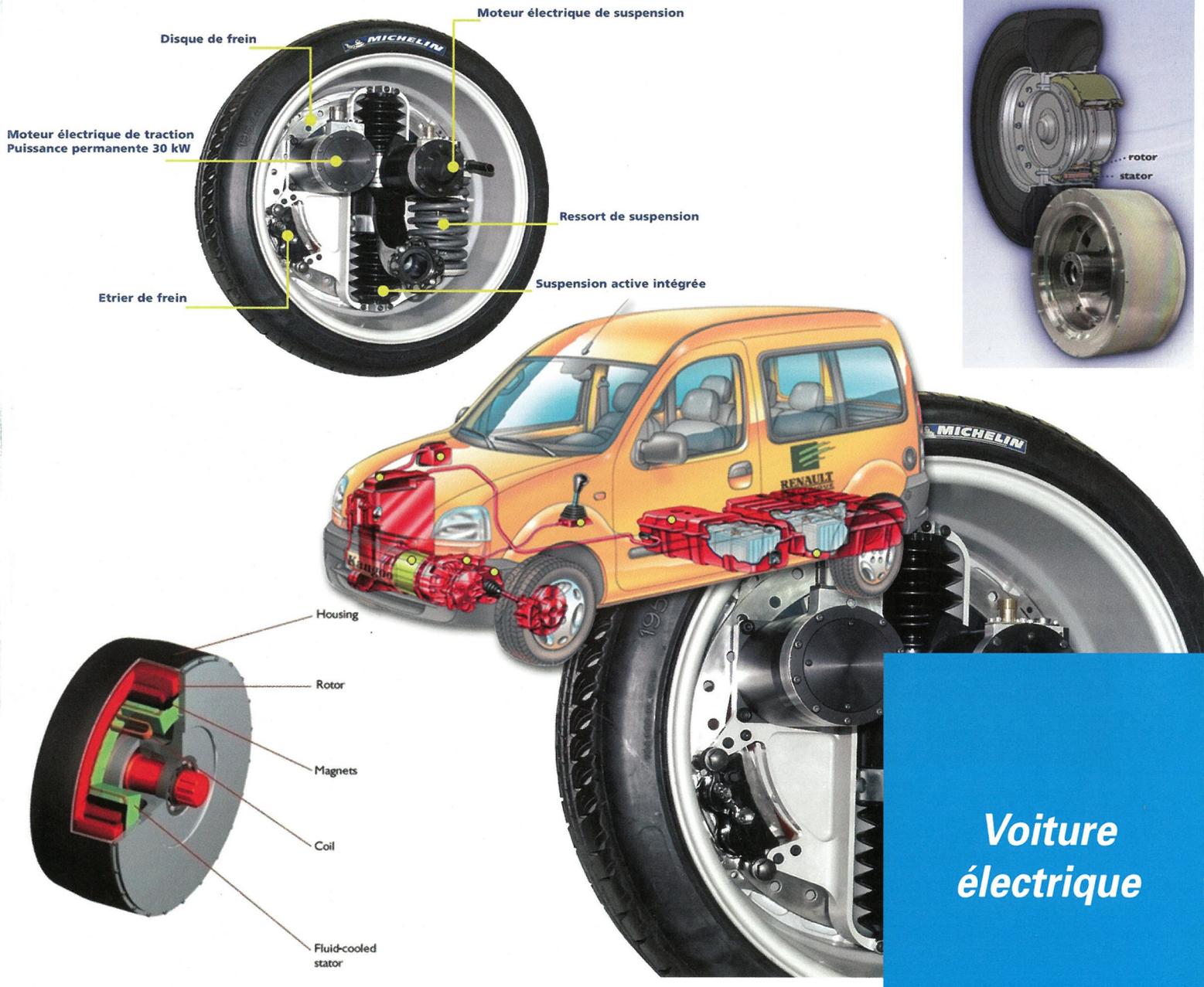


La Revue SEE



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



Voiture électrique

Crédit photos : Michelin, Renault, Magnet Motors

Publication trimestrielle du Cercle Thématique 13.01 de la SEE

ENSEIGNER L'ELECTROTECHNIQUE ET L'ÉLECTRONIQUE INDUSTRIELLE



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

N° 63 - Décembre 2010



moteurs roues et vélo électrique Wavecrest



Citroën C-Métisse équipée de deux moteurs TM4 sur l'essieu arrière



La Revue 3EI

publication trimestrielle
du Cercle Thématique 13-01
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 00 Fax : 01 56 90 37 19
site web : www.see.asso.fr

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

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

La Revue 3EI, Édition SEE,
17 rue de l'Amiral Hamelin
75783 PARIS Cedex 16

Directeur de la publication
Paul FRIEDEL
Président de la SEE

Rédactrice en Chef
Marie Michèle LE BIHAN

Adresser les propositions d'article à :
revue3ei.art@voila.fr

Communication
Micheline BERTAUX
communication@see.asso.fr
01 56 90 37 17

publicité au rapport

Abonnement (4 numéros par an)
déc. 2010, mars, juin, sept. 2011.

tarifs TTC :

Individuel :

France et CEE.....38 €
Pays hors CEE.....48 €

Collectivités

France et CEE.....54 €
Pays hors CEE.....67 €

Gestion abonnement
revue3ei@see.asso.fr

Réalisation et impression
Repro-Systèmes
23, rue de Verdun 77181 Le Pin

Routage et Expédition
Départ Presse
ZI les Richardets
93966 Noisy le Grand

Dépôt Légal : Décembre 2010

Commission Paritaire 1212 G 78028
ISSN 1252-770X

Sommaire du n° 63

Thème : voiture électrique

- p. 2 Éditorial,
- p. 3 Publications, Informations
- p. 8 Mastère Ingénierie des Véhicules Electriques : une réponse aux attentes de l'industrie automobile
E. Semail^{1,2}, A. Bouscayrol^{2,3}, Z. Moumni⁴, P. Rivière⁵, E. Fortin⁶
¹ Arts et Metiers PARISTECH, L2EP, ² Univ Lille Nord de France, L2EP, Lille,
³ MEGEVH, French network on HEVs,
⁴ ENSTA PARISTECH, ⁵ Mines PARISTECH, ⁶ Ponts PARISTECH,
- p. 12 Véhicule électrique : enjeux et opportunités
P. BASTARD Ingénieur Supélec, (Paris XI – Orsay),
Directeur de l'Electronique et des Technologies Avancées Renault, Technocentre,
78288 Guyancourt cedex
- p. 20 Le moteur-roue électrique
C. ESPANET Université de Franche-Comté, Institut FEMTO-ST /
Département ENISYS

Hors Thème

- p. 40 La nouvelle alimentation pulsée de 60MW à 0.5Hz pour le Synchrotron à protons du CERN : un système totalement statique avec stockage d'énergie par condensateurs.
J-P. BURNET CERN, Organisation européenne pour la recherche nucléaire, 1211 Genève, Suisse
- p. 50 Quels logiciels utiliser pour estimer la production d'une installation photovoltaïque?
D. MAZILLE^{1,2}, V. BOITIER^{1,2}
¹ CNRS ; LAAS ; 7 avenue du colonel Roche, F-31077 Toulouse
² Université de Toulouse ; UPS, INSA, INP, ISAE ; LAAS ; F-31077 Toulouse
- p. 60 VHDL pour la modélisation comportementale d'un synthétiseur de fréquence
M. DENOVAL ENSICAEN, 6 Bd Maréchal Juin, 14050 Caen cedex 4,
P ATTIA NXP Semiconductors, 2 Esplanade Anton Philips, 14460 Colombelles

Toute reproduction ou représentation intégrale ou partielle, par quelque procédé que ce soit, des pages publiées dans la présente édition, faite sans l'autorisation de l'éditeur est illicite et constitue une contrefaçon. Seules sont autorisées, d'une part, les reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective et, d'autre part, les analyses et courtes citations justifiées par le caractère scientifique ou d'information de l'oeuvre dans laquelle elles sont incorporées.

Toutefois des copies peuvent être utilisées avec l'autorisation de l'éditeur. Celle-ci pourra être obtenue auprès du Centre Français du Droit de Copie, 20, rue des Grands Augustins, 75006 Paris, auquel la Revue 3EI a donné mandat pour la représenter auprès des utilisateurs. (loi du 11 mars 1957, art.40 et 41 et Code Pénal art. 425).

Pour ce numéro de janvier 2011, nous vous proposons le thème de **la voiture électrique**, sujet au combien présent dans les préoccupations actuelles de nos contemporains.

Tout au long de la lecture des trois articles de ce thème, vous pourrez mesurer l'engagement des enseignants et des industriels français pour relever le défi de la production de masse de véhicules électriques.

Ceux d'entre vous qui seront surpris de ne pas trouver dans ce numéro le thème de l'avion « plus électrique » que nous avions initialement prévu de publier, seront sans doute satisfaits d'apprendre que nous avons décalé ce thème au numéro d'avril prochain afin de laisser aux nombreux auteurs le temps de nous confectionner un numéro qui s'annonce très riche et complet.

Pour l'année à venir, d'avril 2011 à janvier 2012, la prévision des thèmes abordés est la suivante :

- **Vers l'avion « plus électrique »** en Avril 2011
- **CEM** en Juillet 2011
- Le numéro académique d'Octobre 2011 sera assuré par l'académie de Créteil
- **Défaillance et durée de vie du matériel électrique** en Janvier 2012

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

Bonne lecture.

Le Comité de Publication de la Revue3EI

La Revue 3EI

Comité de publication

Hamid BEN AHMED

Jean BONAL

Arnaud BRUGIER

Jean FAUCHER

Gilles FELD

Jean-Philippe ILARY

Chérif LAROUCI

Marie Michèle LE BIHAN

Franck LE GALL

Pascal LOOS

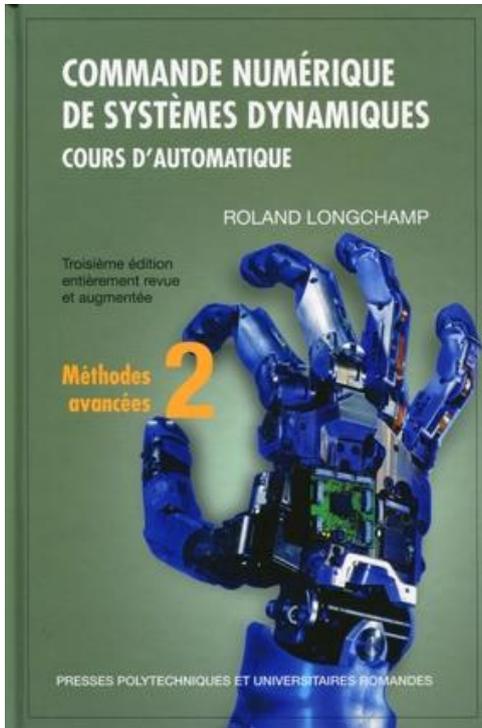
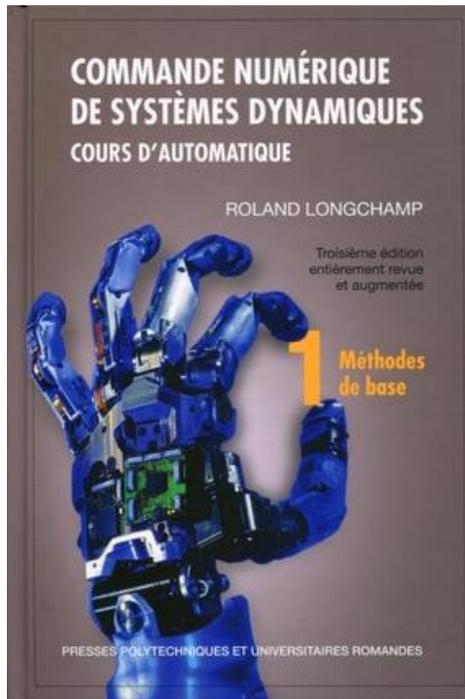
Oviglio SALA

Jean-François SERGENT

Jean-Claude VANNIER

Pierre VIDAL

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



Commande numérique de systèmes dynamiques Cours d'automatique

Roland Longchamp

Presses Polytechniques et Universitaires Romandes (PPUR)

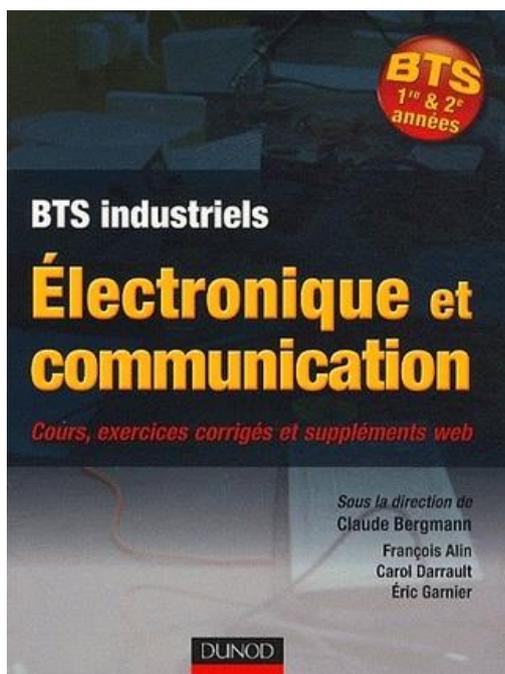
Cet ouvrage en deux volumes constitue une large présentation du domaine de l'automatique. Destiné à être exploité comme support didactique dans le cadre d'un cours d'automatique, les étudiants ingénieurs y découvriront, dans un cadre structuré et formateur, d'efficaces méthodologies d'analyse et de synthèse des lois de commande.

Le livre s'adresse de surcroît aux ingénieurs soucieux de compléter ou de renouveler leurs connaissances en automatique. Fruit d'une solide expérience d'enseignement et de recherche, le texte adopte une vision résolument systémique et interdisciplinaire. Les méthodologies qu'il offre peuvent ainsi être exploitées pour la commande de systèmes les plus variés. Actuellement, tous les projets d'automatisation tirent profit des vastes ressources informatiques disponibles, tant au niveau de la réalisation des algorithmes de commande qu'à ceux de leur analyse et de leur synthèse. Le livre reflète cet état de fait : les aspects numériques sont soigneusement pris en compte et finement explorés.

Le premier volume couvre les méthodes d'analyse et de synthèse des régulateurs standard.

Quant au second volume, il constitue une ouverture vers des techniques plus avancées : régulateur polynomial et synthèse algébrique, identification, commande adaptative, méthodes d'état et commande floue. L'exposé se caractérise par une approche très didactique et une grande rigueur, sans pour autant sacrifier les aspects pratiques. Chaque chapitre est enrichi de nombreux exemples pouvant être reproduits et approfondis à l'aide d'applications interactives contenues dans un CD-ROM intégré à l'ouvrage. Ces exemples, ainsi qu'un ensemble cohérent de problèmes, illustrent les difficultés et la portée des résultats.

L'exposé se caractérise par une approche très didactique et une grande rigueur, sans pour autant sacrifier les aspects pratiques. Chaque chapitre est enrichi de nombreux exemples pouvant être reproduits et approfondis à l'aide d'applications interactives contenues dans un CD-ROM intégré à l'ouvrage. Ces exemples, ainsi qu'un ensemble cohérent de problèmes, illustrent les difficultés et la portée des résultats.



Électronique et communication - BTS industriels
Cours, exercices corrigés et suppléments web
BTS 1re et 2e années

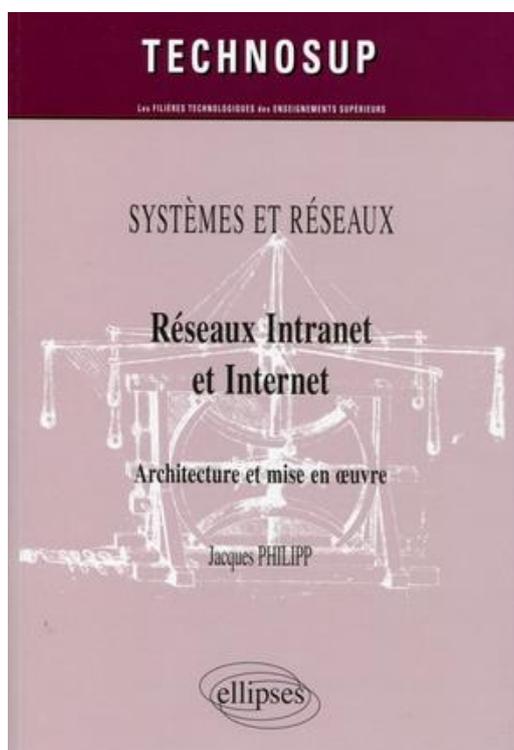
C. Bergmann , F. Alin , C. Darrault , . Garnier

Editions Dunod

L'électronique analogique du composant a disparu pour laisser place aujourd'hui à la microélectronique. Les métiers de l'électronique ont dû évoluer. Ce manuel est complètement dédié aux référentiels des STS CIRA, électrotechnique, MI, MAI, ATI, domotique pour les domaines Informatique et réseaux. Il aborde essentiellement le traitement des signaux et leurs différentes représentations adaptées à la dualité temps / fréquence. Les technologies de la communication comme Bluetooth, WiFi, protocoles internet... servent de fil conducteur à la première partie de ce cours.

Les notions et outils mathématiques du traitement du signal sont abordés dans la seconde partie de l'ouvrage. Elles sont introduites progressivement et illustrées par de nombreux exemples et exercices corrigés.

Des bonus web accompagnent l'ouvrage avec des fiches techniques, des simulations sous Matlab et des exercices supplémentaires



Réseaux Intranet et Internet
Architecture et mise en oeuvre

Jacques Philipp

Editeur : Ellipses

L'ouvrage présente de façon simple et complète les définitions et les mécanismes fondamentaux des réseaux Internet et Intranet : architecture, systèmes clients serveurs, normes et standards.

Un chapitre est consacré à la présentation des divers services (réseaux sociaux, messagerie électronique, téléchargement, téléphonie fixe et mobile, télévisions...) disponibles sur les réseaux Intranet et Internet.

Puis sont présentés les protocoles du monde TCP/IP (couches basses et couches hautes) et les techniques de leur mise en oeuvre sur les systèmes hôtes actuels (monde Unix/Linux et Windows).

L'accent est ensuite particulièrement mis sur les aspects sécurité (techniques d'attaques et de défenses) et administration, à partir des outils standards (interfaces graphiques, commandes de bases...).

Le lecteur est accompagné dans la mise en oeuvre des techniques exposées par de nombreux exemples, illustrations, tableaux et schémas explicatifs. Lui sont également proposés des exercices et manipulations pratiques, qu'il pourra aisément faire sur son poste de travail.



Mesure - Systèmes d'acquisition de données **Échantillonnage, conversion, applications**

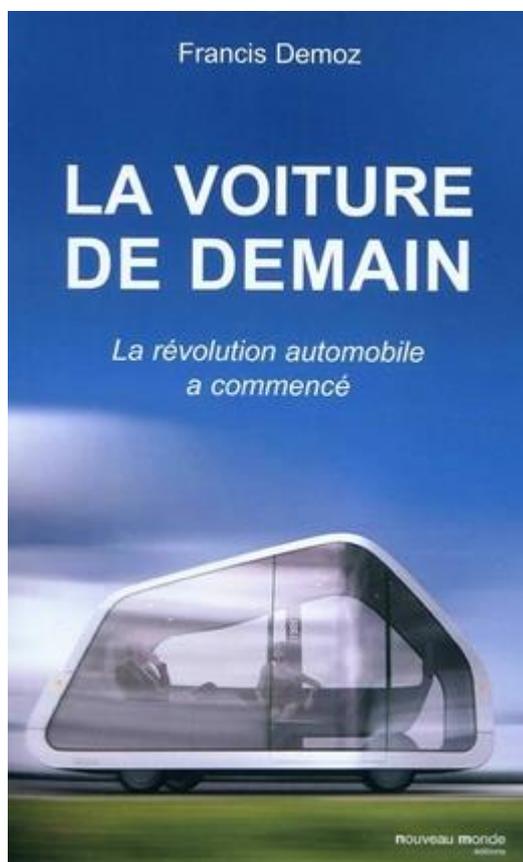
Erik Etien

Editions Ellipses

L'électronique moderne faisant de plus en plus appel au traitement numérique des signaux, l'acquisition des notions fondamentales liées à l'échantillonnage et la conversion des signaux analogiques devient nécessaire de plus en plus tôt.

Cet ouvrage décrit les fondements de l'acquisition de données dans un formalisme particulièrement adapté aux étudiants des filières technologiques. Il développe en détail les différents éléments d'un système d'acquisition et définit des règles permettant de choisir la fréquence d'échantillonnage, la résolution et la cadence d'acquisition des convertisseurs. Plus globalement, il permet au lecteur de comprendre rapidement la constitution d'un système d'acquisition. En termes d'application, une introduction au filtrage numérique est développée de la façon la plus simple possible. Par ailleurs l'accent est mis sur la mise en oeuvre de circuits intégrés actuels.

Pour rendre le contenu du livre aisément accessible, le recours aux modélisations mathématiques est volontairement limité au profit de nombreux exercices d'application et de problèmes corrigés. Enfin, des résultats expérimentaux sont proposés dans le but de valider les notions théoriques développées.



La voiture de demain **La révolution automobile a commencé**

Francis Demoz

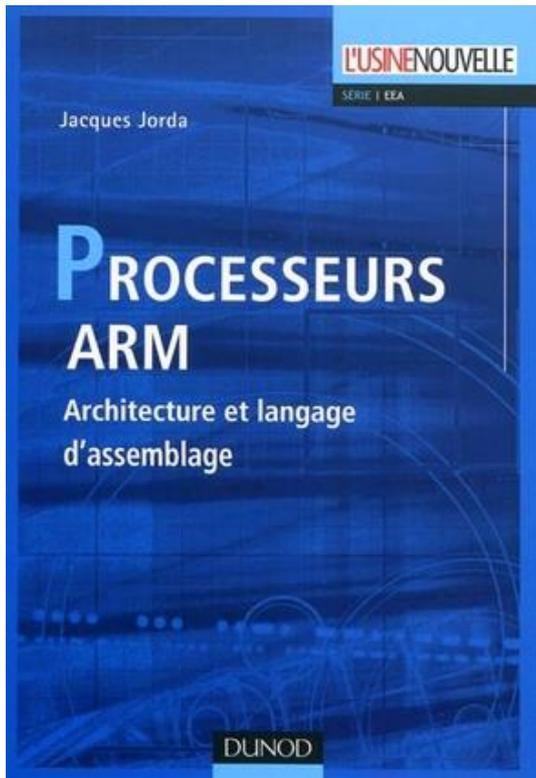
Editeur Nouveau Monde

Tout bascule avec la crise de 2008. Le modèle économique de l'industrie automobile vole en éclats. Épuisement progressif du pétrole, contraintes environnementales, nouveaux marchés dans les pays émergents, nouvelles technologies mais aussi nouvelles attentes des consommateurs : la voiture individuelle va devoir évoluer profondément pour répondre à ces nouveaux défis.

Comment la voiture électrique, entre autres, va-t-elle modifier notre façon de nous déplacer ? Quels acteurs vont émerger ? L'industrie française est-elle correctement préparée pour ces nouveaux marchés ? Plus profondément, quelles sont les mutations en cours ? Et si demain on achetait avant tout de la mobilité, dont la voiture ne serait qu'une simple composante. De la voiture-passion à la voiture-nécessité, c'est la nature même de l'histoire d'amour, entre le conducteur et son automobile, qui semble se réécrire.

Voitures décarbonées, système de réseaux intelligents, voitures connectées et communicantes, et demain "routes intelligentes" vont modifier le rapport de l'automobiliste à son véhicule.

Dans cette enquête passionnante, Francis Demoz lève le voile sur ce qui se trame chez les grands constructeurs mondiaux : les inventions, les alliances et les concurrences mais aussi les changements sociologiques, les nouveaux services en préparation, les technologies et la dynamique des entreprises françaises. Cet ouvrage met pour la première fois en perspective les bouleversements à l'oeuvre et les nouvelles sagas industrielles en préparation dans la mobilité individuelle.



Processeurs ARM Architecture et langage d'assemblage

Jacques Jorda

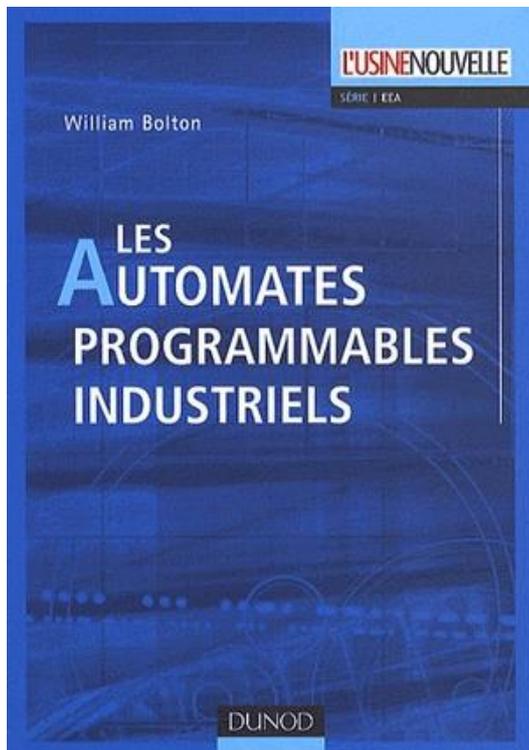
Editeur : Dunod, L'Usine Nouvelle

5 milliards de processeurs ARM vendus par an, 7 à 8 milliards de ventes annuelles prévues d'ici 2014, soit un processeur ARM par habitant de la Terre !

Déjà présents dans les téléphones mobiles, calculatrices, imprimantes... mais aussi dans les GPS, RFID, appareils photo et même certains appareils médicaux, les processeurs ARM n'ont encore jamais fait l'objet d'une étude complète et ce livre se propose d'y remédier.

Il présente la famille de processeurs ARM7, tant au niveau de l'architecture matérielle que du langage d'assemblage. La structure interne d'un coeur de processeur ARM7 y est analysée (rôle de chaque unité fonctionnelle et leurs différents registres, jeu d'instructions...), les techniques classiques de programmation en assembleur y sont expliquées (structures algorithmiques classiques, gestion de la mémoire et de la pile, gestion des exceptions...). Le livre se conclut sur une étude des entrées / sorties (par test d'état et par interruptions) s'appuyant sur la famille de processeurs Atmel AT91SAM7S.

Cet ouvrage s'adresse aux étudiants de licence qui y trouveront de nombreux exemples de mise en oeuvre. Les professionnels utilisant déjà ces processeurs en apprendront plus sur les enjeux et les contraintes matérielles et logicielles lors du développement d'applications spécifiques. Ce livre s'adresse également aux amateurs souhaitant s'initier à l'utilisation de cette famille de processeurs.



Les automates programmables industriels

William Bolton

Editeur : Dunod, L'Usine Nouvelle

Cet ouvrage s'adresse aux professionnels et aux étudiants du domaine de l'informatique industrielle et de l'automatisme qui doivent comprendre et mettre en application des automates programmables industriels (API).

À l'aide d'un jargon minimal, d'explications claires et d'exemples simples, ce livre constitue un guide utile pour :

** Comprendre les principales caractéristiques de la conception et de l'architecture interne des API.*

** Donner les caractéristiques des dispositifs d'entrées et de sorties les plus courants.*

** Décrire les liens de communication mis en oeuvre dans les systèmes de commande.*

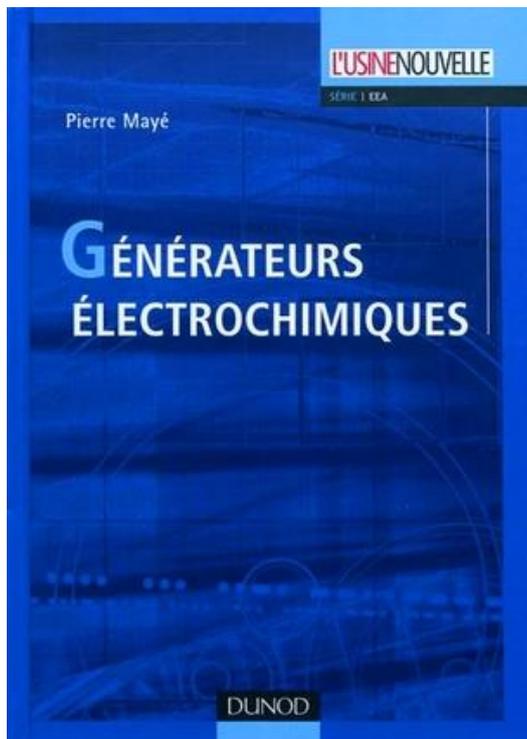
** Concevoir des programmes à contacts pour les fonctions logiques et, ou, non, non-et, non-ou et ou exclusif.*

** Développer des programmes en utilisant les diagrammes de schémas fonctionnels, les listes d'instructions, le texte structuré et les graphes de fonction séquentielle.*

** Ecrire des programmes fondés sur des relais internes, des temporisateurs, des compteurs, des registres à décalage, des séquenceurs ...*

** Maîtriser des méthodes employées pour le diagnostic des défauts, les tests et le débogage.*

De nombreux exemples et exercices fondés sur différents automates répandus facilitent la lecture et la compréhension.



Générateurs électrochimiques **Piles, accumulateurs et piles à combustibles**

Pierre Mayé

Editeur : Dunod, L'Usine Nouvelle

Cet ouvrage s'adresse aux ingénieurs et aux techniciens ayant à utiliser des générateurs électrochimiques, qu'ils soient électrotechniciens ou électroniciens, ainsi qu'aux élèves ingénieurs et étudiants se préparant à ces métiers. Il peut également intéresser les étudiants en chimie et en physique amenés à étudier les applications de l'électrochimie.

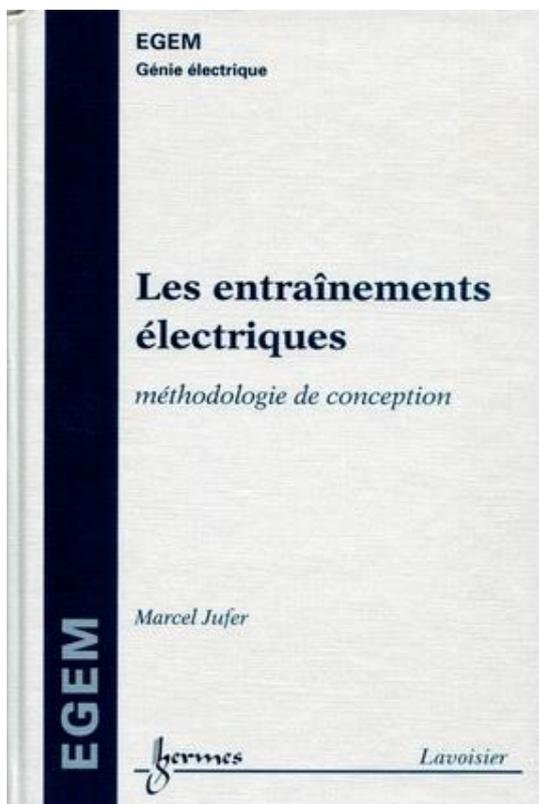
Les générateurs électrochimiques sont utilisés dans des domaines très variés, de la pile miniature d'un stimulateur cardiaque au parc de batteries d'une installation de stockage d'énergie. Face à une demande croissante et à des exigences de plus en plus grandes, ils ont fait des progrès notables ces dernières années.

L'ouvrage propose une synthèse des connaissances actuelles sur les générateurs électrochimiques. Après une présentation des principes de base communs, il décrit successivement :

** les piles, présentes dans de nombreux appareils électroniques autonomes*

** les accumulateurs, qui se rencontrent aussi bien dans les appareils électroniques que dans les installations de stockage d'énergie ou dans les véhicules*

** les piles à combustibles, domaine prometteur qui fait l'objet de nombreuses recherches et dont les applications commencent à se développer.*



Les entraînements électriques **Méthodologie de conception**

Marcel Jufer

Editeur : Hermès - Lavoisier

Un entraînement électrique adapté à une application doit prendre en compte tous les éléments de la chaîne constitutive. En premier lieu, l'organe entraîné doit être caractérisé de façon à pouvoir définir un cahier des charges adapté. Outre le moteur, les éléments constitutifs comprennent la transmission (entraînement direct, réducteur, transformation tournante-linéaire, cames, etc.), l'alimentation, la commande, les capteurs et les éléments de protection. Une fois les composants essentiels définis, le moteur et la transmission peuvent être optimisés et dimensionnés de façon à obtenir le meilleur bilan énergétique, en particulier pour des régimes dynamiques. Pour le meilleur choix du moteur, outre le type le mieux adapté - synchrone auto-commuté, asynchrone, à courant continu, pas à pas - une approche corrélant dimensions du rotor et performances est proposée.

L'ensemble des chapitres propose un inventaire et une caractérisation des composants, ainsi qu'une modélisation de l'ensemble, le tout constituant une méthodologie de conception d'un entraînement électrique.

Mastère Ingénierie des Véhicules Electriques : une réponse aux attentes de l'industrie automobile*

E. Semail^{1,2}, A. Bouscayrol^{2,3}, Z. Moumni⁴, P. Rivière⁵, E. Fortin⁶

¹ Arts et Metiers PARISTECH, L2EP, Lille, France

² Univ Lille Nord de France, L2EP, Lille, France

³ MEGEVH, French network on HEVs, France

⁴ ENSTA PARISTECH, France

⁵ Mines PARISTECH, France

⁶ Ponts PARISTECH, France

eric.semail@ensam.eu

* Cet article a été publié initialement en anglais lors de la conférence IEEE VPPC 2010 (Vehicle Power and Propulsion Conference) September 1-3, 2010 –Lille, France.

Résumé : *Quatre Grandes Écoles Françaises de PARISTECH ouvrent en octobre 2010 un programme de formation dont le principal objectif est l'étude d'impact sur l'arrivée massive de l'énergie électrique dans les véhicules automobiles. Ce programme organisé en un tronc commun et deux options différentes est décrit dans cet article.*

1. Introduction

Le développement des véhicules « décarbonés » doit être une solution pour faire face aux challenges du secteur automobile [1][2]. Les industriels de l'industrie automobile sont ainsi en train de développer de nouveaux véhicules pour répondre aux attentes de réduction des émissions polluantes d'une part, et de réduction de la consommation de ressources fossiles d'autre part. Par exemple, Renault a planifié de lancer en 2011 des véhicules électriques en Israël et au Danemark, avant un développement plus important en Europe [3]. Mais le déploiement sur une grande échelle de ce type de véhicule demande de nouvelles formations plus adaptées, en particulier sur le domaine électrique. Après une étape importante de réflexion et de concertation avec les industriels du secteur, PARISTECH a développé le Mastère « Ingénierie des Véhicules Electriques » (IVE) supporté par 4 de ses écoles (Arts et Métiers Paristech, ENSTA Paristech, Mines Paristech et Ponts Paristech).

Ce Master n'est pas seulement axé sur l'aspect technologique des véhicules électriques mais présente différents aspects de l'insertion de ces véhicules sur le marché actuel. Comme la densité énergétique des batteries est beaucoup plus faible que celle d'un carburant fossile, l'utilisation de l'énergie électrique pour des véhicules autonomes va avoir un impact sur le réseau de distribution électrique, de par l'importance de la demande associée tant en quantité, qu'en pic de puissance. De la même manière, l'architecture d'un véhicule électrique impose de nouvelles contraintes que l'on doit prendre en compte : dissipation thermique, mécanique, sécurité. Les impacts techniques et sociétaux de cette mutation doivent ainsi être étudiés.

Dans le domaine de la formation en Génie Electrique, une importante collaboration existe entre établissement d'enseignement supérieur et industriels depuis de nombreuses années, en particulier pour les entraînements électriques [4][7]. Des expériences plus récentes ont été développées autour de véhicules électriques ou hybrides, mais des approches plus transversales et pluridisciplinaires sont nécessaires [8][9]. Le Mastère IVE a été développé dans ce cadre. On peut souligner que cette formation est aussi supportée par le réseau scientifique national MEGEVH, qui développe des recherches sur la gestion d'énergie de véhicules hybrides et électriques [10]. Ce support scientifique doit permettre à ce Mastère de bénéficier des développements technologiques et scientifiques les plus récents.

Le programme du Mastère se compose d'un tronc commun et de deux options qui sont détaillées ci-après.

2. Tronc Commun

Le tronc commun doit être suivi par l'ensemble des étudiants inscrits dans ce Mastère Une large part est consacrée à l'impact sur l'organisation et les habitudes des usagers pour intégrer ces nouveaux véhicules sur le marché automobile, notamment dans le cadre de véhicules plus respectueux de l'environnement. On peut en particulier noter que les NTIC (Nouvelles Technologies de l'Information et de la Communication) doivent contribuer à une meilleure insertion de ces véhicules par différents aspects (sécurité, gestion de l'autonomie, information de trafic...). D'autre part, les méthodes de conception dans le cadre de développement durable sont présentées, en

particulier pour l'optimisation de la consommation énergétique.

Les objectifs du tronc commun sont les suivants :

- Présentation des nouvelles technologies et des impacts sociétaux induits par l'utilisation de l'énergie électrique dans des véhicules autonomes
- Présentation de méthodologies et outils génériques pour l'analyse et le développement des structures de ces véhicules.

Les différentes unités sont présentées dans la Table I avec un ordre de grandeur des volumes horaires.

Table I

Titre de l'unité	heures
Enjeux de la mobilité durable	30
Electricité dans un véhicule conventionnel	30
Interaction véhicule et réseau électrique	20
Conception durable	30
Cycle de vie et matériaux	20
Apport des NTIC	30
Composants pour la traction électrique	30
Analyse des flux énergétiques de VEs et VHs	30
Conception et optimisation assistées par ordinateur	30

3. Option MEVE-2R

Une option est consacrée à la « Maitrise de l'Energie des Véhicules Electriques du Réseau de distribution à la Roue » (MEVE-2R). Cette option sera réalisée au centre de Lille d'Arts&Métiers PARISTECH. L'objectif principal de cette option est de donner la connaissance en Génie Electrique pour travailler sur les véhicules déjà en production ou en développement. La gestion et le stockage de l'énergie sont ainsi abordés, de la charge à partir du réseau électrique de distribution, à la conversion mécanique pour entraîner les roues.

Les 4 unités de cette option sont présentées en Table II avec un ordre de grandeur des volumes horaires.

Table II

Titres de l'unité	Acronyme	heures
Conversion électromécanique	L1	70
Modulation électrique par électronique de puissance	L2	60
Stockage d'énergie	L3	50
Gestion d'énergie	L4	90

3.1. Unité Conversion électromécanique

L'objectif de cette unité est de donner la connaissance sur la compréhension physique et les contraintes technologiques des machines électriques utilisées dans les VEs. Les étudiants devront être capables de choisir les machines électriques sur des considérations tant énergétiques (rendement instantané ou moyen) qu'environnementales (dimension, durabilité) et que sur le fonctionnement en mode dégradé. De plus, les processus de production des machines électriques à grande échelle seront abordés.

Parmi les éléments étudiés on peut noter : les matériaux magnétiques, les matériaux isolants, les structures de machines électriques, les machines synchrones à aimants permanents, les outils et méthodes de conception, les méthodes et les contraintes de production.

3.2. Unité Modulation d'énergie par électronique de puissance

L'objectif de cette unité est de présenter les adaptations et mises en forme de l'énergie électrique entre diverses sources et charges, dans le cadre des systèmes embarqués. Les fonctionnalités, les rendements mais aussi la compatibilité électromagnétique des convertisseurs d'électronique de puissance sont étudiés dans cet environnement contraint. Les étudiants devront être capables de savoir choisir les convertisseurs de puissance selon les diverses fonctions et contraintes.

Parmi les éléments étudiés on peut noter : les composants de puissance actifs et passifs, les adaptations de puissance DC/DC, les systèmes de charge, la compatibilité électromagnétique, les onduleurs de tension et leurs commandes.

