HAL
open science

De l'optimisation technico-économique à la simulation multi-échelles de temps : Outils et méthodes pour la conception des systèmes électriques

Jean-Christophe Olivier

To cite this version:

Jean-Christophe Olivier. De l'optimisation technico-économique à la simulation multi-échelles de temps : Outils et méthodes pour la conception des systèmes électriques. Sciences de l'information et de la communication. Université de Nantes, 2017. tel-01590795

HAL Id: tel-01590795

https://shs.hal.science/tel-01590795v1

Submitted on 20 Sep 2017

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.

Université de Nantes

Mémoire présenté en vue de l'obtention de

l'Habilitation à Diriger des Recherches

Jean-Christophe OLIVIER

Maître de conférences à l'IUT de Saint-Nazaire
Chercheur au laboratoire IREENA (EA4642)

De l'optimisation technico-économique à la simulation multi-échelles de temps

Outils et méthodes pour la conception des systèmes électriques

Présenté à l'IREENA, Saint-Nazaire, le 13 juin 2017, devant le jury composé de :

Président	—	Bernard MULTON, Professeur des Universités, ENS de Rennes, SATIE, Rennes
Rapporteurs	—	Delphine RIU, Professeur des Universités, Ense3, G2ELab, Grenoble Marie-Cécile PERA, Professeur des Universités, IUT Belfort-Montbéliard, FEMTO-ST, Belfort Stéphane BRISSET, Maître de Conférences HDR, Ecole Centrale de Lille, L2EP, Lilles
Examinateurs	—	Bruno AUVITY, Professeur des Universités, Polytech'Nantes, LTN, Nantes Mohamed MACHMOUM, Professeur des Universités, Polytech'Nantes, IREENA, Saint-Nazaire Luc LORON, Professeur des Universités, Polytech'Nantes, IREENA, Saint-Nazaire
Invités	—	Jérôme DENIAUD, Ingénieur, Directeur Technique COMECA Power, Le Mans

à $t = \infty$, tout arrive

Table des matières

I CV détaillé **9**

1 Synthèse de mes activités d'enseignant-chercheur **11**

1.1 Curriculum vitæ 11

1.2 Activités d'enseignement 13

1.2.1 En synthèse 13

1.2.2 Matières enseignées et volumes horaires 13

1.3 Responsabilités et activités scientifiques 16

1.3.1 Primes 16

1.3.2 Projets 16

1.3.3 Mobilité nationale et internationale 17

1.3.4 Contrats industriels et Prestations 18

1.3.5 Membre de comités et autres implications 18

1.4 Encadrements 19

2 Publications **25**

II Activités de Recherche **31**

1 Applications considérées et positionnement des travaux **37**

1.1 Introduction 37

1.2 Applications considérées 38

1.2.1 Navire à supercondensateurs *Ar Vag Tredan* 38

1.2.2 Système multi-sources de production d'énergie électrique 41

1.2.3 Véhicule Urbain à pile à combustible *Cityjoule* 43

1.3 Etat de l'art et Positionnement 46

1.3.1 Outils de modélisation et de simulation multi-physique 46

1.3.2 Dimensionnement optimisé des chaînes de conversion d'énergie . . . 50

1.3.3 Positionnement de nos travaux 53

2 Modélisation et Optimisation des chaînes de conversion d'énergie 57

2.1 Introduction 57

2.2 Formalisme de représentation et décomposition temporelle des problèmes multi-physiques 58

2.3 Approche technico-économique pour le dimensionnement optimisé des chaînes de conversion 63

2.3.1 Optimisation technico-économique appliquée au transport naval . . . 64

2.3.2 Optimisation technico-économique d'un système multi-sources et prise en compte de la nature stochastique de l'environnement 68

2.4 Modélisation multi-physique d'un système pile à combustible 73

2.4.1 Conception optimale de la chaîne électrique : Du réservoir à la roue . 74

2.4.2 Diagnostic des piles à combustible par une approche de modélisation multi-physique 79

2.5 Conclusion 81

3 Outils de simulation des systèmes multi-physiques et multi-échelles de temps 83

3.1 Introduction 83

3.2 Formulation sur cycles d'un problème multi-physique 85

3.3 Méthodes d'extrapolation sur cycle 89

3.4 Application à la simulation du navire à supercondensateurs *Ar Vag Tredan* . . 93

3.5 Conclusion 101

III Projet **103**

1 Projet de recherche **105**

1.1 Du cycle déterministe au profil stochastique 105

1.2 Gestion de l'énergie et critères technico-économiques 107

1.3 Approche unifiée Dimensionnement-Gestion 108

1.4 Moyens mis en œuvre 109

2 Projet Pédagogique **111**

2.1 Polyjoule…l'aventure continue 111

2.2 Production d'énergie en site isolé 112

A Article de synthèse du navire *Ar Vag Tredan* **123**

B Article sur la prise en compte de la nature stochastique de l'environnement dans le processus de dimensionnement **137**

C Article sur la méthodologie de dimensionnement sur cycles de systèmes multi-physiques et multi-échelles de temps **147**

CV détaillé

I

1 Synthèse de mes activités d'enseignant-chercheur

1.1 Curriculum vitæ

Identité

Jean-Christophe OLIVIER
Né le 17/09/1979, Levallois Perret (92)
Français, marié, un enfant

Grade : Maître de Conférences
Section CNU : 63-61
Etablissements : IUT de Saint-Nazaire/Laboratoire IREENA
e-mail : jean-christophe.olivier@univ-nantes.fr
Tel : +33 (0)2 40 17 26 92

