HAL
open science

Une approche de dimensionnement sur cycle de vie pour l'analyse du potentiel de la distribution en courant continu dans le bâtiment

Cédric Jaouen, Bernard Multon, Franck Barruel

To cite this version:

Cédric Jaouen, Bernard Multon, Franck Barruel. Une approche de dimensionnement sur cycle de vie pour l'analyse du potentiel de la distribution en courant continu dans le bâtiment. Electrotechnique du futur 2011, Dec 2011, BELFORT, France. 11p. hal-00676239

HAL Id: hal-00676239

https://hal.science/hal-00676239v1

Submitted on 4 Mar 2012

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Électrotechnique du Futur
14&15 décembre 2011, Belfort

Une approche de dimensionnement sur cycle de vie pour l'analyse du potentiel de la distribution en courant continu dans le bâtiment

Cédric JAOUEN (1, 2), Bernard MULTON (2), Franck BARRUEL (1)

(1) Laboratoire des Systèmes Solaires, Institut National de l'Energie Solaire (CEA-INES), 50, avenue du Lac Léman, 73377 Le Bourget du Lac
(2) SATIE, ENS Cachan Bretagne, CNRS, UEB, av. Robert. Schuman F-35170 Bruz
cedric.jaouen@cea.fr, bernard.multon@bretagne-ens-cachan.fr, franck.barruel@cea.fr

RÉSUMÉ – Le nouveau contexte énergétique au sein du bâtiment (apparition des systèmes PV en toiture et des véhicules électriques) pose à nouveau la question de la distribution en continu au sein des bâtiments. Dans un contexte où l'énergie et les impacts environnementaux prennent chaque jour plus d'importance, la quantification des performances d'un tel système selon sa seule phase d'usage (pertes énergétiques) ne répond pas complètement à la question de l'impact global des usages. Dans cette optique nous proposons d'éco-dimensionner les composants constituant ce système sur la base d'une minimisation de l'énergie primaire qu'ils consomment pendant tout le cycle de vie (pertes + énergie grise), l'un des objectifs étant d'évaluer le niveau de tension optimale pour ce réseau de distribution en courant continu. Cet article présente les modèles élaborés pour les éléments de puissance pour déterminer les pertes et l'énergie grise, ensuite des résultats d'optimisation sont présentés.

ABSTRACT – The new energetic context inside building (emergence of photovoltaic array and electric vehicle) should incite us to reconsider the use of DC distribution scheme for building. Since the environmental and energetic impacts become more and more important, the efficiency assessment of such system is nowadays not sufficient to quantify its global environmental impacts. In this context, we propose to eco-design the components of such system minimizing their primary energy consumption during their whole life cycle (from raw material extraction to recycling process). The global aim of our work is to determine the best voltage level for such system according this criterion. This article presents the models which have been developed to assess the primary energy consumption of power electronic components and some eco-designs and sensitivity studies are presented.

MOTS-CLÉS – Distribution en courant continu, Bâtiment, Convertisseur DC/DC flyback, Eco-conception, Cycle de vie, Energie primaire.

1. Introduction

Le contexte du fort taux de pénétration des systèmes photovoltaïque (PV) en toiture sur les bâtiments et l'arrivée des véhicules électriques pouvant être acteurs du système électrique (recharges solaires, soutien durant les périodes de pointe, etc…) amènent à reconsidérer les architectures électriques avec distribution en courant alternatif ou continu présentées (Voir Figure 1). Si l'on s'intéresse à l'ensemble des charges présentes dans un bâtiment, on peut les classer en trois groupes :

- Les « charges électroniques » fonctionnant intrinsèquement en courant continu (DC)
- Les charges résistives sensibles à la valeur efficace du courant mais parfaitement capables de fonctionner en DC
- Les charges électromécaniques qui, si elles sont à vitesse variable (améliorant grandement leur efficacité), exploitent un bus DC

La production en courant continu des panneaux PV et les échanges (éventuellement bidirectionnels) avec la batterie du véhicule électrique posent de façon plus aigüe la question de la pertinence du passage à une distribution en continu au sein des bâtiments. Pour ce faire, le système de distribution DC pourrait être connecté au réseau via un onduleur bidirectionnel, permettant de réinjecter la production PV lorsqu'elle est en excès ou de prélever de l'énergie au réseau

lorsqu'elle est insuffisante. Parmi les différentes questions à résoudre, se pose celle du choix du niveau de tension. Ce choix est lié bien sûr aux aspects sécurité (pour les êtres vivants, le courant continu est d'ailleurs moins dangereux que le courant alternatif à même valeur efficace de la tension [1] mais il est plus complexe à gérer du point de vue des protections du matériel à cause de la coupure de l'arc notamment) mais également au volet économique. Plusieurs études ont déjà été menées comparant l'efficacité énergétique d'un même système alimenté avec différents niveaux de tension choisis parmi les niveaux de tension communément employés aujourd'hui [2-4].

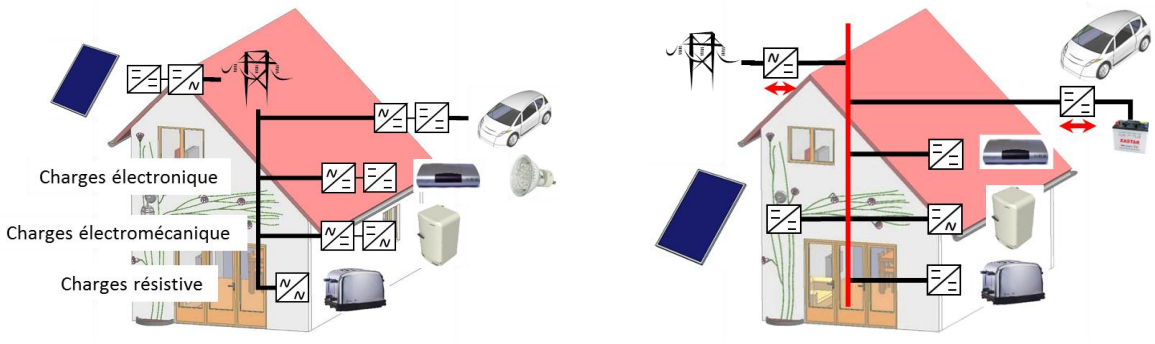


Figure 1 : Architecture actuelle pour la distribution en courant alternatif au sein des bâtiments tertiaire (gauche) et proposition d'une architecture de distribution en courant continu (droite)

Dans un contexte où l'énergie et les impacts environnementaux prennent chaque jour plus d'importance, la quantification des performances d'un tel système selon sa seule phase d'usage (pertes énergétiques) ne répond pas complètement à la question de l'impact global du produit, y compris sur le plan économique. En effet la comparaison des seules pertes de systèmes dimensionnés sur des critères pas nécessairement comparables nous semble insuffisante. Depuis plusieurs années des méthodes d'analyse sur cycle de vie (ACV) se développent et se normalisent. Ces méthodes permettent de quantifier, *a postériori*, l'effet d'un produit ou d'un service selon plusieurs impacts normalisés (Emission de gaz à effet de serre, consommation en énergie primaire, rejets dans l'air, l'eau et le sol…) et surtout sur l'ensemble de son cycle de vie (extraction de matières premières, fabrication, distribution, utilisation et recyclage). Elles peuvent donc permettre d'effectuer des comparaisons pour faire des choix. Dans cet article nous ne proposons pas de réaliser l'ACV d'un réseau de distribution en courant continu existant mais nous proposons d'éco-dimensionner les composants qui le constituent (convertisseurs électroniques et câbles de distribution dans un premier temps) et d'amener des premiers éléments de réponse sur le choix du niveau de tension d'une telle distribution.