3.3. Unité Stockage d'énergie

L'objectif de cette unité est de présenter leurs diverses technologies de stockage de l'énergie électrique ainsi que leurs contraintes. Si une grande partie sera consacrée aux batteries, d'autres technologies émergentes seront aussi présentées. Les étudiants devront savoir dimensionner, en puissance et en énergie, les systèmes de stockage en fonction du cahier des charges et du retour sur investissement.

Parmi les éléments étudiés on peut noter : les divers types de batteries, les supercondensateurs, les volants d'inertie, les systèmes de piles à combustible, la caractérisation et la modélisation des batteries, la gestion des batteries (BMS), le dimensionnement en énergie d'un véhicule.

Cette unité est pilotée par le réseau scientifique national MEGEVH.

3.4. Unité Gestion d'énergie

L'objectif de cette unité est de donner des méthodologies pour la commande et la gestion d'énergie des véhicules électriques et hybrides. Une partie de l'unité sera réalisée sous forme de projet visant à simuler différents véhicules avec leur gestion d'énergie. Les étudiants devront être capables de définir les lois de commande appropriées pour améliorer l'efficacité énergétique des chaînes de traction. Parmi les éléments étudiés on peut noter : les contrôles vectoriels de machines électriques, la Représentation Energétique Macroscopique, les commandes par inversion, les stratégies de gestion d'énergie.

4. Option ACVE

Une option est consacrée aux « Architecture et Conception des Véhicules Electriques » (ACVE). Cette option sera réalisée à l'ENSTA. L'objectif principal de cette option est d'examiner l'impact de l'insertion de l'énergie électrique dans les métiers de l'automobile. Les méthodes de conception sont ainsi redéfinies dans les domaines de la mécanique, de la mécatronique, de l'acoustique et des matériaux. Suite à l'accroissement important de la masse du dispositif de stockage, une réduction des masses inactives est à réaliser tout en conservant un haut niveau de sécurité. Les analyses de « crash-test » seront aussi redéfinir.

Table III

Titre de l'Unité	Acronyme	heures
Ingénierie des systèmes mécaniques pour VEs	P1	100
Ingénierie des systèmes électriques pour VEs	P2	90
Interfaces Homme Machine et couplages	P3	80

4.1. Ingénierie des systèmes mécaniques pour VEs

Cette unité est composée de 3 sous-unités.

1. Conception et simulation avec logiciels de CAO

L'objectif de ce module est de former les étudiants à la simulation des systèmes discrets ou continus, en régime permanent ou transitoire. Différents logiciels seront utilisés comme CATIA, ADAMS, MATALB... Après l'étude de systèmes classiques, une approche inductive permettra aux étudiants d'aborder un projet personnel en utilisant plusieurs logiciels.

2. Méthodes numériques avec Eléments Finis

L'objectif de ce module est de former les étudiants à la simulation avec des logiciels utilisant la Méthode des Eléments Finis pour prendre en compte les nouvelles contraintes mécaniques. Les batteries, machines électriques et convertisseurs seront en particulier abordés dans ce cadre.

3. Acoustique

L'objectif de ce module est de reconsidérer la problématique acoustique du véhicule avec la disparition du moteur thermique. De nouvelles sources de bruits deviennent ainsi prépondérantes. Une approche globale mêlant mesures, modélisation analytique et simulation sera utilisée pour définir la structure du véhicule.

4.2. Ingénierie des systèmes électriques pour VEs

Cette unité est composée de 4 sous-unités.

1. Automatique et contrôle des systèmes

L'objectif de ce module est de donner une vision large des techniques modernes de l'automatique. Les méthodes les plus utilisées dans l'industrie seront abordées, en particulier dans le cadre des véhicules hybrides pour l'optimisation de la consommation.

2. Systèmes embarqués de contrôle/commande

L'objectif de ce module est de donner une approche compréhensive de l'électronique embarquée dans le cadre de la complexification des systèmes de contrôle/commande. Ceux-ci doivent contribuer à l'optimisation énergétique.

3. Sécurité et fiabilité

L'objectif de ce module est d'expliquer comment doivent être appréhendés les aspects sécurité et fiabilité. Ces aspects doivent être abordés dès la phase de conception.

4. Stockage avec batterie

L'objectif de ce module est d'acquérir les notions essentielles sur les techniques associées au stockage par batteries et aux nouvelles technologies émergentes.

4.3. Interface Homme/Machine et couplages

Cette unité est composée de 4 sous-unités.

1. Modélisation multi-physique

L'objectif de ce module est d'utiliser la méthode des éléments finis pour simuler les systèmes électromécaniques afin de prendre en compte les couplages électriques-magnétiques-mécaniques-thermiques.

2. Mécatronique

L'objectif de ce module est de présenter un panorama de systèmes mécaniques et électroniques et leurs couplages dans le cadre des véhicules électriques.

3. Facteurs humains

L'objectif de ce module est de donner une approche compréhensible de la modélisation des interactions entre les véhicules et les utilisateurs.

4. Matériaux « smart »

L'objectif de ce module est de présenter les performances statiques et dynamiques de nouveaux matériaux (piézoélectriques, polymères actifs, magnétiques, à mémoire de forme), et de leur potentialités dans le cadre des VEs.

REMERCIEMENT

Les responsables du Mastère IVE tiennent à remercier Renault pour sa contribution active dans le montage de cette formation, mais aussi son implication dans les unités de formation.

REFERENCES

- [1] C.C. Chan, Y. S. Wong, A. Bouscayrol, K. Chen, "Powering Sustainable Mobility: Roadmaps of Electric, Hybrid and Fuel Cell Vehicles", Proceedings of the IEEE, vol. 97, no. 4, April 2009, pp. 603-607.
- [2] P. Fairley, "Speed bumps ahead for electric-vehicle charging", IEEE spectrum, Vol. 47, no. 1, pp. 13 – 14, January 2010.
- [3] J. Perrin, "Zeo-Emission Vehicles and Renault policy", CPA Expo Conf, Toulouse, October 2009.
- [4] F. Blaabjerg, M. Kazmierkowski, J. Pedersen, P. Thorgersen, M. Tonnes, "An industry/university collaboration in power electronics and drives", *IEEE ton Education*, vol. 43, no. 1, February 2000, pp. 52-57.
- [5] P. Buechner, "New facilities for teaching and research with decentralised electric drive systems", *EPE'05*, Dresden (Germany), September 2005.
- [6] A. Bouscayrol, A. Bruyère, P. Delarue, F. Giraud, B. Lemaire-Semail, Y. Le Menach, W. Lhomme, F. Locment, "Teaching drive control using Energetic Macroscopic Representation - initiation level", *EPE'07*, Aalborg (Denmark), September 2007
- [7] P. Gambôa & all, "Modern Technologies for Experimental Education in Industrial Electronics and Electric Drives", *EPE'05*, Dresden, (Germany), September 2005.
- [8] A. Emadi, T. M. Jacobinus, "Interprofessional projects in advanced automotive power systems: an integrated education and research multidisciplinary approach", *IEEE Transactions on Education*, Vol.: 47, no: 3, pp. 356 – 360;
- [9] J. Beretta, *Le génie électrique automobile, la traction électrique*, traité EGEM, Editions Hermès, Paris, 2005.
- [10] MEGEVH, French scientific network on HEVs (<http://l2ep.univ-lille1.fr/megevh/>)

Véhicule électrique : enjeux et opportunités

Patrick BASTARD

Ingénieur Supélec, Docteur en Sciences (Paris XI – Orsay), HDR

Directeur de l'Electronique et des Technologies Avancées

Renault, Technocentre, 78288 Guyancourt cedex

patrick.bastard@renault.com

Résumé : *Le véhicule électrique est né avec l'automobile, mais c'est maintenant que se construit son véritable essor industriel. Plus qu'une nouvelle technologie de véhicule, c'est tout un éco-système qu'il faut inventer. C'est aujourd'hui possible car pour la première fois de son histoire, le véhicule électrique est au croisement de tout un faisceau d'opportunités technologiques, environnementales, économiques et sociétales.*

1. Contexte

La voiture électrique est née avec l'automobile. En 1899, un prototype électrique baptisé « La Jamais Contente » se payait le luxe de battre ses cousines à moteur thermique en inscrivant le premier record de vitesse au-dessus des 100 km/h. Cet exploit traduisait déjà le potentiel technique que portait la technologie électrique.

Ensuite, au fil des années, et même si le moteur à combustion interne s'est finalement imposé, la voiture électrique n'a jamais complètement disparu du panorama automobile. Tous les constructeurs ont mené leurs projets de véhicules électriques, allant du prototype à la petite série.

L'histoire du véhicule électrique est ainsi ponctuée de véhicules expérimentaux dédiés au test de concepts nouveaux et de petites séries, rarement plus de 1000 véhicules à la fois, permettant d'expérimenter en grandeur réelle l'usage de flottes électriques, souvent destinées à des utilisateurs institutionnels (EDF, municipalités, etc.).



Figure 1 : *prototype de camionnette électrique Renault datant de 1924*

Ces nombreuses expérimentations prouvent que le véhicule électrique a toujours représenté une alternative potentielle aux véhicules à moteur thermique. Ces travaux ont permis d'accumuler un savoir-faire important. C'est particulièrement vrai pour Renault qui a multiplié pendant près de 100 ans les expériences, souvent basées sur l'électrification de véhicules de série.

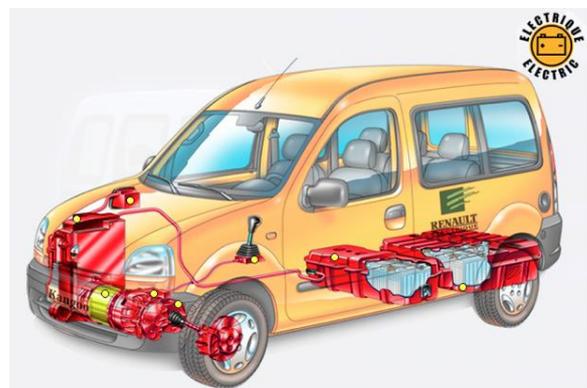


Figure 2 : *Kangoo électrique commercialisée à quelques centaines d'exemplaires au début des années 2000*

La vraie révolution que s'apprête à vivre le monde de l'automobile dans les années à venir ne réside donc pas dans le fait de concevoir des voitures électriques, mais bien dans la capacité de l'industrie à aller vers la production de masse de véhicules électriques.

Et si Renault s'engage aujourd'hui sur cette voie de la production de masse de véhicules électriques, c'est parce que les conditions de succès sont en passe d'être réunies pour la première fois.

2. Enjeux environnementaux

Limiter la consommation de pétrole liée aux transports répond à une double nécessité : anticiper l'épuisement progressif des ressources (et les tensions économiques associées), et réduire les émissions de CO₂.

Globalement, les transports sont à l'origine d'environ 15% des rejets de CO₂ à l'échelle mondiale. Si l'automobile ne doit donc pas cristalliser tous les efforts en matière de réduction d'émissions de CO₂, il n'en est pas moins vrai qu'elle a sa part de responsabilité dans l'accroissement de ces émissions. L'industrie automobile doit donc aussi apporter des solutions pour contribuer à la réduction globale des émissions de CO₂.

C'est précisément ce que visent tous les constructeurs automobiles en faisant progresser leurs moteurs thermiques (Diesel et Essence) et en travaillant l'architecture de leurs véhicules afin de réduire la consommation de carburant, tout en réduisant aussi de façon drastique les rejets de particules polluantes.

Tous ces efforts sur les véhicules à motorisation Diesel ou Essence sont indispensables, et aucun constructeur ne saurait aujourd'hui baisser la garde sur ce qui continuera à représenter dans les 20 ans à venir une part encore très importante du marché automobile. Mais en parallèle, le véhicule électrique représente la seule véritable rupture qui permet d'annuler les rejets de CO₂ lors du roulage. Cependant, pour que cette rupture soit réelle pour l'environnement, encore faut-il que le véhicule électrique ne reste pas marginal, mais puisse rapidement représenter une part non négligeable du marché mondial. C'est pour cela que Renault est le premier constructeur à déployer une stratégie volontariste de production de masse de véhicules électriques dès 2011, anticipant une part de marché mondial pour le véhicule électrique pouvant aller jusqu'à 10% en 2020.

Bien sûr, en matière de rejets de CO₂, il est important pour un véhicule électrique de considérer le cycle complet dit « du puits à la roue », décomposant les émissions en deux parties : du puits au réservoir (production d'électricité) et du réservoir à la roue (zéro pour un véhicule électrique). Dès lors, le bilan en émission de CO₂ pour 100 km parcourus dépend aussi en grande partie du parc de centrales électriques. La figure 3 montre quelques comparaisons pour une Mégane Diesel, une Mégane Essence et une Fluence électrique (véhicules de gabarit comparable), et cela pour différents parcs de production d'électricité.

Certes, la méthode de calcul et les hypothèses retenues (par exemple : rejets moyennés sur tout le parc de production ou prise en compte de la monotone de charge) peuvent modifier à la marge les estimations de CO₂. C'est un sujet complexe qui sans nul doute fera encore l'objet de nombreuses études. Mais quoi qu'il en soit, la comparaison résumée figure 3, basée sur une méthodologie et des hypothèses rigoureuses, montre que le gain environnemental du véhicule électrique serait déjà très important avec le parc européen de production d'électricité actuel (62 g CO₂/km). L'hypothèse d'école la plus défavorable, qui consisterait à considérer un hypothétique parc de centrales au charbon exclusivement (technologie de type Europe) conduirait à des rejets de CO₂ légèrement plus faibles que ceux des meilleurs véhicules à combustion thermique d'aujourd'hui.

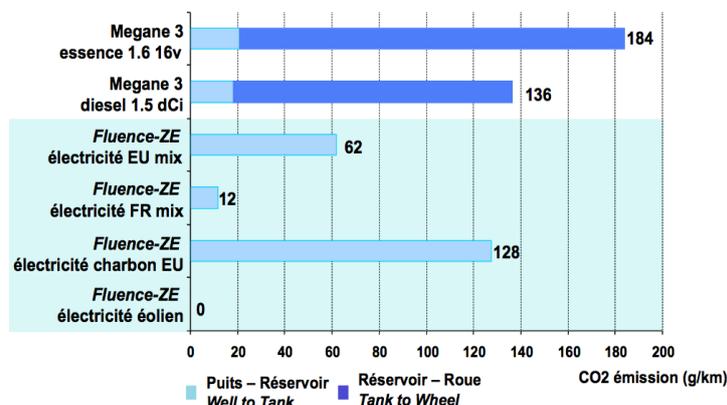


Figure 3 : Estimation des émissions de CO₂ du puits à la roue sur véhicules Renault de taille comparable, calculées sur cycle standard européen de type NEDC

(résultats obtenus en s'appuyant sur la méthode décrite dans l'étude JRC-EUCAR-CONCAWE « Well-to-Wheels Analysis of Future Automotive Fuels and Powertrains In the European Context », v3 Nov. 2008)

Bien sûr, toutes les initiatives pour développer les énergies renouvelables seront un bras de levier efficace pour aller vers une mobilité à zéro CO₂, ce qui est déjà presque le cas en France compte tenu de la nature du parc de production (nucléaire et hydraulique représentant plus de 80% de la production nationale d'électricité).

3. Maturité technologique

L'autonomie constitue un des verrous à faire sauter pour garantir le développement à grande échelle du véhicule électrique. Les progrès technologiques réalisés au cours de ces dix dernières années permettent aujourd'hui d'offrir une autonomie tout à fait compatible avec la plupart des usages automobiles réels,

en particulier en milieu urbain et suburbain. Ces progrès portent sur 3 axes : les batteries, les systèmes de navigation, la gestion de l'énergie embarquée.

Pour ce qui concerne les batteries, la technologie Lithium-Ion représente une réelle percée et permet aujourd'hui d'offrir une autonomie d'au moins 150 km sur des voitures ayant un gabarit semblable à leurs cousines à moteur thermique.

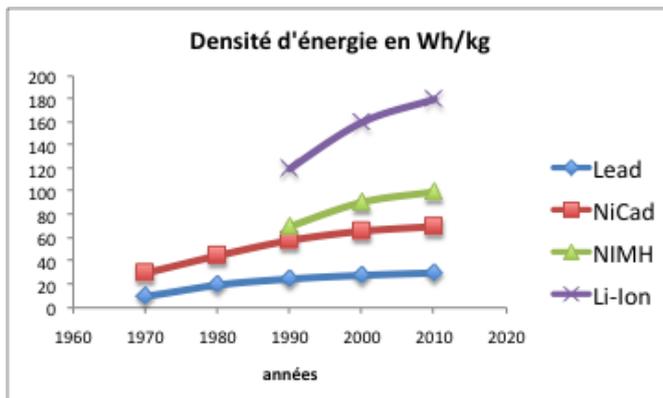


Figure 4 : la technologie Li-Ion permet une vraie rupture dans l'autonomie disponible

Dans le détail, cette technologie générique Li-Ion débouche sur des concepts de batterie et des procédés de fabrication diversifiés selon les fabricants. De la cellule à la batterie complète en passant par le pack, les progrès réalisés dans la technologie de batteries sont aujourd'hui une des clés rendant possible le déploiement des véhicules électriques. Ces progrès ne portent d'ailleurs pas seulement sur l'électrochimie, mais aussi sur l'électronique permettant la surveillance et l'équilibrage des cellules, le contrôle de la charge et l'estimation des états de charge et de santé de la batterie (BMS : Battery Management System).

Si les batteries ont progressé, il ne faut pas oublier que la gestion de l'énergie embarquée est aussi un axe de progrès important pour augmenter l'autonomie des véhicules électriques. Dans la conception et l'optimisation globale du véhicule, tout Wh supplémentaire dans la batterie doit être mis en balance, d'un point de vue technique et économique, avec un Wh économisé. Il s'agit là d'une optimisation globale du système « véhicule » complet, sur des cycles de roulage représentant la diversité des usages. Les outils de modélisation et simulation associés à des retours de terrain et à la conception de lois de contrôle tirant le meilleur parti des puissances de calcul embarquées sont les clés de progrès qui participent de façon significative à l'augmentation de l'autonomie.

Enfin, dans la liste des ruptures technologiques qui ouvrent aujourd'hui la voie vers la diffusion de masse des véhicules électriques, il est absolument nécessaire de considérer l'avènement des systèmes de navigation. En effet, si l'autonomie intrinsèque d'un véhicule électrique est évidemment importante, il est aussi fondamental de pouvoir informer le conducteur en temps réel sur l'état de charge de sa batterie (c'est le rôle du BMS) mais plus utilement encore sur sa capacité à atteindre sa destination et éventuellement sur la façon optimale d'utiliser les points de recharge disponibles : c'est bien là le rôle des systèmes de navigation et d'information qui changent complètement la façon d'appréhender la notion d'autonomie, et qui sans nul doute participeront au développement des véhicules électriques.

4. L'urbanisation crée les conditions d'usage du véhicule électrique

L'urbanisation et la migration des populations vers les villes est un phénomène qui touche tous les pays, et qui s'accroît généralement avec le développement économique.

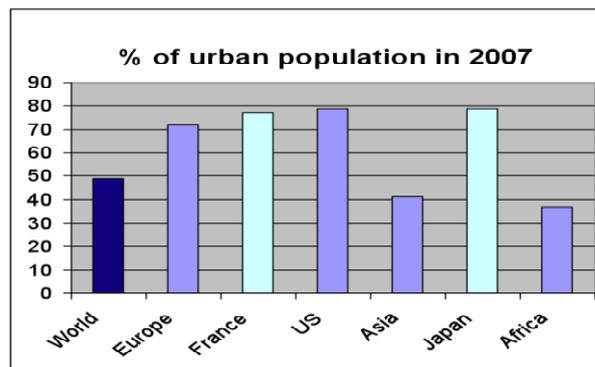


Figure 5 : la population mondiale vivant en milieu urbain est en constante augmentation (source des données : INSEE)

Cette urbanisation n'est pas sans effet sur les besoins de mobilité. Elle réduit les distances moyennes parcourues chaque jour, même si les temps de transport peuvent eux augmenter selon le niveau de fluidité du trafic. Ainsi, en Europe, environ 80% des conducteurs parcourent en général moins de 60 km par jour. Le véhicule électrique est bien sûr tout à fait adapté à ce type d'usage.

L'urbanisation croissante ne rend pas seulement possible le développement des véhicules électriques : elle appelle d'autres solutions de mobilité mieux adaptées aux conditions urbaines et suburbaines, permettant de réduire voire de supprimer les rejets de

CO₂, les rejets de particules polluantes, les nuisances sonores, ...

5. Une équation économique acceptable pour le client

La diffusion en masse du véhicule électrique repose aussi sur la capacité à mettre sur le marché une offre acceptable économiquement par les clients potentiels. Compte tenu du fait que le référentiel en matière automobile est aujourd'hui imposé par les véhicules à moteur thermique, qui s'appuient sur un siècle d'optimisation industrielle, de production de masse et de progrès continu, l'équation économique ne peut être spontanément favorable au véhicule électrique, à l'aube de son véritable essor industriel.

C'est pour cela que les aides publiques, qui peuvent prendre différentes formes selon les pays, se multiplient pour aider ce nouveau marché à décoller. Il est alors possible de proposer une formule originale, avec location de batterie, qui conduit à un prix d'achat comparable à celui d'un véhicule à moteur diesel équivalent. La location de la batterie présente plusieurs avantages. Non seulement elle limite le coût d'achat du véhicule, mais encore elle permet de « tranquilliser » le client. Elle offre en outre la possibilité de procéder à des échanges de batterie en toute sérénité, afin de réinitialiser très rapidement l'autonomie du véhicule (solution de « quick drop » décrite un peu plus loin).

Selon le nombre de kilomètres parcourus chaque année, le coût d'usage d'un véhicule électrique peut alors s'avérer comparable à celui d'un véhicule à moteur thermique, voire meilleur marché.

Pour ce qui concerne le coût de fabrication, sans nul doute les progrès technologiques et l'émergence du marché permettront à l'avenir d'aller chercher des optimisations technico-économiques pour peu à peu réduire les mesures de soutien à l'achat.

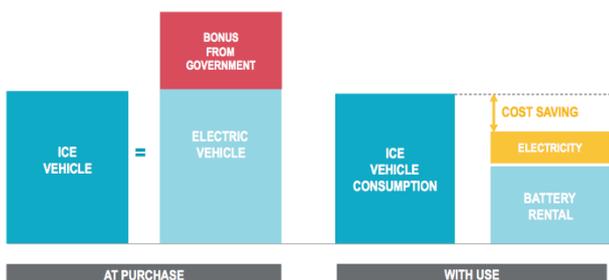


Figure 6 : l'équation économique du véhicule électrique pour le client est aujourd'hui comparable, voire plus avantageuse, que celle d'un véhicule à moteur thermique (ICE : Internal Combustion Engine)

6. Quelles ruptures technologiques pour l'avenir ?

Pour concevoir un véhicule électrique, il est toujours possible de s'appuyer sur un véhicule conventionnel en substituant un moteur électrique au moteur thermique. Finalement, pour un constructeur automobile ayant derrière lui un siècle d'expérience industrielle, et tant qu'on ne vise que de toutes petites séries, c'est probablement la voie la plus pertinente. C'est ce qu'ont fait bien des constructeurs au cours des cent dernières années.

En s'attaquant au marché de masse, il est naturel que Renault reparte de cette approche. C'est ainsi que naîtront les modèles électriques de FLUENCE et de KANGOO EXPRESS. Même si les plateformes initiales (pour moteurs thermiques) ont été repensées et adaptées pour aller vers les versions électriques, même si, au-delà de la motorisation, certaines fonctions telles que le chauffage, la climatisation ou le freinage ont été entièrement repensées, il n'en reste pas moins que ces véhicules auront aussi dans la rue leurs cousines à moteurs thermiques. On peut considérer qu'il s'agit là de la première voie pour concevoir des véhicules électriques.

La deuxième voie consiste à concevoir un véhicule électrique sans repartir d'un modèle existant à moteur thermique. C'est ce que fait Renault en développant TWIZY, disponible dès 2011, et ZOE, disponible dès 2012. L'exercice consiste là vraiment à partir, dès les premières hypothèses, sur la conception d'un véhicule électrique, relâchant ainsi dès le début certaines contraintes liées à la motorisation thermique. Ce n'est possible, d'un point de vue économique, que si le marché visé est suffisamment important.



Figure 7 : les 4 véhicules électriques Renault commercialisés en 2011 et 2012 - de gauche à droite : TWIZY, ZOE (PREVIEW), FLUENCE ZE et KANGOO EXPRESS ZE

Enfin, la troisième voie consiste non seulement à concevoir dès le début un véhicule exclusivement électrique, mais aussi à se débarrasser des réflexes liés à cent ans de conception et de fabrication de véhicules à moteurs thermiques. Cette voie est étroite : il ne faut rien renier de l'expérience passée qui permet à un grand constructeur automobile de maîtriser la conception et l'industrialisation de voitures optimisées années après années, tout en sachant reprendre l'exercice de conception avec un œil neuf et en n'hésitant pas à bouleverser les concepts de mobilité quand le passage au véhicule électrique le justifie, en balayant à la fois le produit automobile lui-même et les services de mobilité associés. Cette troisième voie prépare les ruptures des vingt prochaines années.

Les marges de progrès sont importantes car, finalement, nous ne sommes encore qu'au tout début de l'aventure industrielle du véhicule électrique, au sens « production de masse ». Ces marges de progrès sont à la fois technologiques, mais aussi économiques. Comme elle a su le faire pour les véhicules à moteur thermique, faisons confiance à l'industrie automobile pour optimiser l'équation technico-économique des véhicules électriques, et permettre au plus grand nombre d'accéder à cette nouvelle forme de mobilité.

Voici quelques axes de progrès que les constructeurs doivent travailler en priorité, avec l'ensemble de leurs partenaires (fournisseurs, laboratoires, ...) :

◆ Le moteur électrique (incluant la machine elle-même et les convertisseurs électroniques de puissance associés)

Si les moteurs électriques existent depuis très longtemps, aucune application pour la traction n'a jamais été développée dans une perspective de production de masse. Il existe bien sûr des applications dans le domaine de la traction électrique, mais elles concernent essentiellement le domaine ferroviaire : c'est de la traction, mais c'est de la « petite série » à l'échelle automobile. Il existe aussi des applications de type « production de masse », mais elles ne concernent pas la traction (exemple : électroménager). Les développements de moteurs électriques spécifiques à des véhicules produits à grande échelle doivent intégrer plusieurs facteurs : performances, coût, disponibilité des matériaux, recyclage, process industriel, etc. Pour les constructeurs automobiles, il s'agit là d'un réel défi : nouvelles compétences, nouveaux métiers, nouveaux process, nouvelles chaînes de montage, ...

◆ La batterie

C'est une des clés du succès du véhicule électrique. La technologie Lithium-Ion représente un réel saut technologique qui ouvre la voie de la production de masse, mais des progrès restent à faire pour concevoir les prochaines générations de batterie. Ces progrès porteront sur l'électrochimie elle-même, où de nouvelles ruptures sont toujours à l'étude, mais aussi sur l'électronique de contrôle et de supervision associée au « système batterie ».

◆ La gestion de l'énergie embarquée

L'ère de l'énergie facile à bord des voitures est révolue. Consommer 100 W électriques à bord d'un véhicule diesel ou essence, c'est consommer un peu de carburant en plus et rejeter quelques grammes de CO₂ par km en plus. Si c'était facilement accepté à une certaine époque (encore récente), ça ne l'est plus du tout aujourd'hui tant la chasse au gramme de CO₂ est devenue une des priorités pour beaucoup de constructeurs. Dans le cas d'un véhicule électrique, la question de la consommation électrique se pose de façon encore plus cruciale, puisqu'elle touche directement l'autonomie. Si l'un des atouts de la motorisation électrique est de pouvoir récupérer l'énergie cinétique au freinage, on oublie souvent que l'électricité est aussi une forme d'énergie offrant plus généralement une grande souplesse dans la façon de gérer les flux et d'optimiser l'usage des kWh. C'est une piste de progrès à ne pas négliger.

◆ La connexion véhicule-infrastructure

C'est là, sans aucun doute, le domaine qui offre le plus grand potentiel, mais qui nécessite aussi de revoir en profondeur le référentiel automobile construit au cours du siècle dernier. Un véhicule électrique sera très souvent connecté à l'infrastructure. Loin d'être une faiblesse, cela doit être considéré comme un atout. Cette connexion permettra bien sûr des flux d'énergie, mais aussi des flux d'information. Arrêtons nous un moment sur ce sujet.

7. La connexion véhicule-infrastructure

Il existe plusieurs modes de charge possible pour un véhicule électrique.

Le premier d'entre eux est le mode dit de « charge standard ». Le véhicule est connecté au réseau domestique basse tension standard (habitation, bureau, ...). Si les niveaux de tension et les standards de connexion peuvent varier d'un pays à l'autre, retenons que ce mode de charge permet de faire le plein d'une

batterie 20 kWh en 4 à 8 heures, offrant ainsi une autonomie de 150 km au moins à un véhicule de type Fluence ZE.

Pour réduire le temps de charge, il faut augmenter la puissance de charge de la batterie. On arrive alors au deuxième mode de charge, dit « charge rapide », pouvant aller jusqu'à 40 kW, voire plus. Bien sûr, ce mode de charge n'est possible que connecté à des prises de forte puissance, dans des stations de charge publiques. Cela suppose que sont maîtrisées les fortes puissances à la fois côté batterie et côté chargeur.

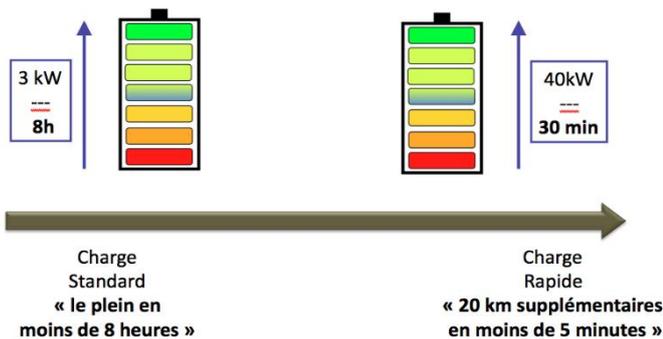


Figure 8 : De la charge standard à la charge rapide : des usages et des enjeux technologiques différents

Les choix technologiques en matière de chargeur et de mode de charge ne sont pas anodins sur l'équation technico-économique de l'électronique embarquée dans la voiture, mais aussi sur celle du déploiement de l'infrastructure. C'est particulièrement vrai pour les modes de charge rapide.

Le réseau de distribution d'électricité étant en tension alternative et la batterie délivrant une tension continue, il est nécessaire d'introduire une fonction « redresseur » entre le réseau et la batterie pour la recharger. Il y a deux façons d'envisager cette fonction.

La première façon consiste à localiser la fonction « redresseur » dans l'infrastructure. Cela oblige à construire des bornes AC-DC. C'est pratique vu de la voiture car la tension continue est délivrée sous la bonne forme. Il « suffit » alors de contrôler le courant continu délivré par la borne selon la stratégie de charge souhaitée. Mais, bien sûr, c'est assez coûteux pour l'infrastructure elle-même et cela alourdit la maintenance des bornes de recharge.

La seconde façon consiste à embarquer la fonction « redresseur » dans la voiture. Bien sûr, c'est beaucoup plus avantageux vu de l'infrastructure puisque le coût des bornes de recharge rapide en technologie AC est très limité. En revanche, cela alourdit le coût de fabrication de la voiture.

Le premier réflexe pour un constructeur automobile serait naturellement de privilégier la charge DC car c'est elle qui limite le plus le coût du véhicule. Cependant, puisque le développement du véhicule électrique nécessite le développement concomitant d'une infrastructure de charge, il peut être judicieux de travailler aussi à la conception de solutions technologiques permettant d'embarquer la charge à moindre coût. C'est ce qu'a fait Renault au cours des dernières années, en cohérence avec une stratégie de déploiement de masse du véhicule électrique reposant aussi sur un déploiement massif de l'infrastructure, à coût limité. Il est à noter que le premier brevet déposé par Renault sur ce sujet date de ... 1997 !

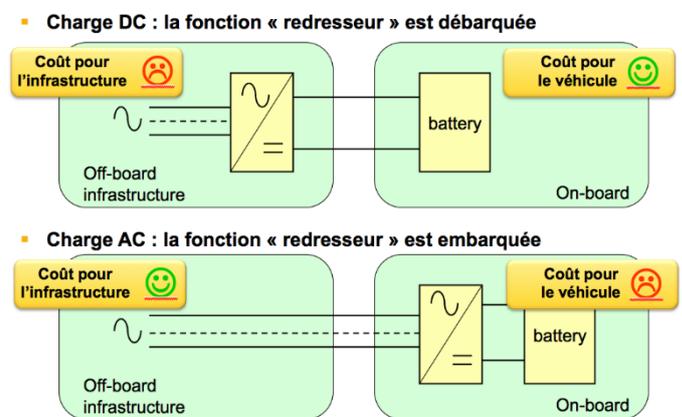


Figure 9 : Charge débarquée ou charge intégrée : deux stratégies différentes

Ces modes de charge, standard et rapide, peuvent aussi être complétés par un troisième mode : le « quick drop ». Il s'agit là d'une idée simple : remplacer sans aucune opération manuelle la batterie vide par une batterie pleine dans une station d'échange automatique. L'idée est simple, certes, mais sa mise en œuvre en vraie grandeur nécessite une réelle expertise dans les processus d'automatisation ... ce qui est précisément un des points forts des industriels de l'automobile ! Cette solution, qui permet de « faire le plein » d'énergie en quelques minutes, fera partie de l'arsenal pour recharger les batteries.

La connexion véhicule-infrastructure, tant pour les échanges d'énergie que pour les transferts d'informations, est un sujet vital pour le développement du véhicule électrique. De nombreuses technologies sont à inventer ou parfois plus simplement à adapter (charge par induction, transmission de données sans fil ou par courants porteurs, ...), avec toujours le contexte normatif et la standardisation en point de mire.

8. Conclusion : un écosystème à inventer

Depuis la naissance de l'automobile, le véhicule électrique a toujours été considéré comme une alternative potentielle ou une offre complémentaire aux véhicules à moteur thermique.

A l'heure où l'automobile doit contribuer à limiter les émissions de CO₂, où la mobilité urbaine se développe de plus en plus, où les solutions de mobilité doivent se démocratiser bien au-delà des pays industrialisés du 20^{ème} siècle, à l'heure où les progrès technologiques permettent une autonomie électrique compatible avec la majorité des cas d'usage de l'automobile, à l'heure encore où les technologies de l'information et de la communication rendent possibles des fonctions de guidage et d'assistance dans une infrastructure intelligente, à l'heure enfin où s'ouvre un 21^{ème} siècle qui devra apprendre à substituer des sources d'énergie renouvelable aux hydrocarbures, le développement du véhicule électrique apparaît comme une voie incontournable vers la mobilité de demain.

Certes, la transition vers le véhicule électrique ne se fera pas en quelques années, et les moteurs à combustion interne cohabiteront longtemps encore avec leurs cousins électriques, sujets eux aussi de progrès en termes de consommation et de rejet de particules. Mais la dynamique est aujourd'hui lancée et plus aucun constructeur automobile ne peut ignorer la vague de l'électrification des véhicules, quelle que soit la forme privilégiée.

Bien sûr, les difficultés existent. Il ne sert à rien de les nier, mais il n'est pas non plus responsable de se retrancher derrière ces difficultés pour justifier un immobilisme sans avenir. Toutes les grandes mutations technologiques ont eu leurs précurseurs et leurs détracteurs. Elles se sont toutes heurtées à des difficultés technologiques et économiques dont l'ingéniosité et la volonté des scientifiques, des industriels et des politiques ont fini par avoir raison. En guise de clin d'œil, citons cette phrase de Lord Kelvin, célèbre scientifique anglais, qui écrivait en 1896 sa conviction que l'aviation n'avait aucun avenir ou presque : « I have not the smallest molecule of faith in aerial navigation other than ballooning or of expectation of good results from any of the trials we hear of. » ...

L'essor de l'automobile au début du 20^{ème} siècle ne s'est pas fait en un jour. On a oublié aujourd'hui ceux qui n'y croyaient pas ... Mais ils étaient nombreux !

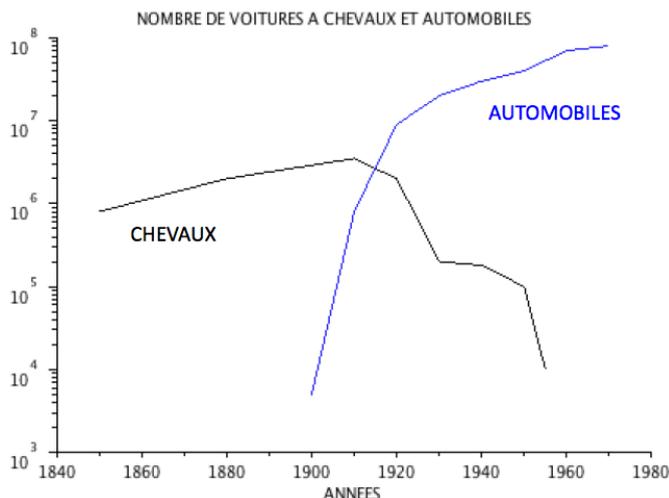


Figure 10 : Le cheval laisse la place à l'automobile en une vingtaine d'années (périmètre : USA)

(courbe adaptée du rapport de recherche « Long Waves, Technology Diffusion, and Substitution », Arnulf Grubler and Nebojsa Nakicenovic, International Institute for Applied Systems Analysis Laxenburg, Austria, 1991)

Dans le cas des véhicules électriques, c'est tout un éco-système qu'il faut réinventer. Les opportunités de développement durable sont à saisir, parfois à créer.

De prime abord, le développement des véhicules électriques représente une charge supplémentaire pour le système de production, transport et distribution d'électricité. Certes, mais avec sa capacité de stockage et de gestion intelligente de la charge, une flotte importante de véhicules électriques aussi une vraie opportunité technique et économique pour mieux exploiter un réseau électrique intelligent (« Smart grid »).

L'autonomie des véhicules électriques est limitée ? C'est un handicap si on raisonne seulement en substituant un véhicule électrique à un véhicule thermique. Mais c'est aussi une opportunité pour inventer de nouveaux modes de mobilité et de nouveaux services mieux adaptés à chaque besoin, basés sur une infrastructure intelligente couplée au véhicule.

La consommation en temps réel

RTE fournit le niveau de la consommation d'électricité française à tout instant.



Figure 11 : Dans un système électrique dont la charge est variable sur 24 heures, le pilotage intelligent d'une flotte importante de véhicules électriques peut être une vraie opportunité, en particulier si des énergies renouvelables intermittentes composent une partie du parc de production.
(figure issue de www.rte-france.com)

Certes, le véhicule électrique nécessite le développement d'une infrastructure portée par la volonté politique de développer une mobilité durable pour tous. Mais qui aurait cru possible que l'éclairage électrique supplanterait la lampe à pétrole, au prix du formidable développement d'une infrastructure de distribution qui devait amener l'électricité dans chaque foyer ? Qui aurait cru possible le déploiement de l'automobile au début du 20^{ème} siècle, au prix du développement progressif de tout un réseau de stations essence ?

Ne soyons pas timorés face aux défis technologiques. Souvenons-nous que les pionniers des moteurs à combustion ont aussi dû affronter les sceptiques qui trouvaient qu'embarquer 30 litres de pétrole pour le faire « exploser » dans le moteur n'était pas très réaliste ! Et pourtant ...

Le salon de l'automobile Paris 2010 a montré que le véhicule électrique était aujourd'hui une réalité. Les défis technologiques pour le faire progresser sont à notre portée. Ils doivent être un facteur de motivation pour que de jeunes ingénieurs en électrotechnique, électronique et automatique rejoignent le secteur automobile pour construire la mobilité de demain !