Formation Universitaire

2004-2006 : Thèse de doctorat en Génie électrique & électronique. Université de Nantes. Soutenue le 5 Décembre 2006. Ecole doctorale : Science & Technologies de l'Information & des Matériaux (STIM)
Laboratoire : IREENA, Saint-Nazaire.
Titre : "Modélisation et Conception d'un Modulateur Auto-Oscillant Adapté à l'Emulation d'Organes de Puissance".
Jury de thèse :
Jean-Paul Vilain – Laboratoire d'Electromécanique, Compiègne (président)
Maurice Fadel – LEEI, Toulouse (rapporteur)
Roméo Ortéga – L2S, Gif-sur-Yvette (rapporteur)

Nicolas Ginot – Ingénieur de Recherche à Electronavale, Saint Herblain (invité)
Philippe Dupuy – Responsable UET Gestion de l'Energie Electrique – TCR Renault, Guyancourt (invité)
Luc Loron – IREENA, Saint Nazaire (directeur de thèse)
Jean-Claude Le Claire – IREENA, Saint Nazaire (co-encadrant)

Résumé : Les travaux de thèse portaient sur l'optimisation de la structure et de la commande de systèmes d'émulation de puissance, appelés Charges Actives. Afin de présenter de très bonnes performances dynamiques ainsi qu'une très grande robustesse, ces Charges Actives utilisent des modulateurs et régulateurs de courant (MRC) et de tension (MRT). Ces procédés font partie de la classe des régulateurs auto-oscillants et sont donc par nature fortement non-linéaires. Aussi, pour que leur application à la Charge Active soit optimale, le premier point abordé dans ce travail traitait de la modélisation de ces régulateurs et de l'identification des différents problèmes éventuels, inhérents à leurs non-linéarités. Il est alors apparu que des phénomènes de synchronisation et d'instabilité de la fréquence de commutation pouvaient survenir si certaines conditions n'étaient pas respectées. Le second point abordé dans cette thèse portait sur la généralisation des procédés de modulation, à des systèmes d'ordre quelconque, en se basant sur une méthode de synthèse en mode de glissement. De cette étude, une nouvelle structure de modulation et de régulation de tension a ainsi pu être proposée, permettant de répondre plus efficacement et de façon plus générique aux problématiques posées par la Charge Active. Les résultats expérimentaux obtenus sur un prototype ont montré les très grandes performances de ce nouveau modulateur, contribuant ainsi à l'amélioration de la qualité et de la précision des anciennes et nouvelles générations de Charges Actives.

2003-2004 : Diplôme d'Etudes Approfondies, spécialité Electronique & Génie Electrique. Université de Nantes.
Sujet : Etude d'une Commande Adaptative de Gain pour Onduleur Monophasé.
2001-2004 : Ingénieur EpUN (Ecole polytechnique de l'Université de Nantes). Département Génie Electrique.
2000-2001 : Licence Ingénierie Electrique. Université de Nantes.
1998-2000 : Diplôme Universitaire Technologique, Génie Electrique & Informatique Industriel. Université de Nantes.
1997-1998 : Baccalauréat STI Electrotechnique. Lycée Marcel Cachin, Saint-Ouen. Mention *bien.*

Expérience professionnelle

Depuis février 2008 : Maître de Conférences à l'IUT de Saint-Nazaire (Université de Nantes), département Mesures Physiques, rattaché au laboratoire IREENA, Saint-Nazaire.

Entre février 2007 à février 2008 : ATER complet à l'IUT de Saint-Nazaire, département

Mesures Physiques.

Octobre 2004 à février 2007 : Ingénieur Recherche & Développement (thèse CIFRE) : Etude et dimensionnement de convertisseurs de puissance. Société ECA EN, Saint-Herblain.

1.2 Activités d'enseignement

1.2.1 En synthèse

Depuis 2008, j'effectue ma charge d'enseignement à l'IUT de Saint-Nazaire, au département Mesures Physiques. J'ai été responsable des enseignements d'électricité (1ère année) entre 2008 et 2013 et je suis responsable des enseignements d'Energies Renouvelables et de Chaînes de Mesures (2ème année) depuis 2014. Je suis également responsable des projets tutorés en deuxième année de DUT Mesures Physiques, consistant à étudier, concevoir ou réaliser un système pratique. Ces projets s'étalent sur toute l'année et sont réalisés par groupes d'au moins 4 étudiants, parallèlement aux enseignements classiques de la formation. En licence Capteur Instrumentation et Métrologie, j'anime depuis 2014 un cours en Conditionnement et Traitement des Signaux de Mesures (environ 14 h). Depuis 2014, je m'occupe du cours de contrôle-commande de cette même formation.

Enfin, j'interviens plus épisodiquement au département Génie Electrique de Polytech'Nantes dans le cadre de projets ingénieurs en dernière année (2 à 3 projets par an depuis 2009), ainsi qu'en électricité et électronique pour la filière par alternance "Maîtrise des Energies" (MdE) de cette même école. Je propose enfin une courte conférence de 3 heures sur l'intégration des énergies renouvelables, à la fois en MdE et en Master ENR à Nantes. En ce qui concerne mon investissement dans des tâches et responsabilités administratives, je m'occupe de la gestion des notes depuis 2014 et suis membre élu du conseil de direction de l'IUT de Saint-Nazaire. La suite de cette section présente de façon plus détaillée ces différents enseignements.

1.2.2 Matières enseignées et volumes horaires

DUT Mesures Physiques

Les programmes pédagogiques à l'IUT étant très régulièrement remis à jour, la répartition des enseignements et leurs découpages sont souvent modifiés. La liste donnée ci-dessous reste toutefois à l'image de mes interventions à l'IUT ces 3 dernières années.