En première partie nous présenterons le cadre de l'étude. Nous expliciterons le critère énergétique [5] (GER : Global Energy Requirement) que nous avons considéré ainsi que la méthodologie employée pour éco-dimensionner le système proposé. Nous présenterons ensuite les modèles utilisés pour quantifier ce critère ainsi que l'approche utilisée pour optimiser le dimensionnement des composants. Enfin nous présenterons l'influence du niveau de tension sur le GER des composants en dissociant les résultats sur chacun des constituants ainsi que les résultats sur le système global.

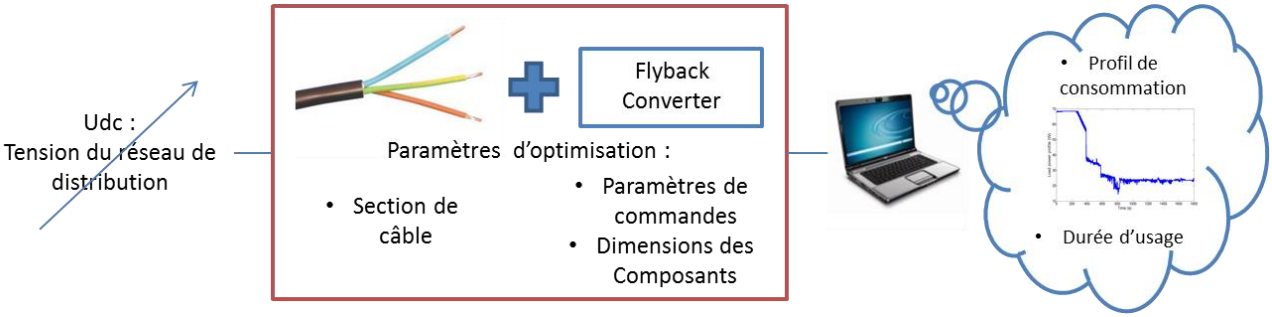
2. Cadre de l'étude et approche

Nous proposons de considérer un réseau de distribution en courant continu basé sur un bus continus (voir Figure 1). Les charges seraient donc directement connectées sur ce bus. Dans cette étude d'une grande complexité, nous avons choisi de nous focaliser seulement sur une partie du réseau de distribution continu d'un bâtiment et nous nous intéresserons à un circuit électrique sur lequel est connectée une charge de type « électronique » (voir Figure 2). Cette charge est alimentée par un convertisseur DC/DC flyback commandé en mode auto-oscillant (technologie d'adaptateur la plus fréquemment utilisée aux faibles puissances et qui nous sert ici de modèle de base pour poser le problème). Le niveau de tension du bus continu sera variable afin d'étudier son influence de celui-ci sur l'impact environnemental de notre système sur son cycle de vie.

L'analyse sur cycle de vie est une démarche évaluant une multitude d'impact environnementaux de nature différentes (pouvant donc difficilement être agglomérer sous la forme d'un unique critère quantifiant l'impact environnemental d'un système), il nous paraissait donc compliqué de minimiser l'ensemble de ces impacts lors d'une première étape d'éco-dimensionnement. Nous avons choisi, dans un premier temps, de ne retenir qu'un seul de ces impacts.

Dans le domaine du génie électrique, nous sommes surtout concernés par des dispositifs qui consomment ou produisent de l'énergie et dans lesquels la consommation d'énergie primaire sur l'ensemble du cycle de vie (GER : Global Energy Requirement) revêt une importance significative voire majeure [5]. De plus, une bonne partie des autres impacts sont fortement corrélés avec cet impact, notamment les émissions de gaz à effet de serre. Cette consommation englobe :

- Les pertes en fonctionnement, évaluées sur cycle, sur toute la durée d'usage. Ces pertes sont ramenées en énergie primaire via le rendement du système de production électrique
- L'énergie grise des constituants du système qui correspond à l'énergie primaire nécessaire à l'extraction des matières premières, à la fabrication, mais également à leur transport et leur recyclage.



- **Figure 2 : Cas d'étude considéré**

L'objectif est donc d'optimiser les paramètres de dimensionnement de ce système simplifié en minimisant son GER dans l'optique, in fine, de déterminer l'influence de la tension continue du système de distribution. Pour mettre au point la méthodologie de cet éco-dimensionnement, nous avons fait des hypothèses sur :

- les profils de consommation (supposés périodique par soucis de simplification, sachant que la méthode permettra de traiter tout problème plus complexe). Nous considérerons ici un profil de consommation durant 3h, mesuré sur un chargeur d'ordinateur portable, d'une puissance nominale de 70W. Ce profil est dupliqué une fois par jour, tous les jours pendant toute la durée d'usage.
- la durée d'usage des constituants. Nous considérerons ici une durée d'usage de 20 ans pour le câble et une durée d'usage de 5 ans pour le convertisseur. On évalue donc le GER du système sur 20 ans en considérant qu'il nous faudra remplacer 3 fois le premier convertisseur pour couvrir cette période. On distingue bien ici la notion de durée de vie, relative au vieillissement des composants, et la durée d'usage, relative au remplacement du matériel pour d'autres raisons (normes, consumérisme…).
- la topologie du câblage. Nous considérerons ici arbitrairement, à titre de premier exemple, un câble d'1 mètre.

Il est important de noter que les pertes en fonctionnement des composants électriques sont fortement liées à la quantité de matière active qui les constitue, ce qui est bien connu dans les dispositifs électrotechniques [6]. En outre, en première approximation, l'énergie primaire nécessaire à la fabrication des composants du système (énergie grise) croît avec la quantité des matières actives utilisées. Partant de ces constatations, il parait assez simple, dans le cas d'un câble électrique, de choisir la section de conducteur comme paramètre d'optimisation, sachant que la quantité d'isolant lui sera directement liée. Pour chaque niveau de tension, nous déterminerons donc la section de conducteur minimisant le GER du câble sur le cycle de vie considéré à l'image de l'étude présentée dans [7].

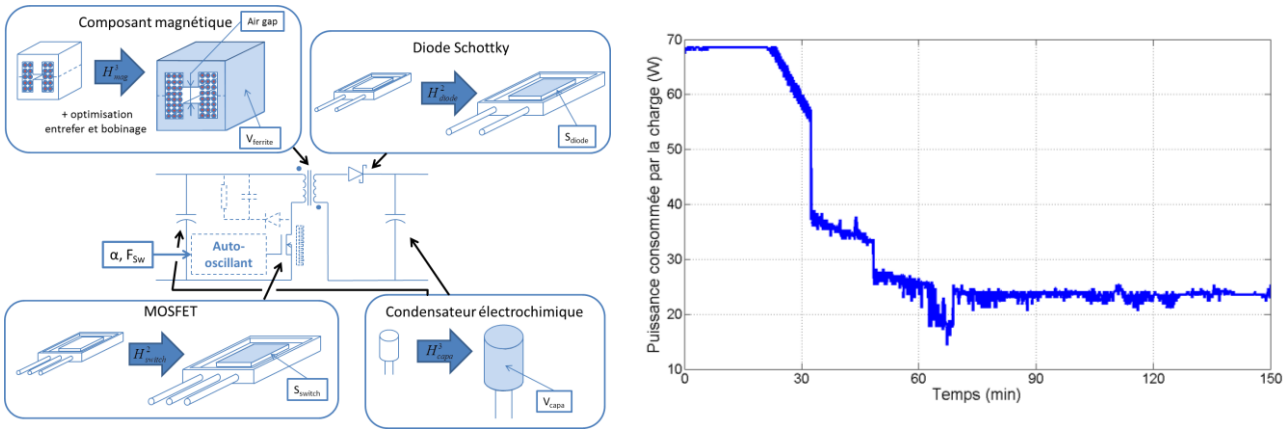


Figure 3 : Approche homothétique appliquée aux composants de puissance du convertisseur DC-DC flyback (gauche) et profil temporel de puissance consommée par la charge sur un cycle type (droite)