Le moteur-roue électrique

Christophe ESPANET

Université de Franche-Comté, Institut FEMTO-ST / Département ENISYS
Parc Technologique – 2, avenue Jean Moulin – F90000 BELFORT

Résumé : Dans le contexte d'une mobilité terrestre de plus en plus électrique, l'intégration d'un moteur électrique dans une roue est une solution permettant de proposer une architecture innovante pour un véhicule électrique ou hybride électrique. Cette solution présente l'avantage d'une très grande compacité de la fonction motrice permettant de supprimer la transmission mécanique. L'intégration de moteurs dans les roues permet également de réaliser électriquement des fonctions avancées (vrai entraînement à 4 roues motrices, antipatinage...) Dans cet article, nous rappelons que le fractionnement de la motorisation nécessite une optimisation du compromis masse/rendement pour ne pas détériorer les performances globales d'un véhicule équipé de moteurs-roues. La conception des moteurs-roues doit également prendre en compte le positionnement de la fonction motrice afin de limiter sa vulnérabilité en cas de chocs ou de roulage dans des environnements défavorables (eau, neige, boue...) En analysant les qualités relatives de chaque type de moteur électrique, nous montrons que les moteurs synchrones à aimants et les moteurs à réluctance variables sont deux bons candidats pour la réalisation de moteurs-roues. Ceci étant, l'analyse des solutions récemment construites montrent clairement que c'est le moteur à aimants qui est très majoritairement retenu car il présente le meilleur compromis masse, encombrement, couple et rendement, et ce malgré le coût élevé des aimants à base de Néodyme presque toujours utilisés.

1. Introduction

La mobilité électrique a connu des hauts des bas depuis plus d'un siècle. Les premiers développements de l'automobile, notamment aux États-Unis, ont été réalisés avec des véhicules électriques. On cite très souvent la 'Jamais Contente' comme le premier véhicule à avoir dépassé au début du 20^{ème} siècle les 100 km/h [i]. Pourtant c'est avec le pétrole (permettant de stocker beaucoup d'énergie dans un volume réduit et surtout permettant une recharge en énergie du véhicule très rapide) que l'industrie automobile a pris la dimension qu'on lui connaît maintenant. Pourtant, à chaque crise énergétique, dans les années 1970, puis dans les années 1990 et enfin depuis le début des années 2000, le véhicule électrique a fait l'objet de recherches et développements, bénéficiant des avancées technologiques de son époque : l'électronique de puissance et les batteries au Ni-Cd dans les années 1990, les machines à aimants et les batteries au Lithium dans les années 2000 et peut-être demain la pile à combustible.

Aujourd'hui, le contexte n'a certainement jamais été aussi favorable : la prise de conscience des populations et des dirigeants de la limitation des ressources énergétiques fossiles, les problèmes environnementaux liés au rejet de CO₂ dans l'atmosphère, le développement du vecteur énergétique 'hydrogène', sont autant de raisons de penser que l'électrification du

véhicule et en cours et que, même si cela prendra encore plusieurs années, les véhicules terrestres vont utiliser des moteurs électriques de plus en plus puissants associés ou pas à des moteurs thermiques. En effet, les moteurs électriques offrent des performances intrinsèques très intéressantes en comparaison avec les moteurs thermiques. Un entraînement électrique de 100 kW aura un rendement maximal de l'ordre de 90% quand le moteur thermique plafonnera à 40% (cas du moteur à cycle Diesel). Par ailleurs, les moteurs électriques peuvent produire leur couple maximal même à vitesse de rotation nulle. En parallèle, l'introduction de moteurs électriques incite à repenser l'architecture du véhicule électrique. Dans ce contexte, nous nous proposons d'étudier dans cet article la solution originale visant à intégrer un moteur électrique dans les roues des véhicules.

La première partie de cet article présente différentes architectures de véhicules électriques (ou hybrides électriques) possibles en prenant le parti de montrer comment passer progressivement d'une architecture adaptée au véhicule à moteur thermique à une architecture utilisant un moteur électrique intégré dans les roues. La deuxième partie détaille les avantages et les limites de l'utilisation de propulsions électriques avec des moteurs intégrés dans les roues. Ensuite la troisième partie traite des contraintes liées au dimensionnement de moteurs électriques en vue de leur intégration dans une roue. Enfin la quatrième et dernière

partie de cet article présente différents exemples récents de moteurs intégrés dans les roues, en essayant de dégager les solutions les plus abouties et de déterminer quel est l'avenir pour ce type de propulsion électrique.

2. Architecture des véhicules électriques

Dans cette partie, nous proposons différentes architectures possible pour la propulsion électrique d'un véhicule. Pour cela, nous limitons notre analyse à un véhicule à quatre roues, mais la plus grande partie de l'analyse proposée est également valable pour d'autres types de véhicules (deux roues, véhicules lourds à 6 ou 8 roues...) Il ne s'agit pas ici de faire une présentation exhaustive de toutes les architectures possibles de véhicules électriques, mais plutôt de montrer comment on peut aboutir rationnellement à une structure utilisant des moteurs électriques intégrés dans les roues. Une analyse plus détaillée des architectures peut par exemple être consultée dans [ii].

La voie la plus simple pour réaliser un véhicule électrique est de remplacer le moteur thermique par un moteur électrique. L'architecture mécanique du véhicule est alors totalement conservée et les contraintes de dimensionnement en couple et en vitesse du moteur électrique sont les mêmes que celles du moteur thermique. Notamment, on conserve alors la boîte de vitesse et l'embrayage. La **Figure 1** illustre cette première solution. Cette solution n'est pas utilisée en pratique, mais son intérêt serait d'être très proche des véhicules traditionnels. La boîte de vitesse permet la réduction du couple maximal (qui impose au premier ordre le volume du moteur électrique). Ceci étant, la boîte de vitesse crée des creux de couple au moment du changement des rapports de la boîte de vitesse et, pour un moteur donné, limite les zones pouvant être atteintes dans le plan couple vitesse. En fait la boîte de vitesse est bien adaptée aux moteurs thermiques qui ont une zone de fonctionnement optimale (i.e. couple et rendement élevés) limitée dans le plan couple-vitesse. Ainsi, la boîte de vitesse permet d'adapter le couple du moteur au couple nécessaire à la propulsion du véhicule. Or les moteurs électriques sont capables de fournir un couple constant élevé à basse vitesse et de fonctionner à puissance maximale constante sur une grande de vitesse. Il est donc inutile de compliquer et de pénaliser le rendement de la chaîne de propulsion par une boîte de vitesse lors de la propulsion d'un véhicule par un moteur électrique.

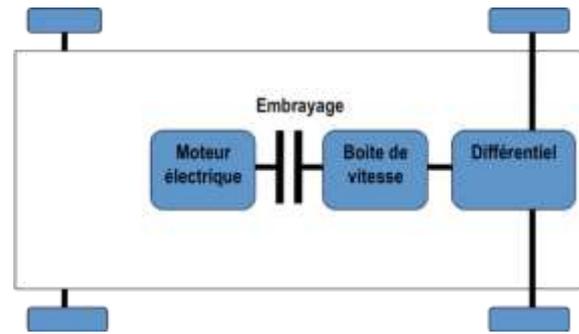


Figure 1 : Architecture de véhicule électrique avec moteur unique centralisé et boîte de vitesse

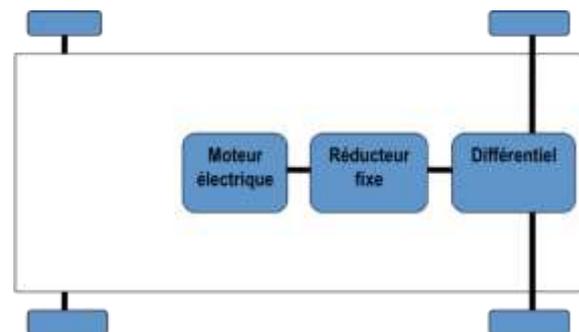


Figure 2 : Architecture de véhicule électrique avec moteur unique centralisé et réducteur fixe

On peut ainsi remplacer la boîte de vitesse par un réducteur unique (cf. **Figure 2**). Cela permet à la fois de réduire le couple que le moteur électrique doit produire tout en éliminant le problème des creux de couple. La structure reste toujours très proche de l'architecture traditionnelle du véhicule à moteur thermique – avec un moteur central – mais l'avantage est d'avoir pu supprimer le système d'embrayage ce qui améliore l'agrément de conduite, simplifie la chaîne de traction et améliore son rendement. C'est cette solution qui est très majoritairement adoptée dans les véhicules électriques et hybrides électriques actuels (même si dans le cas des véhicules hybrides la chaîne de propulsion, plus complexe, associe mécaniquement plusieurs moteurs électriques et thermiques). Le système centralisé reste toutefois encombrant car il nécessite une transmission pour relier les roues au moteur. De plus, la transmission mécanique, et en particulier le réducteur, peuvent nécessiter un entretien, être à l'origine de bruit et faire chuter le rendement. En outre la répartition de puissance sur les deux ou quatre roues motrices est réalisée mécaniquement grâce au différentiel. Cet ingénieux système limite pourtant le contrôle indépendant de chaque roue.

Pour pallier à ce dernier défaut on peut imaginer une solution où la motorisation est répartie sur chaque roue du véhicule : on place à côté de chacune des roues un moteur et éventuellement un réducteur (cf. **Figure 3**). On utilise dans ce cas relativement souvent l'anglicisme

‘moteur hub’, c’est-à-dire littéralement ‘moteur dans le moyeu’. Cette solution est assez proche de ce qui est actuellement fait sur le bogies des locomotives ou des automotrices : le moteur est rapproché des roues motrices. De fait cette solution a été par exemple utilisée par Alstom pour réaliser un Tramway. La **Figure 4** montre le moteur réalisé : il s’agit d’un moteur asynchrone avec un réducteur, le tout étant disposé à côté d’une jante qui vient recouvrir le dispositif. L’encombrement du système complet est tel que Michelin avait alors développé un pneumatique spécifique de grande largeur. L’intérêt d’une telle solution est de pouvoir contrôler de façon indépendante chaque roue. La simplicité mécanique permet d’utiliser des composants (moteurs et réducteurs) classiques, mais cela se fait au prix d’un encombrement plus important que l’intégration directe dans la roue.

Finalement la solution *ultime* consiste à intégrer le moteur complètement dans la roue (cf. **Figure 5**). Dans ce cas il est difficile (mais pas impossible) d’incorporer également un réducteur et le plus souvent le moteur est en attaque directe. Cette solution permet d’obtenir une grande compacité de la fonction motrice et un contrôle précis (en couple et en vitesse) de chaque roue motrice. Le rendement de la chaîne de traction est optimal puisque cette dernière est réduite à son plus strict minimum. Ceci étant, il ne faut pas nier les difficultés mécaniques d’intégration, la vulnérabilité de la fonction motrice qui est incluse dans sa totalité dans les roues et surtout les contraintes fortes qui portent sur le dimensionnement du moteur (surtout dans le cas d’une attaque directe). Les avantages et les inconvénients de cette solution seront discutés plus en détail dans la partie suivante. Bien entendu, le concept de moteur-roue n’est pas exclusivement lié à l’intégration d’un moteur électrique et des moteurs-roues thermiques ou hydrauliques ont aussi été conçus, mais il faut reconnaître que la géométrie cylindrique des moteurs électriques rotatifs se prête mieux à l’intégration dans une roue.

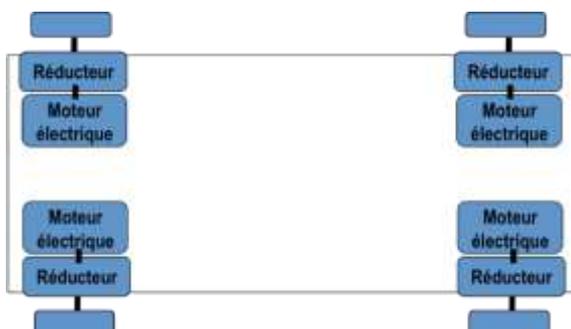


Figure 3 : Architecture de véhicule électrique avec moteurs à proximité des roues



Figure 4 : Exemple de ‘moteur hub’ réalisé par la société Alstom Transport pour la traction d’un Tramway



Figure 5 : Architecture de véhicule électrique avec moteurs intégrés dans les roues

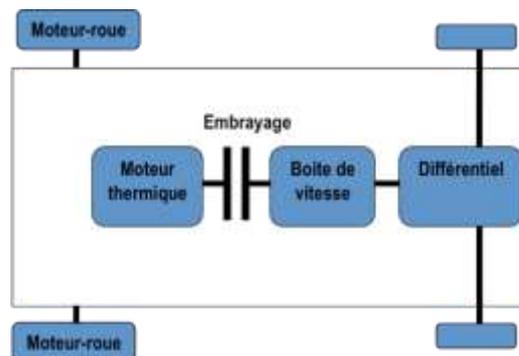


Figure 6 : Architecture de véhicule hybride électrique simplifiée avec moteurs électriques intégrés dans les roues arrière et couplage des puissances ‘thermiques’ et ‘électriques’ par la route



Figure 7 : Renault NEXT – un exemple de véhicule hybride à moteurs intégrés dans les roues arrière

Nous terminerons cette partie en évoquant la possibilité de réaliser une chaîne de traction hybride électrique simplifiée grâce à des moteurs intégrés dans les roues. La structure hybride série/parallèle est celle qui offre le plus de possibilités (modes tout électrique et tout thermique, freinage récupératif, accélération avec les pleines puissance thermique et électrique...), mais dans ce cas l'une des principales difficultés est de réaliser le couplage de puissance mécanique produite par le moteur thermique avec celle(s) produite(s) par la(les) machine(s) électrique(s). La solution la plus connue est celle exploitée par la société japonaise Toyota et qui consiste à utiliser un système mécanique qui est un train planétaire épicycloïdal. Ce dispositif permet de réaliser relativement simplement le couplage, mais ne permet pas de piloter librement le moteur thermique et les deux moteurs électriques car des conditions mécaniques doivent être respectées au niveau du train planétaire. L'utilisation de moteurs-roues peut permettre de réaliser ce couplage de façon simplifiée. L'idée est de maintenir la propulsion thermique classique sur les roues motrices, en réduisant la puissance du moteur thermique (on parle usuellement de 'downsizing'), et d'installer sur les roues non motrices des moteurs-roues, comme représenté **Figure 6**. Ces moteurs sont alors dimensionnés pour assurer un fonctionnement tout électrique (en mode urbain par exemple), soutenir le moteur thermique sous-dimensionné et fournir de cette manière la même puissance que le véhicule thermique initial et assurer un freinage ou ralentissement récupératifs. On obtient alors un véhicule hybride série-parallèle dont la structure est relativement proche d'un véhicule thermique classique mais qui permet l'utilisation d'un moteur thermique plus faiblement dimensionné et l'exploitation des caractéristiques intrinsèques des moteurs-roues, à savoir leur compacité et leur modularité. Le véhicule NEXT développé par Renault en 1995 en est un premier exemple (cf. **Figure 7**). Un autre exemple de ce type de véhicule hybride est actuellement en cours de conception dans le cadre du projet PHEBUS (Propulsion Hybride Electrique Bi-mode pour Usages urbains) soutenu par l'ANR et financé par l'ADEME ; il s'agit d'un quadricycle lourd de la marque AIXAM qui sera hybridé selon l'architecture décrite ci-dessus [iii] (cf. **Figure 25**).

3. Intérêts et limites des moteurs-roues

Dans ce paragraphe, nous détaillons les avantages et les inconvénients de l'intégration de moteurs électriques dans les roues d'un véhicule, de façon à dégager ensuite les véhicules qui pourraient être les mieux adaptés à ce type de motorisation.

3.1. Avantages des moteurs-roues

Nous commençons par les avantages des moteurs-roues. Le premier avantage est clairement la compacité de la fonction motrice. En effet, le moteur et sa transmission sont tous les deux inclus dans la roue elle-même. La roue aura alors une liaison mécanique au châssis, mais également une liaison électrique (courant fort pour la puissance et courant faible pour les capteurs) et éventuellement une liaison hydraulique pour le refroidissement. Cette compacité est un atout pour un véhicule électrique car cela permet de gagner de la place pour disposer les organes de stockage d'énergie (dont le volume peut être considérable si on souhaite une autonomie importante) et de gestion d'énergie (les convertisseurs statiques et d'éventuels composants de stockage de puissance). L'agencement global des composants du véhicule est donc simplifié et cela permet de mieux positionner le centre de gravité du véhicule pour optimiser le comportement routier.

La simplification extrême de la transmission mécanique permet a priori d'optimiser le rendement de la chaîne de traction, si toutefois le rendement de la machine électrique n'est pas pénalisé par l'attaque directe ou la faible place disponible pour intégrer le moteur dans une roue. Quoiqu'il en soit, dans le cas d'une attaque directe, les engrenages sont supprimés ce qui permet de réduire le bruit et les vibrations. Cette suppression devrait également conduire – de ce point de vue au moins – à une limitation de la maintenance et à une augmentation de la fiabilité.

Enfin, la possibilité de contrôler indépendamment les quatre roues du véhicule permet de réaliser par voie électronique des fonctions avancées telles que l'antiblocage des roues (ABS), l'optimisation de la stabilité du véhicule (ESP), mais aussi le pivot. Le contrôle de couple de chaque roue permet ainsi de démarrer presque en toute circonstance même si trois roues se trouvent en terrains glissants ou sont embourbées. La réalisation du pivot (par contre rotation des deux roues d'un même essieu) permet d'améliorer la maniabilité du véhicule. Et la maîtrise du couple sur chaque roue permet d'envisager des franchissements difficiles avec de très fortes pentes (le couple est réglé sur chaque roue au maximum de ce que permet la liaison au sol).

3.2. Limites des moteurs-roues

Nous détaillons maintenant les principaux inconvénients des moteurs intégrés dans les roues.

3.2.1. Vulnérabilité de la fonction motrice

Le premier inconvénient – le plus évident peut-être – concerne la vulnérabilité de la fonction motrice. En effet, toute la fonction motrice étant dans la roue du véhicule, elle est peu protégée vis-à-vis des chocs et des

projections de la route (eau, neige et sel en hiver, sable...) Cela fragilise objectivement le véhicule. Toutefois, l'argument est surtout économique car en ce qui concerne la disponibilité de la fonction motrice, il faut aussi considérer que le fractionnement de la puissance sur plusieurs moteurs augmente la disponibilité (même si celle-ci est en mode dégradé) : dans le cas de deux moteurs, la panne d'un moteur permet de conserver 50% de la puissance (en mode très dégradé car la puissance disponible sur une seule roue tendra à mettre le véhicule en rotation) ; dans le cas de quatre moteurs, la panne d'un moteur permet de conserver 50% de la puissance sans aucun problème de conduite.

Finalement, la localisation du moteur dans les roues nécessite un renforcement des organes mécaniques de liaison au châssis et une conception mécanique optimisée de la jante et du rotor de la machine pour absorber les éventuels chocs et une protection/étanchéité renforcée du moteur pour éviter un encrassement pouvant conduire à un vieillissement prématuré. L'idéal est d'avoir un moteur complètement fermé, mais cela nécessite alors un refroidissement par convection forcée fluide ou un sous-dimensionnement thermique pour assurer un refroidissement par convection naturelle.

3.2.2. Surdimensionnement des solutions multi-moteurs

Nous consacrons maintenant un paragraphe à une problématique intrinsèque liée au dimensionnement des moteurs électriques dans le cas du fractionnement de la motorisation [iv]. Pour cela nous nous appuyons sur l'étude proposée par [ii]. L'analyse est qualitative et repose sur de nombreuses hypothèses, mais elle permet de mettre en évidence un problème réel lié au fractionnement de la motorisation. Pour mener cette étude, nous considérons une machine simplifiée de type synchrone pour laquelle le couple T s'exprime en fonction du nombre de paires de pôles p , du rayon d'entrefer R_e , du volume de la cylindrée V_e (c'est-à-dire le volume du cylindre dont la surface extérieure est au milieu de l'entrefer), de la valeur moyenne de l'induction créée par le rotor dans l'entrefer sous un pôle B_e , de la force magnétomotrice statorique par pôle F_p et d'un coefficient lié au bobinage statoriques k_b :

$$T = 2k_b V_e B_e \frac{F_p}{\pi/p R_e} \quad (1)$$

Il est également supposé que :

- La masse totale de la machine électrique M_{mot} est proportionnelle au volume de la cylindrée :

$$M_{mot} = k_m V_e \quad (2)$$

- Les pertes fer peuvent être négligées devant les pertes Joule (limitant la validité des conclusions à de faibles fréquences de conversion d'énergie) ;
- Les échauffements ΔT de la machine sont proportionnels au rapport des pertes Joule sur la surface de d'échange extérieure S_{ext} :

$$\Delta T = k_{\Delta T} \frac{P_J}{S_{ext}} \quad (3)$$

De plus il est possible de démontrer que les pertes Joule dans la machine sont proportionnelles au produit de la densité surfacique de courant efficace dans les encoches δ par la densité linéique de courant efficace à la surface du stator λ :

$$P_J = k_J \delta \lambda = k_J \frac{F_p}{S_{enc}} \frac{F_p}{\pi/p R_e} \quad (4)$$

où S_{enc} est la surface de toutes les encoches présentes sous un pôle.

En ne considérant que les pertes Joule, le rendement du moteur η s'exprime simplement par :

$$\eta = \frac{T \Omega}{T \Omega + P_J} \quad (5)$$

Pour effectuer la comparaison, nous considérons premièrement le cas mono-moteur et deuxièmement le cas multi-moteurs avec N_m moteurs. Nous supposons en outre que les N_m moteurs sont obtenus en effectuant une homothétie de rapport k_h sur toutes les dimensions géométriques du moteur unique de la solution mono-moteur. Dans les calculs qui suivent, toutes les caractéristiques relatives à la solution mono-moteur portent un indice 1 et celles relatives à la solution multi-moteurs portent l'indice 2.

Chaque motorisation doit produire le même couple T_{max} et atteindre la même vitesse Ω_{max} . En utilisant l'équation (1), on peut écrire :

$$2k_{b_1} V_{e_1} B_{e_1} \frac{F_{p_1}}{\pi/p_1 R_{e_1}} = L N_m \left(2k_{b_2} V_{e_2} B_{e_2} \frac{F_{p_2}}{\pi/p_2 R_{e_2}} \right) \quad (6)$$

L'homothétie ne change pas le type de bobinage ni la polarité de la machine. Donc, s'il est possible d'appliquer le même rapport d'homothétie sur toutes les dimensions géométriques et en particulier sur l'entrefer, on obtient la relation suivante :

$$\frac{F_{p_2}}{F_{p_1}} = \frac{1}{N_m} \frac{V_{e_1}}{V_{e_2}} \frac{R_{e_2}}{R_{e_1}} = \frac{1}{N_m k_h^2} \quad (7)$$

Nous introduisons alors trois ratios pour comparer les performances des deux solutions de motorisation :

- ρ_M , le ratio des masses des deux motorisations, en utilisant la relation (2) :

$$\rho_M = \frac{N_m M_{mot_2}}{M_{mot_1}} = \frac{N_m V_{e_2}}{V_{e_1}} = N_m k_h^3 \quad (8)$$

- ρ_{PJ} , le ratio des pertes Joule des deux motorisations, en utilisant les relations (4) et (7) :

$$\rho_{PJ} = \frac{N_m P_{J_2}}{P_{J_1}} = N_m \left(\frac{F_{p_2}}{F_{p_1}} \right)^2 \frac{R_{e_1} S_{enc_1}}{R_{e_2} S_{enc_2}} = \frac{1}{N_m k_h^7} \quad (9)$$

- $\rho_{\Delta T}$, le ratio des échauffements des deux motorisations, en utilisant les relations (3) et (9) :

$$\rho_{\Delta T} = \frac{\Delta T_2}{\Delta T_1} = \frac{P_{J_2} S_{ext_1}}{P_{J_1} S_{ext_2}} = \frac{1}{N_m^2 k_h^9} \quad (10)$$

À partir des relations précédentes, on peut considérer deux types de comparaison. La première consiste à maintenir le rendement de la motorisation constante. Pour cela, il est nécessaire de maintenir les pertes Joule constantes, car la puissance électromagnétique des deux motorisations est la même. Dans ces conditions, le rapport d'homothétie vérifie la relation suivante :

$$k_h = N_m^{-1/7} \quad (11)$$

Et, en utilisant les relations (8) et (10), on obtient les expressions des ratios des masses et des échauffements :

$$(\rho_M)_\eta = N_m^{4/7} \quad (12)$$

$$(\rho_{\Delta T})_\eta = N_m^{-5/7} \quad (13)$$

Nous traçons alors **Figure 8** les coefficients de variation de la masse et des échauffements d'une solution multi-moteurs par rapport à une solution mono-moteur. Nous constatons une augmentation de la masse (plus de 100% pour 4 moteurs). Réciproquement, si on souhaite maintenir la masse totale, le rendement sera nécessairement affecté. Nous constatons également une diminution des échauffements, ce qui est logique car la surface d'échange totale augmente alors que les pertes restent les mêmes.

On en vient logiquement à la seconde comparaison, qui consiste à maintenir les échauffements constants. Dans ces conditions, le rapport d'homothétie vérifie la relation suivante :

$$k_h = N_m^{-2/9} \quad (14)$$

Et, en utilisant les relations (8) et (10), on obtient les expressions des ratios des masses et des pertes Joule :

$$(\rho_M)_\eta = N_m^{1/3} \quad (15)$$

$$(\rho_{\Delta T})_\eta = N_m^{5/9} \quad (16)$$

Nous traçons alors **Figure 9** les coefficients d'augmentation de la masse et des échauffements d'une solution multi-moteurs par rapport à une solution mono-moteur. Nous constatons une augmentation de la masse, plus modérée toutefois que dans le cas où le rendement est constant, et une augmentation des pertes qui traduit une diminution du rendement.

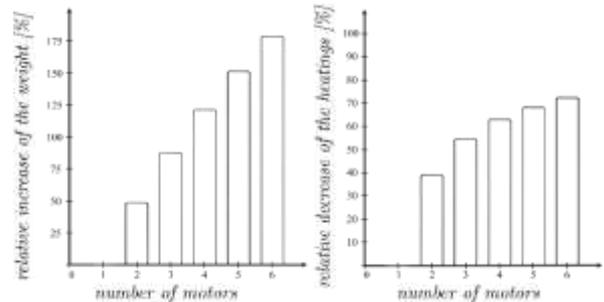


Figure 8 : Évolution de la masse totale et des échauffements d'une solution multi-moteurs versus une solution mono-moteur en fonction du nombre de moteurs utilisés dans la solution multi-moteurs, à rendement maintenu constant

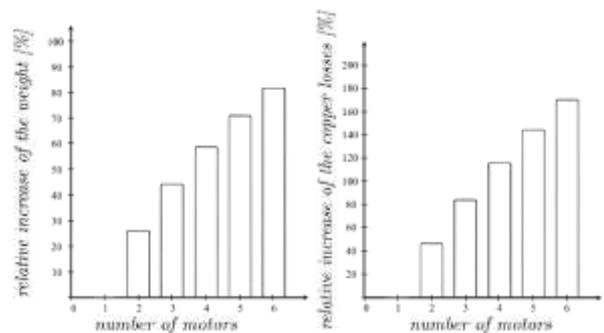


Figure 9 : Évolution de la masse totale et des pertes Joule d'une solution multi-moteurs versus une solution mono-moteur en fonction du nombre de moteurs utilisés dans la solution multi-moteurs, à échauffements maintenus constants

En conclusion de ces deux analyses, nous constatons finalement que lors de la segmentation de la fonction motrice, il n'est pas possible de maintenir la masse et le rendement qui se dégradent l'un et/ou l'autre. Au total, cela pénalisera nécessairement l'autonomie du véhicule, soit d'un fait d'une détérioration du rendement, soit du fait d'une augmentation de la masse de la fonction motrice. Une bonne solution de compromis est probablement de maintenir les échauffements constants : avec deux moteurs, les pertes Joule augmentent de 40% et la masse totale de 25%.

3.2.3. Problème des masses non suspendues

Un autre problème souvent évoqué par les spécialistes automobiles est la masse des parties non suspendues, c'est-à-dire mécaniquement non supportée par la suspension du véhicule. Pour comprendre ce problème, nous pouvons considérer le véhicule comme un système oscillant à deux ressorts amortis (cf. **Figure 10**). Le premier ressort modélise le comportement du pneumatique qui est à l'interface entre la route et les masses non suspendues (roue, moteur, système de freinage...) Le second ressort modélise la suspension du véhicule qui se situe entre les parties non suspendues et les parties suspendues (tout le châssis et ce qu'il supporte, dont les passagers).

Les irrégularités de la route sont une source d'excitation du système oscillant et sont à l'origine de déformations du pneumatique et de l'amortisseur. Entre deux irrégularités, le système oscillant évolue en revenant à l'équilibre. Il effectue des oscillations dont la fréquence est liée à la raideur des ressorts et aux masses des parties suspendues et non suspendues et dont l'amplitude décroît en fonction des amortissements de la suspension et du pneumatique. Qualitativement, on comprend que si l'effet inertiel de la masse m_1 non suspendue est trop grand, il y a d'une part un risque du décollement du pneu (perte d'adhérence) et d'autre part une fréquence d'oscillation plus basse, donc des oscillations qui durent plus longtemps.

Cette approche est très schématique, mais elle montre bien les problèmes de tenue de route et de confort liés à des masses non suspendues trop importantes. Ainsi l'augmentation de la masse des roues peut être néfaste au comportement routier du véhicule et la suspension doit être soigneusement dimensionnée pour limiter ces désagréments.

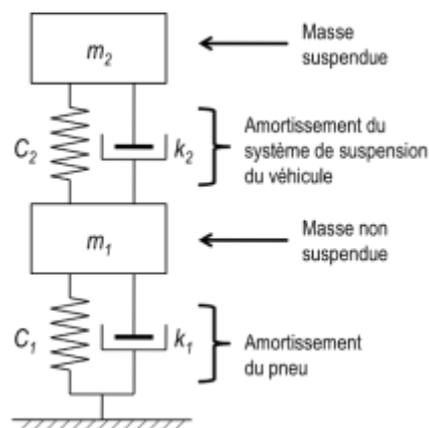


Figure 10 : Représentation mécanique simplifiée du comportement vibratoire d'un véhicule : modélisation par un système oscillant équivalent constitué par le pneumatique, la suspension ainsi que les masses suspendues et non suspendues

3.3. Conclusions

Finalement, les différents avantages et inconvénients décrits ci-dessus permettent d'envisager le moteur-roue pour les grandes familles suivantes de véhicules. Il s'agit tout d'abord des véhicules mono-moteurs tels que les vélos électriques (on verra plus loin dans cet article que c'est de très loin l'application la plus importante des moteurs-roues) ; ces applications ne sont pas pénalisées par le fractionnement de la motorisation et le positionnement de la masse additionnelle (généralement au centre de la roue arrière ne pénalise pas trop le confort de conduite). Il s'agit ensuite des gros véhicules dont on recherche une mobilité extrême, tels que les véhicules militaires ou tout-terrains ; dans ce cas on peut accepter l'augmentation de la masse (et du coût) dans la mesure où les moteurs-roues confèrent en contrepartie au véhicule des fonctionnalités très difficiles à obtenir par ailleurs (pivot, accélérations très marquées, avancement en terrain très boueux ou très glissant...) En outre les vitesses de déplacement sont généralement relativement faibles et la tenue de route ou le confort routier (liés aux masses importantes non suspendues) ne sont pas des facteurs clés pour ce type de véhicule. Enfin, la réalisation de véhicules hybrides avec un essieu à moteurs-roues peut être pertinente pour de petits véhicules où la variation de masse additionnelles de deux moteurs-roues sera relativement faible devant la masse totale du véhicule, même si le surcoût risque par ailleurs d'être une réelle difficulté.

4. Contraintes de dimensionnement des moteurs-roues et choix du type de moteur

Dans ce paragraphe, nous présentons succinctement les principales contraintes de dimensionnement de la machine électrique et de son convertisseur et nous faisons une analyse comparative des différents types de moteurs électriques. Même si l'analyse qui suit est plus spécifiquement orientée vers la réalisation des moteurs-roues, la plupart des arguments sont également vrais dans le cadre plus général des moteurs pour la traction des véhicules électriques.

4.1. Optimisation de l'encombrement et de la masse

La première contrainte de dimensionnement est évidente, elle est liée à l'encombrement nécessairement limitée par la jante dans laquelle il faut intégrer le moteur. Or, il est connu que la minimisation du volume d'une machine électrique passe par l'augmentation de la fréquence f de conversion d'énergie qui est égale au produit du nombre de paires de pôles p par la fréquence de rotation n . De là, deux solutions sont envisageables.

La première consiste à réaliser un moteur en attaque directe. Cela permet de supprimer tout organe de transmission, mais le couple à fournir est élevé en même temps que la fréquence de rotation est basse. Cela conduit donc naturellement à des machines à (très) forte polarité (à l'image des alternateurs hydrauliques).

La deuxième solution consiste à utiliser un réducteur. Cette intégration présente une véritable difficulté d'intégration mécanique dans la roue, mais elle permet de réduire le couple que le moteur doit fournir. Dans ce cas on converge naturellement vers des machines rapides dont la fréquence électrique f est généralement limitée par des contraintes mécaniques liées à la grande vitesse périphérique du rotor ou par les pertes magnétiques dans les tôles statoriques.

Dans les deux cas, l'encombrement limité et la fréquence de conversion (permettant l'optimisation du volume de la machine) conduisent à des pertes et des échauffements qui sont d'autant plus difficiles à évacuer que la machine est confinée : à la difficulté de conception d'une machine compacte s'ajoute la difficulté d'intégration du système de refroidissement. Pour les faibles puissance (véhicules deux-roues), le refroidissement est généralement naturel avec assez souvent un système de brassage de l'air à l'intérieur de la machine pour améliorer l'efficacité de la convection et favoriser ainsi l'évacuation de la chaleur. Dans le cas de moteurs de forte puissance, le refroidissement est forcé à l'aide d'un fluide caloporteur tel que de l'eau glycolée (de la même façon que dans un moteur thermique de voiture traditionnelle). Cela permet

d'optimiser le volume et la masse de la machine électrique tout en conservant des échauffements compatibles avec la tenue en température des matériaux et la durée de vie recherchée de la machine.

Les différents éléments abordés dans ce paragraphe seront illustrés dans la partie 5 avec des exemples concrets.

4.2. Comparaison des différentes machines électriques

Dans ce paragraphe, nous passons en revue les différents types de machines électriques tournantes afin de dégager les technologies les plus intéressantes pour la réalisation d'un moteur roue. Les critères de comparaison retenus sont les suivants :

- la capacité à produire un couple élevé dans un encombrement donné si on cherche à réaliser un moteur à attaque directe ;
- la capacité à atteindre une fréquence de rotation élevée si on cherche à réaliser un moteur associé à un réducteur ;
- le niveau de pertes pour un volume et une puissance à fournir donnés de façon à minimiser la consommation énergétique du système de motorisation et à faciliter le refroidissement ;
- la facilité de faire varier le flux par pôle de la machine (défluxage) pour obtenir un bon compromis de dimensionnement entre la machine et le convertisseur ;
- la simplicité du refroidissement dont on a montré l'importance dans le paragraphe précédent ;
- la robustesse de la machine pour tendre vers une machine sans entretien et avec un niveau de fiabilité élevé ;
- le coût de la machine que ce soit au niveau de la fabrication ou des matériaux, car c'est un point clé pour des applications automobiles potentiellement de grande série ;
- l'électronique de puissance qui doit être prise en compte dans l'analyse de chaque type de machine car tous les moteurs nécessitent un convertisseur statique pour fonctionner en vitesse et couple variables avec un bon rendement, et ce en ayant à disposition une source énergétique qui est presque toujours une source de tension continue plus ou moins fluctuante.

La présentation est faite à chaque fois sous forme de tableau pour permettre une analyse plus synthétique. Des compléments sur les principes de fonctionnement et les caractéristiques de chaque type de machine peuvent être consultés dans [ii,v].

Enfin, nous limitons principalement notre analyse à des moteurs à flux radial. Les moteurs à flux axial présentent l'avantage d'avoir une surface d'entrefer plus grande conduisant à un meilleur couple spécifique mais ils posent un problème mécanique d'équilibrage des forces axiales, qui est d'autant plus prégnant que le moteur doit être intégré dans une roue et donc peut être soumis à des accélérations très fortes liés à d'éventuels chocs. Peu d'exemples de moteurs-roues à flux axial ont d'ailleurs été publiés à ce jour.

4.2.1. Moteur à courant continu (MCC)

<i>Critère</i>	<i>Évaluation du critère pour le MCC à excitation bobinée séparée ou à aimants permanents</i>
Couple	La structure polyphasée de l'induit d'un MCC permet d'atteindre un couple important qui est toutefois limité par la densité de courant limitée au niveau du collecteur, le phénomène de commutation et la saturation magnétique. L'amélioration des deux derniers points nécessite l'utilisation d'enroulement de compensation et de pôles de commutation qui complexifient grandement la construction de la machine.
Vitesse	La vitesse de rotation d'un MCC est limitée par le système balais/collecteur, même s'il existe maintenant des systèmes autorisant des vitesses périphériques de l'ordre de 50 à 70 m/s.
Rendement	Le rendement d'un MCC est dégradé par le système balais-collecteur dont les pertes mécaniques (tribologie) et électriques sont en outre difficiles à évaluer.
Variation du flux, défluxage	La variation du flux d'un MCC est possible et simple pour un rotor bobiné, mais elle est impossible pour un rotor à aimants permanents (qui conduit pourtant aux meilleures performances massiques).
Refroidissement	Les pertes dans un MCC sont principalement localisées à l'induit qui est tournant, donc le refroidissement est difficile à effectuer (nécessité de joints tournants).
Robustesse	Le MCC est très bien connu car il a été très longtemps utilisé dans des applications de fort couple (laminoir, traction ferroviaire...) et il est encore très utilisé pour les accessoires automobiles et l'électronique de loisir donc sa construction est bien maîtrisée. Le système balais/collecteur produit cependant les poussières et les balais subissent une usure qui diminue la fiabilité de la machine et nécessite une maintenance régulière.

Coût	Le coût de l'ensemble convertisseur machine est favorable du fait de l'expérience industrielle, mais munie d'aimants permanents et du fait de la présence du système balais/collecteur, le coût de la machine est finalement plus élevé que celui d'une MAS ou d'une MRVDS par exemple.
Électronique de puissance et commande	Pour fonctionner dans les 4 quadrants du plan couple/vitesse, le MCC est alimenté par un hacheur de tension constitué d'un pont complet (4 interrupteurs). La commande est relativement simple et très bien maîtrisée aujourd'hui. Le dimensionnement du convertisseur sera plus favorable dans le cas d'une excitation réglable de façon à pouvoir atteindre des vitesses élevées à puissance constante par défluxage.

4.2.2. Moteur asynchrone (MAS) à cage

<i>Critère</i>	<i>Évaluation du critère pour le MAS à cage</i>
Couple	Le couple spécifique de la MAS à cage est limité par la saturation magnétique et les pertes rotoriques ; il est généralement plus faible que celui des machines synchrones, surtout lorsque ces dernières sont excitées par des aimants permanents.
Vitesse	La vitesse d'un MAS à cage peut être très élevée dans le cas d'un rotor à cage à encoches fermées, voire d'un rotor massif, car il n'y a aucun contact tournant et le rotor est mécaniquement 'homogène'. On peut atteindre des vitesses périphériques allant jusqu'à 300 m/s.
Rendement	Le rendement d'un MAS à cage est pénalisé par les pertes rotoriques. En effet, la création du couple nécessite l'existence de courants induits dans le rotor qui sont à l'origine de pertes rotoriques souvent importantes. De même la machine étant magnétisée par le stator, cela nécessite en permanence l'existence d'un courant statorique de magnétisation qui pénalise le facteur de puissance et le rendement.
Variation du flux, défluxage	Grâce au contrôle vectoriel, il est possible de contrôler avec précision le flux dans la MAS à cage au stator et au rotor et donc de fonctionner à puissance constante sur une grande plage de vitesse.
Refroidissement	Les pertes rotoriques (toujours présentes de par le principe de fonctionnement d'un MAS) sont délicates à évacuer car présentes au niveau d'une partie en rotation.
Robustesse	Le point délicat d'une MAS à cage se situe au niveau des barres de la cage d'écureuil (qui peuvent vibrer, s'échauffer, se casser, être l'origine de phénomène d'électroérosion...), mais il existe maintenant des méthodes éprouvées de diagnostic en ligne permettant de détecter les défauts et d'effectuer la maintenance de la machine.