- **Systèmes Electriques (S1, 12 h cours, 18 h TD, 36 h TP, responsable entre 2008 et 2012)** – Cet enseignement permet d"aborder les bases de l'électricité en continu et en régime sinusoïdal dès l'entrée des étudiants en première année.
- **Electromagnétisme (S2, 12 h TD, 15,5 h TP)** – Dans la continuité des enseignements d'électricité, l'objectif est ici de proposer une initiation à l'électromagnétisme et notam-

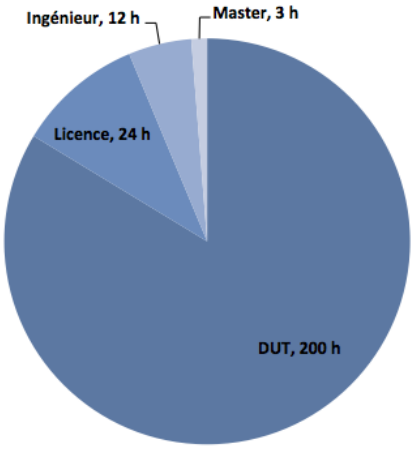


Figure. 1.1 – Répartition de ma charge d'enseignement annuelle (en moyenne sur 3 ans).

ment au calcul d'organes électrotechniques, tels que les self-inductances, électroaimants et transformateurs.

— **Electronique Analogique (S2, 16 h TD, 20 h TP)** – C'est le troisième pilier de l'EEA en première année de DUT. Cet enseignement introduit les amplificateurs opérationnels en linéaire et en comparateur, les fonctions de filtrage, ainsi que le redressement à diode.

— **Informatique d'Instrumentation (S2, 23,5 h TP)** – Nous abordons en TP la mise en œuvre de fonctions en logique câblée, la programmation de cibles microcontrolleurs ainsi que les codages numériques entier et en virgule flottante.

— **Energies Renouvelables (S3, 3 h cours, 12 h TD, 24 h TP, responsable depuis sa création en 2013)** – Cet enseignement est donné en début de deuxième année et vise à présenter de manière générale le problème de la ressource énergétique, puis à décliner 3 systèmes particuliers : La pile à combustible/Electroyseur, les panneaux photovoltaïques et enfin les éoliennes. Les TP sont couplés avec l'électronique de puissance pour disposer de 7 séances consécutives de 3 h, nous permettant de proposer des projets complets tenant compte du système de production, du convertisseur de puissance et du système de stockage.

— **Conditionnement de signaux (S3, 16 h TD, 22 h TP)** – Nous voyons au cours de ce module les différents schémas classiques d'amplification et de filtrage pour l'instrumentation de capteurs. Les travaux pratiques portent sur l'instrumentation d'un capteur de courant, d'un pont de Wheatstone (sonde PT100) et sur la mise en œuvre sous Labview d'un système d'identification automatique de filtre.

— **Chaînes de Mesures (S4, 9 h cours, 14 h TD, 20 h TP, responsable depuis sa création en 2014)** – Cet enseignement du S4 est une forme de synthèse des semestres précédents autour du capteur et de son instrumentation. L'objectif est d'appréhender dans son ensemble une chaîne de mesure, allant du capteur jusqu'au système d'acquisition numérique et de pilotage. Des éléments d'automatique linéaire son également

présents dans cet enseignement. Les TP, comme en Energies Renouvelables, se déroulent sous forme de projets. L'objectif est de mettre en œuvre un système de régulation de température dans une plaque, en partant du capteur (PT100) et en construisant bloc par bloc toute la chaîne de conditionnement. Une cible à microntrolleur est alors utilisée pour la régulation PI par commande MLI d'un interrupteur de puissance.

Licence Pro Capteurs, Instrumentation et Métrologie

J'effectue des enseignements dans cette formation depuis mes tout débuts en 2004, alors que j'étais en première année de thèse. Aujourd'hui, j'interviens essentiellement dans deux modules dont je suis responsable :

- **Conditionnement et Traitement des Signaux de Mesures (12 h TD, responsable depuis 2004)** – Ces cours que je propose depuis 2004 consistent à étudier des chaînes de conditionnement de capteurs. Nous analysons en détail le pont de Wheatstone, l'amplificateur différentiel, ainsi que les différents défauts de ces étages (tolérance des composants, mode commun, auto-échauffement, bande passante, ...).
- **Contrôle-Commande (12 h TD, responsable depuis 2014)** – L'objectif est ici d'introduire les notions de régulation de processus, en mettant l'accent sur la modélisation et l'identification des systèmes.

MASTER Pro Energies Nouvelles et Renouvelables

- **Stockage Electrochimique - Interfaces de puissance (3 h cours)** – Ce court module de 3 heures me permet de présenter à un public non initié, les notions d'électronique de puissance appliquées aux chaînes de conversion avec stockage. L'objectif est de définir les structures classiques de conversion pour arriver jusqu'à des calculs simples de rendement.

Polytech Nantes, Ingénieur Maîtrise des énergies par apprentissage

Entre 2011 et 2014, j'ai été responsable des enseignements d'électricité pour les étudiants de première année de cette formation (environ 30 h TD). Ce cours était une initiation aux circuits électriques en régime continu et sinusoïdal. Cet enseignement a depuis été repris par un collègue recruté pour administrer la formation et pour participer aux enseignements de l'EEA. Aujourd'hui, je n'interviens donc plus que ponctuellement, et en particulier sur mes spécialités d'enseignement et de recherche :

- **Electronique de puissance pour les énergies renouvelables (4 h cours)** – Ce module est dans la même veine que celui donné en MASTER ENR. Le public étant initié aux notions d'électronique de puissance, nous allons un peu plus loin en étudiant des architectures multi-sources plus complexes.
- **Métrologie Electrique (8 h TP)** – Ces TP (2 séances) visent à réaliser et tester des circuits de filtrage analogique et d'amplification différentielle. Les étudiants commencent

la séance avec uniquement un cahier des charges. Ils doivent alors proposer un montage, le réaliser et le qualifier.