En ce qui concerne le convertisseur flyback, nous avons considéré qu'il était nécessaire de détailler son dimensionnement à l'échelle de ses principaux composants de puissance, en négligeant la contribution (au GER du convertisseur) de la commande, de l'écrêteur, du circuit imprimé, de l'éventuel dissipateur et du boitier. Pour limiter l'ampleur du problème, nous nous sommes limités à des technologies particulières (MOSFET multicellulaire planar classique, diode Schottky, noyau magnétique de forme donnée, matériau ferrite N97 Epcos, condensateurs électrochimiques aluminium Vishay à électrolyte liquide) et nous leur avons appliqué des facteurs homothétiques optimisés (voir Figure 3), afin de minimiser le GER. Pour les condensateurs et le noyau du composant magnétique, on appliquera un facteur homothétique sur leur volume. Pour la diode et transistor, les substrats étant, dans la gamme de tension considérée, de même épaisseur, seule la surface de puce influe sur les pertes, on appliquera donc un facteur homothétique sur cette surface.

Comme le montre la Figure 4, on prédimensionne pour chacun des composants, pour différents niveaux de tension et pour un jeu de paramètres de commande (F_{Sw} fréquence nominale, α rapport cyclique), un composant de référence sur lequel on appliquera ensuite un facteur homothétique à optimiser. Cette étape correspond à un dimensionnement initial rapide fondé sur le seul respect des contraintes thermiques et électriques au point nominal de fonctionnement. Cependant contrairement au cas du câblage, on est ici confronté à une dépendance des pertes dans le convertisseur vis-à-vis de ses paramètres de commande (fréquence nominale, rapport cyclique) qui constituent donc des paramètres secondaires nécessitant également une optimisation. Il y a donc, comme le montre la Figure 4, deux optimisations imbriquées. Puis pour chaque niveau de tension, nous déterminons les paramètres de commande minimisant le GER du convertisseur (boucle rouge) et pour chaque couple de paramètres (Fsw, α) on détermine, pour chacun des composants, le facteur homothétique minimisant son GER établi pour un cycle de fonctionnement et une durée d'usage fixés (boucle bleue). Pour le composant magnétique, en plus de son facteur homothétique, il est nécessaire d'optimiser aussi les valeurs de son entrefer (et par conséquent les nombres de spires, directement liés à la valeur de l'entrefer) afin de minimiser les pertes en fonctionnement, tout en respectant une contrainte d'induction maximale. Le découplage des optimisations est rendu possible en considérant le mode de commande auto oscillant et en négligeant l'influence des chutes de tension et des pertes d'un composant sur l'autre.

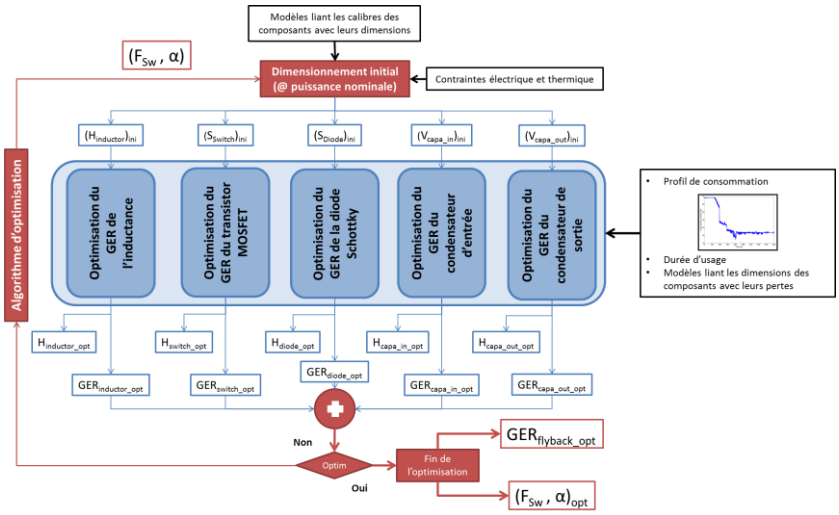


Figure 4 : Synoptique de l'optimisation du dimensionnement des composants de puissance du convertisseur flyback

3. Modélisation du GER du système étudié

Dans cette partie nous allons détailler les modèles utilisés pour évaluer le GER du convertisseur DC-DC flyback (en mode auto-oscillant) précédemment décrit et de la portion de câble mentionnée (20 m). Ils ont pour objectif :

- d'établir, pour chaque composant, des lois, éventuellement empiriques, liant leurs caractéristiques à leurs facteurs dimensionnels et aux paramètres associés à leurs pertes,
- d'établir les modèles de pertes relativement aux paramètres de dimensionnement
- et de lier leurs facteurs dimensionnels à leur énergie grise.

3.1 Modélisation du GER d'un câble de distribution [7]

Comme nous l'avons vu plus haut, le GER est composé des pertes en fonctionnement E_{pertes}(sur l'ensemble du cycle de fonctionnement caractérisé par une durée d'usage) et de l'énergie grise totale des éléments considérés, sachant que l'énergie « utile » distribuée par le câble est une contrainte liée à l'application et qu'elle n'est donc pas comptabilisée dans le GER.

Les pertes Joule sont évaluées à l'aide de l'équation (1), en prenant en compte l'influence de la température θ_{cuivre}, déterminée en utilisant un modèle thermique statique (les régimes transitoires ne sont pas considérés à ce stade de l'étude, d'autant plus qu'ils complexifient sévèrement la méthodologie [8] en nécessitant un traitement temporel), sur la résistivité du cuivre. Dans cette expression P_{load} représente la puissance instantanée consommée par la charge, U_{dc} la tension du bus continu et $\eta_{élec}$ le rendement de conversion entre énergie primaire et énergie électrique.

$$E_{pertes} = \frac{1}{\eta_{elec}} \times \int_{Durée\,d'usage} \frac{\rho\left(\theta_{cuivre}\left(P_{load}\right)\right) \times L_{câble}}{S_{Cu}} \times \frac{P_{load}}{U_{dc}} dt \qquad avec \quad \eta_{elec} = 0.28 \qquad (1)$$

Afin d'estimer l'énergie grise du câblage, $EG_{câble}$, nous avions besoin de connaitre le lien entre la section du conducteur et la quantité d'isolant. Cette relation est issue d'une norme française NF C 32-201 qui donne l'épaisseur minimale d'isolant en fonction de la section du conducteur pour une tension allant jusqu'à 450V (voir Figure 5) [9]. Il nous fallait

ensuite des données issues d'études ACV estimant l'énergie grise d'un câble. Par manque de données ACV nous avons considéré que l'isolant du câble était constitué de PVC. Nous nous sommes donc basés sur deux sources :

- [10] qui a évalué à 112 Wh_p l'énergie primaire nécessaire à l'extraction des matières premières, au raffinage, à la fabrication et au recyclage d'un fil de cuivre nu d'un mètre et d'1 mm² de section, soit une valeur EG_{fil_cuivre} de 112MWh_p/m^3.
- [11] qui a estimé une valeur $EG_{isolant}$ de 26 MWh_p d'énergie primaire pour produire un m^3 de PVC, de l'extraction des matières premières à la synthèse du matériau.