Coût	En l'absence de matériaux coûteux et du fait de la standardisation de la fabrication, le coût de la MAS à cage peut être très compétitif (ce qui explique son utilisation très répandue dans les procédés industriels). Mais cet argument est à relativiser dans le cas de la réalisation d'un moteur-roue qui est une machine spéciale plutôt conçue en dehors des standards industriels.
Électronique de puissance et commande	L'électronique de puissance d'alimentation d'une MAS à cage est un onduleur de tension fonctionnant en MLI afin de contrôler les courants statoriques et par suite contrôler l'amplitude et la phase du flux dans la machine. Son coût est comparable à celui des onduleurs utilisés pour les machines synchrones, si ce n'est que le facteur de puissance étant souvent plus faible, cela induit un surdimensionnement en courant de interrupteurs.

4.2.3. Moteur synchrone à rotor bobiné (MSyRB)

Critère	Évaluation du critère pour le MSyRB
Couple	Le couple pouvant être produit par un MSyRB est limité par la saturation magnétique et les échauffements statoriques. Pour un volume donné, il est plus élevé que dans le cas de la machine asynchrone, mais plus faible que pour une machine synchrone excitée par des aimants permanents. Le système bague balais est par ailleurs encombrant et détériore donc le couple volumique.
Vitesse	La vitesse de rotation d'un MSyRB est limitée par le bobinage rotorique (surtout dans le cas de pôles saillants) et le contact tournant permettant l'alimentation de ce bobinage
Rendement	Le rendement d'un MSyRB est bon. À noter toutefois que les pertes Joule d'excitation peuvent être élevées pour une machine compacte. Le rendement est moins élevée à basse vitesse que pour une machine à aimants qui ne nécessite pas d'excitation, mais il peut devenir meilleur à haute vitesse car le défluxage de la machine à aimant peut nécessiter l'augmentation du courant statoriques alors qu'il suffit de réduire le courant d'excitation pour la machine à rotor bobiné.
Variation du flux, défluxage	Le flux d'un MSyRB est facilement réglable par action sur le courant d'excitation.
Refroidissement	Le refroidissement du rotor d'un MSyRB est complexe mais les pertes qui y existent ne sont pas très élevées sauf pour une machine très compacte.
Robustesse	La robustesse du MSyRB est limitée par le système bague/balais, mais la fiabilité est généralement bonne.

Coût	Le coût d'un MSyRB est plus élevé que pour la MAS à cage du fait du bobinage rotorique qui peut être complexe dans le cas d'une machine à rotor lisse.
Électronique de puissance et commande	Le MSyRB peut être alimenté par un onduleur de courant à thyristors qui est une solution simple et peu coûteuse, même s'il ne faut pas omettre la nécessité d'une inductance de lissage permettant la réalisation de la source de courant. Cette inductance elle-même peut être volumineuse et coûteuse. Le dimensionnement des composants de puissance est généralement optimal car le facteur de puissance est toujours proche de l'unité et le défluxage est réalisé par l'alimentation du rotor.

4.2.4. Moteur synchrone à aimants permanents (MSyAP)

Critère	Évaluation du critère pour le MSyAP
Couple	Le couple spécifique d'un MSyAP est très élevé, car on peut atteindre la même induction d'entrefer que dans une machine synchrone à rotor bobiné avec un volume rotorique plus faible, surtout dans le cas d'excitation par des aimants permanents à base de terres rares (Néodyme ou Samarium) et lorsque les aimants sont enterrés (grâce au couple de saillance). L'encombrement n'est pas pénalisé par un système de contacts tournants.
Vitesse	La vitesse de rotation d'un MSyAP est surtout limitée par la tenue mécanique des aimants, mais aussi les pertes magnétiques dans les tôles statoriques et les aimants permanents (si ceux-ci sont conducteurs). On peut atteindre des vitesses périphériques allant jusqu'à 200 m/s avec des aimants enterrés ou des aimants surfaciques frettés.
Rendement	Le rendement d'un MSyAP est bon du fait de la possibilité d'avoir une induction d'entrefer élevée, mais il peut-être pénalisé par la forme de l'induction qui peut avoir un contenu harmonique riche et par l'existence de pertes dans le rotor (aimants permanents et culasse) du fait de l'existence de courants de Foucault. Il peut aussi être pénalisé par la nécessité d'injecter dans la machine un courant statorique négatif dans l'axe d pour réduire le flux et accélérer la machine à puissance constante.
Variation du flux, défluxage	Le principal problème de la MSyAP réside dans le fait que le flux des aimants est fixé par la géométrie de la machine et la température. Le seul moyen de faire varier le flux est d'injecter un courant statorique produisant un flux en opposition de phase avec celui créé par le rotor : ce courant ne permet pas de produire du couple mais il permet de diminuer le flux créé par les aimants permanents. Ce courant supplémentaire peut être à l'origine de pertes Joule additionnelles. Ce point sera vu plus en détail dans le paragraphe 4.3.

Refroidissement	Le refroidissement d'un MSyAP est relativement simple car, si les pertes rotoriques sont maîtrisées, seul le stator doit être refroidi.
Robustesse	Le MSyAP est relativement robuste. Les seuls aspects à noter sont d'une part la tenue mécanique et en température des aimants permanents, et d'autre part les inductances généralement faibles qui peuvent provoquer des dv/dt importants lors d'alimentation par onduleurs de tension en MLI, ces dv/dt pouvant être à l'origine de courants de fuite détériorant les paliers ou de décharges partielles détériorant les bobinages. Mais cela peut aussi être le cas avec des MAS.
Coût	Le coût d'un MSyAP est l'autre point négatif des machines à aimants permanents. En effet, pour être vraiment performantes, ces machines doivent utiliser des aimants à base de terres rares (Néodyme ou Samarium). Or ces matériaux sont intrinsèquement onéreux. En outre leur production est quasiment exclusivement localisée en Chine qui depuis 2009 spéculait régulièrement sur ces matériaux en augmentant leur coût ou en limitant la quantité exportée.
Électronique de puissance et commande	L'électronique de puissance alimentant un MSyAP est un onduleur de tension contrôlé en courant par MLI comme pour la machine asynchrone. Le dimensionnement en courant est lié à la plage de défluxage possible et au facteur de puissance de la machine qui peut être mauvais lors du fonctionnement défluxé.

4.2.5. Moteur synchrone à réductance variable (MSyRV)

Critère	Évaluation du critère pour le MSyRV
Couple	Le couple spécifique d'un MSyRV est lié au facteur de saillance, c'est-à-dire au rapport de l'inductance dans l'axe direct L_d sur l'inductance dans l'axe transverse L_q . Plus ce rapport est important, plus le couple sera élevé. Or pour obtenir un rapport élevé, on a recouru à des rotors très particuliers (par exemple des rotors axialement laminés ou des rotors à barrières de flux) qui peuvent être difficiles et coûteux à réaliser. Il est donc difficile d'atteindre des couples spécifiques comparables aux MSyAP avec de telles machines.
Vitesse	La vitesse des MSyRV est limitée par la topologie du rotor. En effet pour obtenir un couple spécifique élevé, il faut avoir recouru à une machine constituée de plusieurs matériaux magnétiques et non magnétiques, ce qui a tendance à déséquilibrer la machine et à la rendre moins résistante aux forces d'inertie importantes à haute vitesse.

Rendement	Comme pour la MAS, le champ magnétique dans la MSyRV est créé par les courants statoriques, mais avec un bon rapport L_d/L_q , le courant nécessaire peut être faible et la machine est moins pénalisée que la MAS. Les pertes au rotor sont très faibles. Au total, le rendement peut être élevé.
Variation du flux, défluxage	Le flux dans la MSyRV est réglé par la phase du courant statorique comme pour la machine à aimants permanents. Là encore, la plage de défluxage sera d'autant plus grande que le rapport L_d/L_q sera élevé.
Refroidissement	Le refroidissement des machines à réductance est simple car les pertes sont très majoritairement localisée au stator.
Robustesse	La MSyRV est très robuste : le rotor est passif (pas de contacts tournants) et il est faiblement influencé par les paramètres d'environnement tels que la température. Notons toutefois que les rotors composites à fort L_d/L_q peuvent présenter des difficultés de tenue mécanique.
Coût	L'absence d'aimants, le rotor passif et le stator très classique conduisent à un coût de machine relativement limité. Mais il faut prendre en compte le coût de l'électronique de puissance qui, encore une fois, sera très lié au rapport L_d/L_q .
Électronique de puissance et commande	Une MSyRV est alimentée par un onduleur de tension contrôlé en courant comme une MASAP. Le dimensionnement en courant de l'onduleur est principalement influencé par le rapport L_d/L_q de la machine. Plus ce facteur est faible, plus grand sera courant absorbé par la machine, d'où le surdimensionnement du convertisseur (et le surcoût) et la diminution du rendement.

4.2.6. Moteur à réductance variable à double saillance (MRVDS)

Critère	Évaluation du critère pour le MRVDS
Couple	Les MRVDS ne fonctionnent pas comme les machines synchrones par interaction de champs tournants mais par attractions de dents (ou plots) magnétiques. Dans le cas de machines à grand nombre de dents, le couple spécifique peut être très élevé et voisin de celui obtenu avec des MSyAP.
Vitesse	Les MRVDS sont de bonnes candidates pour atteindre des vitesses de rotation élevées. Pour ces machines, la vitesse est principalement limitée par les pertes aérodynamiques et la résistance du rotor aux forces d'inertie. La vitesse périphérique peut atteindre jusqu'à 300 m/s.
Rendement	Si la MRVDS est saturée, le 'coût' énergétique de la magnétisation tend à s'annuler. Comme les pertes rotoriques sont très faibles, le rendement est donc plus élevé que celui d'une MAS et comparable voire supérieur à celui d'une MSyAP.

Variation du flux, défluxage	Le fonctionnement à puissance constante des MRVDS est plus complexe car ces moteurs ne sont pas alimentés par des courants sinusoïdaux (sous peine de perdre l'intérêt de ces machines en terme de couple spécifique). Le 'défluxage' est obtenu en décalant la démagnétisation des dents, mais il faut optimiser la forme des dents ainsi que la phase de démagnétisation pour augmenter la plage de vitesse en régime de défluxage sans développer un couple trop pulsatoire et sans pénaliser le rendement.
Refroidissement	Le refroidissement des MRVDS est simple car seul le stator est à l'origine de pertes importantes. Mais dans ce type de machine les bobinages sont concentrés (ce qui est un avantage en terme de coefficient de remplissage en cuivre) et la surface de contact fer/cuivre est plus faible ce qui augmente la résistance thermique entre les bobines et le circuit magnétique statorique et par conséquent la température du cuivre pour des pertes données.
Robustesse	La MRVDS est de construction très simple (surtout en l'absence d'excitation par des aimants permanents) et la fiabilité est très bonne. Le seul problème concerne les variations des forces magnétiques existantes au niveau des dents rotoriques et statoriques. Pour obtenir un couple moyen élevé, il est nécessaire de disposer de forces tangentielles importantes. Or les forces tangentielles importantes vont inévitablement s'accompagner également de forces normales intenses. Les variations de ces forces peuvent être à l'origine de vibrations et de bruit acoustique.
Coût	La construction simple et l'absence d'aimants permettent de limiter le coût de la machine, même si, en comparaison avec la MSyAP, la présence d'aimants de bonne qualité permet par ailleurs de réduire la quantité de fer et de cuivre.
Électronique de puissance et commande	Chaque phase est indépendante et elles est alimentée par un demi-pont asymétrique. Au total, le nombre de composant ne change pas mais la structure n'est pas très commune et elle n'est pas intégrée dans des modules industriels. Si la machine est optimisée ('bien saturée') le dimensionnement des composants semi-conducteurs peut être plus bas que celui d'une MSyAP défluxable.

4.2.7. Synthèse de la comparaison des machines électriques

Le moteur à courant continu est principalement pénalisé par le système balais/collecteur que ce soit au niveau de l'encombrement, de la fiabilité ou du rendement. Le moteur asynchrone est de construction simple, il est relativement économique mais il est trop limité en couple spécifique et en rendement pour être un bon candidat pour l'intégration dans une roue. Le moteur synchrone à rotor bobiné présente de bonnes qualités en terme de couple spécifique, mais le système bague/balais ne favorise pas l'intégration dans une roue à cause de l'encombrement et du refroidissement du rotor. Les deux moteurs les plus favorables sont donc le moteur synchrone à réluctance variable et le moteur synchrone à aimants permanents. Nous verrons dans la prochaine partie que la machine la plus utilisée est la machine synchrone à aimants permanents, du fait de ses performances inégalées en terme de couple spécifique et de rendement et ce malgré le coût élevé lié aux aimants.

4.3. Optimisation de l'ensemble machine et convertisseur statique

Comme nous l'avons évoqué dans le précédent paragraphe et comme nous le verrons dans la partie suivante, la machine synchrone à aimant permanents est la machine la plus utilisée dans la réalisation des moteurs-roues. Nous allons donc nous intéresser maintenant dans cette partie aux contraintes liées au convertisseur statique pour l'alimentation de cette machine.

Le convertisseur statique utilisé pour l'alimentation des machines synchrones à aimants permanents est l'onduleur de tension. Pour contrôler le couple de la machine, l'onduleur est commandé en MLI (Modulation de Largeur d'Impulsion) de façon à contrôler la forme des courants statoriques (amplitude et phase pour un courant sinusoïdal). Pour atteindre les fréquences de rotation les plus élevées, il est également possible de ne plus contrôler que la phase des tensions statoriques (fonctionnement en pleine onde).

L'onduleur de tension est principalement constitué de deux parties. La première correspond aux interrupteurs de puissance. Leur type (IGBT, MOS...) et leur nombre dépend de la structure du convertisseur, des calibres de tension et de courant, des fréquences de travail... Nous nous limiterons ici à la structure la plus classique contenant six interrupteurs montés en pont de Graëtz. Les deux principaux critères de dimensionnement qui vont permettre de choisir le calibre des interrupteurs (en fait la quantité de silicium) sont la tension maximale à tenir à l'état bloqué et le courant maximal à commuter pour chaque interrupteur.

Pour l'onduleur deux niveaux à six transistors, la tension maximale à tenir à l'état bloquée est simplement égale à la tension du bus continu. Quant au courant maximal à commuter, il est défini par le courant maximal qui circule dans les phases de la machine à aimants et par le déphasage du fondamental du courant par rapport au fondamental de la tension (le facteur de puissance en régime sinusoïdal). Or ce courant est essentiellement lié au nombre de spires N_s dans les bobines statoriques de la machine. En effet, le couple maximal produit par la machine est proportionnel à la force magnétomotrice sous un pôle (cf. équation (1)), qui est elle-même proportionnelle au produit du nombre de spires N_s et du courant efficace (dans le cas d'une machine à répartition du champ sinusoïdal). Pour fournir un certain couple tout en minimisant le courant efficace, il convient alors d'augmenter le nombre de spires. Mais dans ce cas, en appliquant la pleine tension et en maintenant le courant en phase avec la force électromotrice, la vitesse maximale peut ne pas être atteinte. La solution évidente est de diminuer le nombre de spire pour pouvoir augmenter la vitesse, mais alors le courant pour produire le couple maximal augmente et provoque un surdimensionnement en courant des interrupteurs de puissance (et également des câbles et des connecteurs par la même occasion). La solution est alors de réduire le flux créé par les aimants en appliquant un courant qui créé un champ en opposition de phase avec le champ produit dans les aimants (défluxage). Lorsque la pleine tension est atteinte, la vitesse est alors augmentée en déphasant le courant par rapport à la force électromotrice (application d'un courant négatif dans l'axe d). Cette technique permet d'augmenter la vitesse simplement tout en ayant un nombre de spires élevé (donc un courant de phase limité), mais elle n'est vraiment efficace que si la réduction du flux ne nécessite pas d'appliquer un courant dans l'axe d trop intense, car cela induirait des pertes Joule additionnelles trop importantes. Pour cela il est nécessaire de posséder des machines dont l'inductance dans l'axe d est importante. De ce point de vue, les machines à aimants enterrés et à concentration de flux sont ainsi plus intéressantes que les machines à aimants déposées en surface ; on dit que ces machines sont défluxables. L'utilisation de machine à double excitation est aussi une solution intéressante : le flux maximal est produit par les aimants et un bobinage additionnel permet de réduire le flux. Mais il faut reconnaître que les machines avec aimants montés en surface – surtout dans le cas d'une attaque directe – sont plus simples à intégrer dans une jante : on peut utiliser une structure inversée avec le rotor extérieur et déposer directement la jante sur le rotor. En résumé, le dimensionnement des interrupteurs de puissance d'un onduleur de tension alimentant une MSyAP résulte

principalement d'un compromis au niveau du choix du nombre de spires : ce nombre de spires doit être le plus grand possible pour minimiser le courant statorique à commuter pour produire le couple maximal et il ne doit pas être trop élevé pour ne pas induire trop de pertes Joule à vitesse élevée du fait de l'existence du courant (négatif dans l'axe d) permettant de défluxage.

La deuxième partie de l'onduleur de tension qu'il faut dimensionner est le filtre d'entrée permettant la stabilisation de la tension du bus continu et le lissage du courant absorbé sur le bus continu. Ce filtrage est généralement réalisé par un filtre LC : le condensateur stabilise la tension qui est commutée par l'onduleur et la bobine du condensateur lisse le courant. Le lissage du courant est d'autant plus important si ce courant est débité par une batterie car les variations importantes du courant de batterie peuvent accélérer son vieillissement. Dans le cas d'une machine à répartition de champ sinusoïdale, le courant absorbé sur le bus continu sera d'autant plus ondulé que le déphasage du courant par rapport à la tension sera important. Ainsi, si on souhaite effectuer un défluxage important de la machine, il sera nécessaire de dimensionner correctement le filtre en tête du convertisseur.

5. Quelques exemples de moteurs-roues

Dans cette partie nous présentons maintenant quelques exemples de moteurs-roues. Nous nous limitons préférentiellement à des exemples récents et à des moteurs-roues qui ont été réellement montés sur des véhicules prouvant ainsi leur fonctionnalité.

5.1. Le moteur-roue : une idée ancienne

Il convient tout d'abord de rappeler que le moteur-roue électrique n'est pas une idée neuve. Nous trouvons la première trace dans un brevet américain de 1884 (cf. **Figure 11**). En 1898, Ferdinand Porsche développa un véhicule hybride à moteurs électriques intégrés dans les quatre roues (cf. **Figure 12**). La Lohner-Porsche possède à la fois un moteur thermique et des moteurs électriques alimentés en énergie électrique par une batterie. Ces deux exemples montrent que l'idée d'intégrer un moteur dans une roue a plus d'un siècle et est apparu pratiquement en même temps que les premiers moteurs électriques produits industriellement et en même temps que les premiers développements des véhicules à quatre roues motorisées.

(No Model)
 W. ADAMS.
 ELECTRIC MOTOR.
 No. 300,827.
 Patented June 24, 1884.

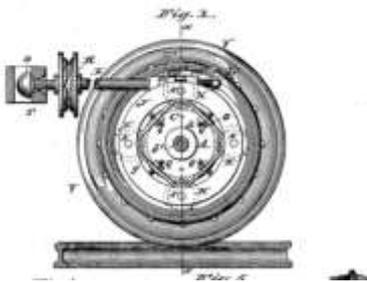


Figure 11 : Moteur-roue du brevet de W. Adams

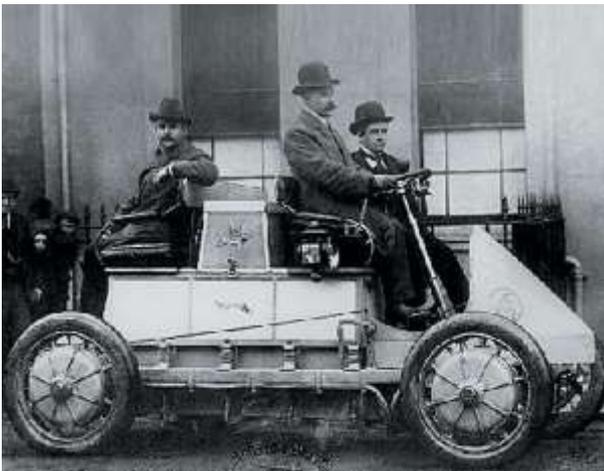


Figure 12 : Moteur-roue de la Lohner-Porsche hybride 1898



Figure 13 : Moteur-roue et vélo électrique de Wavecrest Laboratories

5.2. Des applications dans les véhicules à deux roues

Les véhicules à moteur-roue les plus répandus sont sans aucun doute les véhicules à deux roues, au premier rang desquels le vélo électrique. En effet, le développement à grande échelle (très grande échelle en Chine) du vélo à assistance électrique s'est accompagné du développement de moteurs électriques intégrés dans la roue de ces vélos. Des développements moins nombreux ont également vu le jour pour la motorisation de scooters ou de motos électriques, principalement en Chine également.

Dans ce paragraphe nous présentons deux exemples de moteurs-roues pour véhicules à deux-roues. Le premier exemple concerne le moteur développé en 2005 par Wavecrest Laboratories pour l'armée américaine, puis installé sur des vélos à destination du grand public (toutefois plutôt haut de gamme) [vi]. Ce moteur équipe les roues avant et arrière d'un vélo (cf. **Figure 13**). Il s'agit d'un moteur synchrone à aimants permanents montés en surface et à bobinages dentaires, monté dans la roue en attaque directe. Le constructeur annonce une puissance maximale de 750 à 1000 W et un couple maximal de 80 N.m pour un refroidissement par convection naturelle et une alimentation par un bus continu de 36 V. La masse n'est pas connue avec précision, mais en 2010, ces performances font de ce moteur le plus puissant sur le marché des vélo électriques.

Nous citons également un deuxième exemple de moteur-roue utilisé dans des véhicules à deux roues. Il s'agit du moteur-roue développé par Ez-Wheel [vii]. La société française Ez-wheel, créée en 2010, s'est spécialisée dans le développement de moteurs-roues électriques pour tout type de véhicule (scooters, vélos, triporteurs, brouettes, lits médicalisés...) Le constructeur donne des informations pour un moteur-roue de 10'' destiné à de la manutention. La technologie du moteur est de type synchrone à aimants permanents, sans plus d'informations sur la disposition des aimants ou le type de bobinage. Le couple maximal vaut 70 N.m, la puissance en régime S1 vaut 180 W et la vitesse de rotation maximale vaut 100 tr/min (7 km/h). Le moteur intègre un réducteur de rapport voisin de 3 et la masse totale de la roue (moteur, réducteur et jante) vaut 10 kg. La température de fonctionnement est comprise entre -20 et +60°C. La particularité des développements de cette société est de fournir une solution clef en main de traction électrique à base de moteur-roue : le constructeur fournit la roue électrique, mais également une batterie et une interface de pilotage du moteur sans fil.



Figure 14 : Moteur-roue Ez-Wheel

5.3. Les moteurs-roues de la société TM4

Nous présentons dans ce paragraphe les moteurs-roues de la société TM4 [viii]. Cette société est historique sur le marché des moteurs-roues. En effet, TM4 a été créée pour poursuivre les travaux initiés par Pierre Couture au sein d'Hydro Quebec sur le moteur-roue dans les années 1980. Aujourd'hui TM4 développe des solutions pour véhicules électriques et hybrides, mais aussi pour la production d'énergie (éoliennes et groupes électrogènes).

La **Figure 15** présente le moteur-roue développé dans les années 1990. Il s'agit d'une structure synchrone triphasée à attaque directe, à aimants montés en surface et à bobinages répartis (cf. **Figure 15**). Cette structure convient très bien à l'intégration directe dans la roue. Elle a toutefois été abandonnée au profit d'une structure de type 'moteur hub' (cf. **Figure 16**). TM4 donne en référence le véhicule Citroën C-Métisse (cf. **Figure 17**). Il s'agit d'un 'véhicule hybride doté d'un système de motorisation diesel hybride qui combine un moteur à combustion à l'avant, couplé avec deux moteurs-roues électriques TM4 à attaque directe dans les roues arrière du véhicule'. Pour ce véhicule, les performances indiqués par le constructeur sont les suivantes (pour chaque roue) :

- puissance en continu : 15 kW ;
- couple maximal : 300 N.m ;
- vitesse maximale : 1900 tr/min ;
- refroidissement par liquide.

Au niveau technologique, le rotor est extérieur pour maximiser le rayon d'entrefer et donc le couple spécifique. Les aimants sont montés en surface et leurs formes sont optimisées pour minimiser le couple de détente. Le bobinage réparti utilise du fil méplat permettant de maximiser le remplissage et l'évacuation de la chaleur, autorisant ainsi une densité de courant plus importante qu'avec du fil rond. La forme des tôles statoriques utilisant des encoches rectangulaires non fermées permet de faciliter la réalisation du stator.

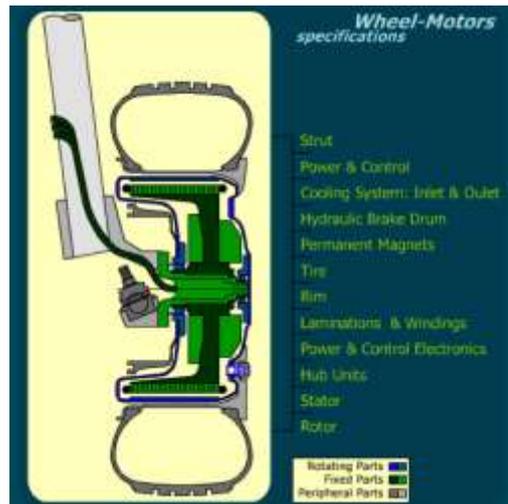


Figure 15 : Moteur-roue TM4 développé dans les années 1990

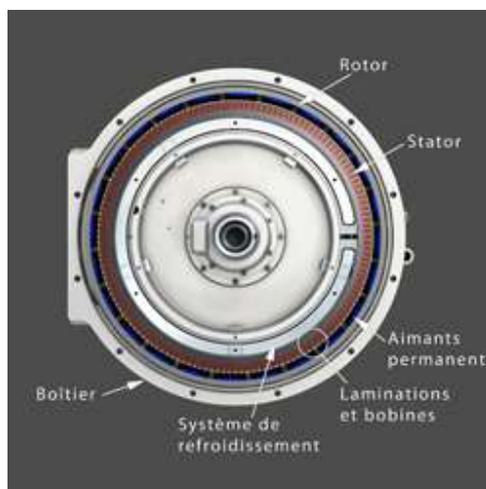


Figure 16 : Moteur hub TM4 développé dans les années 2000



Figure 17 : Citroën C-Métisse équipés de deux moteurs-roues TM4 sur l'essieu arrière

5.4. Les moteurs-roues de la société Magnet Motors

Un autre acteur important des moteurs-roues est la société allemande Magnet Motors [ix]. Cette société développe des moteurs-roues depuis les années 1980 et a intégré des moteurs dans de nombreux véhicules, surtout dans des véhicules lourds militaires ou civils. Le **Figure 18** présente la technologie développée dans les années 1990. Il s'agissait d'une technologie très proche de celle développée dans les mêmes années par TM4 : moteur synchrone à rotor extérieur et aimants montés en surface. Le bobinage, quant à lui, est de type dentaire. Aujourd'hui les moteurs proposés par Magnet Motors sont à rotor intérieur et intègre un réducteur planétaire pour optimiser l'encombrement du moteur-roue. Le **Tableau 1** précise les caractéristiques de deux motoréducteurs pour intégration dans une roue. Notons que le refroidissement est effectué par conversion forcée avec un liquide de type eau glycolée (50%-50%). Les deux moteurs triphasés sont dimensionnés pour être alimentés sous 800 V max. Le fonctionnement autorise un fonctionnement avec une surpuissance d'environ 25% par rapport à la puissance continue (150 kW au lieu de 120 kW pour le moteur M69 par exemple).

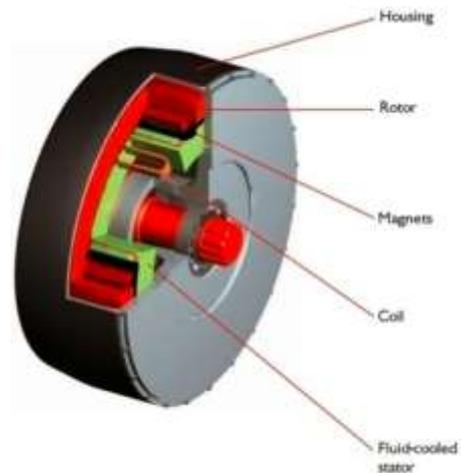


Figure 18 : Moteur-roue Magnet Motors développé dans les années 1990

Tableau 1 : Exemples de caractéristiques de moteurs-roues produit par Magnet Motors

Caractéristique	Moteur M69	Moteur M70
Illustration		
Puissance continue (kW)	120	50
Couple maximal (N.m)	2130	1050
Vitesse de rotation maximale (tr/min)	3210	2200
Dimensions	Ø 478mm x 180 mm	Ø 437mm x 134 mm
Masse du moteur-roue (kg)	90	34
Type de refroidissement	liquide	liquide

5.5. L'Active-Wheel de Michelin

Nous consacrons maintenant un paragraphe à l'Active-Wheel de Michelin. Il s'agit d'une roue électrique intégrant non seulement un moteur de propulsion très compact mais également une suspension électrique et un système de freinage permettant de fournir une solution complète de propulsion électrique intégrée dans une roue (cf. **Figure 19**) ; seul le convertisseur est 'délocalisé'.

Contrairement à TM4 et Magnet Motors, Michelin a choisi de concevoir un moteur très rapide avec un fort rapport de réduction, permettant de converger vers une solution extrêmement compacte. Les caractéristiques techniques de la machine de traction sont les suivantes :

- machine à aimants permanents à rotor intérieur à concentration de flux ;
- puissance continue : 30 kW ;
- vitesse de rotation maximale : 18 000 tr/min ;
- fréquence d'alimentation à la vitesse maximale : 900 Hz ;
- masse totale de la machine électrique seule : 5,8 kg ;
- refroidissement : convection forcée à eau.

Plusieurs brevets [x] ont été déposés par Michelin concernant la construction de la machine électrique. Ces brevets permettent de disposer de plus d'informations sur la technologie de la machine. Le **Figure 20** présente le stator de la machine : le bobinage est réalisé par le 'fond' de l'encoche, ces dernières étant fermées. L'ensemble constitué des 18 dents et des bobinages triphasés est ensuite assemblé sur la culasse statorique permettant un bobinage plus aisé et un assemblage plus simple. De façon à améliorer le transfert thermique dans

le stator, ce dernier est imprégné avec une résine particulière constituée de résine époxy chargée (farine de silice, alumine). Le rotor est présenté **Figure 21**. Il est constitué de 6 pôles et les aimants sont enterrés et aimanté tangentiellement de façon à réaliser une concentration de flux. Des cales métalliques (probablement non magnétiques) permettent la tenue des aimants et les pôles sont réalisés en tôles magnétiques solidarisiées par des tirants. Cette technologie est plus simple à réaliser au niveau de la disposition des aimants dans le circuit magnétique rotorique car il n'est plus nécessaire de coller les aimants. Ceci étant, l'assemblage des pôles feuilletés et des aimants en une pièce pouvant tenir la vitesse de rotation de 18000 tr/min présente d'autres difficultés en terme d'équilibrage et de tenu mécanique. Les aimants enterrés de cette manière conduisent à un fort effet de saillance qui permet de réduire la quantité de silicium du convertisseur (augmentation de la plage de défluxage), de bénéficier d'une induction élevée dans l'entrefer et d'un couple de saillance marqué. L'ensemble de ces avantages a permis la réalisation d'une machine ayant une densité spécifique de puissance supérieure à 5 kW/kg. La **Figure 22** présente deux véhicules équipés de l'Active-Wheel. Il s'agit d'une part d'un véhicule de sport (la Venturi Volage) et d'un véhicule urbain (Heuliez WILL), montrant la diversité des applications possibles, exploitant les performances importantes du moteur-roue et/ou la compacité extrême de la fonction motrice.

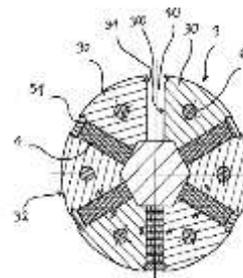


Figure 21 : Rotor de l'Active Wheel de Michelin



(a)



(b)

Figure 22 : Exemple de véhicule équipés de l'Active-Wheel e Michelin : (a) Venturi Volage (véhicule de sport) – (b) Heuliez WILL (véhicule urbain)



Figure 19 : Active Wheel de Michelin

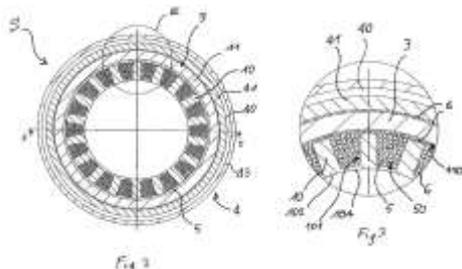


Figure 20 : Stator de l'Active Wheel de Michelin

5.6. Les moteurs-roues de la société Novelté Système

Nous terminons cette revue d'exemples de moteurs-roues par les réalisations de la société Novelté Système (anciennement Technicréa). Les développements ont toujours été réalisés en étroite collaboration avec le département ENISYS de l'Institut FEMTO-ST (anciennement l'Institut de Génie Énergétique, puis le Laboratoire d'Électronique, Électrotechnique et Systèmes).

La société Novelté a développé à la fin des années 1990 un vélo électrique et le moteur-roue spécifique à attaque directe associé (cf. **Figure 23**). Il s'agit d'un moteur synchrone à aimants permanents à 26 pôles (pour maximiser le couple spécifique). Sa puissance nominale vaut 250 W, sa vitesse de rotation maximale vaut 250 tr/min (35 km/h) et il est capable de produire

un couple maximal de 30 N.m. Le rotor est extérieur et possède des aimants montés en surface. La machine est à bobinages répartis à une encoche par pôle et par phase, produisant des forces électromotrices trapézoïdales. De façon à exploiter au mieux les harmoniques de la fém, la machine est alimentée par des quasi-créneaux de courant. La tension d'alimentation est de 36 V et l'électronique de puissance est intégrée au centre du stator. Le moteur est refroidi par convection naturelle grâce à un système de picots disposés sur les flasques du rotor et du stator qui permettent un brassage de l'air lors de la rotation du moteur. La masse totale de la roue est inférieure à 10 kg.



Figure 23 : Vélo électrique développé par Novelte et moteur-roue spécifique développé en collaboration avec l'Institut FEMTO-ST

Tableau 2 : Caractéristiques de deux moteurs-roues pour applications militaires développés par Novelte Système et l'Institut FEMTO-ST

Caractéristique	Moteur A	Moteur B
Illustration		
Taille de la roue	22,5''	27''
Réducteur	Attaque directe	Réducteur de rapport 3.75
Puissance continue (kW)	30	45
Puissance maximale (kW)	60	100
Couple maximal à la roue mesuré (kN.m)	6 pendant 60s	22 pendant 20s
Vitesse de rotation maximale (tr/min)	400	435
Tension du bus continu (V)	540 à 600	540 à 800
Masse moteur-roue complet (kg)	150	300
Type de refroidissement	Eau glycolée	Eau glycolée

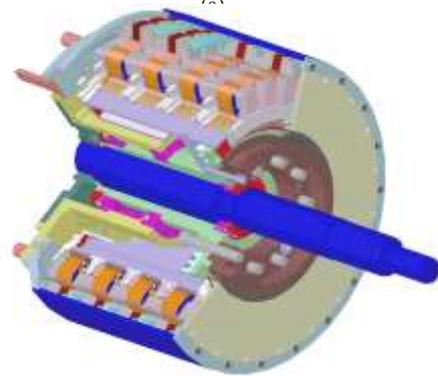


Figure 24 : Moteur-roue Novelte/FEMTO à réluctance excitée et à rebouclage transversal de flux : (a) prototype de 2 kW, (b) dessin CAO d'un prototype de 30 kW

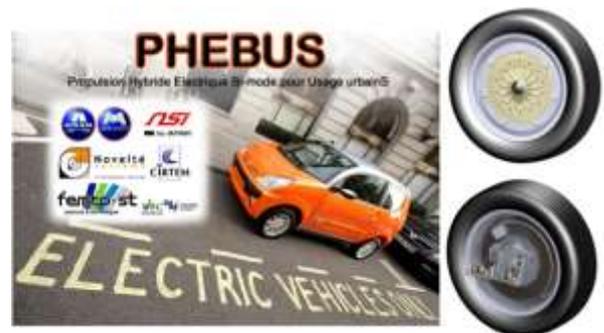


Figure 25 : Moteur-roue Novelte/FEMTO pour le projet PHEBUS

Sur la base de la même technologie, Novelte et FEMTO-ST ont également conçu des moteurs-roues pour des véhicules lourds dans le cadre de contrats avec la DGA. Le Tableau 2 précise les caractéristiques de deux moteurs-roues prototypes réalisés et testés. À notre connaissance le moteur-roue B est le moteur intégré dans une roue produisant le plus fort couple à l'échelle mondiale.

Novelte et FEMTO-ST ont aussi développé un moteur-roue sur la base d'une autre technologie. Il s'agit d'un moteur à réluctance variable excitée à effet Vernier et rebouclage transversal du flux. Le rotor est extérieur. Le moteur-roue (dans une jante de 22,5'') est à attaque directe, la puissance en régime S1 vaut 30 kW et la

vitesse maximale vaut 400 tr/min. Le couple maximal que le moteur est capable de fournir est de 3200 N.m pendant 60s. Le moteur est constitué de circuits magnétiques en forme de U – également dénommés ‘arceaux’ – disposés de telle sorte que la base du U soit dans la direction axiale et que les deux ‘jambes’ soient dans la direction radiale. Les U statoriques sont bobinés et les U rotoriques sont excités par des aimants permanents. Pour un cahier des charges comparable au moteur A du **Tableau 2**, l’effet de la saturation magnétique qui provoque des flux de fuite entre les arceaux rotoriques et statoriques limite le couple maximal à 3200 N.m au lieu de 6000 N.m pendant la même durée de 60s. Le refroidissement est du même type dans le deux cas (convection forcée avec eau glycolée).

Enfin, plus récemment, Novelte et FEMTO-ST ont développé un moteur-roue pour véhicule hybride urbain dans le cadre du projet PHEBUS (cf. **Figure 25**). Ce moteur est toujours de type synchrone à aimants montés en surface et rotor extérieur, mais il utilise un bobinage autour des dents au stator [iii]. Le rotor contient 34 aimants et le stator 36 dents. Le bobinage est triphasé et toutes les dents sont bobinées (deux bobines par encoche). Cela permet de réduire le couple de détente très fortement et, avec l’ouverture d’encoche choisie, cela permet également d’obtenir des forces électromotrices très sinusoïdales. Le moteur, intégré dans une jante de 15”, a une puissance continue de 1,5 kW, une puissance maximale de 4,5 kW, il produit un couple maximal de 240 N.m en attaque directe pendant 12s et il peut atteindre la vitesse de rotation de 600 tr/min. Le refroidissement se fait par convection naturelle et la tension du bus continu du véhicule est de 200 V. Enfin, le frein à tambour est complètement intégré au moteur-roue. La masse totale des parties actives de la machine électrique est de 8 kg et la masse additionnelle de la roue due à sa motorisation est de 12 kg, sachant que l’électronique de puissance n’y est pas intégrée. Le rendement prévu par la simulation au régime S1 est supérieur à 95%.