1.3 Responsabilités et activités scientifiques

1.3.1 Primes

Titulaire de la Prime d'Encadrement Doctoral et de Recherche depuis 2015.

1.3.2 Projets

ETRERA (Empowering Tunisian Renewable Energy Research Activities) : 2010–2013

Co-responsable à l'IREENA du projet européen REGPOT FP7 ETRERA (Empowering Tunisian Renewable Energy Research Activities) démarré en 2010 et terminé en juin 2013, ayant pour objectif de dynamiser la recherche sur le domaine des piles à combustible en Tunisie. Ce projet fait intervenir 4 partenaires (le site du CRTEn en Tunisie, le CNR-ITAE, IBIC en Italie, les laboratoires IREENA et LTN en France) :

- Montage de Workshops en ligne ;
- Organisation de séminaires ;
- Organisation d'un congrès international (EMHyTEC 2012).

BESST (Breakthrough in European Ship and Shipbuilding Technologies) : 2009–2013

Participation en tant que chercheur au projet européen BESST (Breakthrough in European Ship and Shipbuilding Technologies) entre septembre 2009 et février 2013, en partenariat avec les chantiers navals STX Europe à Saint-Nazaire et Fincantieri à Trieste en Italie. Ce projet vise à améliorer les performances, la sécurité et l'impact environnemental des navires actuels, en y intégrant des technologies innovantes :

- Réalisation d'un état de l'art sur les nouvelles technologies de stockage/récupération d'énergie ;
- Conception et réalisation d'un démonstrateur de chaîne de puissance électrique de navire, de longue durée de vie (>15 ans).

ETRERA 2020 (Empowering Trans-Mediterranean Renewable Energy Research Alliance for Europe 2020) : 2013–2016

Participation au projet européen R2I-FP7 ETRERA 2020 (Empowering Trans-Mediterranean Renewable Energy Research Alliance for Europe 2020), entre septembre 2013 et septembre 2016. Ce projet vise à créer un réseau de compétences euro-méditerranéen afin d'assurer les besoins

futurs en énergie électrique :

- Participation à un *Info-Day* pour la diffusion du projet auprès des acteurs régionaux ;
- Rédaction de fiches de compétences et de synthèse.

Projet interne du GdR SEEDS-SHS : 2015–2016

Optimisation technico-économique des infrastructures de production, stockage et utilisation de l'hydrogène-EMR : application à l'éco-mobilité maritime en Région des Pays de la Loire. Un des objectifs de ce projet est de concevoir un outil de simulation de chaînes de puissance à pile à combustible, dans l'optique d'évaluer leur consommation et d'optimiser des solutions hybridation.

Plateforme Smart-Power du RFI WISE : 2016–2018

Pilote du projet de plateforme *Smart-Power* développé dans le cadre du RFI WISE (Recherche Formation Innovation). Cette plateforme sera tournée vers la production d'énergie multi-sources à énergies renouvelables. Les applications visées par cette plateforme sont celles de l'autoconsommation résidentielle, à l'échelle d'un micro-grid (habitat ou quartier), et le transport naval.

1.3.3 Mobilité nationale et internationale

- Déplacements à des conférences et GDR : EF 2009, FIT 2010, VPPC 2010, 2011 et 2015, GDR HySPaC axe *systèmes*, GDR Seeds GTs optimisation et micro-grid, journée des labos 2013 du pôle S2E2, PHM 2013, EmHyTEC 2012 et 2016 ;
- Déplacements au Centre National de Recherche CNR-ITAE à Messine (Italie) et au Centre de recherche CRTn de Tunis (Tunisie) sur les domaines des énergies renouvelables et Pile à combustible. Actions menées : Secondments, séminaires de travail, organisation d'une conférence internationale ;
- Déplacements réguliers à l'ENIT, au Laboratoire des Systèmes Electriques, Tunisi : Encadrement d'une thèse en cotutelle et montage de projets collaboratifs ;
- Chercheur invité au séminaire de formation SEFRA, Tunisie, pour faire un exposé sur deux journées autour de l'intégration des systèmes pile à combustible (15 et 16 mars 2015).
- Conférence invitée au journées thématiques du club EEA, sur le thème du Power-In-the-Loop (14 et 15 mars 2017, Genevilliers).

1.3.4 Contrats industriels et Prestations

Chantiers navals STX Europe (Saint-Nazaire) – Participation en tant que chercheur aux projets : 2008–2010

- Etude de faisabilité pour un nouveau concept de navire écologique (durée : 5 mois). Réalisation d'un outil logiciel de simulation ;
- Etude complémentaire pour un nouveau concept de navire écologique (durée : 6 mois). Réalisation d'un maquettage de l'architecture électrique du navire.

SGTE-Power (Le Mans) – Responsable scientifique des études : 2013–2016

- Spécifications de la structure et des lois de commande d'un chargeur de batterie réversible forte puissance (durée : 4 mois). Réalisation d'un outil logiciel de dimensionnement et de réglage des correcteurs.
- Banc de test - Validation de la structure et des lois de commande (durée : 6 mois). Réalisation d'un maquettage du chargeur de batterie réversible et implantation des régulations dans le système final de contrôle-commande.
- Dimensionnement et définition des lois de commande de systèmes d'alimentation de forte puissance à absorption sinusoïdale (12 mois).