L'énergie grise du câble sera évaluée à partir de l'expression (2) en exploitant ces données numériques. On cherchera ensuite à minimiser, pour une topologie de distribution, pour une puissance consommée par la charge et pour une durée d'usage données, le GER du câble. Pour ce faire, on déterminera, lors d'un dimensionnement initial, la section minimale respectant à la fois les contraintes thermiques (70°C max) et les contraintes de chute de tension (5% max). On fera ensuite varier la section du conducteur et on cherchera celle minimisant le GER somme de l'énergie grise et des pertes du câble.

$$EG_{cable} = \left(EG_{fil_cuivre} \times S_{Cu} + EG_{isolant} \times S_{isolant}\left(S_{Cu}\right)\right) \times L_{cable} \tag{2}$$

On trouvera plus de détails dans la référence [6] traitant de l'éco-dimensionnement d'un câble alimentant un véhicule électrique, ou d'un réseau de distribution pour un système d'éclairage.

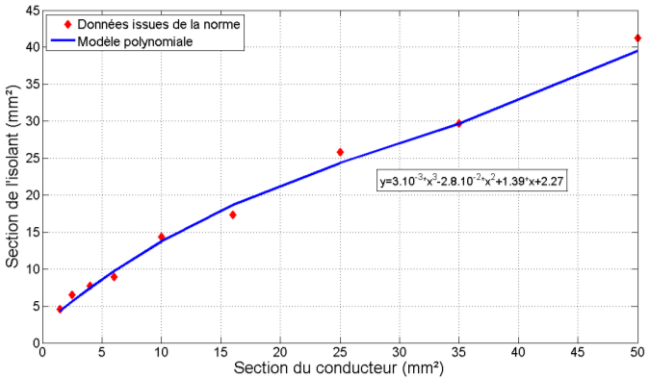


Figure 5 : Modèle polynomial liant la section de l'isolant avec la section du conducteur selon la norme NF C 32-201

3.2 Modélisation simplifiée du convertisseur DC-DC flyback auto-oscillant

On présente ici les principes nous permettant de déterminer le GER des principaux composants de puissance du convertisseur flyback. Le régime auto-oscillant est par définition à fréquence variable. C'est à la puissance « nominale » (maximale) que le régime est le plus contraignant et nous appelons fréquence nominale, la fréquence correspondante (la plus basse), elle sera l'un des paramètres d'optimisation. Le fait que les chutes de tension soient négligées en première approximation conduit à ce que le rapport cyclique soit constant quel que soit le point de fonctionnement puisque les tensions d'entrée et de sortie sont considérées constantes. Nous allons maintenant détailler les modèles utilisés pour évaluer le GER des condensateurs de filtrage afin d'illustrer notre démarche de dimensionnement. Pour les autres composants on trouvera plus de détails dans [12] et un condensé des modèles utilisés par la suite est donné dans le Tableau 1.

3.2.1 GER des condensateurs de filtrage

A tenue en tension donnée, nous avons choisi le condensateur de référence afin de limiter l'ondulation de tension (en entrée et en sortie) à 10% (cahier des charges arbitraire). Pour cela nous avons négligé l'ondulation de tension capacitive étant donnée l'effet dominant de la résistance série ESR, pour la technologie considérée (électrolytique) et aux fréquences où travaille le convertisseur (de quelques dizaines à quelques centaines de kHz). Le condensateur de référence est donc largement caractérisé par sa valeur d'ESR, supposée constante sur toute la plage de fréquence balayée en mode auto-oscillant.

Avant d'appliquer le facteur homothétique sur les dimensions du condensateur nous avons besoin d'un modèle liant ces dimensions (et ici plus particulièrement son volume, puisque l'homothétie est globale) avec son ESR. Comme on peut le voir sur la Figure 6, l'ESR d'un condensateur se révèle, après observation, globalement inversement proportionnelle à son volume et à un facteur près dépendant de la tenue en tension du condensateur.

Nous avons donc développé des modèles reliant l'ESR d'un condensateur avec son volume et sa tenue en tension. Ces lois ont été établies à partir de l'analyse d'une large gamme de condensateurs électrochimiques aluminium à électrolyte liquide fabriqué par Vishay (série 058/059 PLL-SI) [13]. Les contraintes de tenue en tension n'étant pas les mêmes en entrée et sortie du convertisseur (<50V en sortie et >50V en entrée), nous avons développé un modèle pour les condensateurs « basse » tension et un autre modèle pour les condensateurs « haute » tension. On en donne les

expressions selon la gamme de tensions dans l'équation (3) avec *Ur* la tenue en tension des condensateurs et *Vol* leur volume. La première a été établie à partir de 42 références et pour des tenues en tension allant de 6,3 à 63V (erreur moyenne de +/-8%). La seconde provient de l'étude de 28 références et convient pour des condensateurs dont la tenue en tension est comprise entre 100 et 400V (erreur moyenne de +/-20%).

$$ESR_{\leq 63V} = 85 \times U_r^{0.60} \times Vol^{-1.09} \qquad ESR_{\geq 100V} = 6.1 \times U_r^{1.43} \times Vol^{-1.2} \tag{3}$$

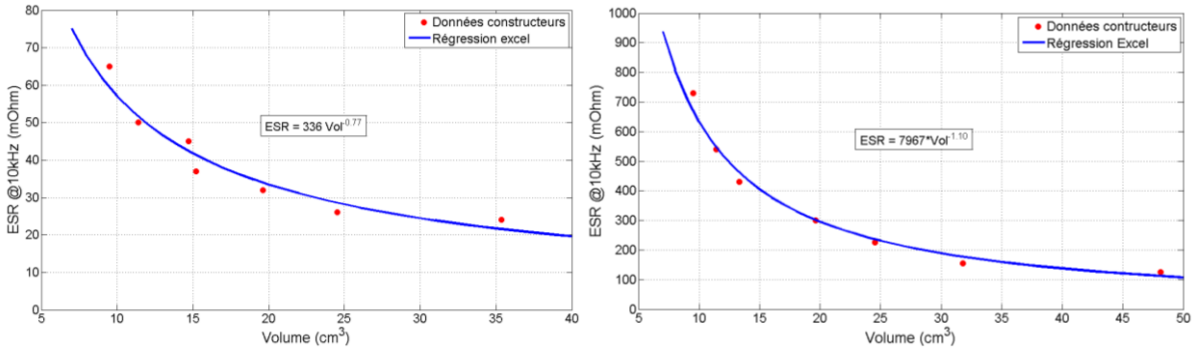


Figure 6 : Résistance équivalente série en fonction du volume pour une tenue en tension de 40V (gauche) et 200V (droite) pour les condensateurs électrochimiques fabriqué par Vishay (série 058/059 PLL-SI).

Les pertes en fonctionnement dans les condensateurs de filtrage seront calculées en se basant sur la valeur de sa résistance équivalente série (ESR). Une fois le facteur homothétique appliqué sur les dimensions du condensateur de référence nous utilisons également les lois de l'équation (3) pour déterminer la valeur de l'ESR du nouveau condensateur et pour évaluer ses pertes en fonctionnement pour un profil de référence et pour une durée d'usage fixés.