6. Conclusions

Dans cet article, nous avons décrit le concept de traction électrique utilisant un moteur électrique intégré dans la roue plus couramment appelé moteur-roue électrique ou roue électrique. Nous avons pu voir que cette solution permet une forte intégration de la fonction motrice, libérant ainsi le véhicule des organes de transmission mécanique. Parfois le frein ou l’électronique de puissance sont également intégrés. Michelin, avec son Active-Wheel, a poussé le

raisonnement encore plus loin en intégrant un système de suspension électrique.

Nous avons également montré les deux limites principales du moteur-roue. Premièrement le fractionnement de la motorisation, en comparaison avec une solution mono-moteur, conduit soit à une masse plus grande à rendement équivalent, soit à une baisse du rendement à masse équivalente. Cela oblige à une optimisation soignée du compromis masse-rendement pour ne pas pénaliser les performances d’un véhicule équipé de moteurs-roues. La masse doit être également minimisée pour limiter les masses non suspendues afin de ne pas détériorer le comportement routier du véhicule. L’autre défaut est la vulnérabilité de la fonction motrice qui est entièrement placée dans la roue. Or cette dernière est peu protégée contre d’éventuels chocs et contre les pollutions extérieures.

L’analyse des motorisations possibles et des principales solutions existantes a montré la très forte prédominance des moteurs à aimants permanents, même si théoriquement la machine à réluctance variable pourrait également se positionner favorablement tout en étant plus économe. La prédominance du moteur à aimant est essentiellement due au fait que c’est la machine qui permet le meilleur compromis rendement, masse et couple spécifique. Les structures à aimants déposés en surface sont plus simples à intégrer dans une roue (c’est la solution observée en grande majorité dans les machines existantes), mais pourtant les rotors à aimants insérés permettent un meilleur dimensionnement du convertisseur statique et un couple spécifique encore meilleur.

En conclusion, le moteur-roue est une solution innovante et bien adaptée à des certains types de véhicules : les deux roues tout électriques, les véhicules lourds (militaires ou civils) et les véhicules urbains hybrides électriques à architecture simplifiée utilisant un couplage par la route des puissances électriques et thermiques. Le coût, la vulnérabilité du dispositif et la modification importante de l’architecture du véhicule ne permet toutefois pas d’envisager aujourd’hui une telle solution pour la voiture routière traditionnelle.

7. Remerciements

Je remercie Bernard Multon, professeur à l’École Normale Supérieure de Cachan (Antenne de Rennes) pour les discussions intéressantes menées pendant la rédaction de cet article, en particulier sur les machines à réluctance variables (qu’elles soient synchrones ou à double saillance).

8. Références

-
- [i] Revue Générale de l'Électricité, Dossier spécial sur le véhicule électrique, n°10/93, novembre 1993.
- [ii] B. Multon, 'Motorisation des véhicules électriques', Techniques de l'Ingénieur, Référence E3996, Février 2001.
- [iii] H.C.M. Mai, F. Charih, F. Dubas, D. Chamagne, C. Espanet, 'Comparaison de deux types de bobinage d'une MSYAP pour la propulsion d'un véhicule hybride urbain', Électrotechnique du Futur, Compiègne, 24-25 Septembre 2009.
- [iv] C. Espanet, 'Modélisation et conception optimale de moteurs sans balais à structure inversée – Application au moteur-roue', Thèse de doctorat de l'Université de Franche-Comté, Janvier 1999.
- [v] Z. Q. Zhu, D. Howe, 'Electrical Machines and Drives for Electric, Hybrid, and Fuel Cell Vehicles', Proceedings of the IEEE, Vol. 95, No. 4, April 2007, pp. 746-765
- [vi] <http://www.wavecrestlabs.com/> (lien valide au 01/01/2011).
- [vii] <http://ez-wheel.com/fr/> (lien valide au 01/01/2011).
- [viii] <http://www.tm4.com/> (lien valide au 01/01/2011).
- [ix] www.magnet-motor.com/ (lien valide au 01/01/2011).
- [x] Références des brevets portant sur la technologie de l'Active-Wheel de Michelin : FR2898836A1A1, EP1901416A2, EP1359657A1, WO0235685A1, EP1756929A1

La nouvelle alimentation pulsée de 60MW à 0.5Hz pour le Synchrotron à protons du CERN : un système totalement statique avec stockage d'énergie par condensateurs

Jean-Paul BURNET

CERN, Organisation européenne pour la recherche nucléaire, 1211 Genève, Suisse

Résumé : Le Synchrotron à proton (PS) du CERN est un accélérateur de particules mis en service en 1959. Aujourd'hui, il est plus que jamais un élément essentiel de la chaîne des accélérateurs du CERN. Il reçoit les protons d'un pré-accélérateur à une énergie de 1.4GeV et il les accélère jusqu'à 25GeV. Les cycles d'accélération durent 1.2 ou 2.4 secondes et s'enchaînent les uns à la suite des autres, 5000 heures par an. Cent-un aimants sont répartis sur les six cents mètres de circonférence de la machine et créent un champ magnétique qui permet de conserver les protons sur la trajectoire circulaire de la machine. Ils sont tous connectés en série et alimentés par un seul convertisseur de puissance. En réalité, ce convertisseur est un système de puissance complexe comprenant un groupe tournant de 90MVA. Ce groupe est en service depuis 1968 et après plus de 200 millions de cycles, montre des signes de fatigue. Une nouvelle alimentation prendra bientôt la relève. La solution retenue est une solution innovante qui est basée sur des convertisseurs statiques associés à des bancs de condensateurs comme réservoir d'énergie locale. Cette nouvelle technologie a été développée par le CERN et réalisée par l'entreprise CONVERTEAM.

1. Introduction aux accélérateurs de particules du CERN

Le CERN (organisation européenne pour la recherche nucléaire) a été créé en 1954 par quelques scientifiques et hommes politiques, notamment par le prix Nobel français Louis de Broglie, qui avait imaginé un laboratoire européen de physique atomique. Un tel Laboratoire permettrait non seulement d'unir les scientifiques européens, mais également de faire face aux coûts croissants des installations de physique nucléaire. Le terme nucléaire est resté employé mais en réalité le CERN est le plus grand laboratoire de physique des particules au monde. L'étude de la fission nucléaire à des fins militaires ou civiles n'a jamais fait partie de sa mission. En 1959, le CERN a démarré son premier grand accélérateur de particules ; le Synchrotron à protons (PS). Aujourd'hui encore, et bien que son rôle ait changé, le PS continue de distribuer des particules pour des expériences mais surtout pour les deux grands accélérateurs du CERN ; le SPS (Super Synchrotron à protons) et le LHC (le grand collisionneur de hadrons). Il est désormais l'accélérateur le plus polyvalent au monde et l'intensité de ses faisceaux a été multipliée par mille par rapport à ses paramètres d'origine. La figure 1 montre la chaîne d'accélérateur du CERN. Les protons partent de la source du LINAC2, puis parcourent le BOOSTER, le PS et le SPS avant d'être finalement injectés dans le LHC.

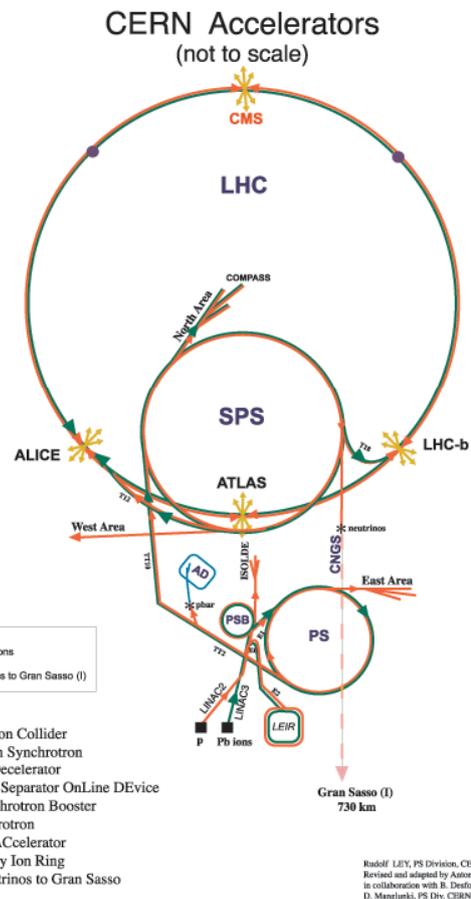


Figure 1: le complexe des accélérateurs du CERN

2. Introduction à l'accélérateur PS

Dans un synchrotron, c'est la radiofréquence qui augmente l'énergie des particules mais pour conserver les particules sur la même trajectoire, il faut augmenter le champ magnétique des aimants proportionnellement à l'énergie des particules. Le PS est donc composé de 101 électro-aimants principaux répartis sur les 600m de circonférence de la machine. Ces aimants créent un champ magnétique dipolaire vertical qui permet de conserver les protons sur la trajectoire circulaire de la machine. Pour être sûr que tous les aimants créent un champ magnétique identique et pour réduire le coût du câblage, tous les aimants sont connectés en série. Les aimants principaux du PS représentent une charge totale de 0.9Henry et 0.3Ω.



Figure 2 : l'accélérateur PS avec au centre un aimant principal et la chambre à vide où circule le faisceau

Le PS reçoit du BOOSTER les particules à 1.4GeV et les accélère jusqu'à 25GeV. Les cycles d'accélération durent 1.2s pour les cycles jusqu'à 20GeV et 2.4s pour les cycles plus lourds. Les cycles s'enchaînent les uns à la suite des autres, 24 heures sur 24, 8 mois par année. Le PS effectue entre 5 à 7 millions de cycles par an.

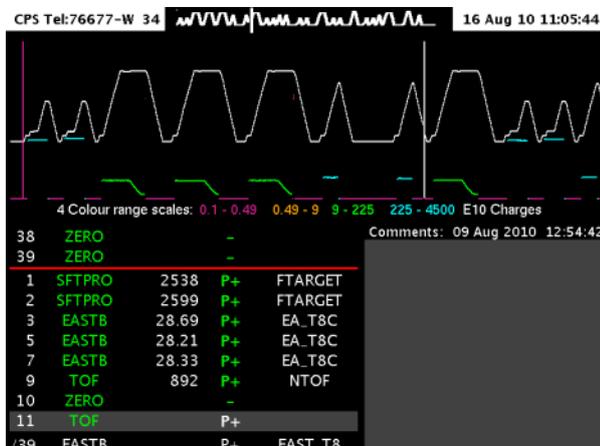


Figure 3 : Les cycles pulsés du PS. Visualisation du courant des aimants avec un temps maximum de 2.4s par cycle et un courant maximum de 5.5kA

3. Introduction à l'alimentation principale du PS

L'alimentation principale du PS doit fournir 45MW pendant la montée du courant, 10MW durant le plateau et récupérer -40MW lors de la descente du courant. Comme il n'était pas possible de connecter une charge pulsée d'une aussi grande puissance sur le réseau électrique, la solution retenue en 1957 (et maintenue en 1968 lors d'un programme de modernisation) a été d'utiliser un groupe tournant (association d'un moteur et d'un générateur) avec volant d'inertie. L'alimentation principale actuelle est en opération depuis 1968. Elle comprend un ensemble moteur-générateur, voir figure 4.



Figure 4 : Le groupe tournant du PS. Le générateur à gauche, le moteur à droite.

Le volant d'inertie n'est pas séparé, il est réalisé par construction avec des rotors les plus lourds possibles. Le moteur de 6 MW est connecté au réseau électrique 18kV et entraîne à 1025tr/min le rotor de 80 tonnes du générateur. Il s'agit d'une machine asynchrone à rotor bobiné, que l'on qualifierait aujourd'hui de machine à double alimentation puisque le bobinage rotorique est alimenté par un convertisseur statique (cycloconvertisseur à thyristors) complètement réversible et autorisant des fonctionnements hypo et hypersynchrone. Le générateur de 90MVA crée un réseau 6kV qui alimente les 4 transformateurs 12MVA des redresseurs à thyristor qui eux, alimentent en courant continu les aimants, voir figure 5.

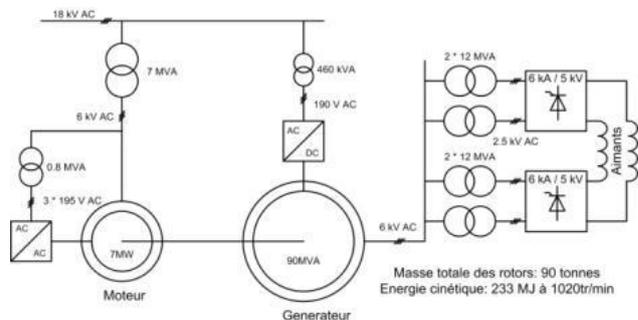


Figure 5 : L'alimentation principale du PS par groupe tournant depuis 1968

La tension maximale appliquée aux aimants est de $\pm 9\text{kV}$ et le courant maximum des aimants est de 5.5kA , voir figure 6. L'énergie cinétique stockée dans les rotors du groupe est de 233MJ à 1025tr/min . Hors cycle, le moteur consomme 500kW pour maintenir sa vitesse nominale, dont 300kW de perte par frottement. Durant un cycle, le moteur va rapidement fournir 6MW puis stabiliser sa puissance à ce niveau, dès lors la vitesse de rotation va diminuer pour fournir la puissance nécessaire aux aimants. Durant la descente du courant, les aimants vont renvoyer l'énergie magnétique stockée vers le générateur ce qui va permettre de le ré-accélérer à sa vitesse nominale. La vitesse du groupe varie de 1025 à 975tr/min durant les cycles, soit $\pm 2.5\%$ par rapport à la vitesse de synchronisme. Ce faible glissement permet de minimiser la puissance de dimensionnement du cycloconvertisseur et de limiter la variation de fréquence du générateur. Ce dernier paramètre est très important car des filtres accordés sont utilisés dans le filtrage de sortie pour obtenir une ondulation de tension très faible ($< 24\text{V}$ crête à crête). La totalité des pertes du système est d'environ 2MW pour un cycle 25GeV , dont 1MW liées uniquement au groupe tournant. Avec ce système, uniquement les pertes Joule des aimants et les pertes du système sont fournies par le réseau électrique à savoir 5MW moyen. L'énergie magnétique de l'aimant, qui est au maximum de 12MJ , est échangée avec l'énergie cinétique du groupe tournant durant chaque cycle. Ce système a donc l'avantage de fournir une puissance de pointe très élevée tout en ne prenant sur le réseau électrique que les pertes du système qui sont dix fois moindre. Il s'agit donc en somme d'un dispositif à stockage inertiel fonctionnant sur une faible plage de vitesse.

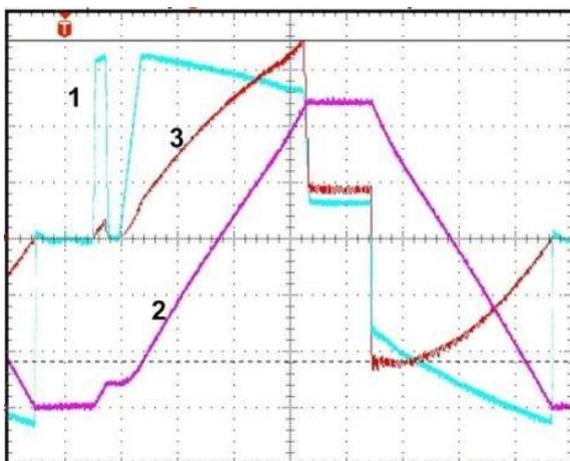


Figure 6 : Exemple de cycle 25GeV

Echelle du temps : 100ms/carreau

1 : Tension appliquée aux aimants, 2.5kV/carreau

2 : Courant des aimants, 1kA/carreau

3 : Puissance appliquée aux aimants, 10MW/carreau

La puissance de crête de 90MVA (46MVA efficace) de l'alternateur peut sembler surdimensionnée mais elle est déterminée par les chutes de tension du system (17% au total) et par l'angle d'allumage des thyristors durant le cycle. Pour chaque cycle, le couple du générateur est inversé à pleine puissance ce qui génère une fatigue mécanique du groupe et particulièrement des rotors. La très belle longévité du système existant (fournit par Siemens) s'explique par le fait que le groupe tournant est monté sur une dalle flottante. En effet, le groupe qui pèse au total 224 tonnes a été ancré sur une dalle de 324 tonnes. Cette dalle repose par l'intermédiaire de ressort hélicoïdaux et d'amortisseurs à masse visqueuse, sur deux poutres solidaire du radier du bâtiment. L'allongement des ressorts est de quelques millimètres et l'effort maximal transmis à la poutre est de 15 tonnes. Cette technique permet de limiter la fatigue mécanique du groupe en réduisant les chocs lors de l'inversion de couple. Au total, l'alimentation principale actuelle occupe environ 1000m^2 .

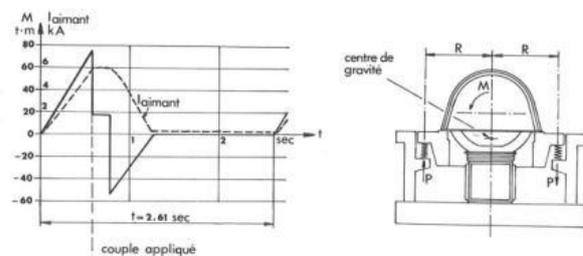


Figure 6 : Couple et plateforme d'ancrage du groupe tournant

Cette technique des groupes tournants dit 'd'impulsion' était largement utilisée pour le test du matériel électrique jusqu'aux années 1970. Par la suite et avec l'avènement de réseaux électriques de très forte puissance (plusieurs GVA de puissance de court-circuit), ils ont été abandonnés. Pour les accélérateurs de particules, les groupes tournants ont aussi été abandonnés dans les années 1970 pour des convertisseurs de puissance à thyristor. Par exemple au CERN, le SPS utilise des redresseurs à thyristor jusqu'à $\pm 140\text{MW}$ de puissance de pointe sur des cycles de 14 secondes. C'est le distributeur (EDF) qui se charge de fournir ces pointes de puissance via le réseau 400kV . Dans le cas du PS, le groupe tournant s'est montré très fiable malgré des coûts de maintenance élevés. Son remplacement n'a été envisagé qu'après une série d'événements qui a révélé le vieillissement et la fatigue mécanique du groupe. Plusieurs études détaillées ont été lancées par le CERN pour trouver une solution de remplacement [1]. La solution retenue est une solution innovante qui maintient le principe d'échange d'énergie locale sans avoir recours au réseau électrique comme réservoir d'énergie.

La topologie du système a été brevetée par le CERN et L'EPFL (Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne) et la réalisation du système de puissance confiée à CONVERTEAM (entreprise leader sur le marché de la conversion d'énergie) [2]. Le détail du nouveau système de puissance est présenté dans le chapitre suivant.

4. La nouvelle alimentation du PS

La topologie retenue est une association de convertisseurs et de bancs de condensateurs, voir figure 7. Le principe est de stocker l'énergie, cette fois, dans des condensateurs et de l'échanger avec les aimants au cours de chaque cycle. Pour des raisons de sécurité et pour créer un système modulaire, les condensateurs sont groupés en six bancs distincts. L'échange d'énergie entre les bancs de condensateur et les aimants est contrôlé par des convertisseurs DC/DC de type pont en H, qui régulent le courant des aimants. Seuls deux convertisseurs AC/DC (redresseurs actifs), appelés chargeurs, sont raccordés au réseau électrique et fourniront les pertes du système. Chaque chargeur est branché sur un banc de condensateurs. Quatre bancs de condensateur ne sont pas connectés directement au réseau mais laissés flottant [3].

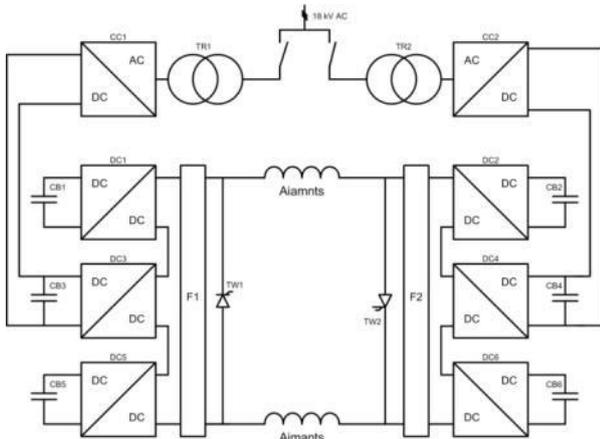


Figure 7 : Topologie du nouveau système de puissance

La séquence de démarrage se déroule en plusieurs étapes. Premièrement, les deux chargeurs vont démarrer l'un à la suite de l'autre et charger progressivement à tension nominale leur banc de condensateurs associés. Deuxièmement, les six convertisseurs DC/DC vont démarrer et faire circuler un faible courant dans les aimants pour charger les quatre autres bancs de condensateurs. Lorsque tous les bancs de condensateurs sont à tension nominale, à savoir 5kV, le système d'alimentation sera prêt pour effectuer un cycle. L'avantage de cette topologie est d'intégrer dans le convertisseur de puissance le stockage d'énergie et de réduire le nombre de connexions au réseau électrique. Le système est modulaire et redondant, il a été conçu pour fonctionner avec un élément défectueux, topologie

à N+1 éléments. Le nouveau système a été conçu pour délivrer 10kV et 6kA aux aimants, passant la puissance de pointe de 45MW utilisée aujourd'hui à 60MW.

5. Gestion de l'énergie pendant un cycle

Les pertes les plus importantes du système sont les pertes Joule des aimants. Pendant un cycle 25GeV (voir figure 8), la puissance de crête des pertes est de 10MW, voir figure 9. L'énergie nécessaire pour couvrir les pertes doit être fournie par le réseau électrique. La puissance de chaque chargeur est donc de 5MW. Le profile de la puissance absorbée par les chargeurs va être très proche de celui des pertes des aimants. L'énergie magnétique maximale des aimants est de 12MJ pour un cycle 25GeV, voir figure 10. Cette énergie est fournie par les condensateurs. La tension des condensateurs de stockage passera de 5kV à 2kV (ce qui permet d'extraire 84% de l'énergie maximale stockée) lorsque le courant des aimants augmentera jusqu'à 5.5kA. Lors de la descente du courant, la tension des condensateurs retournera à 5kV, voir figure 11.

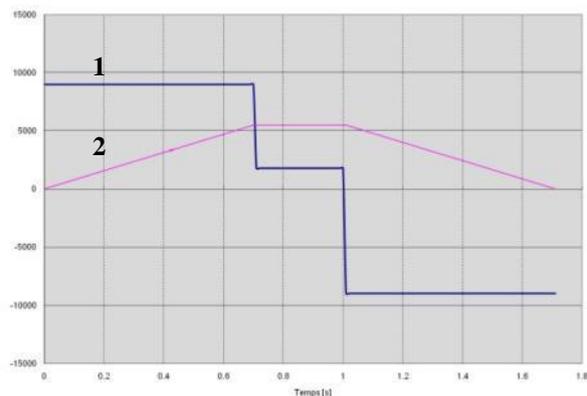


Figure 8 : Tension et courant dans les aimants pendant un cycle 25GeV

1 : la tension appliquée aux aimants
2e : le courant des aimants

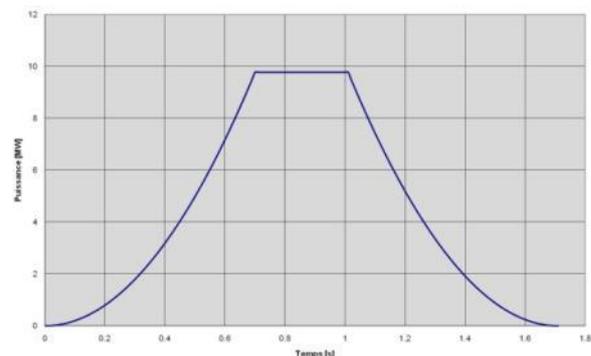


Figure 9 : Puissance dissipée (en MW) dans les aimants pendant un cycle 25GeV

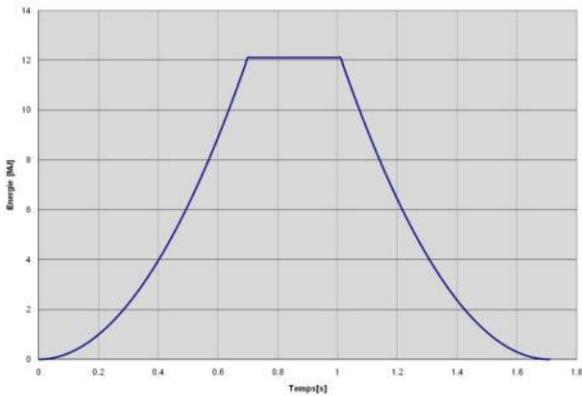


Figure 10 : Energie magnétique (en MJ) stockée dans les aimants pendant un cycle 25GeV

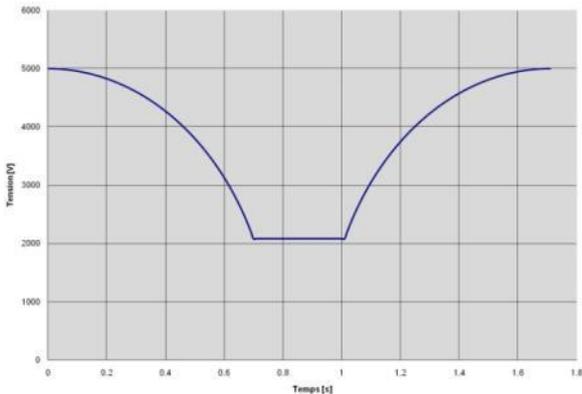


Figure 11 : tension des condensateurs de stockage pendant un cycle 25GeV

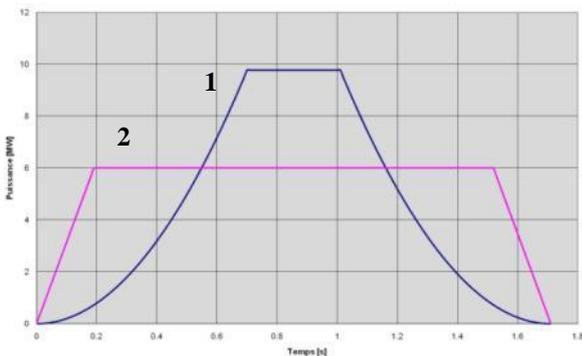


Figure 12 : Profil de la puissance en cas d'utilisation d'un seul chargeur pendant un cycle 25GeV

- 1 : les pertes joule des aimants
- 2 : le profile de la consigne du chargeur

Le système est conçu pour être modulaire et redondant. Si un banc de condensateurs ou un convertisseur DC/DC ou un chargeur est en panne, le système peut encore fonctionner. L'exploitation avec un seul chargeur est le cas le plus critique car la puissance d'entrée sera limitée à 5MW. Dans le cas d'utilisation de deux chargeurs, le profil de consigne de chaque chargeur est égal à celui des pertes Joule des aimants divisé par deux. Dans le cas d'un chargeur unique, il faut changer ce profil de consigne pour que l'intégrale du profil de la consigne du chargeur soit égale à l'intégrale des pertes du système. Ainsi, même les cycles les plus lourds peuvent être

exécutés, voir figure 12. Des commutateurs de puissance sont utilisés pour passer en mode dégradé, voir figure 13. Dans le cas de panne d'un banc de condensateurs ou d'un convertisseur DC/DC, les sorties du convertisseur DC/DC associées seront court-circuités. Dans le cas d'un chargeur, le commutateur de sortie du chargeur sera ouvert. En cas de défaut interne du système de puissance, toutes les commandes des IGBT seront bloquées et les bancs de condensateurs seront déchargés dans des résistances externes en moins de 2 minutes. Du cotés de la charge (aimants), un chemin doit être donné au courant pour que l'aimant se décharge en circuit fermé. C'est le rôle des thyristors de roue libre (repéré TRL1 sur la figure 13) placé en sortie des convertisseurs qui seront amorcés systématiquement en cas de défaut. Les thyristors sont commandés par le système de contrôle mais ils peuvent aussi se déclencher de façon autonome en surtension.

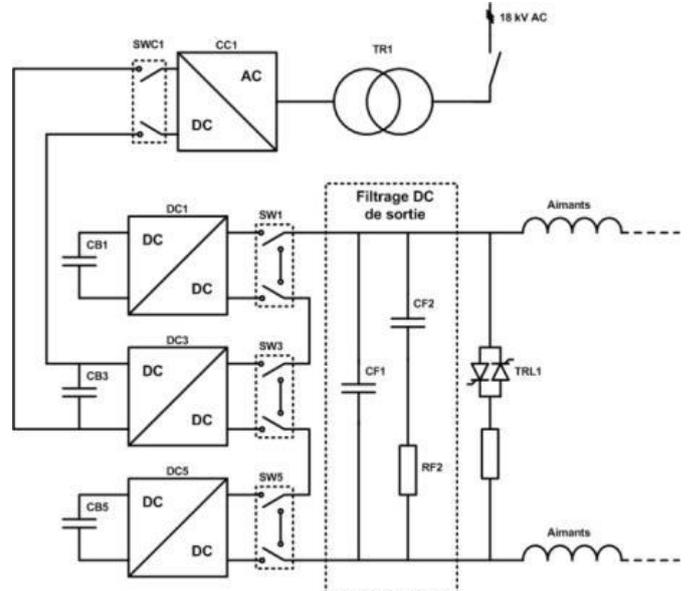


Figure 13 : Système de configuration d'un demi-système

6. Technologies associées : les condensateurs

Les condensateurs ont été choisi comme réservoir d'énergie car malgré une densité d'énergie faible (0.1Wh/kg), leur densité de puissance est très forte (100kW/kg). Ils permettent donc d'extraire rapidement l'énergie stockée et ne souffrent pas des cycles de charge et décharge (vieillessement par cyclage négligeable). Ce dernier paramètre est fondamental dans le cas du PS car le système est conçu pour réaliser 200 millions de cycle ce qui exclut par exemple l'utilisation de batterie électrochimiques. Une tension totale de 10kV est appliquée aux aimants durant toute la montée au courant nominal. La tension minimale, que doit fournir chaque convertisseur DC/DC, est donc au minimum de 1,66kV. En tenant compte des limites des convertisseurs DC/DC, la tension minimum des bancs de condensateurs est donc de 2kV à la

fin de la rampe. La valeur des bancs de condensateurs est déterminée par la tension nominale des condensateurs, la tension minimum pendant le cycle et l'énergie requise par les aimants. La tension nominale des condensateurs est de 5kV (pour utiliser des condensateurs sans huile). La variation de tension étant ainsi de 3kV, la valeur minimum de chaque banc de condensateurs est donc de 195mF. En réalité, la valeur des bancs est de 257mF pour pouvoir fonctionner avec seulement cinq bancs. La valeur totale des six bancs de condensateur est de 1.54F sous 5kV. Le poids total des condensateurs est de 60 tonnes. Ils ont été placés dans six conteneurs standard du transport maritime de 40 pieds (12 m de long par 2.4m de large), voir figure 14 et 15.



Figure 14 : un banc de condensateurs placé dans son conteneur

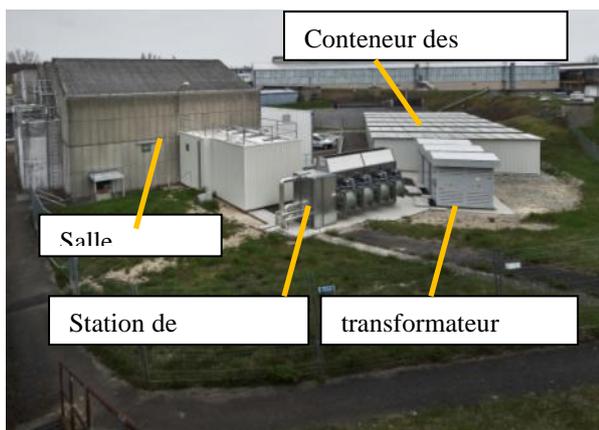


Figure 15 : vue extérieure de la nouvelle alimentation du PS

Les condensateurs sont de type film métallisé polypropylène auto-cicatrisant. L'épaisseur du film est de 10 μ m et il est utilisé à 250V/ μ m. Une structure multicouche de bobinage a été choisie pour réaliser l'équivalent de deux condensateurs en série.

7. Technologies associées : l'entrelacement des convertisseurs

Côté convertisseur, le développement d'un convertisseur unique de plusieurs mégawatt ne pouvait être envisagé pour cette application, l'idée était plutôt d'utiliser des convertisseurs de puissance produits en série par l'industrie et de les associer en série et parallèle. Une étude de marché a montré que les industriels commercialisaient en série des onduleurs triphasés de 2kA par phase utilisant un bus DC de 5kV. Dans notre cas, chaque convertisseur DC/DC doit avoir une topologie de principe type pont en H et doit délivrer 6kA pour une tension de bus DC de 5kV. La solution consiste à associer trois bras de pont en parallèle pour atteindre 6kA. En réalité, il s'agit de l'association de deux onduleurs triphasés multi-niveaux pour faire un convertisseur DC/DC, voir figure 16.

La technique de l'entrelacement a été utilisée pour réduire la taille du filtre de sortie et pour obtenir une meilleure dynamique de tension [4]. Les trois bras de pont sont mis en parallèle via une inductance de couplage et chaque commande MLI (Modulation de Largeur d'Impulsion) des bras est déphasée de $2\pi/3$, voir figure 17.

La fréquence des MLI est de 333Hz. Les MLI des deux bras de pont résultant d'un DC/DC sont aussi déphasés de $\pi/6$, ainsi le premier harmonique de tension généré par un convertisseur DC/DC sera à 2kHz. Pour augmenter encore les performances, les DC/DC sont aussi déphasés entre eux. Les deux chargeurs qui reçoivent la même consigne sont déphasés de 90°, conduisant à un premier

harmonique à 4kHz. Les quatre DC/DC associés aux bancs de condensateurs flottants sont eux déphasés de 45°, conduisant à un second harmonique à 8kHz pour l'ensemble du système. L'ondulation de tension maximale de sortie est ainsi inférieure à 4Vrms, voir figure 18. Ce critère est très important pour un accélérateur de particules car le faisceau de particules est très sensible à la qualité du champ magnétique. Toute oscillation de tension se transforme en oscillation de courant et donc en oscillation du champ magnétique ce qui peut rendre le faisceau inutilisable dans certaines applications.

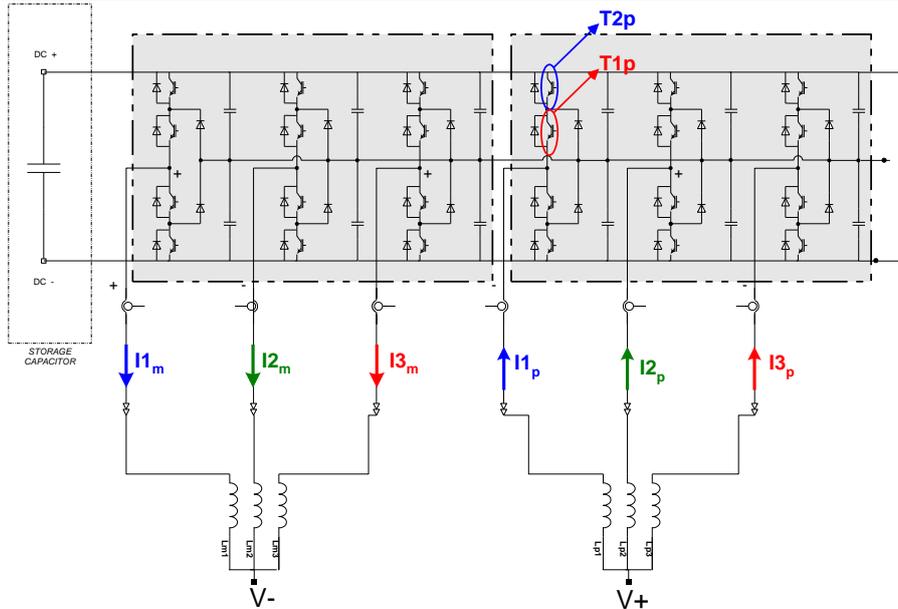


Figure 16 : un convertisseur DC/DC réalisé avec deux onduleurs triphasés dont les 6 bras sont à commandes entrelacées

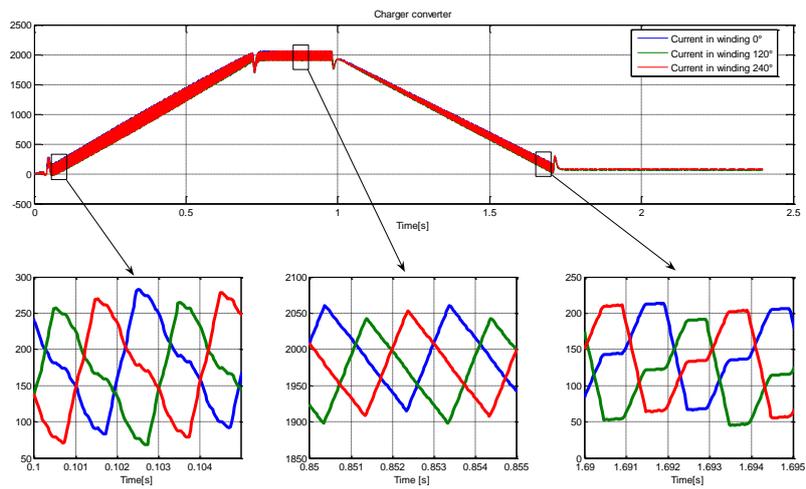


Figure 17 : Courants des bras de pont pendant un cycle 25GeV

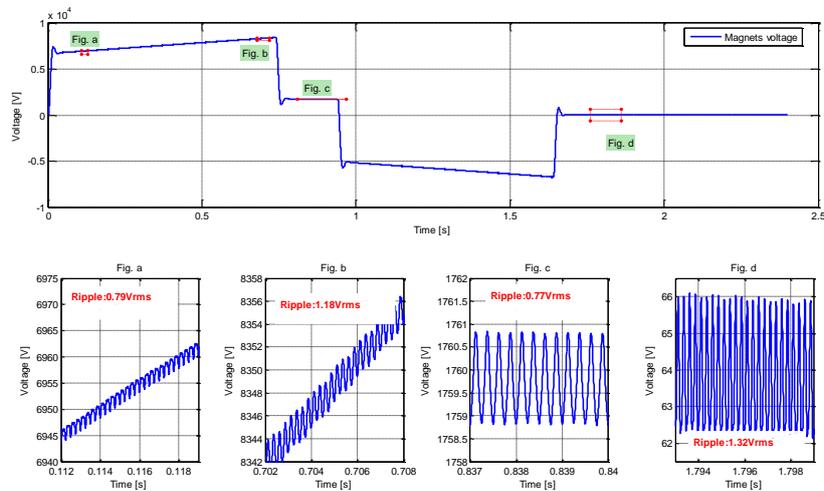


Figure 18 : tension de sortie du convertisseur et ondulation de tension mesurée à différent instant du cycle

8. Technologies associées : les IGBT press-pack

Le choix des semi-conducteurs de puissance est fondamental dans une application de type pulsée. En général, la constante de temps thermique d'une jonction est inférieure à 100ms. Dès lors que la répétition d'un cycle est supérieure à quelques constantes de temps thermique de la jonction, celle-ci va subir une fatigue mécanique. Dans le cas des modules IGBT classique, c'est le système de câblage par fil très fin (bonding) qui va être le point faible. Certains fabricants donnent le nombre de cycles thermiques réalisables en fonction de l'excursion de température de la jonction pendant le cycle et il s'avère que ce nombre est incompatible avec les exigences de tenue en cyclage de cette application. Les composants 'press-pack' ont eux l'avantage de ne pas utiliser de connexion par fil fin et aussi d'avoir une meilleur échange thermique avec les radiateurs de dissipation à eau [4]. Pour pouvoir confirmer la viabilité de l'utilisation d'un produit de série de type MV7308, voir figure 19, CONVERTEAM a réalisé une étude thermique dynamique sur les IGBT employés (IEGT TOSHIBA ST2100, 4500V/1800A 125mm) [5]. Le résultat montre qu'il faut limiter les pertes dans les IGBT afin de limiter la variation de la température de jonction à moins de 25°C pendant un cycle et ce afin de pouvoir réaliser 200 millions de cycle, voir figure 20. Leur fréquence de commutation a été réduite à 333Hz au lieu des 900Hz possible.