XSun (Guérande) – Responsable scientifique de l'étude (en cours de montage) : 2017–2018

- Dimensionnement optimisé d'un convertisseur MPPT pour un drone solaire autonome. Contraintes fortes d'efficacité et de masse ;
- Réalisation d'un prototype fonctionnel.

1.3.5 Membre de comités et autres implications

- Comité d'organisation de la journée des doctorants de l'école doctorale S.T.I.M. (JDOC'2006) ;
- Comité d'organisation du congrès EPF 2010 (30 juin-2 juillet 2010, Saint-Nazaire, France) ;
- Comité d'organisation des évènements ETRERA sur la période 2010-2012 (Workshops, séminaires) ;
- Comité d'organisation d'un congrès international EMHyTEC 2012, à Tunis, sur les systèmes *Pile à combustible* ;
- Comité d'organisation de la conférence JCGE 2013 (Journées JCGE/SEEDS, Saint-Nazaire, France) ;
- Comité d'organisation de la conférence NUMELEC 2015 (Saint-Nazaire, France) ;
- Comité scientifique de la conférence InGEC-EmHyTec 2016 (Tunisie) ;
- Animateur de session orale lors des conférences EMHyTEC 2012 et 2015 ;
- Animateur d'un atelier "Techniques d'optimisation" au sein du laboratoire, avec pour objectif de former les jeunes chercheurs à ces méthodes, d'organiser des séminaires avec

des spécialistes et de créer une boîte à outils générique utilisable par l'ensemble des chercheurs du laboratoire ;
- Membre élu du conseil de laboratoire depuis septembre 2016 ;
- Membre élu du conseil de direction de l'IUT de Saint-Nazaire depuis 2015 ;
- Membre de comités de sélection de l'IUT de Saint-Nazaire en 2012 et 2014 pour des postes de Maîtres de Conférences ;
- Reviewer pour plusieurs conférences (VPPC, ECCE, JCGE, EmHyTEC, ...) et revues (IEEE Transactions on Industrial Electronics, International Journal of Hydrogen Energy, Power Sources, Solar Energy, ...) ;
- Réalisation d'expertises pour l'ANRT (une en 2015 et une en 2016).

1.4 Encadrements

Entre 2009 et aujourd'hui, j'ai eu l'opportunité de participer au co-encadrement de 3 thèses soutenues. Actuellement, deux thèses sont en cours. La première (Alexis Mahé) a débuté fin 2014 pour une soutenance prévue en 2017. La seconde (Ramzi Saidi) a démarré fin 2016, pour une soutenance prévue en 2019. Enfin, la troisième (Chaima Mahjoubi) en cotutelle avec l'ENIT, vient aussi de démarrer fin 2016 pour une soutenance prévue fin 2019. Un des débouchés du projet pédagogique Polyjoule/Cityjoule, auquel je participe en tant que co-animateur scientifique, est la thèse de Stéphane Chevalier, soutenue en 2013, et portant sur le diagnostic de piles à combustible par spectroscopie d'impédance. Bien que je ne sois pas dans l'équipe d'encadrement de cette thèse, j'ai pu suivre de près le travail réalisé, et contribuer directement sur les problématiques d'optimisation et d'inversion de modèle. Je suis de plus associé à l'ensemble des publications soumises durant la thèse. J'ai également participé à l'encadrement de 12 Masters Recherche.

La présente section détaille ces différents encadrements, avec pour les thèses un résumé des travaux réalisés ou en cours.

Encadrement doctoral

THESE 1 – Sony Trieste, *Etude d'une nouvelle architecture énergétique de navire : éco-conception, mise en œuvre optimisée et expérimentation.* Thèse réalisée en collaboration avec la société STX dans le cadre d'un contrat CIFRE (2009-2013).
Directeur : Luc Loron (40 %)
Co-encadrants : Jean-Christophe Olivier (30 %), Salvy Bourguet (30 %)
Soutenue le : 10 juin 2013
Publications associées : ACL10, ACTI7, ACTN3, AP1-5
Résumé : Ce travail porte sur le dimensionnement optimisé d'une navette fluviale (Ar Vag Tredan, Lorient) fonctionnant uniquement avec des supercondensateurs. Cette thèse CIFRE s'est déroulée en partenariat avec la société STX (chantier naval de Saint-Nazaire) et dans le cadre du projet Européen BESST (FP7). L'idée de ce travail a été de proposer une méthodologie de dimensionnement technico-économique du navire. L'originalité de cette démarche est de

tenir compte des critères de durée de vie et de coût des différents organes. Le principal résultat de cette étude est de proposer un outil de simulation et d'optimisation sur cycle, mettant en jeu un ensemble de modèles multi-physiques couplés (thermique, électrique, vieillissement et économique).

THESE 2 – Ahmed Bouabdallah, *Pilotage et gestion d'énergie de systèmes énergétiques hybrides.* Thèse ministérielle (2011-2014).
Directeur : Mohamed Machmoum (40 %)
Co-encadrants : Jean-Christophe Olivier (30 %), Salvy Bourguet (30 %)
Publications associées : ACL9, ACTI12, ACTI13, ACTI21, ACTI23
Résumé : Ce travail traite du dimensionnement optimisé d'un système énergétique multi-sources pour l'habitat. Le système considéré comporte des panneaux photovoltaïques (PV) comme moyen de production, des batteries pour le stockage d'énergie, une pile à combustible (PàC) comme moyen de secours et des convertisseurs statiques pour le conditionnement de l'énergie. Le dimensionnement repose sur la modélisation technico-économique des différents composants, sur la modélisation de la ressource et de la charge, ainsi que sur la durée de vie des batteries et de la PàC. L'objectif est alors de déterminer les meilleurs compromis entre le taux de satisfaction de la charge et le coût actualisé du kWh produit. En se basant sur une modélisation stochastique de la couverture nuageuse par chaînes de Markov, il est possible de générer un très grand nombre de profils d'ensoleillement virtuel, respectant les caractéristiques statistiques et dynamiques des mesures. Il est alors montré dans ce travail qu'il est possible de rendre une solution de production plus fiable et robuste, en optimisant un dimensionnement *au pire des cas* et sur la base des années simulées ayant le plus faible rayonnement annuel. De par sa nature générique, l'approche proposée peut être utilisée dans de nombreuses applications de production d'électricité et de transport.