Concernant l'évaluation de l'énergie grise d'un condensateur, nous nous sommes basés sur une donnée provenant de l'université de Chalmers [14]. Leur étude a révélé que la fabrication d'un kg de condensateur électrochimique de diamètre inférieur à 2cm nécessite 260 kWh_p d'énergie primaire, de l'extraction des matières premières à la fabrication du condensateur. Pour déterminer la masse d'un condensateur à volume donné nous avons, grâce aux données constructeurs, pu déterminer une masse volumique moyenne, ρ_{capa}, de 1400 kg/m^3. On obtiendra donc l'énergie grise du condensateur, EG_{capa}, grâce à l'équation (4).

$$EG_{capa} = EG_{massique_capa} \times Vol_{capa} \times \rho_{capa} \tag{4}$$

3.2.2 GER du MOSFET

A tenue en tension donnée, le transistor de référence sera celui acceptant thermiquement (dans des conditions d'échange thermique spécifiées par le fabricant) le courant efficace maximal requis par l'application et auquel nous appliquerons un facteur homothétique sur la surface de puce. Nous avons donc, dans un premier temps, créé un modèle reliant la surface de puce avec le calibre en courant.

Les modèles de calcul de pertes dans les transistors sont fondés sur la résistance à l'état passant R_{DSon} et la charge totale de grille Q_g [15]. Afin de déterminer des lois reliant la surface de puce, notée S_{Si}, avec ces deux grandeurs et reliant la surface de puce avec le calibre en courant, nous avons analysé des *datasheet* d'un constructeur de puces nues en technologie multicellulaire planar (IXYS). Nous avons pu en extraire des lois reliant le FOM (Figure Of Merit) [16] et la résistance spécifique $R_{DSon}.S_{Si}$ avec la tenue en tension du transistor BV_{DS} (voir Tableau 1). Avec ces modèles nous pouvons évaluer les pertes en fonctionnement au sein de l'interrupteur.

Pour évaluer l'énergie grise nous avons exploité une donnée issue de [17] qui estime à 512 Wh_p la quantité d'énergie primaire nécessaire pour produire un transistor en boitier TO220, donnée recoupée par des informations collectées auprès d'un fabricant de MOSFET et dont la valeur est très largement due à l'élaboration de la puce. Pour déterminer l'énergie grise d'un transistor on comparera sa surface de puce avec la surface maximale pouvant être empaquetée dans un boitier TO220. Le ratio entre ces deux surfaces nous permettra de calculer l'énergie grise du transistor par une simple règle de trois, en supposant donc que les tailles de puce et de boîtier varient continûment...

3.2.3 GER du composant magnétique

Le noyau ferrite support est un circuit de type EE10/5.5/5 sur lequel nous appliquons un facteur homothétique (notons que cette limite conduit à une répartition figée de la quantité de cuivre et de ferrite). Le circuit magnétique de référence sera le circuit magnétique respectant la contrainte d'induction maximale (B_{max}=300mT) et respectant les contraintes thermiques du bobinage et du noyau ferrite (θ_{Cu_max}=120°C ; $\theta_{ferrite_max}$=100°C) calculé en statique comme dans [8] et en omettant les échanges entre le cuivre et le circuit magnétique. Il sera caractérisé par un facteur homothétique de référence ($H_{inductor_ini}$) à appliquer sur le circuit magnétique support EE10/5.5/5 pour obtenir le circuit de référence.

Pour modéliser les pertes fer volumiques en fonction de la fréquence, du rapport cyclique maximal et de l'amplitude de l'induction, nous avons utilisé le modèle DNSE [18] (Double Natural Steinmetz Equation).

Les données support pour l'évaluation de l'énergie grise ont été extraites pour un kg de ferrite de [19] (8 kWh_p/kg) et de [20] pour le processus d'émaillage du fil de cuivre (3.6 kWh_p/kg de cuivre). Pour chaque facteur homothétique appliqué sur le composant magnétique nous minimisons les pertes en fonctionnement, en optimisant la longueur de l'entrefer ainsi que les nombres de spires (à facteur de remplissage constant).

3.2.4 GER de la diode Schottky

La diode de référence sera choisie par rapport à son calibre en courant (valeur moyenne du courant, donnée fabricant) et on appliquera ensuite un facteur homothétique sur la surface de puce. Nous avons donc, dans un premier temps, créé un modèle reliant la surface de puce avec le calibre en courant (voir Tableau 1).

Pour la diode nous avons émis l'hypothèse d'un seuil de tension indépendant de la tenue en tension (celle-ci dépend très peu de la tension d'entrée puisque la tension de sortie est constante), mais la résistance dynamique dépend de son calibre en courant. Nous avons également négligé les pertes de commutation (diode Schottky sans charge stockée avec blocage à faible di/dt dû au mode auto-oscillant). Le modèle liant la résistance dynamique d'une diode Schottky avec son calibre en courant a été élaboré sur la base des documentations constructeurs de la société Vishay [21].

N'ayant pas d'autres données que celles du transistor MOS pour les semi-conducteurs, nous calculerons l'énergie grise de la diode de la même façon que pour le transistor, sachant qu'elle est probablement surestimée (moins d'étapes de masquage).

4. Influence du niveau de tension sur le GER du système

Avant de s'intéresser à l'impact du niveau de tension sur le système global, nous allons regarder son influence sur chacun des deux composants.

4.1 Influence du niveau de tension sur le GER d'un câble d'alimentation

Nous avions déjà étudié dans [6], l'impact du niveau de tension sur le GER d'un câble d'alimentation, on rappelle ici les principaux résultats. On rappelle que, pour chaque niveau de tension, la section du câble est optimisée afin de minimiser son propre GER. On présente Figure 7 l'évolution du GER et de la section optimale du câble en fonction du niveau de tension soumis au profil de la Figure 3(Au premier ordre, on a négligé l'impact des pertes du convertisseur sur les profils).

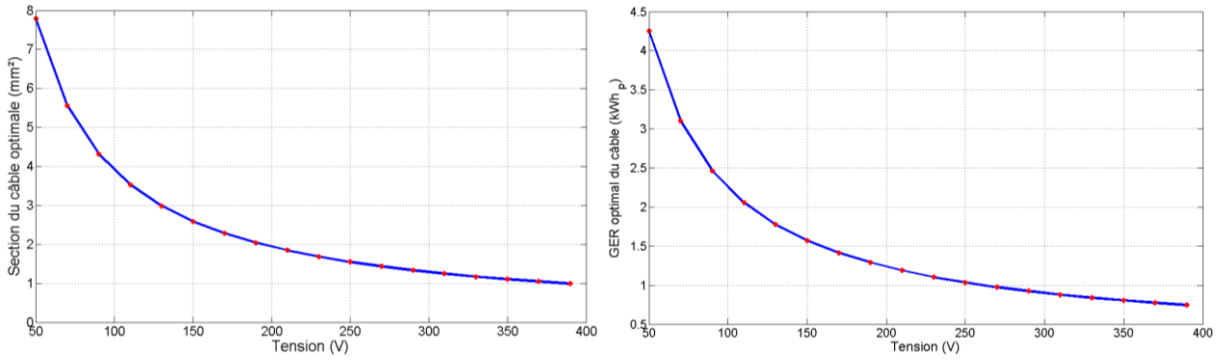


Figure 7 : Evolution de la section de câble optimale (gauche) et Evolution du GER optimal associé (droite) en fonction de la tension du bus continu

Comme on pouvait s'en douter, le GER du câble diminue lorsque le niveau de tension du bus continu augmente. En effet, à l'optimum, la somme des pertes en conduction et de l'énergie grise diminue lorsque la tension augmente. De plus nous avions déjà illustré dans [7] que pour la section de câble minimisant le GER, il y avait sensiblement égalité entre pertes en fonctionnement et énergie grise (si la masse d'isolant était proportionnelle à la masse de cuivre et pour des contraintes non atteintes, on obtiendrait une stricte égalité).