Figure 19 : Un bras de pont avec 4 IGBT presspack utilisé dans les convertisseurs MV7308 de CONVERTEAM

9. Technologies associées : les inductances de filtrage

L'utilisation de la technique de l'entrelacement nécessite des inductances pour pouvoir mettre en parallèle les bras de pont. Le filtrage de la tension de sortie demande lui aussi des inductances afin de réaliser un filtre du type LC amorti. Une des solutions possibles est de réaliser des inductances individuelles pour chaque fonction, une par bras de pont à 2kA pour l'entrelacement, une par filtre de sortie à 6kA. Cette solution aurait conduit à des volumes beaucoup trop importants. Afin contenir ce volume, CONVERTEAM a utilisé des inductances couplées.

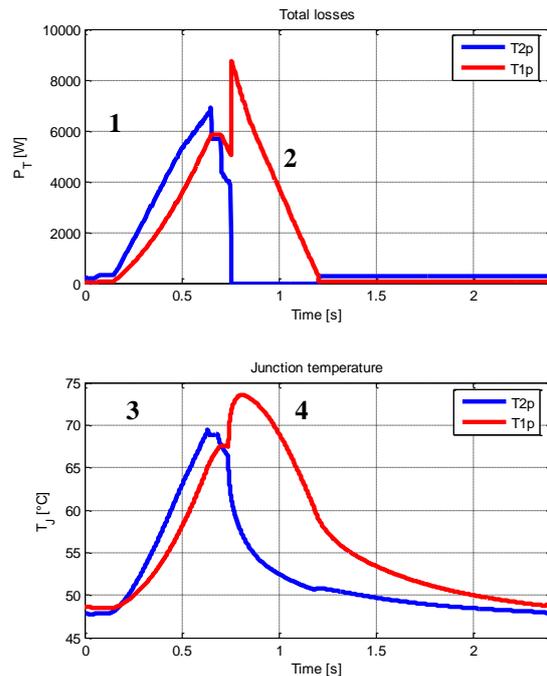


Figure 20 : Simulation des pertes et de la température de jonction des IGBT sur un cycle 25GeV

1-2 : Pertes totales dans deux IGBT d'un bras de pont

3-4 : Température de jonction de deux IGBT d'un bras de pont

L'idée est d'utiliser un noyau ferromagnétique unique pour la mise en parallèle de trois bras de pont. Le mode différentiel est utilisé pour l'entrelacement et le mode commun est utilisé pour le filtrage de sortie. Un noyau de type triphasé reçoit un bobinage par bras de pont. Le mode commun est découplé du mode différentiel en introduisant des fuites magnétiques. Ce sont ces fuites magnétiques qui déterminent la valeur d'inductance de mode commun. Chaque inductance pèse 4 tonnes pour 6.5mH de mode différentiel et 500μH de mode commun. Comme il a six inductances en série, la valeur utile pour le filtrage de sortie est donc de 3mH ce qui rend inutile l'ajout d'une inductance individuelle pour le filtrage de sortie. La très faible ondulation de tension de sortie (voir chapitre 7) est obtenue en plaçant seulement 1.8mF de condensateur en sortie des trois convertisseurs DC/DC (repéré CF1 et CF2 dans la figure 13). L'atténuation obtenue est de -49dB à 4kHz pour une bande passante de 180Hz. Le filtre est constitué d'une première branche non amortie de 320μF et d'une deuxième branche amortie avec 1.5mF en série avec une résistance de 2.9Ω. L'utilisation de la technique des inductances couplées a permis de réduire le poids de 130 tonnes pour des inductances individuelles à 48 tonnes, voir figure.21.



Figure 21 : Inductance couplé d'un convertisseur DC/DC

9. Réalisation et perspectives

Le système complet a été livré et installé au printemps 2010, voir figure 15 et 22. La totalité du matériel électrique est estimé à 300 tonnes et la surface totale utilisée est de 1000m² (dont 200m² pour la salle électrique).



Figure 22 : Photo de la salle électrique

Les pertes totales dissipées dans le circuit d'eau sont de 540kW et les pertes dans l'air sont elles estimées à 170kW. Rapportée à la puissance de pointe (60MW), le rendement du système est supérieur à 98%. Ramené à la puissance moyenne transmis à la charge (3.3MW), il est tout de même proche de 80%. L'accélérateur PS étant en opération jusqu'en décembre 2010, les tests de réception ont été réalisés sur des aimants de réserve représentant 1/10 de l'énergie à fournir. Ces tests ont permis de valider le système, voir figure 23 [6].

La mise en service définitive s'effectuera au printemps 2011. Pour comparaison, la surface utilisée par le nouveau système de puissance est très proche de celle avec groupe tournant (1000m²), le poids du matériel électrique est aussi très proche (300 tonnes), par contre, les pertes du système ont elles été divisées par presque 3 bien que ceci ne représente qu'une amélioration de 2% du rendement.

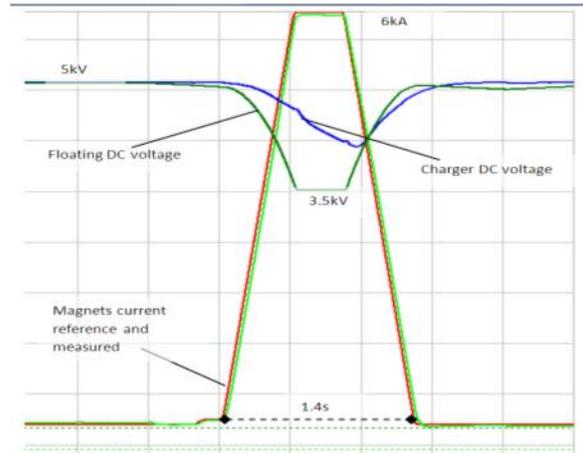


Figure 23 : Cycle 25GeV réalisé avec le nouveau système de puissance

Une des difficultés majeures du projet a été la réalisation du système de contrôle. Le système complet représente une association de 14 convertisseurs de type MV7308, soit 168 IGBT à contrôler et 42 MLI à générer, avec un seul et même système de contrôle. Le système doit aussi gérer tous les modes de fonctionnement en mode dégradé. En réalité, chaque convertisseur DC/DC et chargeur ont un système de contrôle local qui est géré par un contrôleur principal. Le contrôleur principal gère tous les processus 'lent' et il est le maître des huit contrôleurs locaux. La deuxième fonction du contrôleur principal est de gérer la régulation digitale et de générer toutes les impulsions de commande des IGBT. La résolution des MLI ainsi que la digitalisation des signaux analogiques est de 17 bits. La régulation du courant de l'aimant est elle réalisée par un système de contrôle CERN appelé FGC utilisant un capteur de courant haute précision appelé DCCT. Ce système est très particulier et ne peut pas être développé dans cet article, voir bibliographie [7]. Ce système permet de contrôler le courant par pas de 50mA sur toute la plage d'opération de 0 à 6kA.

Le rôle du CERN est de concevoir des accélérateurs de particules, de les construire et d'en assurer l'opération. Il fait appel à l'industrie pour toutes les technologies classiques mais doit avoir ces propres équipes dans les domaines spécifiques. C'est le cas pour les convertisseurs de puissance avec près de 90 personnes au service du développement et de l'opération de ceux-ci. La production des équipements est toujours réalisée par l'industrie. Une des missions du CERN est de développer des technologies innovantes et de transférer ses technologies dans l'industrie européenne. Ce fut pleinement le cas pour ce projet ou CONVERTEAM a dû repousser les limites technologiques de l'entreprise. Le résultat est remarquable et d'autres applications devraient pouvoir bénéficier de ces développements.

10. Conclusions

Une solution innovante pour alimenter les accélérateurs de particules fonctionnant en mode pulsé a été proposée et réalisée. Cette solution consiste à récupérer l'énergie magnétique des aimants et de l'échanger localement avec des bancs de condensateurs à chaque cycle. Elle évite de solliciter le réseau de distribution électrique avec de très fortes pointes de puissance, ce qui réduit considérablement le risque de perturbations. Ce système met en œuvre de façon originale des techniques classiques de l'électrotechnique mais à l'échelle de plusieurs mégawatt. C'est un pas important pour tous les laboratoires de physique et peut-être un changement de culture pour l'alimentation de système pulsée de très forte puissance. Ce principe d'échange d'énergie locale est bien sûr applicable à d'autres systèmes, il ouvre aussi une voie pour le stockage des énergies renouvelables pour lequel la conversion d'énergie peut-être un facteur de limitation.

11. Bibliographie

- [1] F. Bordry, J-P Burnet, F. Voelker "CERN-PS Main Power Converter Renovation: How to Provide and Control the Large Flow of Energy for A Rapid Cycling Machine" Particle Accelerator Conference, PAC'05. Proceedings of the, pp. 3612 – 3614, May 2005.
- [2] F. Bordry, J.P. Burnet, C. Farhni, A. Rufer, "Device for supplying a load with an integrated energy storage", European Patent, EP1868279
- [3] C. Farhni, A. Rufer, F. Bordry, J-P Burnet, "A Multilevel Power Converter with Integrated Storage for Particle Accelerators" Power Conversion Conference - Nagoya, 2007. PCC '07
- [4] D. Begin, B. Gollentz, N. Gruau, "Low losses PWM for High Power Press Pack IGBT Inverters", EPE-2003, Toulouse
- [5] R. Péron, V. Guenegues, JL. Pouliquen, B. Gollentz, F. Bordry, JP. Burnet, 'Performances analysis of main components used in 60MW pulsed power supply for particle accelerator', EPE-2009, Barcelona
- [6] R. Péron, D. Giraud, F. Bordry, JP. Burnet, F. Boattini 'A 60MW pulsed power supply for particle accelerator: preliminary test results', EPE-PEMC-2010, Ohrid, Republic of Macedonia
- [7] H. Thiesen, M. Cerqueira-Bastos, G. Hudson, Q. King, V. Montabonnet, D. Nisbet, S. Page 'High precision current control for the LHC main power converters'. IPAC-2010, Kyoto.

Quels logiciels utiliser pour estimer la production d'une installation photovoltaïque ?

D. MAZILLE^{1,2}, V. BOITIER^{1,2}

Email : maz-merize@hotmail.fr, vboitier@laas.fr

¹ CNRS ; LAAS ; 7 avenue du colonel Roche, F-31077 Toulouse, France

² Université de Toulouse ; UPS, INSA, INP, ISAE ; LAAS ; F-31077 Toulouse, France

Résumé : Cet article présente un comparatif entre plusieurs logiciels de dimensionnement d'installations photovoltaïques. Chaque logiciel est présenté puis testé sur une installation simple et sur une installation avec des ombres portées. Dans les deux cas, la production réelle et le gisement solaire sont connus. Un comparatif permet de choisir son logiciel en fonction de l'objectif visé.

1. Introduction.

Le développement des technologies de production d'énergie photovoltaïque et les différentes lois favorisant les énergies renouvelables font qu'aujourd'hui les installations solaires sont accessibles pour un plus grand nombre, entreprises ou particuliers. Il en découle un accroissement du nombre d'installateurs photovoltaïques, qui ont besoin de fournir à leurs clients des chiffres de prévision de production énergétique. A juste titre, les particuliers veulent eux aussi savoir ce que pourrait leur apporter une éventuelle installation, ou vérifier la validité des performances annoncées par les installateurs. La production d'énergie par conversion photovoltaïque dépend de très nombreux paramètres (ensoleillement, températures...) qui présentent des fluctuations importantes. Il est donc très difficile de faire une évaluation précise. Il existe sur le marché de nombreux logiciels qui permettent d'estimer cette production. Nous allons ici comparer ces logiciels, et essayer de déterminer lequel est le plus adapté pour trois usages donnés : utilisation en entreprise, chez un particulier ou dans un but pédagogique, car le développement du photovoltaïque implique bien sûr un développement de l'enseignement dans ce domaine.

Nous présentons dans une première partie les caractéristiques des deux installations typiques pour lesquelles la production réelle et la ressources sont connues et sur lesquelles vont être testés les logiciels. Les données techniques sont visibles en annexe. Vous trouverez ensuite pour chaque logiciel un paragraphe présentant son fonctionnement et son évaluation sur les deux installations. Les parties concernant les analyses financières ou environnementales ne sont pas traitées dans cet article. La dernière partie présente les résultats fournis par les différents logiciels et propose une approche pour analyser

l'origine de la disparité des résultats. Une évaluation par critères est présentée en conclusion de ce travail (figure 12).

2. Descriptif des installations test.

Deux installations ont été choisies, une installation « complexe » avec des pertes par ombres proches (ce qui complique la modélisation), et une installation plus simple sans pertes majeures autre que les pertes matérielles (rendement des panneaux, de l'onduleur...). Ces installations sont situées dans la région Toulousaine.

2.1 Installation A.



*Photo 1. Installation A intégrée en toiture
On note l'ombre portée due à la cheminée*

Le générateur PV est composé de 20 modules en série, avec les modules les plus performants en haut du toit. Une cheminée génératrice d'ombre et de salissure sur les panneaux est présente sur la droite du toit, au milieu de la largeur, d'une hauteur au-dessus du toit de 1m (cf. ph.1). Les modules sont ventilés par-dessous : le toit à été aménagé de façon à laisser un espace entre les modules et la charpente. L'installation dispose donc d'une bonne ventilation. Il faut noter la présence d'arbres dans le jardin qui pourraient faire de l'ombre sur les panneaux. On dispose des résultats de production réelle de mars 2009 à février 2010.

2.2 Installation B.



Photo 2 : Installation B.

Cette installation se compose de 16 modules dans un même plan sur un bâti à proximité de la maison (cf. ph.2) : deux strings de 8 modules en série. Aucune ombre sur l'installation, le masque lointain est négligeable. On dispose aussi pour cette installation des données de production mensuelle (mêmes périodes).

3. Les logiciels.

Une recherche sur internet nous a permis de sélectionner six logiciels disponibles en version française et permettant un dimensionnement au moins sur le territoire français. **PvSol** disponible gratuitement une seule journée n'a pu être testé. **Solarcalc** dédié au dimensionnement matériel sortait du cadre de notre étude.

3.1 PVSyst :

PV Syst [1] est un logiciel développé par l'université de Genève. Il a la particularité de proposer une version totalement gratuite et complète (avec toute la base de données) pendant 15 jours. Conçu initialement en Anglais, la traduction française est parfois obscure. Il s'adresse à des architectes ou des ingénieurs travaillant dans le domaine des énergies renouvelables mais est aussi adapté à l'éducation.

Le logiciel est divisé en trois parties distinctes : pré-dimensionnement, conception du projet et outils.

La **partie pré-dimensionnement** permet d'effectuer une étude très rapide d'une *installation couplée au réseau*, ou *isolée avec batterie*, ou avec une *station de pompage*. Très peu de paramètres sont modifiables, comme ceux liés à l'orientation des panneaux photovoltaïques (cf. fig1). Les résultats obtenus sont des graphes d'irradiation, de production d'énergie et des données financières. Cette partie est bien adaptée aux novices ayant peu de connaissances dans le photovoltaïque ou pour des personnes souhaitant faire un pré-dimensionnement rapide.

La **partie conception du projet** est beaucoup plus complète. En plus des installations vues pour le pré-dimensionnement, elle permet le dimensionnement

d'une installation connectée à un réseau en courant continu. Les paramètres à fournir sont beaucoup plus précis et nombreux. Le dimensionnement est divisé en quatre étapes : *orientation*, *horizon*, *ombrages proches* et *système*. Chaque étape ouvre une nouvelle fenêtre et certains paramètres nécessitent d'ouvrir encore de nouvelles fenêtres, on se retrouve alors vite submergé sous une pile de fenêtres si l'on souhaite aller loin dans les réglages, mais heureusement ces réglages sont parfois facultatifs, ou déjà réglés avec des valeurs par défaut. Il n'est utile de les modifier que pour des installations spécifiques ou pour une étude très précise.

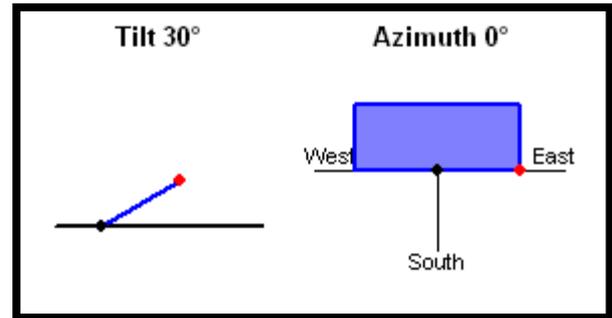


Figure 1 : Positionnement des panneaux avec PVSyst.

Pour ce qui est de l'étape *horizon*, il est possible de tracer le masque lointain à la main points par points sur une carte d'élévation du soleil, ou de le générer via un logiciel (Carnaval -cf § Carnaval- qui est très pratique pour tracer l'horizon autour d'un point donné en France, Horiz'on, SunEye ou Meteonorm) puis de l'importer.

Une étape particulièrement réussie est celle du dessin des *ombrages proches*. En effet un petit utilitaire 3D intégré permet de dessiner l'installation et les éléments susceptibles de porter une ombre sur les panneaux (poteau, arbre, bâtiment...cf. fig.2). Ceci permet de déterminer les pertes sur l'année dues à ces ombres. On peut même simuler la course du soleil lors d'une journée (dont on choisira la date) et voir l'ombre se dessiner sur les panneaux ainsi qu'un graphe montrant le pourcentage de panneaux à l'ombre selon l'heure de la journée. Cette étape est très utile pour visualiser précisément les ombres portées sur les panneaux.

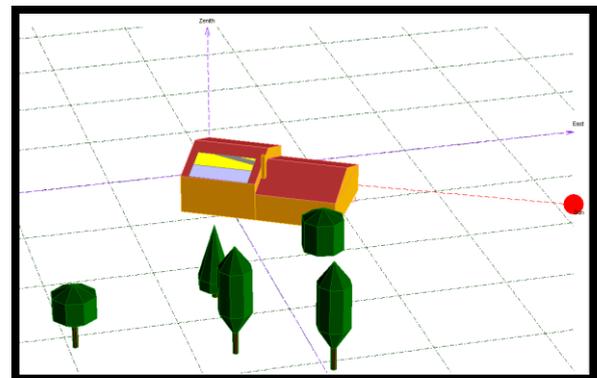


Figure 2 : Dessin de l'installation A

Ensuite l'étape *système* permet de choisir son équipement parmi une très vaste base de données « matériel ». On peut aussi dans cette étape détailler précisément l'origine des pertes : pertes thermiques, ohmiques (dus à la longueur des câbles) et même salissure et déviation de l'angle incident des rayons solaires dû au vitrage de protection.

L'étape *résultats* qui clôture la partie dimensionnement est extrêmement complète. On peut personnaliser les graphes avec les grandeurs souhaitées (ensoleillement, production d'énergie, rendement, ...) et les diagrammes préconstruits sont très intéressants, particulièrement le diagramme des pertes (cf. fig4).

La dernière partie, la **partie outils** permet d'avoir accès aux bases de données météo et composants, ainsi qu'à quelques petits outils indépendants pour tracer des courbes d'ensoleillement ou de caractéristique des panneaux comme sur la figure 3.

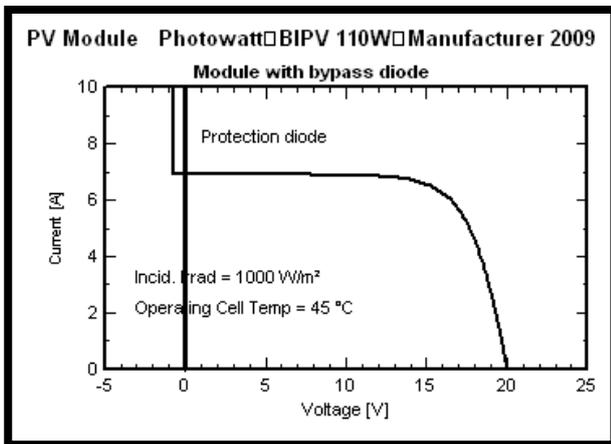


Figure 3 : Caractéristique d'un module.

Conclusion : Ce logiciel très complet s'adresse aussi bien à des novices en énergie renouvelable qu'à des professionnels souhaitant faire une étude très détaillée de leur installation. On obtient une multitude de résultats qui permettent de fournir un rapport complet. Le logiciel n'est cependant pas très convivial malgré les quelques photos du menu (une notice a été rédigé et est disponible auprès des auteurs sur simple demande).

Les plus : Logiciel très complet / utilitaire de dessin 3D intégré pour déterminer les ombres proches / visualisation des ombres proches en fonction de l'heure / version gratuite pendant 15 jours.

Les moins : Prise en main peu aisée pour le mode conception du projet / traduction incomplète et maladroite.

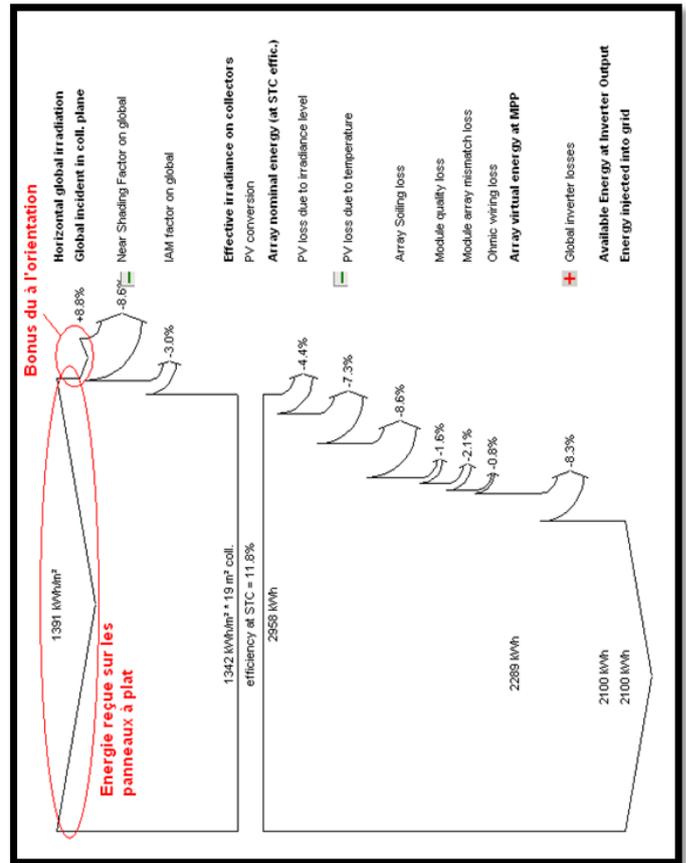


Figure 4 : Diagramme des pertes obtenu avec PVSyst pour l'installation A

Cas concret : Installation A :

Le principal avantage pour simuler l'installation A est l'utilitaire de dessin 3D qui va nous permettre de dessiner précisément la cheminée et les arbres. Ceci va nous permettre de déterminer l'ombre portée par la cheminée, et de s'apercevoir que les arbres ne portent pas d'ombre sur les panneaux. De plus, la cheminée à proximité de l'installation provoque un dépôt de suie, que l'on peut simuler dans la rubrique *perte* du logiciel. Néanmoins le réglage des salissures est assez imprécis, car on entre un pourcentage qui ne correspond pas exactement à un pourcentage de pertes. Aucune aide n'explique les calculs de cette section. Le fait que les panneaux soient bien ventilés n'est pas évident à simuler non plus. En effet les seules modifications thermiques que l'on peut effectuer jouent sur la valeur du NOCT (Normal Operating Cell Temperature ou température de fonctionnement normal des cellules) ou sur un facteur de perte thermique assez compliqué à régler.

Cas concret : Installation B :

Cette fois le paramétrage est plus rapide étant donné que l'on saute les étapes de masque lointain et d'ombres proches. Encore une fois le nombre de paramètres à définir permet d'obtenir une simulation extrêmement précise pour peu que l'on prenne le temps d'entrer dans les détails des nombreuses fenêtres que propose le logiciel.

3.2 Archelios v.10.01 (sans Cythelia) :

Le logiciel Archelios [2] est conçu par Alain Ricaud de l'université de Savoie. Il est amélioré chaque année par ses étudiants lors de Travaux Dirigés. Le logiciel en lui-même est totalement gratuit, mais sans plugins et sans la base de données Cythelia qui contient les bases de données météo et matériels. La version que nous avons testé est la version sans base de données et sans plugins. Pour avoir droit à cette base de données et à ces plugins, il faut compter 500 € pour la version complète sur un poste.

Archelios fonctionne avec un système d'onglets très pratique qui évite une profusion de fenêtres sur l'écran. Il y a 6 onglets à renseigner, et un onglet *résultats* automatiquement mis à jour.

Le premier onglet **paramètre** permet de choisir son projet. Quatre types de projets sont possibles : *autonome* (DC ou AC), *raccordé au réseau*, *raccordé au réseau avec batteries* ou *raccordé au réseau haute tension*. On trouve ensuite un onglet **météo** assez complet qui permet de choisir sa station ou de la créer en renseignant divers paramètres.

L'onglet **site** permet quant à lui de localiser l'installation, de visionner les courbes d'ensoleillement, d'observer le gisement solaire et de définir l'albédo. Le masque lointain peut être importé depuis Carnaval. Par contre, l'éditeur de masque proche n'est vraiment pas pratique et ne permet que de faire un masque grossier. On y retrouve un désavantage récurrent du logiciel : un système de glissière pour choisir la valeur d'une variable (par exemple l'inclinaison du toit) qui ne permet pas d'entrer directement la valeur, il faut y aller en tâtonnant. Cependant un plugin (compris dans le pack payant) permet d'utiliser Google Sketchup, un logiciel gratuit d'architecture qui permet de dessiner les ombres proches.

Un onglet **besoins** permet de définir les appareils qui seront alimentés par l'installation, on peut aussi éditer le profil de chaque appareil. Le logiciel calcule alors les besoins annuels en kWh. Cet onglet permet de comparer plus tard dans l'onglet **résultats** la production et la consommation, ce qui peut être intéressant pour une installation autonome.

Vient ensuite l'onglet **Champs PV** (cf. fig5) qui permet de définir l'installation matérielle. Ceci est assez long sans la base de données car cela implique d'entrer à la main toutes les données sur les panneaux, l'onduleur... et nécessite d'avoir tous les documents techniques. C'est aussi ici que l'on définira l'orientation et la schématisation des panneaux. Malheureusement, on ne peut dessiner qu'un champ rectangulaire dont les panneaux sont en série soit dans le sens horizontal soit dans le sens vertical. On ne peut donc pas, par exemple, dessiner deux rangées différentes de panneaux qui soient en série.

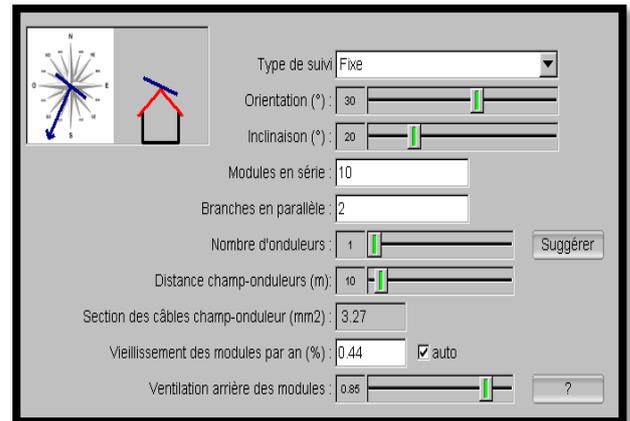


Figure 5 : Dimensionnement du champ PV (Archelios).

Le dernier onglet est un onglet **économie** assez complet.

La partie **résultats** (cf. fig6) est claire et divisée en quatre parties : les indicateurs de validité (rouge ou vert) pour savoir si le matériel est compatible ou non, la partie résultats économiques, la partie résultats de production, et la partie graphes de production. On peut ensuite générer un rapport au format PDF qui reprend les informations vues précédemment, et un glossaire très utile.

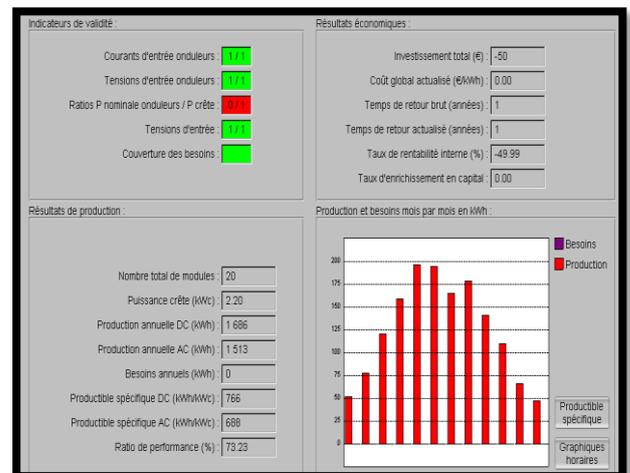


Figure 6 : Partie résultats dans Archelios

Conclusion : Archelios est un logiciel très pratique qui ne doit prendre toute sa valeur qu'avec les différents plugins et sa base de données. Sa rapidité d'utilisation dans sa version sans la base de données est gâchée par le fait de devoir rentrer toutes les informations à la main. On aurait aussi aimé plus de résultats, mais là encore, beaucoup sont disponibles dans les plugins. Le problème majeur du logiciel reste la définition des pertes. En effet, seules les pertes thermiques et ohmiques dues aux câbles sont prises en compte. Ceci ne permet donc pas la prise en compte précise des pertes dues aux ombrages ou aux salissures.

Les plus : Système d'onglet très pratique / simple d'utilisation / actualisation immédiate des résultats.

Les moins : Version gratuite sans aucune base de données / un peu limité dans les paramètres / résultats assez limités.

Cas concret : Installation A :

Rappelons que le logiciel a été testé sans la base de données Cythelia. Cela a donc pris du temps pour entrer les informations météorologiques et matérielles, ce qui gâche un peu la rapidité d'utilisation du système d'onglet. Un autre problème qui se pose est par rapport au dessin des ombres proches. En effet, le logiciel permet d'insérer un plan de masse (pris sur Google Earth). On dispose donc d'une vue de dessus sur laquelle on implante les objets 3D faisant de l'ombre. Le problème est que ces objets sont forcément des « cubes », avec ou sans toit, dont les dimensions minimales sont de un mètre par un mètre. On ne peut donc pas dessiner les arbres ou la cheminée. Pour cela il faut disposer du plugin fournis avec la base de données Cythelia qui permet d'utiliser Google Sketchup. Impossible aussi d'inclure les pertes dues à la salissure de la fumée de cheminée. On peut en déduire que ce logiciel est assez peu adapté pour les installations complexes.

Cas concret : Installation B :

Il faut encore une fois trouver les documentations techniques des modules et de l'onduleur pour pouvoir faire la simulation. Néanmoins cette fois nous obtenons des résultats beaucoup plus proches de la réalité que pour l'installation A, et ce en entrant beaucoup moins de paramètres qu'avec le logiciel PVSyst. Cela nous confirme que la version d'Archelios sans plugins ni base de données est suffisante pour dimensionner une installation simple, à conditions d'avoir les caractéristiques techniques de chaque élément.

3.3 CalSol (en ligne) :

Le logiciel CalSol [3] est disponible en ligne sur le site de l'INES [4]. Ce logiciel n'est pas un logiciel dédié au dimensionnement, néanmoins il fournit un ordre de grandeur. Il dispose d'autres outils très pratiques qui serviront dans les autres logiciels. Ce logiciel est intéressant aussi pour les novices qui souhaitent voir l'influence des différents paramètres d'une installation sur la production solaire.

Le logiciel est divisé en quatre parties : **ressource solaire, solaire photovoltaïque, solaire thermique et solaire passif**. Nous nous intéresserons aux deux premières parties.

La partie **ressource solaire** est un outil très pratique pour le dimensionnement d'installation photovoltaïque. On y trouve les données climatiques par mois allant de la température de l'air à la fraction solaire pour une multitude de ville en France. On y trouve aussi une partie gisement solaire qui donne sur un site donné, les irradiations globale, directe et diffuse reçues pour un angle et une orientation donnée. Le logiciel donne aussi

l'irradiation à l'horizontal, qui sera celle qu'il faudra entrer dans les logiciels de dimensionnement. On peut aussi entrer comme paramètre l'albédo du sol ainsi qu'un masque lointain sous forme de tableau, ce qui n'est pas très pratique.

La partie **Solaire photovoltaïque** est divisée en trois sous parties : *réseau, site isolé* ou *pompage*. La partie *réseau* permet une étude très rapide étant donné le peu de paramètres à renseigner. En effet si l'on ne tient pas compte des données économiques, il suffit de choisir une ville, une inclinaison et un angle des panneaux, le type de technologie et la puissance installée et pour finir le rendement global de l'installation dues aux pertes du convertisseur et des câbles. Les résultats sont alors présentés dans un tableau donnant l'irradiation globale dans le plan des panneaux en kWh/m² et la production en kWh pour chaque mois de l'année. Ensuite viennent diverses données économiques et données environnementales

Conclusion : L'outil CalSol est un outil très pratique, que ce soit pour un pré-dimensionnement ou pour obtenir des valeurs d'irradiation ou de données climatiques en France. De plus le site de l'INES peut servir pour une approche pédagogique du solaire.

Les plus : Rapide et pédagogique / très utile pour les données climatiques et d'ensoleillements en France ! / sert aussi pour le thermique et le passif.

Les moins : Dimensionnement peu fiable / masques difficiles à entrer / pas de modifications des données météo possibles.

Cas concret : Installation A :

L'absence de base de données matérielles rend la simulation à la fois plus simple et plus rapide, mais imprécise. On rentre simplement un rendement estimé entre 60% et 100% (d'où le manque de précision des résultats) pour toute l'installation. La simulation a été réalisée avec un rendement général déterminé à partir de la simulation réalisée sous PVSyst. Le système de masque ne permet pas d'entrer précisément la position de la cheminée.

Cas concret : Installation A :

Pour les mêmes raisons que pour l'installation A la simulation est assez imprécise, même pour une installation simple. On voit donc que l'intérêt du site est plutôt pédagogique. Il permet aussi de trouver de façon très rapide des données météo, utile pour effectuer des simulations avec d'autres logiciels.

3.4 Retscreen :

Retscreen International [5] est un centre d'aide à la décision sur les énergies propres financé par Ressource Naturel Canada (www.rncan.gc.ca). Ce centre a développé avec l'aide d'experts divers modules

utilisables sur Excel. Nous nous contenterons de présenter la partie production d'électricité photovoltaïque.

Les données climatiques utilisées par Retscreen sont fournies par des bases de données issues des satellites de la NASA et des stations au sol. On a donc ici des données météo mondiales, modifiables si nécessaire.

La partie photovoltaïque permet d'étudier cinq types d'installations : *connecté au réseau, connecté au réseau avec charge, réseau isolé, réseau isolé avec charge* et enfin *hors réseau*. On peut réaliser une étude rapide (feuille *modèle énergétique* à remplir) ou plus complète (on rajoute les feuilles *analyse des coûts, analyse des émissions, analyse financière* et *analyse des risques*). La base de données 'modules PV' est complète mais il faut noter l'absence de données pour les onduleurs. Une autre limitation est la prise en compte des pertes avec un pourcentage que doit choisir l'utilisateur.

Dans la partie résultats, la feuille **analyse des émissions**, permet de déterminer les réductions de GES par rapport à la production d'électricité fournie par le réseau ou un autre type de production d'énergie. La réduction de GES est exprimée en tonnes de CO2 mais le logiciel la convertit aussi en équivalent en véhicules non utilisés, barils de pétrole non consommés, tonne de déchets recyclés... Ceci est assez intéressant pour une approche éducative.

Pour terminer, une dernière feuille du logiciel Retscreen est un peu à part et regroupe divers outils concernant les énergies propres. Quelques-uns peuvent être utiles pour le photovoltaïque ainsi *Appareils et équipements* permet de déterminer la consommation électrique annuelle selon les équipements choisis. Les équipements vont de l'ordinateur à la bouilloire en passant par le séchoir à cheveu.

Conclusion : Le logiciel Retscreen est très complet en ce qui concerne les énergies propres, mais la partie photovoltaïque est beaucoup moins avancée que ce que propose les logiciels dédiés au photovoltaïque.

Les plus : *Totalement gratuit en version complète / aide très complète, site internet utile / partie financière intéressante.*

Les moins : *Développé sous Excel mais protégé / pas de calculs de pertes / pas de base de données onduleur.*

Cas concret : Installation A :

La simulation sur Retscreen est très rapide, à condition d'avoir déjà déterminé les pertes (nous utiliserons les valeurs fournies par PVSyst)... La base de données météo et la base de données panneaux solaires sont facilement accessibles. Les résultats

obtenus pour la production sont les plus éloignés des mesures réelles. Concernant la réduction des GES, le logiciel nous promet 0.2 tonnes de CO2 en moins, soit 85,9 litres d'essence non consommée. Cela correspond aussi aux 215kg de CO2 évités en France prévus par le logiciel CalSol.

Cas concret : Installation B :

Encore une fois ce logiciel est beaucoup plus probant sur une installation simple que sur une installation avec des pertes complexes. En entrant un coefficient de perte général déterminé avec PVSyst, nous arrivons à une simulation plutôt précise (voir récapitulatif fig. 9a et b).

3.5 PVGIS (en ligne) :

PVGIS [6] (pour Photovoltaic Geographical Information System) est un logiciel en ligne disponible sur le site internet de la Commission Européenne. Il s'agit en fait d'une carte interactive couplée à un système de calcul. Outre ces cartes interactives, le site propose des cartes de nombreuses données climatiques pour l'Europe, l'Afrique. Le logiciel n'est pour le moment disponible qu'en Anglais ou Italien.

Le logiciel est divisé en trois onglets pour l'Europe et quatre pour l'Afrique. Le premier permet d'obtenir des informations de production en énergie. Le second donne des informations d'irradiation mensuelle et le troisième des données d'irradiation sur une journée.

Il faut tout d'abord localiser l'installation sur la carte puis renseigner un certain nombre d'informations techniques (technologie des panneaux, puissance crête, pourcentage de pertes, orientation, inclinaison...). On obtient alors plusieurs types de résultats : irradiation horizontale, vertical, irradiation sous un angle choisi, irradiation à l'angle optimale de fonctionnement, le facteur de trouble de Link (utile pour Archelios), le rapport irradiation globale sur irradiation diffuse, mais aussi des données de températures. Ces données de température ne sont disponibles que pour l'Europe. Pour l'onglet d'irradiation moyenne sur une journée, les résultats sont donnés par quarts d'heure sur une journée solaire (du couché au lever du soleil).

Pour la carte de l'Afrique, un quatrième onglet permet l'estimation de production d'un système photovoltaïque autonome

Un rapport contenant les résultats est disponible sous trois formats : page web, texte, ou PDF. On peut aussi choisir d'afficher les graphes des données et une courbe d'horizon avec l'élévation du soleil et le masque lointain calculé automatiquement par le logiciel selon la position géographique choisie

Conclusion : PV Gis est un logiciel très facile à prendre en main grâce à son système de carte interactive qui évite d'entrer soit même les données météo et les masques. Malheureusement, il n'est pas possible d'insérer les masques proches.

Les plus : Très facile d'utilisation / masques, données météo pour l'Europe, l'Afrique et une partie de l'Asie / calculs et méthodes détaillés sur le site dans la rubrique FAQ.

Les moins : Pas de calculs des pertes / pas de modifications des données météo possibles.