THESE 3 – Sadok Hmam, *Méthodologie de conception optimale de chaînes de conversion et de stockage de l'énergie électrique.* Thèse ministérielle (oct. 2013- nov. 2016).
Directeur : Luc Loron (40 %)
Co-encadrants : Jean-Christophe Olivier (30 %), Salvy Bourguet (30 %)
Publications associées : ACL11, ACL13, ACLN1, ACTI18, ACTI22
Résumé : Cette thèse est dans la continuité de celle de Sony Trieste et de Ahmed Bouabdallah. Notre objectif est ici de concevoir une méthodologie générique de conception, qui intègre à la fois les critères techniques et économiques qui impactent sur les choix technologiques et le dimensionnement d'une chaîne de conversion et de stockage de l'énergie électrique. Au sein d'une architecture, définie à partir d'un formalisme énergétique de type bond-graph, chaque organe est caractérisé par un modèle fonctionnel, un modèle de vieillissement et un ou plusieurs modèles économiques. Ce travail nous a permis d'aboutir à un formalisme de modélisation basé sur une décomposition par cycle du problème, sans limite a priori entre les échelles de temps considérées. Cette formulation associée à des méthodes d'extrapolation adaptées permet des gains significatifs sur le temps de simulation.

THESE 4 – Alexis Mahé, *Etude et mise en œuvre d'une architecture générique de convertisseur réversible de forte puissance en vue de l'intégration de systèmes de stockage au réseau.* Thèse réalisée en collaboration avec la société Comeca Power, dans le cadre d'un contrat CIFRE (oct. 2014, soutenance prévue en 2017).
Directeur : Mohamed Machmoum (40 %)
Co-encadrants : Jean-Christophe Olivier (30 %), Azeddine Houari (30 %)
Publications associées : ACTN6
Résumé : Ce travail de thèse vise à proposer des solutions optimisées d'intégration d'organes de stockage dans le réseau électrique. L'enjeu principal de cette thèse repose donc sur la recherche d'architectures de conversion génériques, assurant la réversibilité des flux de puissance entre un système de stockage et le réseau d'alimentation. Les premiers résultats obtenus dans ce travail tendent à nous orienter vers les architectures de convertisseurs cellulaires, permettant de s'affranchir du transformateur de liaison et de proposer une connexion directe du système de stockage au réseau haute tension. Ces architectures présentent également d'autres avantages tels que leur haut rendement, leur possibilité de reconfiguration et de fonctionnement en mode dégradé et la haute qualité de l'énergie grâce à la nature multi-niveaux de l'architecture. Les travaux en cours sur cette problématique portent sur l'optimisation multi-critères du dimensionnement de ces convertisseurs, ainsi que sur la mise en œuvre de techniques de modulation entrelacées modulaires et adaptatives.

THESE 5 – Ramzi Saidi, *Gestion optimale de l'énergie des systèmes de production multisources pour l'autoconsommation électrique en site isolé.* Thèse financée par la région Pays de la Loire dans le cadre d'un appel à projet recherche RFI-WISE (oct. 2016, soutenance prévue en 2019).
Directeur : Mohamed Machmoum (40 %)
Co-encadrants : Jean-Christophe Olivier (30 %), Eric Chauveau (30 %)
Résumé : Ce projet vise à optimiser les lois de gestion de l'énergie d'un système de production multisources pour un habitat isolé. L'originalité de ce projet repose sur la recherche de stratégies de gestion d'énergie "intelligentes", prenant en compte différents critères tels que le vieillissement des composants ou l'amélioration de la qualité de l'énergie. Outre ces différents aspects, un effort important sera porté sur la flexibilité de ces lois de gestion qui devront être capables de s'adapter à la plus grande diversité possible de sources et d'organes de stockages. Ce travail s'appuiera sur les moyens matériels de la plateforme *Smart Power* du RFI WISE, qui sera installée dans les locaux du laboratoire IREENA d'ici à 2018.

THESE 6 – Chaima Mahjoubi, *Modélisation, optimisation et pilotage d'un système de stockage avec prise en compte du vieillissement pour son intégration dans un nanoréseau résidentiel multi sources.*. Thèse en co-tutelle avec l'ENIT, Tunisie (oct. 2016, soutenance prévue en 2019).
Directeur : Mohamed Machmoum (40 %)
Co-encadrant : Jean-Christophe Olivier (60 %)
Résumé : L'utilisation rationnelle de l'énergie et l'efficacité énergétique se situent en premier