Il est aussi important de noter que la section optimale reste valable quelle que soit la longueur du câble puisque les pertes en fonctionnement et l'énergie grise sont directement proportionnelles à la longueur du câble.

4.2 Influence du niveau de tension sur le GER du convertisseur DC-DC flyback

On s'intéresse maintenant à l'évolution du GER du convertisseur flyback en fonction de la tension d'entrée (résultats présentés Figure 8). On rappelle que pour chaque niveau de tension, les paramètres de commande (α et F_{sw}) sont optimisés de façon à minimiser le GER du convertisseur. De même, pour chaque couple de paramètres de commande, les facteurs homothétiques de chaque composant sont optimisés de façon à minimiser leur GER.

On peut remarquer que le GER optimal du convertisseur diminue également avec le niveau de tension. Pour expliquer ce phénomène on s'intéresse à l'emplacement des paramètres de commande optimaux pour chacun des composants pris indépendamment (voir Figure 8). Sur cette figure on représente le lieu des minima et le GER associé pour 320 et 390V. On peut remarquer, dans un premier temps, que les valeurs optimales des paramètres de commandes ne sont pas

affectées par l'évolution du niveau de tension. Par contre, seules les valeurs optimales du GER du MOSFET et du condensateur d'entrée diminuent avec l'augmentation du niveau de tension. L'algorithme d'optimisation cherche à diminuer le rapport cyclique et à augmenter la fréquence du convertisseur afin de diminuer la contribution des composants qui n'ont pas été affectés par le changement de niveau de tension. Le GER du convertisseur va donc globalement diminuer avec l'augmentation du niveau de tension.

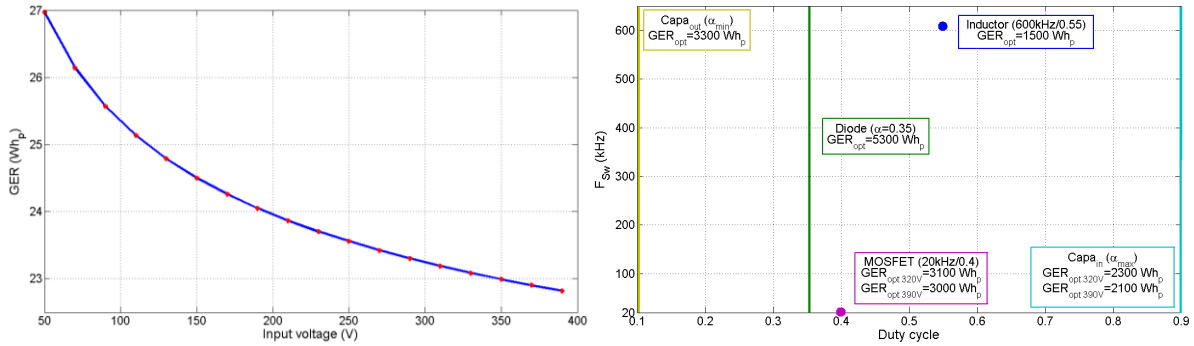


Figure 8 : Evolution du GER du convertisseur en fonction de la tension du bus continu (gauche) et Lieu des paramètres de commandes optimaux associés à chacun des composants et GER associés pour 320 et 390V (droite).

4.3 Influence du niveau de tension sur le GER du système complet et du couplage entre les composants

Nous allons maintenant nous intéresser à l'évolution du GER du système « câble + convertisseur ». Le fait que les deux « sous-systèmes » pris à part voient leur GER diminuer avec l'augmentation du niveau de tension d'entrée entraîne, de façon évidente, que le GER du système présentera la même tendance. On présente, Figure 9, l'évolution du GER du système en prenant en compte deux cas de figure :

- Dans le premier cas, on additionnera le GER du câble (de 20 m aller), soumis au profil de consommation de la charge (sans les pertes du convertisseur) et le GER du convertisseur alimenté directement par le niveau de tension référence du bus (sans tenir compte des chutes de tension).
- Dans le deuxième cas, le GER du système est constitué de la somme du GER du câble, en ajoutant au profil de consommation les pertes du convertisseur, et du GER du convertisseur optimisé sous une tension plus faible prenant en compte les chutes de tension dans le câble d'alimentation.

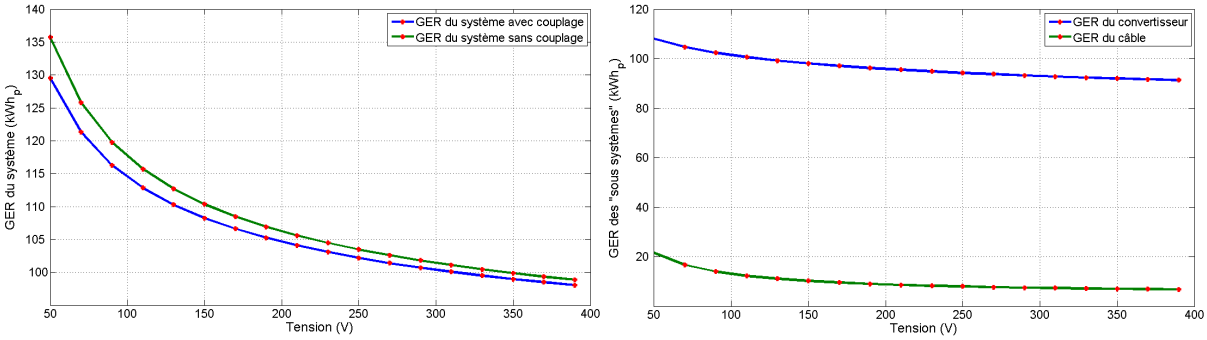


Figure 9 : Effets des couplages (à travers les pertes) entre les optimisations du câble et du convertisseur en fonction du niveau de tension (gauche) et Répartition du GER du système entre le câble et le convertisseur (droite)

On remarque que le couplage est faible entre les deux composants, et ce quel que soit le niveau de tension, puisque le GER du système en prenant en compte les couplages est ici très proche de celui les négligeant. En effet, l'éco-dimensionnement des convertisseurs conduit généralement à des composants plus gros et donc à de meilleurs performances (rendements élevés et faibles chutes de tension), minimisant les éventuels couplages entre les différents composants. On pourra donc considérer par la suite, dans le cas où les chutes de tension au sein du réseau sont relativement faibles (inférieur au %), que le système optimal d'un point de vue du GER peut être déterminé en optimisant indépendamment les différents composants.

Si l'on s'intéresse maintenant à la répartition au sein du GER, entre le câble et le convertisseur, on peut remarquer que le câble représente dans cet exemple particulier moins de 15% du GER du système. Cette proportion est en pratique évidemment liée à la longueur de câble considérée puisque nous avions déjà illustré dans [7] que le GER du câble est directement proportionnel à sa longueur, mais également aux considérations de mutualisation des câbles sur le réseau DC.