Cas concret : Installation A :

Ce logiciel est le plus simple et le plus rapide à utiliser. Mais encore une fois comme pour tous les autres logiciels en ligne il n'y a pas de calculs des pertes et de masques proches.

Cas concret : Installation B :

En un clic sur la carte et quelques données entrées rapidement, on obtient une simulation précise à près de 4%. Et ce sans utiliser la base de données météo réelle de l'année simulée. De plus le calcul du masque effectué par le logiciel permet de confirmer que celui-ci est négligeable.

3.6 TecSol (en ligne) :

Le site de TecSol [7] propose un logiciel en ligne permettant le dimensionnement photovoltaïque pour un site isolé ou raccordé au réseau. Nous allons simplement nous intéresser aux installations raccordées au réseau.

La base de données météo comporte 400 stations qui couvrent l'Europe du Sud, les DOM-TOM et l'Afrique du nord. Le logiciel ne permet pas d'entrer soi-même les informations ou d'y avoir accès. On choisit ensuite le module photovoltaïque parmi les quatre catégories : polycristallin, monocristallin, amorphe ou couche minces (CdTe). La base de données reste limitée. Il reste ensuite à renseigner des données sur l'installation. On entre soit le nombre de modules, soit la surface totale, soit la puissance crête de l'installation. Viennent ensuite les données d'orientation et d'inclinaison des panneaux. Le dernier cadre à renseigner concerne les données financières... la page résultats récapitule les caractéristiques de l'installation et contient un tableau comprenant les données mensuelles suivantes : l'énergie solaire reçue sur le plan horizontal, l'énergie solaire reçue dans le plan des panneaux, et l'énergie électrique produite. Nous trouvons aussi les données environnementales et financières classiques (CO₂, gain, ...)

Conclusion :

L'application connectée réseau proposée par TecSol reste basique, en revanche la partie dimensionnement d'installation isolée est très intéressante.

Les plus : Rapide et facile d'utilisation / données financières très faciles à entrer / météo pour l'Europe du Sud et l'Afrique du nord.

Les moins : Pas de calculs des pertes / définition du masque peu pratique et très imprécise. / pas de modifications des données météo possibles.

Cas concret : Installation A :

Par chance la référence des modules de l'installation A se trouve dans très maigre base de données matériel du logiciel. En revanche impossible ici de choisir l'onduleur, d'entrer les pertes ou un rendement. Ceci explique sûrement l'écart entre la simulation et la production réelle.

Cas concret : Installation B :

La référence des modules de l'installation n'est cette fois pas présente dans la base de données du logiciel. Nous avons donc utilisé pour la simulation un module de même puissance crête. Il en résulte une simulation imprécise

3.7 Carnaval (en ligne) :

Logiciel un peu à part, Carnaval est gratuit et téléchargeable sur le site d'Incub' [8]. Il permet de dessiner le masque lointain de n'importe quel endroit en France. Très simple à utiliser, il suffit d'entrer les coordonnées du lieu (facilement repérable sur Google Earth) et le programme trace la courbe d'ensoleillement avec la ligne d'horizon (masque). On clique ensuite sur la courbe pour exporter les points ; on peut utiliser ce masque sur des logiciels comme PV Syst ou Archelios par exemple, comme on peut le voir sur la figure 7.

Tracé de la ligne d'horizon

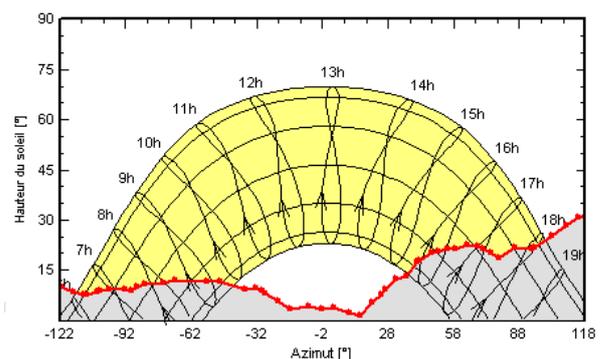


Figure 7 : Exemple de ligne d'horizon Carnaval

4 Analyse des résultats.

Les premiers résultats de simulation donnent un écart allant jusqu'à 20% par rapport à la production réelle. Deux raisons nous semblent prépondérantes pour expliquer la disparité des résultats. La raison principale est l'absence ou la mauvaise modélisation de certains paramètres (longueur des câbles, ombres, disparité des

modules, rendement des onduleurs...). Dans une moindre mesure, les écarts entre l'ensoleillement réel et les valeurs d'ensoleillement utilisées dans les modèles interviennent aussi.

En ce qui concerne l'ensoleillement, les modèles utilisés sont généralement obtenus à partir de pondérations mensuelles elles-mêmes moyennées sur 10 ans ce qui entraîne un lissage des courbes météo utilisées par les logiciels. A titre d'exemple on constate en 2009 sur les deux stations météo situés de part et d'autre de nos installations (Herm (données Météo France) et Université Paul Sabatier) une disparité de plus ou moins 12% selon les mois par rapport au modèle CalSol (cf fig10). Ces disparités induites (importantes au niveau du mois) sont généralement gommées pour un résultat annualisé (1% d'écart sur Toulouse en 2009)

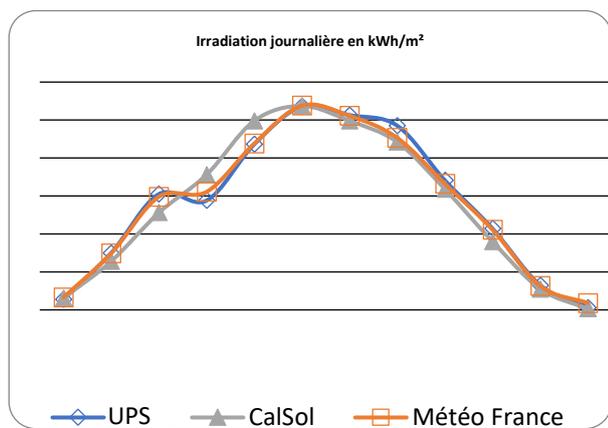


Figure 10 : Irradiation journalière, données Météo France, Université Toulouse III [9] et CalSol.

D'autre part les modèles eux-mêmes présentent une certaine disparité entre eux comme on peut le voir sur la figure 11.

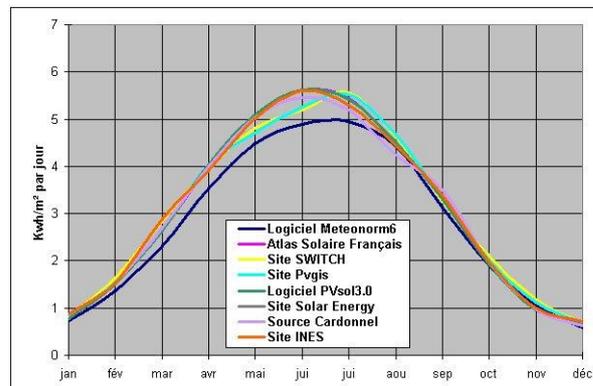
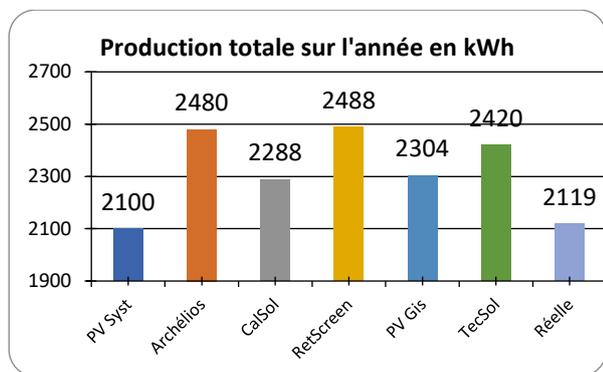


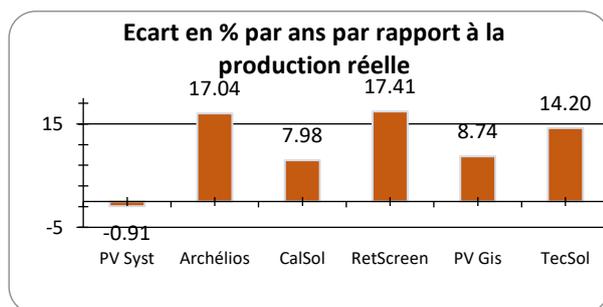
Figure 11 : données d'irradiation pour Paris selon les modèles d'ensoleillement utilisés [4]

Pour essayer de s'affranchir des problèmes météorologiques les simulations sont faites, lorsque cela est possible (logiciels :PV Syst, Archélios, Retscreen), avec les données météo réelles pour les 12 mois considérés. Les résultats sont présentés figures 8 et 9.

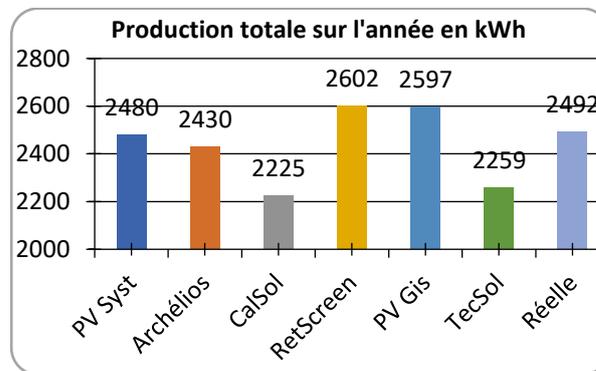
On constate comme on pouvait le penser que la qualité des prévisions est bien meilleure pour une installation simple (cas B) sans ombres portées. La figure 8b montre que les logiciels ne prenant pas en compte les ombres surestiment la production escomptée pour une installation avec des ombres (cas A).



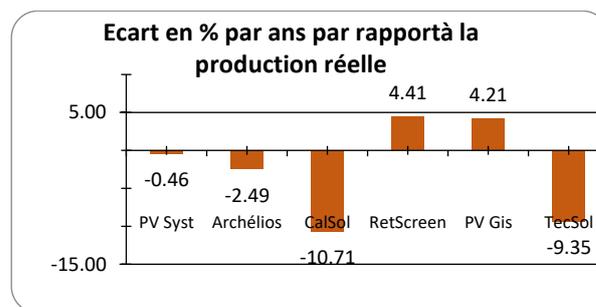
(a) Simulations et mesure.



(b): Ecart simulation/production Fig8 Installation A



(a) Simulations et mesure.



(b): Ecart simulation/production Fig9 Installation B

5 Conclusion.

Une synthèse des principales fonctions, des qualités et des défauts des logiciels utilisés est présentée dans le tableau 1 et la figure 12.

A travers cette étude nous avons pu constater qu'il est possible de faire une prévision fiable avec PVsyst et Archelios pour une installation simple, sans ombres portées, ni effets d'encrassement des panneaux.

La modélisation du système (et donc la connaissance des pertes associées) reste imparfaite pour la plupart des logiciels, les résultats obtenus ne peuvent alors être qu'indicatifs (comme le précise d'ailleurs Calsol et PVGIS).

Pour les installations complexes, seul PVsyst arrive à tirer son épingle du jeu bien que la modélisation de certains paramètres reste peu évidente.

Enfin il faut noter que prévision n'est pas prédiction, aussi les variations d'ensoleillement qui peuvent aller jusqu'à 10%/an par rapport à l'année moyenne entraînent des variations de la production annuelle qui ne peuvent être prédites. Il serait intéressant de disposer du gisement solaire et de la production réelle sur 10 ans pour voir si ces variations se compensent bien sur une durée assez longue.

Logiciel	PVsyst	Archelios	CalSol	Retscreen	PVGis	TecSol
Connecté Réseau / Installation Isolée	•/•	•/•	•/•	•/•	• /	•/•
Masque lointain / Masque proche	•/•	•/•	•/•	/	*•/	•/
Base de données matériel	•			**		**
Modification possible des données météo	•	•		•		
Bilan émission de CO2			•	•		•
prix	Gratuit 15 jours, licence 600€ + 150€ par poste	Gratuit sans base de données 300€ ou 500€ pour un poste	Gratuit, disponible en ligne	Gratuit	Gratuit, disponible en ligne	Gratuit, disponible en ligne

Tableau 1 : Caractéristiques des logiciels * : Pour l'Afrique seulement, ** : Modules seulement.

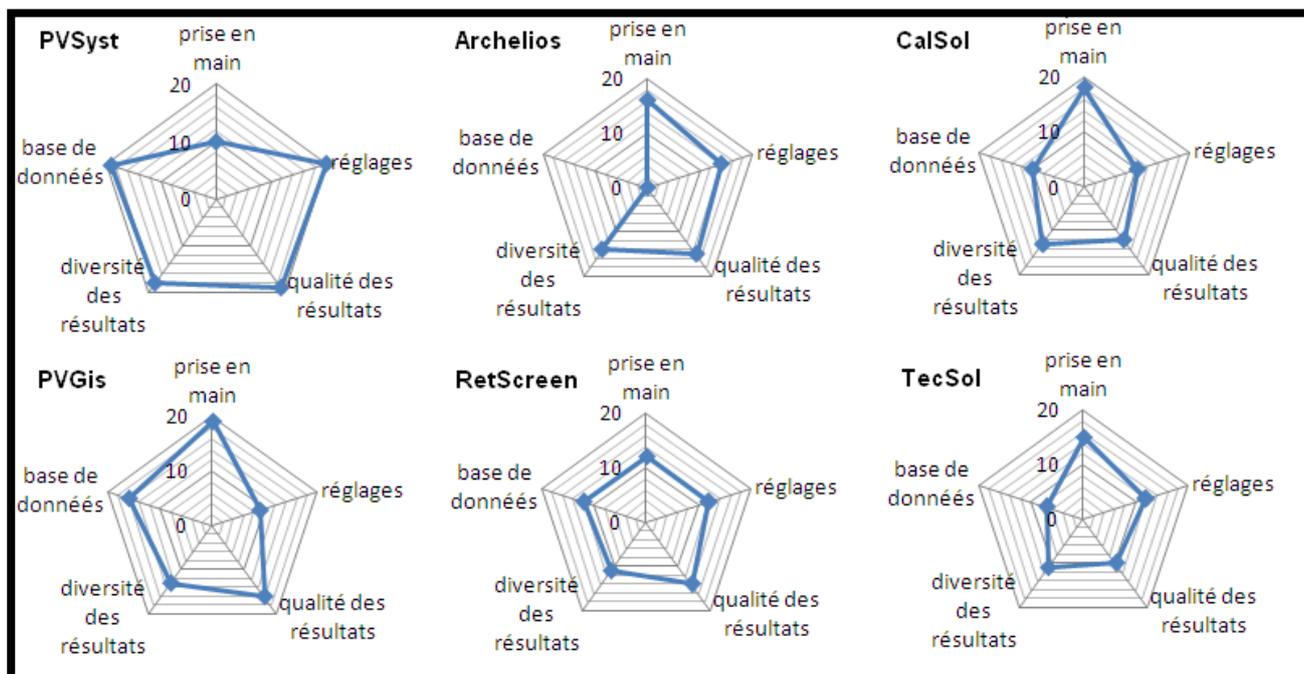


Figure 12 : Evaluation des critères pour chaque logiciel

REFERENCES

- [1] <http://www.pvsyst.com/5.0/index.php>
- [2] www.archelios.fr/
- [3] <http://ines.solaire.free.fr/>
- [4] www.ines-solaire.com/
- [5] www.retscreen.net
- [6] <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/>
- [7] www.tecsol.fr/
- [8] <http://www.incub.net>
- [9] <http://ufrpca-phy.ups-tlse.fr/meteo/index-251712.htm>

ANNEXES

Caractéristiques des installations :

Installation A : Toulouse, alt. 255m

toit : (Pente : 20°, +30° Sud)

Puissance installée : 2200Wc (Modules : Photowatt PW6-110, Onduleur : Photowatt PWI-6-30)

Installation B : Castanet (Toulouse) Alt. 216m

Support des panneaux (Pente : 34°, Sud)

Puissance installée : 2000Wc (Modules Kyocera KC125G-2, Onduleur : Fronius IG20EI)

VHDL pour la modélisation comportementale d'un synthétiseur de fréquence

Matthieu DENOUAL⁽¹⁾, Patrick ATTIA⁽²⁾

⁽¹⁾ENSICAEN, 6 Bd Maréchal Juin, 14050 Caen cedex 4

⁽²⁾NXP Semiconductors, 2 Esplanade Anton Philips, 14460 Colombelles

Résumé : dans cet article, nous présentons la modélisation haut-niveau en VHDL de systèmes électroniques. Cette présentation s'appuie sur une application concrète en télécommunication, un synthétiseur de fréquence. Riche et complète, cette application permet d'illustrer les potentialités de cette démarche de modélisation et son intérêt dans l'étude de systèmes électroniques mixtes complexes.

Introduction

Dans un monde où les circuits électroniques sont de plus en plus complexes, et où l'intégration poussée s'accompagne de performances accrues, le concepteur de circuits intégrés doit pouvoir s'appuyer sur des outils de conception et de validation performants.

Les circuits intégrés actuels combinent intimement des blocs analogiques et numériques. La part des blocs numériques tend à augmenter, remplaçant certaines parties auparavant analogiques ou intégrant de nouvelles fonctionnalités. Ainsi ces blocs numériques permettent, entre autres, de piloter les parties analogiques et d'effectuer des calibrations garantissant le respect des spécifications quelles que soient les variations de température, de tension d'alimentation et de conditions de procédé. Face à cette évolution, où plusieurs centaines d'interconnexions entre les blocs numériques et analogiques peuvent exister, l'adaptation des outils et des méthodes de validation semble nécessaire.

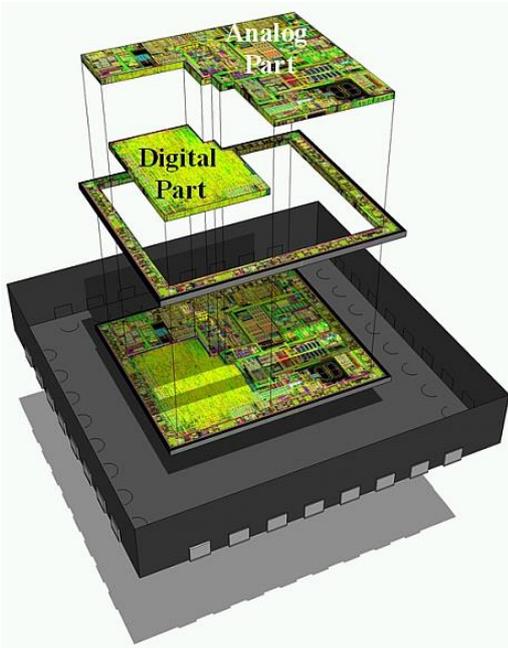


Figure 1: Illustration d'un tuner intégré

A titre d'exemple la **Figure 1** présente un tuner intégré. Ce circuit complexe est composé : d'une partie analogique comprenant notamment un amplificateur faible bruit, un mélangeur, une boucle à verrouillage de phase, et d'une imposante partie digitale permettant de piloter tout le circuit.

Lors de la phase de développement, les concepteurs analogiques et numériques font en sorte que leurs blocs respectifs répondent au mieux à leurs cahiers des charges. Une fois les différents blocs assemblés, il faut réserver suffisamment de temps aux validations top. On entend par validation «top», la validation du circuit complet dans son environnement. Cette validation haut-niveau vise à s'assurer que le circuit est fonctionnel c'est-à-dire, d'une part, que la communication entre les blocs analogiques et numériques est conforme aux attentes et, d'autre part, que les blocs analogiques sont correctement câblés entre eux. Il est clair que l'objectif de ce type de simulation n'est pas de remonter aux performances des blocs analogiques (bruit, linéarité, ...), performances qui restent sous la responsabilité du concepteur, mais de s'assurer que l'assemblage des différents blocs est correctement effectué. Cette vérification doit alors permettre d'obtenir des circuits fonctionnels afin de fournir des échantillons aux clients pour le développement de leurs applications et de respecter ainsi les engagements de délai de commercialisation.

A l'heure actuelle, trois approches de simulation mixte haut-niveau sont à notre disposition [1].

(1) L'approche « couplée » consiste à simuler les blocs numériques et analogiques dans leurs environnements respectifs avec leurs propres outils. Ainsi, pour une configuration donnée, les commandes issues du bloc numérique sont récupérées et fournies aux blocs analogiques. Cette approche permet une validation fonctionnelle ainsi qu'une évaluation des performances du circuit. Notons cependant qu'elle est, d'une part, limitée à des petits circuits ou à des sous parties uniquement et, d'autre part, qu'elle ne valide qu'une configuration particulière, de façon statique, sans interaction entre les blocs analogiques et numériques. Cette approche ne permet pas, par exemple, la validation des algorithmes embarqués.

(2) L'approche « intégrée » se réfère aux outils s'appuyant sur une paire d'algorithmes intimement liés effectuant la simulation globale et utilisant des outils de simulation mixte. Certains blocs seront alors simulés au niveau transistors tandis que d'autres utiliseront des modèles comportementaux afin de réduire le temps de simulation. Bien que ces outils soient adaptés aux simulations mixtes, ils ne permettent pas la validation de circuits complets, le temps de simulation étant beaucoup trop grand. Notons enfin que leur mise en œuvre peut s'avérer assez fastidieuse.

(3) Enfin, l'approche « augmentée » consiste à utiliser un seul type de simulateur pour valider l'ensemble du circuit. Dans cette approche, les blocs analogiques et numériques sont simulés dans le même environnement avec les mêmes outils. C'est cette approche qui est développée dans l'article. Elle consiste à utiliser un simulateur et un environnement purement digital (NC-Sim/Cadence ou MODELSIM/Mentor Graphics) pour valider l'ensemble du circuit. Les blocs analogiques sont alors modélisés en VHDL et/ou en Verilog. En utilisant des commandes spécifiques, on peut facilement, à partir d'un schéma, obtenir une netlist, c'est-à-dire une représentation des interconnexions en VHDL ou en Verilog, et simuler ensuite cette netlist dans cet environnement purement digital. Cette approche permet, d'une part, des temps de simulation relativement courts et, d'autre part, de s'affranchir des problèmes de convergence couramment rencontrés. Cette approche, qui vient en complément des méthodes de validation traditionnelles, nécessite de disposer des modèles des blocs analogiques, l'architecture de ces modèles étant fonction de ce que l'on souhaite valider.

Le langage utilisé pour la description comportementale des blocs analogiques varie selon les connaissances et les sensibilités de chacun. Ainsi, aux Etats-Unis on aura plutôt tendance à utiliser du Verilog tandis qu'en Europe on utilisera plutôt du VHDL. L'intérêt du VHDL est multiple : (i) ce langage dispose de packages mathématiques permettant de manier des nombres et des fonctions dans les domaines réels et complexes (*math_real* et *math_complex*) ; (ii) il permet également de manipuler des types spécifiques définis par l'utilisateur et des types enregistrement permettant d'avoir sur un même signal un ensemble d'informations (fréquence, tension, ...).

L'approche « augmentée » avec simulateur numérique repose sur une discrétisation temporelle des phénomènes analogiques. Elle permet donc de détourner l'utilisation classique du VHDL et de l'étendre à la simulation de blocs analogiques pour lesquels des modèles comportementaux sont développés, modèles généralement non synthétisables.

L'avantage direct de la simulation numérique, purement événementielle, est un gain de temps de simulation important. Ce gain peut encore être accru dans certains cas par une modélisation ad-hoc du système se focalisant sur les événements réellement liés au fonctionnement du circuit (c'est le cas dans l'exemple développé dans cet article). Elle sous-entend alors un effort de modélisation pour rendre correctement compte du fonctionnement analogique des blocs concernés. Le second avantage, lié à la robustesse des simulateurs numériques, est l'absence de problème de convergence des simulations.

Si cette approche permet une validation fonctionnelle des circuits mixtes complexes, elle ne prétend pas valider les performances du circuit. Ainsi, les performances en terme de bruit ou de linéarité par exemple, non modélisées, ne sont pas accessibles. Ce type d'analyse demeure le domaine réservé d'outils de simulation mixte ou purement analogiques.

Notons enfin que dans le milieu industriel, cette approche commence à s'imposer après une dizaine d'années de développement et d'améliorations dans le monde de la recherche [2-5].

D'un point de vue pédagogique, cette approche peut présenter plusieurs intérêts. Le premier est la manipulation du langage VHDL et d'outils de simulation numérique. Le second est la sensibilisation à une approche haut-niveau des circuits électroniques et à une réflexion en termes de systèmes intégrés complets avec blocs analogiques et numériques communicant entre eux. Le temps de simulation réduit est alors un avantage indéniable en TP ou en projet.

Pour résumer, contrairement aux méthodes de simulation classiques analogiques (SPICE, ADS, Spectre/Cadence) ou mixtes (AMS/Cadence) cette approche purement numérique permet des temps de simulation réduits sans problème de convergence. En complément des méthodes de simulation traditionnelles, le concepteur dispose alors d'un outil lui permettant de valider un circuit dans sa globalité avec notamment ses interfaces, les algorithmes embarqués... .

La suite de l'article développe cette approche « augmentée » de façon détaillée à travers un exemple concret : un synthétiseur de fréquence.

Après une présentation générale des synthétiseurs de fréquence et de leurs applications, la démarche de modélisation comportementale haut-niveau en VHDL est décrite à travers la description des différents blocs. Le rappel de quelques notions de programmation VHDL est présenté avec notamment l'utilisation et l'intérêt des types enregistrement. Enfin, les résultats de simulations permettent d'appréhender à sa juste valeur la puissance de cette approche.

L'intégralité des codes est disponible sur le site [6].

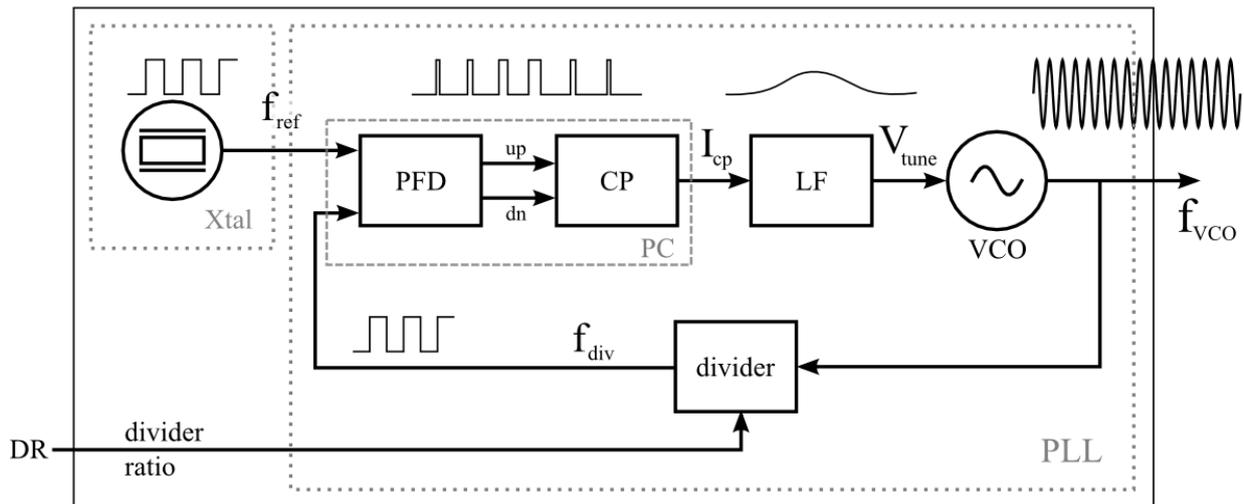


Figure 2: Schéma bloc d'un synthétiseur de fréquence à PLL (Phase-Locked Loop)

Xtal : oscillateur à quartz ; Comparateur de Phase (*Phase Comparator*), comprenant un détecteur de phase (*Phase Frequency Detector*) et une pompe à charge (*Charge Pump*); Filtre de boucle (*Loop Filter*) ; Oscillateur commandé en tension (*Voltage Controlled Oscillator*) ; diviseur de fréquence entier ou fractionnaire (*divider*)

1. Application support : synthétiseur de fréquence

L'objectif de cet article est la présentation de la modélisation en VHDL de blocs analogiques et leur simulation à l'aide des logiciels purement numériques, couramment utilisés, tels que NCsim de Cadence ou MODELSIM de Mentor Graphics. Dans ce contexte, une application complète et utile a été choisie comme support de présentation des possibilités offertes par cette approche. Cette application d'illustration est un synthétiseur de fréquence qui sera décrit de façon plus détaillée dans la suite de l'article.

1.1. Présentation générale

L'application support pour illustrer l'intérêt de la modélisation VHDL haut-niveau et de la simulation «top» est un synthétiseur de fréquence à boucle à verrouillage de phase fractionnaire [7, 8]. Cette application est volontairement complète et riche pour démontrer les possibilités et l'intérêt de cette approche de modélisation et de validation. Le synthétiseur de fréquence a pour fonction de générer, à partir d'un signal fourni par une référence, un signal dont la fréquence peut être ajustée dans une gamme de fréquences voulue. Le signal ainsi généré bénéficie alors de la stabilité de la référence utilisée, typiquement un quartz. Les synthétiseurs de fréquence sont des blocs couramment utilisés en électronique et notamment dans des applications de télécommunication radio. Le cas applicatif concret présenté par la suite correspond à un émetteur-récepteur DECT, *Digital Enhancement Cordless Telephone*, à la fréquence 1.9 GHz (standard Europe) pour la téléphonie numérique sans fil. Pour cette application, le synthétiseur doit être capable de couvrir une gamme de fréquence de l'ordre de 50 MHz et de passer d'un canal à un autre en quelques dizaines de micro secondes.

1.2. Description du synthétiseur de fréquence

Le schéma bloc du synthétiseur étudié est présenté Figure 2. On y retrouve la structure classique associant un oscillateur à quartz à une boucle à verrouillage de phase. Dans des schémas plus généraux, on peut trouver, après l'oscillateur, un diviseur de fréquence, *Reference Divider*, non présent dans l'application décrite ici. Sur la figure, les noms de blocs sont exprimés par des sigles anglophones en raison de leur compacité et pour la cohérence avec la littérature, principalement en langue anglaise dans le domaine.

Le synthétiseur de fréquence est donc composé d'un oscillateur à quartz servant de référence stable dans le temps et en température, appelé Xtal, et d'une boucle à verrouillage de phase dénommée PLL (*Phase-Locked-Loop*). La PLL est un système bouclé composé d'un comparateur de phase (*PC : Phase Comparator*), d'un filtre de boucle (*LF : Loop Filter*), d'un oscillateur contrôlé en tension (*VCO : Voltage Controlled Oscillator*) et d'un diviseur de fréquence, entier ou fractionnaire, dans la chaîne de retour (*divider*).

Le fonctionnement en boucle fermée assure, quand la PLL est verrouillée, une fréquence de sortie du VCO proportionnelle à la fréquence de référence suivant l'expression :

$$F_{VCO} = DR \cdot F_{ref},$$

avec *DR* le rapport de division (*Divider Ratio*), pouvant être soit entier, soit fractionnaire en moyenne. Dans ce dernier cas, on parle de PLL fractionnaire (voir encadré avant dernière page de l'article).

1.3. Problématique de la simulation du synthétiseur de fréquence

La fréquence de sortie du synthétiseur est bien souvent dans la gamme du GHz (autour de 2.5 GHz dans l'application décrite ici). Une telle fréquence impose un pas de simulation très petit (*time step*) à un simulateur, ce qui conduit à des temps de simulation très grands. Si l'on considère, d'une part, la fréquence Xtal dans la gamme du MHz (13.824 MHz), et, d'autre part, la fréquence propre de la PLL dans la gamme du kHz (≈ 55 kHz), un pas de simulation calculé à partir de la fréquence VCO est parfaitement inadapté pour décrire le comportement dynamique de la PLL. Un tel pas implique des temps de simulation considérables, dans le meilleur des cas, c'est-à-dire si la simulation converge.

La simulation événementielle et une description fonctionnelle en VHDL des blocs vont permettre de réduire ce temps de simulation. Le cadencement de la simulation est fait à un rythme plus faible, celui de la fréquence de l'oscillateur à quartz, de façon à être plus adapté au comportement dynamique de la PLL et à réduire ainsi le temps de simulation. Pour que cela fonctionne, il faut alors considérer deux domaines de fréquence, l'un « basse fréquence », correspondant aux fréquences inférieures à celle de l'oscillateur à quartz ou du même ordre de grandeur ; et l'autre « haute fréquence » pour les fréquences supérieures à celle de l'oscillateur à quartz. Ces domaines de fréquence sont illustrés Figure 3. Suivant le domaine, la fréquence des signaux est soit considérée comme un événement associé à un changement d'état ou de valeur du signal (*frequency=event*), soit comme une donnée réelle (*frequency=data*). Ainsi les hautes fréquences et notamment les fréquences VCO sont traitées comme des données alors que les basses fréquences, telle que la fréquence de l'oscillateur à quartz, sont traitées comme des événements. L'ensemble peut alors être simulé à un rythme adapté aux phénomènes événementiels « basses fréquences ».

Dans l'exemple présenté, les calculs ne se font plus au rythme du VCO mais à celui de l'oscillateur à quartz, deux ordres de grandeur en dessous. Typiquement, on passe de simulations pouvant durer des heures quand elles convergent (VHDL-AMS par exemple) à des

simulations de quelques dizaines de secondes grâce à l'approche événementielle et à la modélisation haut-niveau.

1.4. Aspects pédagogiques

Dans le contexte de l'enseignement, suivant le temps disponible, le travail peut être abordé sous forme de projet ou de travaux pratiques s'appuyant sur le code existant fourni sur le site [6].

La boucle à verrouillage de phase est un bloc fonctionnel de base essentiel dans nombre de systèmes de télécommunication (tuner, émetteur-récepteur, clock recovery). Les PLL discrètes et notamment celles utilisées en TP ou maquette, sont construites à partir de briques de base telles que le multiplieur, le VCO, ... Au niveau industriel, les PLL sont intégrées, embarquant sur le silicium quasiment tous les blocs présentés Figure 2. Le filtre de boucle, externe auparavant, tend lui aussi à être intégré dans les circuits actuels.

La modélisation VHDL constitue un biais supplémentaire d'approche de la PLL pour en faciliter la compréhension par les étudiants, comme un pont entre les approches purement automatiques, type Matlab, et les approches purement électroniques (Spice, maquettes). L'accès aux signaux transitoires et aux performances dynamiques de la PLL avec ce type de modélisation permet d'appréhender, entre autre, le phénomène de verrouillage (*lock*), phénomène rendu observable grâce aux simulations événementielles haut-niveau.

Le bloc de comparaison de phase peut constituer le cœur ou le début d'un projet autour de ce synthétiseur de fréquence. Ce dernier est en effet plus proche de l'utilisation classique du VHDL, abordé dans l'enseignement supérieur, et les étudiants peuvent, à partir des chronogrammes présentés Figure 6, écrire une description comportementale de ce bloc.

La vitesse de simulation et la convergence systématique sont des avantages dans le cadre d'un TP ou d'un projet pour limiter le temps d'inactivité lors de simulations et l'impatience des étudiants devant des simulations qui « ne marchent pas ».

La suite de l'article concerne la description générale de la PLL et introduit les notations que nous utilisons et que l'on retrouve dans les codes VHDL fournis.

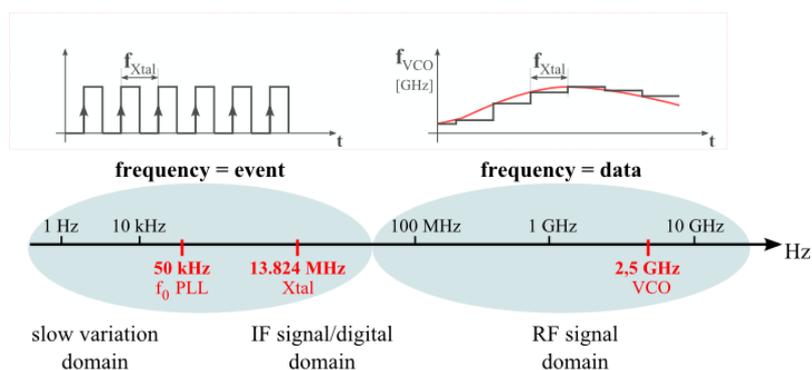


Figure 3: Domaines de fréquence. Dans le domaine des « basses fréquences », les signaux sont mis à jour au rythme de la fréquence de l'oscillateur à quartz. Dans le domaine « hautes fréquences », la fréquence VCO est une donnée réelle calculée à un rythme basse fréquence, celui de l'oscillateur à quartz.

2. Description du code

2.1. Xtal

Le *Xtal*, référence de fréquence, est un élément relativement simple à modéliser. Le code VHDL, d'une architecture possible, présenté dans l'encadré **Listing 1** permet d'introduire certaines conventions de programmation utilisées. L'ensemble de ces conventions et exigences de programmation sont regroupées dans un encadré spécifique, en fin d'article. La fréquence du *Xtal* est fixée par une constante, *Fxtal*, définie dans le package *constants_package* appelé en entête du code.

Le signal de sortie *xo* est du type *clock*. Il s'agit d'un type *record*, c'est-à-dire un type enregistrement, défini pour cette application et décrit dans le package *types_package* appelé également en entête du code.

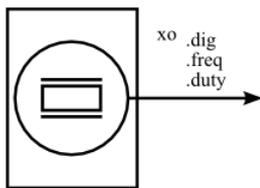


Figure 4: Schéma bloc du Xtal

La définition de types spécifiques permet, de part l'utilisation de *records*, de définir et d'avoir accès à différentes informations sur un même fil. Notons que l'utilisation de noms explicites facilitera la compréhension du code ainsi que sa maintenance. Le VHDL étant un langage fortement typé, un test de connectivité est effectué de façon transparente à la

Le type enregistrement (**record**) permet de rassembler des objets de types différents dans une même organisation. Chaque élément est appelé **champ**. Le type est défini en énumérant les champs. Par exemple, pour le type *clock*, tel qu'il est défini dans le package *types_packages* :

```
TYPE clock IS RECORD
    dig      : STD_LOGIC;
    freq     : real;
    duty     : real;
END RECORD;
```

Les champs sont *dig*, *freq* et *duty* de type *std_logic*, *real* et *real* respectivement.

Pour un signal ou une variable de type *record* le champ est adressé par le nom du signal ou de la variable suivi d'un '.' puis du nom du champ. Par exemple, le champ *dig* du signal *xo* est affecté comme suit :

```
xo.dig <= .....;
```

compilation, deux signaux connectés ensemble devant être de même type. Enfin, la présence des packages *math_real* et *math_complex* permet de manier respectivement des nombres et des fonctions réels et complexes.

Comme le montre la description comportementale du *Xtal*, Listing 1, un process autonome fait commuter, toutes les demi-périodes, un signal logique *clock_xtal*. Ce signal est affecté au champ *.dig* du signal *xo*. Les autres champs, *.freq* et *.duty*, sont affectés directement par des constantes correspondant à la fréquence de l'oscillateur à quartz et au rapport cyclique, constantes définies dans le package *constants_packages*.

```
LIBRARY ieee, work;
USE ieee.std_logic_1164.all;
USE ieee.math_real.all;
USE work.types_package.all;
USE work.constants_package.all;

ENTITY xtal IS
    PORT(
        xo : OUT clock
    );
END xtal;

ARCHITECTURE behaviour OF xtal IS

    SIGNAL clock_xtal : STD_LOGIC := '1';
    SIGNAL TdemiP     : TIME := 20.0 NS;
    SIGNAL TdemiN     : TIME := 20.0 NS;

    BEGIN
        c_clock : PROCESS
        BEGIN
            WAIT FOR TdemiP ;
            clock_xtal <= '0';
            WAIT FOR TdemiN ;
            clock_xtal <= '1';
        END PROCESS;

        TdemiP <= duty_cycle_xtal/Fxtal * 1.0e15 FS;
        TdemiN <= (1.0-duty_cycle_xtal)/Fxtal * 1.0e15 FS;
        xo.dig <= clock_xtal;
        xo.freq <= Fxtal;
        xo.duty <= duty_cycle_xtal;
    END behaviour;
```

Listing 1 : Code VHDL de modélisation du Xtal

2.2. Comparateur de Phase (PC)

Le comparateur de phase utilisé ici est un comparateur numérique 3-états comme le montre le schéma fonctionnel Figure 5. Le PFD (*Phase Frequency Detector*), constitué de deux bascules D et d'une porte NAND, compare les fronts de l'horloge de référence à ceux issus du diviseur. L'erreur de phase, décalage temporel des signaux, se traduit alors par des impulsions *up* et/ou *dn* en fonction du retard ou de l'avance de phase entre le signal de retour et la référence. Le comparateur de phase est un bloc clef puisque c'est lui qui génère le signal d'erreur permettant l'asservissement en boucle fermée. La pompe de charge (*Charge Pump*) convertit ces impulsions en variations de charge à l'entrée du filtre de boucle par la commande de deux sources de courant (I_{source} , I_{sink}). Des sources de courant plutôt que des sources de tension sont usuellement choisies car elles sont directement compatibles avec ce type de comparateur de phase 3-états (*charge pump structure*).