lieu dans les plans stratégiques nationaux ou internationaux relatifs à l'énergie. Dans ce cadre, et aussi bien pour la Tunisie que pour la France, le management de la demande ou consommation électrique (Demand Side Management) constitue un objectif majeur. Le secteur résidentiel occupe une des premières places dans cette problématique et les efforts restent déployés visant notamment l'habitat à énergie positive, avec une maîtrise de la consommation, une exploitation des énergies renouvelables, tout en facilitant le comportement éco-responsable et en assurant un environnement confortable et sûr. L'habitation visée comprendra un mix énergétique avec un système photovoltaïque, un système éolien, une pile à combustible, des batteries, des super capacités ainsi que des charges résidentielles, et fonctionnera en mode isolé (non connecté au réseau). Cette thèse se propose de traiter l'intégration des énergies renouvelables dans l'habitat, en vue d'une autoconsommation énergétique. L'enjeu est alors de définir une méthodologie de dimensionnement optimisé, répondant à des contraintes d'usage et de coût, tout en tenant compte de la très grande variabilité de l'énergie disponible et des profils de consommateurs. Ce dimensionnement concerne principalement la taille des sources de production d'énergie (PV, éolien, pile à combustible) à intégrer à l'habitat, la taille et la nature des systèmes de stockage (batteries, super condensateurs, ...), l'architecture d'interconnexion de ces éléments, ainsi que la stratégie de gestion des flux d'énergie. Les travaux de recherche à mener dans le cadre de cette thèse concerneront principalement les éléments de stockage.

Encadrement MASTER

MASTER 1 – Khaled Almousa Almaksour, *Modélisation des pertes dans les convertisseurs statiques pour la commande de machines rapides*, 2009.

MASTER 2 – Mickael Ducamp, *Commande d'une Charge Active pour l'émulation d'une machine synchrone*, 2011.

MASTER 3 – Franck Gannay, *Conception et spécification d'une chaîne de propulsion hybride d'un véhicule "Urban Concept"*, 2012.

MASTER 4 – Luis Mendoza Aranguren, *Flywheel energy storage system for transport application*, 2013.

MASTER 5 – Hao Yang, *Study of hybrid system with supercapacitors and flywheel energy storage for transport applications*, 2014.

MASTER 6 – Chabakata Mahamat, *Système multi-sources pour l'habitat isolé : Architecture et gestion de l'énergie*, 2014.

MASTER 7 – Yingzi Chen, *Optimal Design of a hybrid power train for an Urban Concept vehicle*, 2014.

MASTER 8 – Thierno Alia Mbengue, *Pilotage et gestion de l'énergie dans un système multi-sources à énergies renouvelables*, 2014.

MASTER 9 – Weihang Wang, *Fuel cell modelization for a high performance light-duty vehicle*, 2015.

MASTER 10 – Milad Sajadi Mian Ab, *Techno-economic optimization of the hydrogen energy production from Marine Renewable Energy*, 2016.

MASTER 11 – Ning Tao, *Multi-physics simulation of a hybrid fuel-cell/batteries powertrain for the main propulsion of a full-electric ship*, 2016.

MASTER 12 – Ismail Djeddour, *Mise en œuvre de lois de gestion de l'énergie adaptatives tenant compte de la dégradation ou défaillance des organes de production et de stockage, application à un système multi-sources pour site isolé*, 2016.

2 Publications

Revues internationales avec comité de lecture

ACL1 – **J.-C. Olivier**, J.-C. Le Claire, and L. Loron. *An efficient switching frequency limitation process applied to a high dynamic voltage supply.* IEEE Transactions on Power Electronics, 23(1) :153–162, 2008.[IF=4.953].

ACL2 – V. Doirat, G. Berthiau, J. Fouladgar, and **J.-C. Olivier**. *An hybrid analytical/e.c.c. model driven by particle swarm optimization for fibre metal laminates testing.* Studies in Applied Electromagnetics and Mechanics, 32(Electromagnetic nondestructive evaluation (XII), IOS Press) :81–90, 2009.

ACL3 –**J.-C. Olivier**, J.-C. Le Claire, and L. Loron. *A nonlinear phenomenon on self-oscillating current controllers : The indirect synchronization.* IEEE Transactions on Industrial Electronics, 57(3) :1106–1111, 2010.[IF=6.383].

ACL4 – **J.-C. Olivier**, L. Loron, F. Auger, and J.-C. Le Claire. *Improved linear model of self oscillating systems such as relay feedback current controllers.* Control Engineering Practice, 18(8) :927–935, August 2010.[IF=1.83].

ACL5 – **J.-C. Olivier**, G. Wasselynck, D. Trichet, B. Auvity, C. Josset, P. Maindru, and M. Machmoum. *Light-duty fuel-cell vehicle designed for energetic races. high efficiency power converter design.* European Journal of Electrical Engineering, 15(1), feb 2012.[IF=0.116].

ACL6 – G. Wasselynck, B. Auvity, **J.-C. Olivier**, D. Trichet, C. Josset, and P. Maindru. *Design and testing of a fuel cell powertrain with energy constraints.* Energy, 38(1) :414 – 424, 2012.[IF=4.292].

ACL7 – S. Chevalier, D. Trichet, B. Auvity, **J.-C. Olivier**, C. Josset, and M. Machmoum. *Multi-physics DC and AC models of a PEMFC for the detection of degraded cell parameters.* International Journal of Hydrogen Energy, 38(26) :11609–11618, aug 2013.[IF=3.205]

ACL8 – S. Chevalier, B. Auvity, **J.-C. Olivier**, C. Josset, D. Trichet, and M. Machmoum. *Detection of cells state-of-health in PEM fuel cell stack using EIS measurements coupled with multiphysics modeling*. Fuel Cells, 2014.[IF=1.769].

ACL9 –– A. Bouabdallah, **J.-C. Olivier**, S. Bourguet, M. Machmoum, and E. Schaeffer. *Safe sizing methodology applied to a standalone photovoltaic system*. Renewable Energy, 80(0) :266 – 274, 2015.[IF=3.404].