5. Etude de sensibilité

L'éco-dimensionnement que nous venons de présenter a été réalisé avec un profil de consommation particulier et une durée d'usage constantes des « sous-systèmes », nous allons maintenant étudier l'impact d'une modification de ces paramètres sur leur GER.

5.1 Sensibilité à la durée d'usage

On présente, Figure 10 (gauche), l'évolution du GER d'un convertisseur optimisé pour une durée d'usage estimée de 5ans et dont la durée effective d'utilisation serait différente des 5 ans estimés (courbe verte). On la compare avec la courbe représentant le GER d'un convertisseur optimisé pour la durée d'usage effective. On remarque que l'on peut commettre une erreur de +/- 40% (soit +/- 2 ans) sur la durée d'usage servant au dimensionnement du convertisseur, sans que cela n'éloigne trop le GER du convertisseur de sa valeur optimale si le convertisseur avait été optimisé pour la durée d'usage effective.

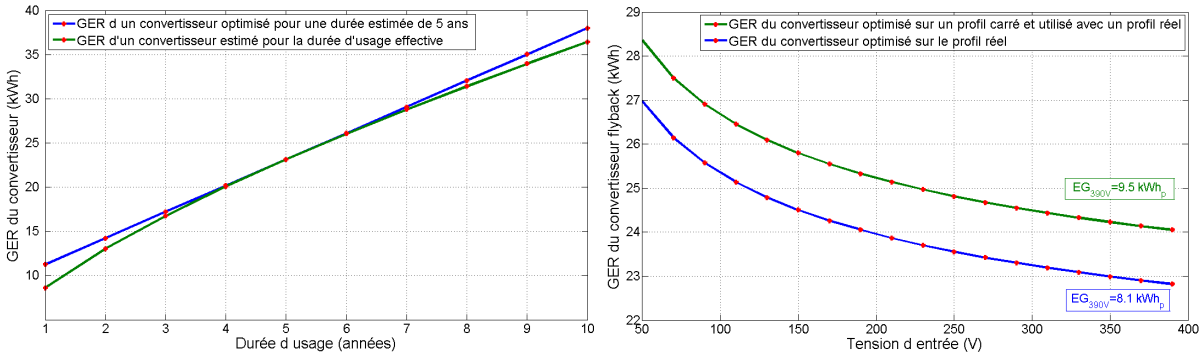


Figure 10 : Impact d'une erreur d'estimation de la durée d'usage sur le GER d'un convertisseur flyback (gauche) et Impact du choix du profil de consommation pour l'éco-dimensionnement d'un convertisseur (droite).

Pour le câble, nous avions déjà montré dans [7] le même type de résultats concernant l'éco-dimensionnement d'un câble.

5.2 Sensibilité au profil de consommation

Concernant le profil de consommation, il est légitime de penser que l'optimisation serait plus simple et plus rapide dans le cas d'un profil de consommation plus simple (de type carré par exemple). Cependant il faut s'assurer que l'utilisation de ces profils pour le dimensionnement ne conduit pas à un convertisseur dont le GER serait trop éloigné de celui dimensionné en considérant le profil réel. Pour aborder cette étude, nous allons étudier l'influence du profil de consommation considéré pour éco-dimensionner un convertisseur. On présente Figure 10 l'évolution du GER, en fonction de la tension d'entrée, pour deux convertisseurs dimensionnés différemment et soumis durant leur période d'usage au profil de la Figure 3

- Le premier (courbe verte) a été éco-dimensionné en considérant un profil rectangulaire idéalisé correspondant à la consommation énergétique journalière et dont l'amplitude est égale à la puissance maximale consommé par la charge du profil « réel » de la Figure 3. On cherchera donc, pour le dimensionnement, à minimiser le GER du convertisseur en considérant un profil carré présentant la même énergie et la même puissance max que le profil de la Figure 3.
- Le second (courbe bleue) correspond à l'éco-dimensionnement obtenu avec le profil « réel » de la Figure 3.

On remarque une différence de seulement 5% entre le GER des deux convertisseurs. L'éco-dimensionnement d'un convertisseur peut donc être réalisé sur un profil plus simple que le profil réel sur lequel il sera utilisé sans pour autant obtenir un GER trop éloigné du GER optimal. Si l'on s'intéresse à la valeur de l'énergie grise des deux convertisseurs dans le cas d'une tension d'entrée de 390V (voir Figure 10), on remarque que le convertisseur éco-dimensionné sur profil carré est plus volumineux que celui éco-dimensionné sur profil réel (puisque en premier approximation, l'énergie grise est directement lié au volume). En effet, le profil carré conduit à concevoir un convertisseur ayant un rendement maximal à puissance maximale, utilisant donc des composants plus gros qu'avec profil réel, qui, dans le cas de la Figure 3, fait fonctionner le convertisseur à sa puissance maximale seulement 15% du temps.

Pour le câble, nous avions déjà montré dans [7] que le niveau de puissance maximale a une influence significative, à même énergie transférée, sur le GER optimal d'un câble. En effet, un profil de puissance plus impulsionnel conduit à un accroissement des pertes en fonctionnement et conduit à préférer un câble plus gros présentant un GER plus important. Afin de quantifier l'influence du niveau de puissance maximale sur le GER du convertisseur nous comparerons par la suite le GER de convertisseur dimensionné en considérant des profils idéaux. Nous considérerons une forme rectangulaire qui à énergie constante ne présente qu'un seul paramètre, l'amplitude, sachant que la durée lui sera inversement proportionnelle.

6. Conclusion

Dans cet article, pour tenter de répondre avec un nouveau regard à la question de l'intérêt de la distribution en courant continu, nous avons proposé les fondements d'une méthode de dimensionnement originale en prenant en compte les convertisseurs d'électronique de puissance. Le critère utilisé est fondé sur l'énergie primaire consommée sur l'ensemble du cycle de vie (GER). L'objectif de cette méthode n'est plus de minimiser seulement les pertes en fonctionnement du système, ou sa masse, son encombrement… mais la somme de ses pertes sur sa durée d'usage et de son énergie grise.

Nous avons appliqué cette approche sur une portion de réseau de distribution en courant continu (envisagé pour le bâtiment), constituée d'un câble d'alimentation de 20 m et d'un convertisseur DC/DC flyback le tout dimensionné sur un profil (réaliste mais arbitraire) d'alimentation d'un ordinateur portable (recharge batterie et utilisation). En exploitant des documentations constructeurs et des données d'énergie grise issues d'évaluations environnementales, nous avons établis des modèles liant les caractéristiques fondamentales des composants de puissance avec leurs dimensions et liant ensuite leurs dimensions caractéristiques avec leurs pertes et leur énergie grise. En utilisant une approche homothétique, nous avons dimensionné ces composants afin de minimiser le GER du système considéré. Dans l'optique de trouver un niveau de tension optimal pour notre réseau de distribution en courant continu, nous avons étudié l'influence du niveau de tension sur le GER de notre système. Dans le cas considéré il parait judicieux de choisir le niveau de tension le plus élevé possible. Cependant, même si les problèmes de sécurité des personnes sont moins aigus en DC qu'en AC, les contraintes de sécurité et de protection des matériels (coupure d'arc notamment) pourront amener à limiter ce niveau de tension. De plus, d'autres études en cours sur des convertisseurs sans isolation galvanique, concluent à une diminution du GER du convertisseur avec le niveau de tension d'entrée. La question est donc encore loin d'être traitée.