La Figure 6 illustre le fonctionnement de ce bloc. Quand le signal *ref*, issu de la référence, est en avance par rapport au signal *div*, issu du diviseur, le signal *up* passe à '1', fermant l'interrupteur supérieur. Le courant I_{source} est alors connecté à la sortie. Au front montant du signal *div*, les signaux *up* et *dn* sont à '1', ce qui conduit

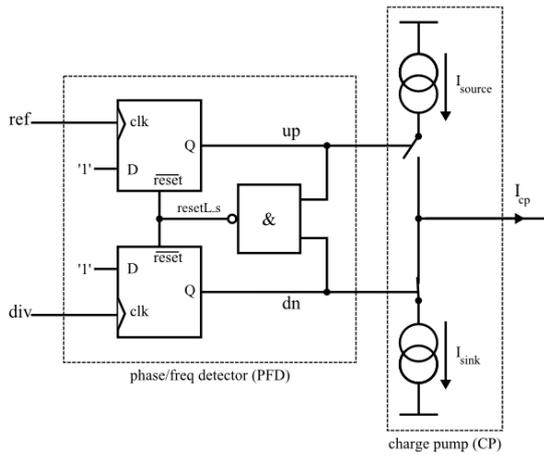


Figure 5: Schéma fonctionnel du comparateur de phase

au reset des bascules D et une mise à '0' des signaux *up* et *dn*.

Au contraire, quand le signal *div* est en avance par rapport au signal *ref*, le signal *dn* passe à '1', fermant l'interrupteur inférieur. Le courant I_{sink} est alors connecté à la sortie. Au front montant du signal *ref*, les deux bascules sont remises à zéro, forçant à '0' les signaux *up* et *dn*.

Ce bloc permet une approche de la modélisation VHDL haut-niveau du fait de la structure à base de

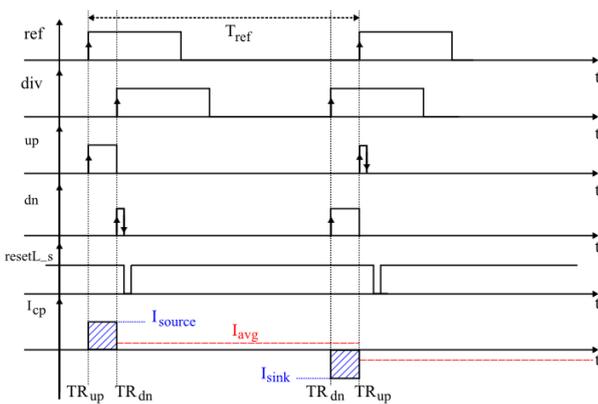


Figure 6: Chronogramme représentatif du fonctionnement du comparateur de phase

basculés D du PFD et de la modélisation plus particulière du CP. Il s'agit d'un bon début pour appréhender ce type de modélisation.

2.3. Filtre de boucle (LF)

Le filtre de boucle convertit les impulsions du courant issu de la pompe de charge, en une tension permettant de commander le VCO. Il contribue fortement aux performances en boucle fermée de la PLL puisqu'il agit sur la bande passante, l'amortissement et le temps de verrouillage (cf. expressions théoriques dans la partie 3 simulation).

Ce filtre peut être actif ou passif, l'avantage du passif étant d'être plus économique. Les filtres de type actif sont surtout utilisés quand les niveaux de tension doivent être relevés en sortie pour les adapter au VCO. Dans le cas des PLL modernes le filtre de boucle, auparavant bien souvent externe, tend de plus en plus à être intégré.

Dans le cas étudié, nous utilisons un filtre de boucle passif du 2nd ordre. Il s'agit d'un correcteur à avance de phase, voir la Figure 7. La capacité C_2 , très petite devant C_1 ($C_2 < C_1/10$), atténue les signaux parasites (*spurs*) dus notamment aux fuites de la référence.

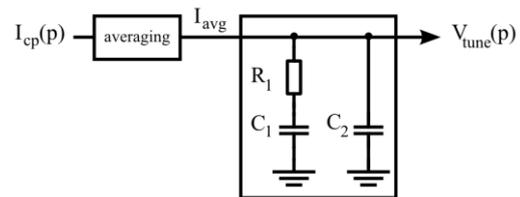


Figure 7: Filtre de boucle (Loop filter)

La fonction de transfert en notation de Laplace de ce filtre de boucle est donnée par :

$$F(p) = \frac{V_{tune}(p)}{I_{avg}(p)} = \frac{G \cdot (1 + \tau_z \cdot p)}{p \cdot (1 + \tau_p \cdot p)}$$

avec $G = \frac{1}{C_1 + C_2}$, $\tau_z = R_1 \cdot C_1$ et $\tau_p = \frac{R_1 \cdot C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2}$

La modélisation du filtre de boucle est obtenue par transformation bilinéaire $p \leftrightarrow \frac{2}{T} \cdot \frac{1 - z^{-1}}{1 + z^{-1}}$, avec T la période d'échantillonnage, égale à la période de l'oscillateur à quartz, pour transformer l'expression de Laplace à temps continu en expression à temps discrétisé.

Le passage à la transformée en Z conduit à :

$$\frac{V_{tune}(z)}{I_{avg}(z)} = \frac{G \cdot T_s \cdot (1 + z^{-1})}{2 \cdot (1 - z^{-1})} \cdot \frac{T_s \cdot (1 + z^{-1}) + 2 \cdot \tau_z \cdot (1 - z^{-1})}{T_s \cdot (1 + z^{-1}) + 2 \cdot \tau_p \cdot (1 - z^{-1})}$$

En développant cette expression et considérant que les termes z^{-n} correspondent à des retards, on arrive naturellement à l'équation de récurrence ou équation aux différences $V_{tune}(nT)$:

$$V_{tune}(z) = \frac{1}{2 \cdot (T_s + 2 \cdot \tau_p)} \cdot [I_{avg}(z) \cdot G \cdot T_s \cdot (T_s + 2 \cdot \tau_z) + z^{-1} \cdot I_{avg}(z) \cdot 2 \cdot G \cdot T_s^2 + z^{-2} \cdot I_{avg}(z) \cdot G \cdot T_s \cdot (T_s - 2 \cdot \tau_z) + z^{-1} \cdot V_{tune}(z) \cdot 8 \cdot \tau_p + z^{-2} \cdot V_{tune}(z) \cdot 2 \cdot (T_s - 2 \cdot \tau_p)]$$

$$V_{tune}(nT) = \frac{1}{2 \cdot (T_s + 2 \cdot \tau_p)} \cdot [I_{avg}(nT) \cdot G \cdot T_s \cdot (T_s + 2 \cdot \tau_z) + I_{avg}((n-1)T) \cdot 2 \cdot G \cdot T_s^2 + I_{avg}((n-2)T) \cdot G \cdot T_s \cdot (T_s - 2 \cdot \tau_z) + V_{tune}((n-1)T) \cdot 8 \cdot \tau_p + V_{tune}((n-2)T) \cdot 2 \cdot (T_s - 2 \cdot \tau_p)]$$

C'est cette équation de récurrence qui sera codée.

La modélisation VHDL nécessite alors la création de variables utilisées pour le vieillissement des données $I_{avg}(nT)$, $I_{avg}((n-1)T)$, $I_{avg}((n-2)T)$, $V_{tune}((n-1)T)$ et $V_{tune}((n-2)T)$. Des extraits du code VHDL sont présentés dans l'encadré Listing 2. Ce filtrage numérique est cadencé à la fréquence Xtal. Par conséquent, il ne peut pas être appliqué directement au signal entrant, I_{cp} , ce dernier devant être moyenné au préalable, en intégrant

```

ARCHITECTURE
behaviour_transformation_bilineaire OF lf IS
  SIGNAL Vtune      : REAL := 0.0;
  SIGNAL I_averag  : REAL := 0.0;
  SIGNAL Dtr       : REAL := 0.0;

BEGIN
  I_averag_Process : PROCESS          process de calcul de Iavg
    VARIABLE TRup   : TIME := 0 NS;
    VARIABLE TRdn   : TIME := 0 NS;
    VARIABLE Delta_time : TIME := 0.0 Ns;
  BEGIN
    WAIT ON cp.current;
    WAIT FOR 1 fs;
    Delta_time := TRdn - TRup;
    Dtr        <= real(Delta_time / 1.0 fs);
    I_averag   <= ICP * Dtr * 1.0E-15 *
cp.freq;
  END PROCESS I_averag_Process;

  PROCESS (I_averag)          process du filtre de boucle
    VARIABLE charge_previous : REAL := 0.0;
    VARIABLE charge_pprevious : REAL := 0.0;
  BEGIN
    ---
    vdc_out := 1.0/(2.0*(Ts + 2.0*tau_p)) +
(I_averag*G*Ts*(Ts+2.0*tau_z) +
charge_previous*2.0*G*Ts*Ts +
charge_pprevious*G*Ts*(Ts-2.0*tau_z) +
vdc_out_previous*8.0*tau_p +
vdc_out_pprevious*2.0*(Ts-2.0*tau_p));
    ---
    charge_pprevious := charge_previous;
    charge_previous := I_averag;
    vdc_out_pprevious := vdc_out_previous;
    vdc_out_previous := vdc_out;
    ---
    Vtune <= vdc_out;
  END PROCESS;
  vco.vdc <= Vtune;
END behaviour_transformation_bilineaire;

```

Listing 2 : Extraits du code VHDL du filtre de boucle

le courant sur une période (cf. I_{avg} , **Figure 7**). Sans ce moyennage, la cadence du filtre numérique obtenu par transformation bilinéaire ne serait pas assez rapide pour représenter fidèlement le fonctionnement du filtre de boucle. Les variations de I_{avg} sont dans la bande [0 ; 55 kHz] représentative du comportement de la PLL, soit plusieurs ordres de grandeur sous la fréquence du quartz (13.824 MHz). Cette dernière peut donc être utilisée sans problème pour cadencer le filtre discrétisé obtenu par transformation bilinéaire.

2.4. Oscillateur contrôlé en tension (VCO)

Le VCO fournit en sortie un signal dont la fréquence varie avec la tension, V_{tune} , appliquée en entrée. La **Figure 8** propose une implémentation possible d'un VCO multi-bandes constitué d'un résonateur LC et d'une conductance négative, la fréquence en sortie du VCO étant donnée par :

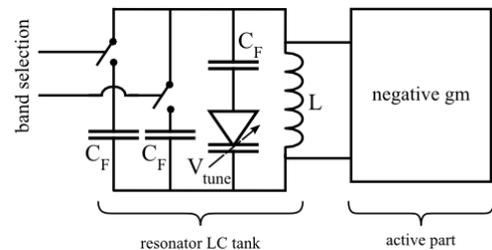


Figure 8 : Schéma de principe d'un VCO multi-bandes

$$F_{VCO} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

avec L la self et C la capacité équivalente, composée de capacités fixes (C_F) et de capacités variables (des diodes varicaps) dont la valeur est fonction de la tension V_{tune} .

La **Figure 9** présente la caractéristique fréquence/tension du VCO de notre application. Pour éviter que le VCO ne soit perturbé par les signaux émis et/ou reçus, celui-ci travaille à 4/3 de la fréquence voulue soit autour de 2.5 GHz. Ce VCO possède

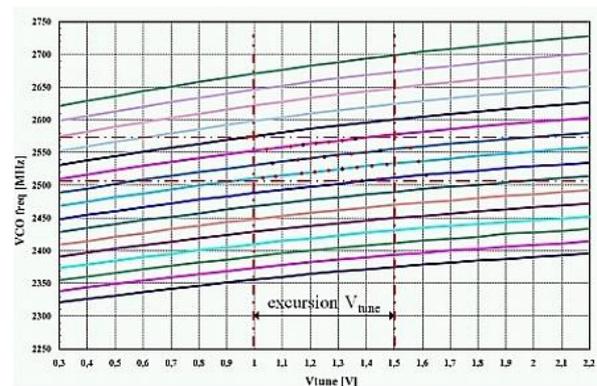


Figure 9 : Caractéristique fréquence/tension du VCO utilisé. Dans la zone d'intérêt (entre 2.5 GHz et 2.575 GHz) l'excursion de la tension V_{tune} est limitée à $1.25 V \pm 0.25$

différentes bandes de fréquence, obtenues en connectant des capacités aux bornes du résonateur LC. Ces bandes sont accessibles *via* 4 bits permettant d'en sélectionner une parmi 16 (2^4). L'intérêt d'un VCO multi-bandes est double. D'une part, il autorise une marge de réglage en cas de dérive du procédé de fabrication et/ou de la température. D'autre part, le passage d'une bande à une autre permet de limiter l'excursion de la tension V_{tune} et ainsi de réduire le temps de verrouillage (cf. expression théorique un peu plus loin).

Le modèle proposé ici est issu de mesures et de l'extraction des paramètres par une interpolation polynomiale de la fréquence en fonction de la tension d'entrée. Un polynôme du second ordre permet en effet de représenter convenablement le comportement du VCO, ce qui conduit à des expressions du type :

$$F_{VCO} = a.V_{tune}^2 + b.V_{tune} + c$$

La description VHDL consiste alors à écrire, pour les différentes bandes, les expressions polynomiales de la fréquence en fonction de la tension V_{tune} . Le signal en sortie de VCO, de type RF, possède un champ *freq* et un champ *phase*. La fréquence calculée en sortie du VCO permet d'affecter le champ *freq*. Cette fréquence est alors une grandeur réelle manipulée comme une donnée, aucun signal à cette fréquence n'étant généré. Le bloc diviseur suivant réalisera la transition entre le monde « hautes fréquences » où l'on manipule des données et le monde « basses fréquences » où l'on manipule des événements. Ainsi, cette approche permet un temps de simulation court puisque seules les transitions basses fréquences sont considérées.

2.5. Divider

Dans l'application présentée ici, le bloc de division est fractionnaire, ce qui permet d'obtenir, en sortie du VCO, une fréquence qui n'est pas un multiple entier de la fréquence de l'oscillateur à quartz. Ceci permet alors, contrairement aux PLL dont le rapport de division est entier, d'avoir un écart entre deux canaux différent de la fréquence de l'oscillateur à quartz. La plus grande souplesse obtenue dans le rapport de division permet

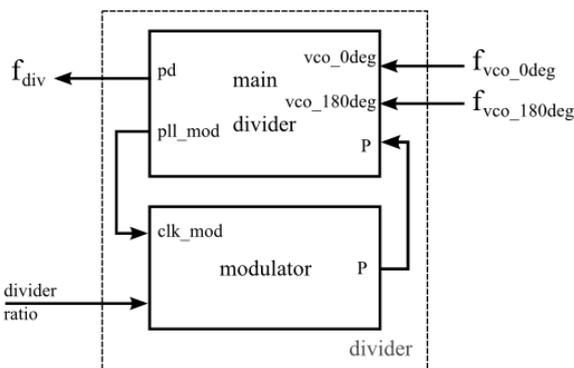


Figure 10 : Schéma du diviseur de fréquence fractionnaire

aussi des améliorations des performances dynamiques de la boucle et des performances en termes de bruit [7] (voir l'encadré *avantages des PLL fractionnaires*).

Le bloc diviseur de fréquence fractionnaire (*divider*) est composé d'un modulateur (*modulator*) et d'un diviseur de fréquence (*main_divider*), comme le montre la **Figure 10**. Suivant le rapport de division (*divider ratio*), le modulateur fournit au diviseur de fréquence un rapport de division dynamique P égal soit à la valeur entière N soit à N+1. Ce rapport de division évolue à la fréquence de l'oscillateur à quartz lorsque la PLL est verrouillée. En moyenne, ce rapport de division correspond au rapport de division souhaité.

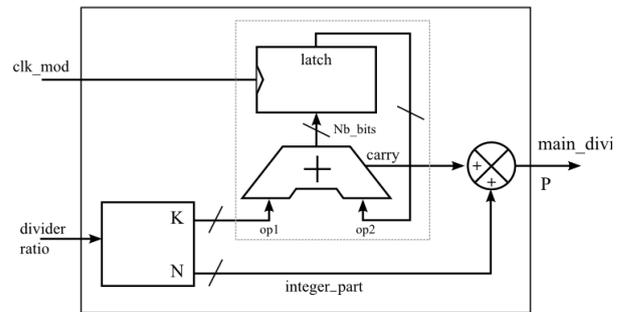


Figure 11 : Schéma du modulateur

La **Figure 11** propose une implémentation du modulateur. Le rapport de division est décomposé en une partie entière N et une partie décimale K^* . En fonction du nombre de bits (Nb_bits) et de cette partie décimale K^* , le modulateur cadencé à la fréquence clk_mod fournit un rapport de division N ou N+1. Le rapport de division moyen s'exprime par :

$$DR = N + K^* = N + \frac{K}{2^{Nb_bits}}$$

Le **Tableau 1** illustre, sur un exemple, le principe du fonctionnement du modulateur, et notamment la génération de la retenue (*carry*). Compte tenu de la partie décimale du rapport de division et du nombre de bits (dans cet exemple $K^* = 0.1875$ et $Nb_bits = 4$), l'opérande 1 à l'entrée de l'additionneur, c'est-à-dire K, est égal à 3. L'opérande 2 quant à lui évolue à la fréquence de l'oscillateur à quartz. On constate alors que la *carry* est égale à '1' à 3 reprises et les autres fois, c'est-à-dire (2^4-3) fois, elle est égale à '0'. Cette séquence est périodique et se répète tous les 2^{Nb_bits} coups d'horloge, soit tous les 16 coups d'horloge.

Cette *carry* est ensuite additionnée à la partie entière N du rapport de division ce qui conduit, sur un cycle de 16 coups d'horloge, à générer 3 fois N+1 et (2^4-3) fois N.

clk	op1	op2	Σ	carry
1	3	0	3	0
2	3	3	6	0
3	3	6	9	0
4	3	9	12	0
5	3	12	15	0
6	3	15	2	1
7	3	2	5	0
8	3	5	8	0
9	3	8	11	0
10	3	11	14	0
11	3	14	1	1
12	3	1	4	0
13	3	4	7	0
14	3	7	10	0
15	3	10	13	0
16	3	13	0	1
17(1)	3	0	3	0

Tableau 1 : Exemple d'évolution des opérands du modulateur pour Nb_bits = 4 et K* = 0.1875,

$$\text{conduisant à } F_{\text{synth}} = F_{\text{ref}} \left(N + \frac{3}{2^4} \right)$$

La modélisation du divider est conforme au schéma de la Figure 10 avec d'une part le diviseur de fréquences et d'autre part le modulateur.

La modélisation du diviseur de fréquence ressemble à celle du Xtal avec dans ce cas deux process autonomes générant des signaux logiques de fréquence :

$$Freq = \frac{Freq_{VCO}}{P}$$

Un process génère le signal pour la chaîne de retour et l'autre un signal de cadencement pour le modulateur.

Quant à la modélisation du modulateur, elle décrit exactement le schéma Figure 11 avec, d'une part le calcul de N et de K et d'autre part deux process, l'un représentant l'additionneur et l'autre la bascule cadencée à la fréquence clk_mod.

Rappelons enfin que ce bloc interface les domaines frequency=data et frequency=event définis à la Figure 3 en générant, à partir d'une donnée réelle représentant la fréquence du VCO, un signal cadencé à la fréquence Freq_{VCO}/P.

3. Simulation comportementale du synthétiseur

Le logiciel de simulation utilisé est MODELSIM-Altera 6.3 Quartus II 8.1 qui présente l'avantage d'être téléchargeable gratuitement en ligne dans sa version webedition. Cette version est suffisante pour simuler le synthétiseur de fréquence et visualiser les signaux [9].

Un document, en format pdf, disponible sur le site hébergeant le projet [6], permet une prise en main rapide de l'outil (MODELSIM Simulation Tour).

En règle générale lors de la réalisation du projet, il faut penser à créer des bancs de tests, testbench, pour chaque bloc modélisé, la validation fonctionnelle de chacun des blocs étant indispensable avant l'assemblage. Bien réfléchir à la structure du test est aussi important dans le développement du projet que la réflexion sur les blocs eux-mêmes.

La Figure 12 présente l'assemblage de la PLL d'un point de vue modélisation. Elle reprend les noms des fichiers de code VHDL associés à chacun des blocs. On y trouve également la structure complète du banc de test

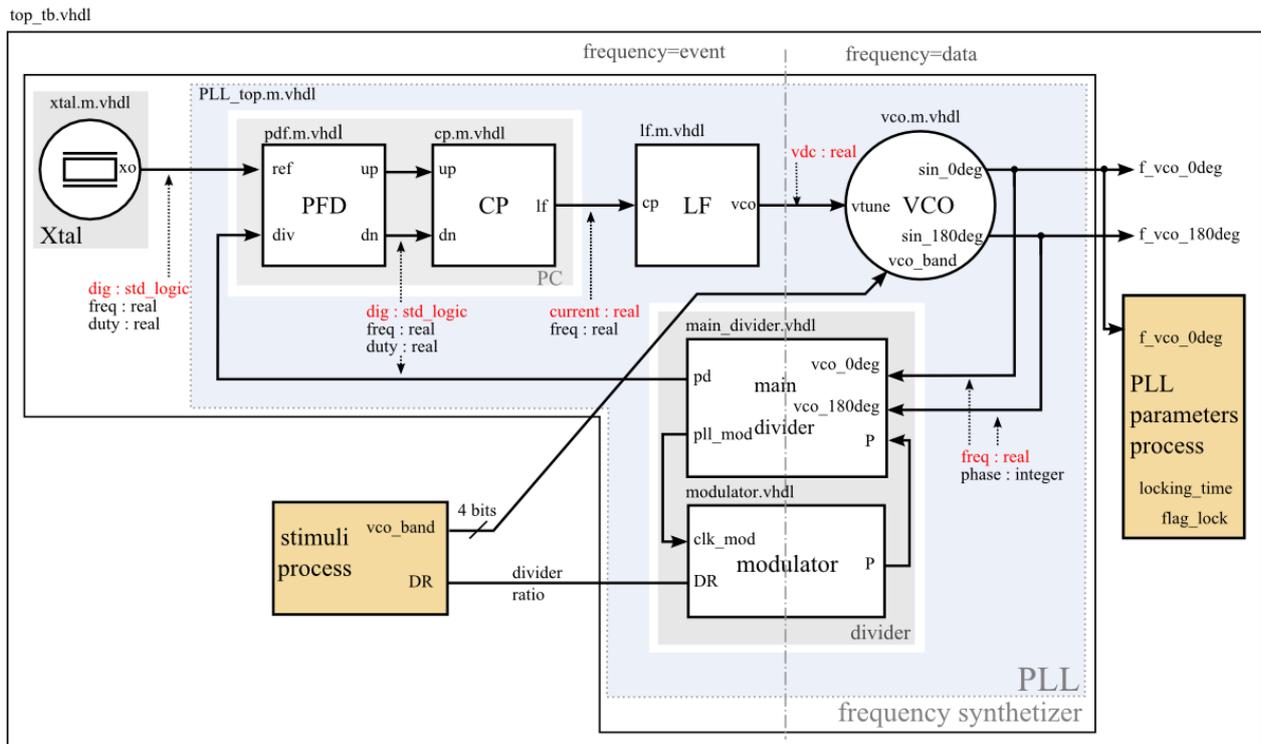


Figure 12 : Schéma bloc complet représentant la PLL et son banc de test. Les noms des fichiers VHDL ainsi que les types des signaux entre les blocs sont précisés. On distingue également les régions pour lesquelles les signaux sont traités comme des événements ou comme des données réelles. Le process stimuli génère le choix de la bande VCO et le rapport de division fractionnaire alors que le process PLL_parameters évalue les paramètres clés de la PLL.

avec : (i) un bloc, *stimuli process*, permettant de générer les signaux de commande du synthétiseur de fréquence, à savoir le sélecteur de bande du VCO et le rapport de division ; (ii) un bloc, *PLL parameters process*, permettant de calculer les paramètres clés de la PLL et de vérifier qu'ils sont en bon accord avec les résultats de simulation. Ce bloc évalue notamment le temps de verrouillage, le coefficient d'amortissement et la fréquence naturelle.

Ce qui est intéressant dans cette approche est d'évaluer les performances dynamiques et en particulier le temps de verrouillage utile pour caractériser le temps de réponse lors du changement d'un canal fréquentiel à un autre. Ce temps de verrouillage définit la durée de l'approche de l'état final (en théorie le système n'atteint jamais un état stable) dans un intervalle défini, par exemple +/- 10 kHz de la fréquence de consigne. En jouant par exemple sur les paramètres du filtre de boucle, paramètres stockés dans le package *constants_package*, on visualise aisément le comportement dynamique de la PLL.

Nous renvoyons les lecteurs vers les références et notamment [7] pour y trouver les développements théoriques du fonctionnement de la PLL et du synthétiseur de fréquence. Nous nous contenterons ici de rappeler les principaux résultats et en particulier les performances dynamiques pour mettre en évidence les résultats de simulation par rapport aux attentes théoriques.

La fonction de transfert en notation de Laplace $H_\phi(p)$ d'une PLL en boucle fermée est donnée par :

$$H_\phi(p) = \frac{\varphi_{VCO}(p)}{\varphi_{ref}(p)} = \frac{K_D \cdot K_O \cdot F(p)}{1 + \frac{K_D \cdot K_O \cdot F(p)}{N}}$$

avec $K_D = I_{cp} / 2 \cdot \pi$ et $K_O = 2 \cdot \pi \cdot K_{VCO}$

respectivement les gains du comparateur de phase et du VCO. $F(p)$ correspond à la fonction de transfert du

filtre de boucle et N le rapport de division. En remplaçant $F(p)$ par son expression et en négligeant l'effet de C_2 ($C_2 < C_1/10$), on peut écrire :

$$H_\phi(p) = \frac{1 + \frac{2\xi}{\omega_n} p}{1 + \frac{2\xi}{\omega_n} p + \frac{p^2}{\omega_n^2}}$$

avec $\omega_n = \sqrt{\frac{K_D \cdot K_O}{N \cdot C_1}}$ la pulsation naturelle, et ξ

l'amortissement donné par : $\xi = \frac{R_1 \cdot C_1}{2} \cdot \omega_n$

Comme on peut le constater, la fonction de transfert, $H_\phi(p)$, de ce système bouclé est du second ordre puisque le filtre de boucle utilisé pour ces calculs est du premier ordre.

Dans ces conditions, une estimation pessimiste du temps de verrouillage ou temps de *lock* est donnée par :

$$t_{sw} = \frac{-\ln(\xi \cdot \delta)}{\xi \cdot \omega_n} \text{ avec } \delta = \frac{\Delta f_{tol}}{f_{step}} \text{ et } \Delta f_{tol} \text{ l'écart en}$$

fréquence tolérable autour de la fréquence souhaitée et f_{step} le saut de fréquence entre f_1 et f_2 .

Le temps de verrouillage correspond donc au temps que met le VCO pour passer de la fréquence f_1 à la fréquence f_2 avec une précision de Δf_{tol} .

Application numérique : pour $f_{step}=27$ MHz ; $I_{cp}=1$ mA ; $K_{VCO}=50$ MHz/V ; $N=187$; $R_1=2.2$ k Ω ; $C_1=2.2$ nF ; $\Delta f_{tol}=10$ kHz

- $f_n = \frac{\omega_n}{2\pi} \approx 55.5$ kHz

- $\xi \approx 0.84$

- $t_{sw} \approx 27.5$ μ s

La **Figure 13** présente les résultats de simulation. L'évolution dans le temps de la fréquence VCO permet d'observer l'allure de la réponse, caractéristique d'un système bouclé du second ordre avec :

- A gauche, un coefficient d'amortissement de l'ordre de l'ordre de 0.84 et pour lequel le système est sur-amorti ($\xi > \sqrt{2}/2$).

- A droite, un coefficient d'amortissement de l'ordre de 0.19, conduisant à un système sous-amorti ($\xi < \sqrt{2}/2$).

Ce coefficient d'amortissement est obtenu en faisant passer R_1 de 2.2 k Ω à 500 Ω . On note également un bon accord entre la fréquence naturelle calculée et celle obtenue par simulation (≈ 55 kHz).

Ces résultats de simulation permettent également de remonter au temps de verrouillage. Les temps de verrouillage obtenus par simulation, en utilisant les

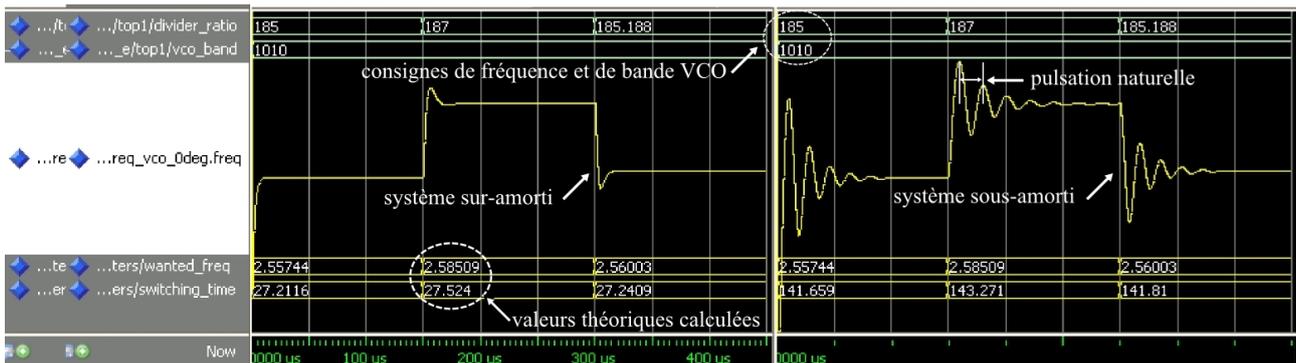


Figure 13 : Résultats de simulation avec les paramètres suivants : $C_1=2.2$ nF, $C_2=150$ pF, $I_{cp}=1$ mA, $K_{vco}=50$ MHz/V, $DR=187$, VCO_Band : hA. A gauche $R_1 = 2.2$ k Ω conduisant à un comportement sur-amorti et à droite $R_1 = 500$ Ω conduisant à un comportement sous-amorti.

courseurs du logiciel, pour un saut de fréquence d'environ 27 MHz et un écart de fréquence tolérable de 10 kHz, sont en accord avec les valeurs théoriques soit 27.5 μ s pour l'amortissement de 0.84 et 144.3 μ s pour l'amortissement de 0.19.

Notons que l'on peut automatiser l'extraction des temps de *lock* simulés ou d'autres paramètres d'intérêt dans le fichier *Testbench* en créant des signaux supplémentaires correspondants aux valeurs que l'on souhaite afficher et en définissant leur méthode d'extraction dans le code. Cela permet de s'affranchir de l'utilisation des curseurs lorsque de nombreuses simulations sont envisagées.

Notons enfin que ce type de simulation ne dure que quelques secondes, ce qui permet aux étudiants de faire varier les paramètres de simulation (composants du filtre de boucle, courant de la pompe de charge, rapport de division, bande VCO...) pour en observer l'influence.

Conclusion

La simulation événementielle permet, après une discrétisation temporelle des phénomènes analogiques, une simulation entièrement numérique focalisée sur les événements d'intérêt. Le gain en temps de simulation est alors considérable et les problèmes de convergence,

fréquemment rencontrés lors de la simulation de gros circuits, sont inexistantes.

Cette approche est particulièrement adaptée à la simulation fonctionnelle de circuits complets, embarquant à la fois des parties analogiques et numériques. Elle permet alors de vérifier : (i) la connectivité des blocs ; (ii) le déroulement des algorithmes au niveau «top» ; (iii) les modes de fonctionnement du circuit.

L'exemple présenté dans cet article, un synthétiseur de fréquence, se prête parfaitement à la mise en œuvre de cette approche, alliant à la fois des blocs analogiques et numériques. L'utilisation du VHDL revêt plusieurs intérêts, et notamment, l'existence de packages mathématiques et de types enregistrements (records).

Cet exemple démontre comment à partir de modélisations relativement simples, on réussit à rendre compte du fonctionnement et du comportement dynamique d'une PLL. Ainsi, en jouant sur les paramètres de la PLL (filtre de boucle, courant de la pompe de charge, rapport de division) on remonte à des informations comme le temps de verrouillage.

Notons enfin que cet article est le fruit d'un projet d'enseignement que nous avons dispensé en 2009, sur un volume horaire de 40 heures, en Mastère micro-électronique de l'ENSICAEN.

Consignes de programmation VHDL pour la modélisation haut-niveau

Note 1 : Définition de types spécifiques

La première étape lors de la modélisation, la **définition des types**, est fondamentale car elle conditionne le développement ultérieur. Un temps suffisant doit y être consacré. Le langage VHDL étant typé, la définition de types peut être utile pour le test de connectivité entre les blocs, ce dernier, effectué de façon transparente à la compilation, permettant de garantir que seuls sont connectés entre eux des signaux de même type. Ce check de connectivité est crucial dans les applications modernes pour lesquelles on peut avoir jusqu'à plusieurs centaines de connexions entre les blocs analogiques et les blocs numériques.

L'utilisation de type enregistrement (records) permet, en plus, de disposer sur un même fil de différentes grandeurs, adressables indépendamment. Les types définis dans l'application sont rappelés ci-dessous :

```

TYPE clock IS
RECORD
dig   : STD_LOGIC;
freq  : real;
duty  : real;
END RECORD;

TYPE charge_pump IS
RECORD
current : real;
freq    : real;
END RECORD;

TYPE V_tune IS
RECORD
vdc : real;
END RECORD;

TYPE RF IS
RECORD
freq : real;
phase : integer;
END RECORD;

```

Note 2 : Initialisation des signaux et des variables

Une attention particulière doit être portée à l'**initialisation des variables et signaux**, sans quoi la simulation peut générer une erreur dès le lancement à cause des grandeurs non définies.

Remarque : d'expérience nous avons pu constater que les différents logiciels de simulation sont plus ou moins souples avec cette étape d'initialisation des signaux et variables. Pour certains logiciels elle est indispensable, pour d'autres elle peut être optionnelle. Les codes fournis correspondant à ce projet ont été validés pour ModelSim 6.3.

Note 3 : Process avec liste de sensibilité

Une liste de sensibilité permet d'activer un process dès que l'un des signaux qu'elle contient évolue. Cette liste peut être passée, soit en l'indiquant entre parenthèses derrière le mot *process*, soit en utilisant l'instruction **wait on** dans le process. Ainsi, l'instruction *wait on toto, tata* ; est équivalente à *process(toto, tata)*. Le code du PFD, utilisant ces deux écritures permet d'illustrer ces propos.

La différence subtile entre ces deux écritures, réside dans le fait que l'instruction **wait on** autorise l'utilisation dans un process de l'instruction **wait for**, instruction qui suspend l'exécution du process pendant un temps déterminé. Ceci est particulièrement intéressant, notamment au démarrage de la simulation pour laisser le temps aux variables et aux signaux de s'initialiser, c'est le rôle des instructions *wait for 1fs* que l'on peut retrouver dans certains codes.

Les références [10-12] permettront une bonne compréhension du langage VHDL et de la modélisation.



Références

La majorité des références ci-dessous sont accessibles par internet.

[1] Simulation des circuits analogiques et mixtes, Joël Besnard, Pascal Bolcato, Dézai Glao, Hervé Guégan, Techniques de l'ingénieur E 3 450

[2] Mixed-Signal Event-Driven Simulation of a Phase-Locked Loop, Martin Schubert, BMAS Workshop 1999

[3] Behavioral Simulation of Fractional-N Frequency Synthesizers and Other PLL Circuits, Michael H. Perrott, IEEE Design Test of Computers 2002

[4] Event-Driven Modeling and Simulation of an Digital PLL, Jingcheng Zhuang, Qingjin Du, Tad Kwasniewski, BMAS Workshop 2006

[5] Event Driven Analog Modeling for the Verification of PLL Frequency Synthesizers, Yifan Wang, Christoph Van-Meersbergen, Hans-Werner Groh, Stefan Heinen, BMAS Workshop 2009

[6]<http://www.enseignement.ensicaen.fr/claroline/course/index.php?cid=VHDLTOP>

[7] Fractional/Integer-N PLL Basics, Technical Brief Texas Instrument, Curtis Barrett August 1999

[8] Synthèse de fréquence, Vincent Giordano, Enrico Rubiola, Techniques de l'ingénieur E 330.

[9]https://www.altera.com/support/software/download/eda_software/MODELSIM/dnl-msim-63g-qii81.jsp

[10] Initiation au langage VHDL, Michel Aumiaux, Enseignement de l'Electronique, Masson

[11] Le langage VHDL, Cours et Exercices, Jacques Weber, Maurice Meaudre, Dunod.

[12] The System Designer's Guide to VHDL-AMS, Analog Mixed-Signal and Mixed-Technology Modeling, Peter J. Ashenden, Gregory D. Peterson, Darrell A. Teegarden, Morgan Kaufmann Publishers.

Avantages de la PLL fractionnaire

Les principales motivations pour réaliser des PLL à rapport de division fractionnaire sont, d'une part, la réduction du bruit de phase et, d'autre part, l'amélioration des temps de verrouillage.

La principale source de bruit dans les synthétiseurs de fréquence est le comparateur de phase, ce bruit de phase augmentant avec la valeur du rapport de division [7]. Un facteur N de multiplication $F_{VCO} = N.F_{réf}$ augmente de $20 \log(N)$ dB le bruit de phase du signal. Par exemple, un facteur de multiplication de 30 000, typique avec une PLL à rapport entier, augmentera le bruit de phase de 90 dB.

On a alors tout intérêt à réduire le facteur de multiplication. Cependant, une seconde grandeur est liée à la valeur de N, la largeur d'un canal. Cette grandeur imposée par les réglementations ne peut pas être choisie librement. Dans l'exemple numérique présenté, la valeur 30 000 correspond à une gamme de fréquence de sortie autour de 900 MHz et une largeur de canal de 30 kHz.

La solution fractionnaire est intéressante car elle permet de découpler les contraintes sur la gamme de fréquence de sortie et la largeur des canaux. La résolution en fréquence peut en effet être une portion fractionnaire de la fréquence de référence.

	PLL entière	PLL fractionnaire
	$F_{VCO} = N F_{réf}$	$F_{VCO} = (N + K/M) F_{réf}$
Gamme de fréq.	$N F_{réf}$	$N F_{réf}$
résolution	$F_{réf}$	$F_{réf}/M$

avec N, K et M des entiers et $K < M$.

La fréquence de référence, $F_{réf}$, peut alors être plus grande que la résolution en fréquence et le rapport de division N peut être réduit. Par voie de conséquence, le bruit de phase s'en trouve réduit. Les performances dynamiques sont également améliorées puisque la réduction de N entraîne une augmentation de la bande passante de la PLL (ω_n est proportionnelle à $1/\sqrt{N}$) et donc finalement à une diminution du temps de verrouillage (inversement proportionnel à ω_n).