Nous avons ensuite réalisé une étude de sensibilité portant sur l'estimation de la durée d'usage et du profil de consommation. Nous avons conclu qu'un convertisseur optimisé pour une durée d'usage envisagée et utilisé sur une autre, dite effective, présente finalement un GER relativement proche du GER optimal tant que l'erreur sur l'estimation de la durée d'usage en dépassait pas +/-40%. Concernant l'impact du profil choisi pour le dimensionnement nous avons montré que l'erreur induite par l'optimisation du convertisseur sur un profil rectangulaire n'était pas significative (+5% par rapport au GER optimal) mais conduisait à un convertisseur un peu plus volumineux nécessitant plus de matériaux. L'intérêt majeur d'un tel profil rectangulaire va être de nous permettre une étude relativement générale sur l'effet du caractère impulsionnel du profil de puissance sur l'éco-dimensionnement du système et sur son GER.

Ce travail ne permet pas encore de conclure quant au niveau de tension minimisant le GER d'un réseau de distribution continu, même s'il apparaît d'ores et déjà que des tensions élevées sont préférables avec les technologies considérées. La suite de nos travaux concernera d'autres convertisseurs électroniques, notamment ceux associés au générateur photovoltaïque connecté au réseau continu. Comme nous l'avons expliqué plus haut, nous avons aujourd'hui restreint nos critères de dimensionnement à la consommation en énergie primaire, il serait donc pertinent par la suite d'étendre nos critères de dimensionnement à d'autres impacts environnementaux tel que la consommation en ressource minérale.

Tableau 1 : Tableau récapitulatif des modèles développés pour cette étude et des paramètres imposés

Composant magnétique	
$P_{vol} = P_r \times 0.19 \frac{f}{f_r} \times \left(\frac{\Delta B}{2\hat{B}_r}\right)^{3.4} + P_r \times (1-0.19)\left(\frac{f}{f_r}\right)^{2.31} \times \left(\frac{\Delta B}{2\hat{B}_r}\right)^{2.15} \times 2^{2.31}\left(D^{-1.31} + (1-D)^{-1.31}\right) \times K(2.31)$	
$avec \quad f_r = 100kHz \quad B_r = 200mT \quad P_r = 300kW/m^3$	$K(\alpha) = \frac{1}{(2\pi)^{\alpha} \times \int_0^{2\pi} \lvert\cos(\vartheta)\rvert^{\alpha} d\vartheta}$
Condensateur électrochimique	
$ESR = 85 \times V^{0.60} \times Vol^{-1.09} (mm^3)$	$ESR = 6.1 \times V^{1.43} \times Vol^{-1.2} (mm^3)$
Transistor MOSFET	
$S_{Si}(mm^2) = (5e-6 + 5.7e-3 \times BV_{ds}) I_{\max}$	$R_{dson} * S_{Si}(m\Omega.mm^2) = 0.086 \times BV_{ds}^{1.95}$
$FOM(m\Omega.nC) = 0.3 \times BV_{ds}^{1.83}$	
Diode Schottky	
$S_{Diode}(mm^2) = 0.68 \times I_F$	$R_F(m\Omega) = \frac{34 \times V_{RM}^{0.527}}{S_{Diode}(mm^2)}$

Références

[1] J.P. Meyer and J.L. Poyard, “Prévention des risques professionnels, risques liés aux installations”, Techniques de l’Ingénieur, SE 3850, 2006.

[2] A. Sannino, G. Postaglione, et H.J. Bollen, « Feasibility of a DC network for commercial facilities », IEEE Transactions on Industry applications, vol. 39, no. 5, oct. 2003.

[3] K Engelen, et al, « The Feasibility of Small-Scale Residential DC Distribution Systems », IEEE Industrial Electronics Society, CNAM Paris, France 2006.

[4] M. Sechilariu, « C.A vs C.C : Intégrer un réseau électrique hybride dans les bâtiments équipés en énergies renouvelables », EF 2007, Toulouse, 2007.

[5] B. Multon, H. Ben Ahmed, V. Debusschere, Y. Thiaux, J. Aubry, C. Jaouen, F. Barruel, « Expériences de recherche en éco-conception dans le domaine du Génie Electrique »CONFREGE, Toulouse, déc. 2010, 8p.

[6] A. Hadj Amor, M. Poloujadoff, S. J. Salon “Optimum design of electromagnetic devices by the state variable method: application to transformers”, Optimization of Electrical and Electronic Equipment, OPTIM '98, May 98.

[7] C. Jaouen, B. Multon, F. Barruel, « Wiring design based on Global Energy Requirement criteria: a first step towards optimization of DC distribution voltage », iREED’11, Lille, France, 2011.

[8] V. Debusschere,, « Contributions méthodologiques à l'éco-conception de convertisseurs électromagnétiques d'énergie », thèse de doctorat de l’ENS de Cachan, soutenue le 9 décembre 2009.

[9] « Norme NF C 32-201, Conducteurs et câbles isolés au polychlorure de vinyle de tension assignée au plus égale à 450/750V », 1998, Révisé en 2009

[10] L. Tikana., Sievers H., Klassert A., « Life cycle assessment of copper product », Europ. Copper Institute, 2005

[11] R. Hischier, « Life cycle inventories of packaging & graphical papers, part 2: Plastics », Ecoinvent n°11, Dec. 07

[12] C. Jaouen, B. Multon, F. Barruel, “Design optimization methodology for power converters based on global energy requirement criteria. Application to a DC-DC flyback structure”, European conference on Power Electronics, EPE’11, Birmingham, Aug 2011

[13] Documentation technique de condensateurs électrochimiques (séries 058/059 PLL-SI), Site web de la société Vishay (http://www.vishay.com), visité en Nov 2010.

[14] « Capacitor for hole mounting assembly » Donnée ACV extraite de la base de donnée de l’université de Chalmers, Mars 2000, visité en Dec 2011

(http://www.cpm.chalmers.se/CPMDatabase/Scripts/sheet.asp?ActId=ECOP3207)

[15] John Shen Z., Xiong Y., Cheng X., Fu Y., Kumar P.: Power MOSFET switching loss analysis: a new insight, Conference Record of the 2006 IEEE Industry Applications Conference, Tampa, Finland: Oct 2006, 5p.

[16] J. Ejury, “How to compare the Figure Of Merite (FOM) of MOSFETs,” Application note Infineon, Juin-2003.

[17] Base de données EIME V11.0, 2009, site web EIME, visité en Déc 2010

(http://www.codde.fr/page.php?rubrique=20)

[18] Van den Bossche A.P., Van de Sype D.M., Valchev V.C.: Ferrite loss measurement and models in half bridge and full bridge waveforms, IEEE 36th Power Electronics Specialists Conference PESC’05, Recife, Brazil: 2005, 8p.

[19] Hischier R., Classen M., Lehmann M., Scharnhorst W.: Life cycle inventories of electric and electronic equipment: Product use and disposal Part III §5, Eco-invent report n°18, Dec 2007

[20] Boughamni W., Roger D., Manata J.P., Brudny J.F, Frezel PH.: Comparative analysis of wire impregnating and different solutions of Thermo bonding (In French), CONFREGE, Toulouse: 2010, 7p.

[21] Documentation technique de puces de diodes Schottky haute performance fabriquées par Vishay, site web de Vishay, visité en Nov. 2010 (http://www.vishay.com/die-wafer/schottky_die/).