ACL10 – S. Trieste, S. Hmam, **J.-C. Olivier**, S. Bourguet, and L. Loron. *Techno-economic optimization of a supercapacitor-based energy storage unit chain : Application on the first quick charge plug-in ferry*. Applied Energy, 153 :3–14, sep 2015.[IF=5.746].

ACL11 – S. Hmam, **J.-C. Olivier**, S. Bourguet and L. Loron. *A cycle-based and multirate approach for power system simulation application to the ageing estimation of a supercapacitor-based ferry*. Journal of Energy Storage, 2016.

ACL12 – M. Barbouche, Z. Ahmed, K. Charradi, H. Goubantini, Z. Beji, F. Krout, S. Azzouni, R. Chtourou, **J.-C. Olivier**, and G. Squadrito. *Tunisian european cooperation project : Pem fuel cells technology*. Energy Procedia, 93 :89–95, 2016.[IF=0.378]

ACL13 – S. Hmam, **J.-C. Olivier**, S. Bourguet and L. Loron. *Efficient multirate simulation techniques for multi-physics systems with different time scales : Application on an all-electric Ferry design*. IET Electrical Systems in Transportation, 2016.[IF=0.958]

ACL14 – A. Houari, A. Bouabdallah, A. Djeriouiand, M. Machmoum, F. Auger, A. Darkawi, **J.-C. Olivier** and M.-F. Benkhoris. *An Effective Compensation Technique for Speed Smoothness at Low Speed Operation of PMSM Drives*. IEEE Industry Applications Magazine, 2017.[IF=0.307]

ACL15, soumis – **J.-C. Olivier**, G. Wasselynck, S. Chevalier, B. Auvity, C. Josset, D. Trichet, G. Squadrito, N. Bernard. *Multiphysics modeling and optimization of the driving strategy of a light duty fuel cell vehicle*. International Journal of Hydrogen Energy, (soumis, 08/2016).

Revues nationales (avec comité de lecture)

ACLN1 – S. Hmam, **J.-C. Olivier**, S. Bourguet, and L. Loron. *Modélisation et simulation d'un système multi-physique - application à un stockeur d'énergie d'un ferry tout électrique*. Société de l'Electricité, de l'Electronique et des Technologies de l'Information et de la Communication (3EI), (82) :49–58, oct 2015.

Conférences internationales

ACTI1 – J.-C. Le Claire, L. Menager, J.-C. Olivier, and N. Ginot. *Isolation amplifier for high voltage measurement using a resonant control loop.* In European Conference on Power Electronics and Applications, Dresden, Germany, Sep. 2005.

ACTI2 – J.-C. Olivier, J. L. Claire, and L. Loron. *A powerful switching frequency limitation in sliding mode control.* In 12th International Power Electronics and Motion Control Conference, Aug. 2006.

ACTI3 – J.-C. Olivier, J.-C. Le Claire, and L. Loron. *Indirect synchronization phenomenon on self-oscillating current controllers.* In 33rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, pages 1598–1603, Taipei, Japan, nov. 2007.

ACTI4 – J.-C. Olivier, L. Loron, and J.-C. Le Claire. *Control law and compensations of a voltage active load for automotive applications.* In The 14th IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference, pages 534 – 540, Ajaccio, France, May 2008.

ACTI5 – V. Doirat, G. Berthiau, J. Fouladgar, and J.-C. Olivier. *Composite material physical parameters characterization with an hybrid analytical/e.c.c. model driven by particle swarm optimization.* In 13th International Workshop on Electromagnetic Non Destructive Evaluation, 2008.

ACTI6 – J.-C. Olivier, G. Wasselynck, D. Trichet, B. Auvity, and P. Maindru. *Power source to wheel model of a high efficiency fuel cell based vehicle.* In 6th IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, Lilles, France, Sep. 2010.

ACTI7 – S. Trieste, S. Bourguet, J.-C. Olivier, L. Loron, and J. L. Claire. *Accurate sizing of supercapacitors storage system considering its capacitance variation.* In 14th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE1), Birmingham, United Kingdom, Aug./Sep. 2011.

ACTI8 – D. Trichet, S.Chevalier, G. Wasselynck, J.-C. Olivier, B. Auvity, C. Josset, and M. Machmoum. *Global energy optimization of a light-duty fuel-cell vehicle.* In 7th IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, Chicago, United-States, Sep. 2011.

ACTI9 – G. Wasselynck, S. Chevalier, D. Trichet, J. Olivier, B. Auvity, C. Josset, B. Khiari, and M. Machmoum. *Fuel cell accessories optimization and design for high efficiency low power applications.* In EMHyTeC, September 2012.

ACTI10 – S. Chevalier, C. Josset, J.-C. Olivier, D. Trichet, B. Auvity, and M. Machmoum. *Physical modeling of the electrochemical impedance of pemfc.* In EMHyTeC, September 2012.

ACTI11 – S. Chevalier, C. Josset, J.-C. Olivier, B. Auvity, D. Trichet, and M. Machmoum. *Experimental validation of an identification procedure of pemfc stack state of health using eis combined*

with a physical impedance modelling. In IEEE Conference on Prognostics and Health Management. Milan, September 2013.

ACTI12 – A. Bouabdallah, S. Bourguet, J.-C. Olivier, and M. Machmoum. *Optimal sizing of a stand-alone photovoltaic system. In International Conference on Renewable Energy Research and Applications.* IEEE, oct 2013.

ACTI13 – A. Bouabdallah, S. Bourguet, J.-C. Olivier, and M. Machmoum. *Photovoltaic energy for the fixed and tracking system based on the modeling of solar radiation.* In Industrial Electronics Society, IECON 2013-39th Annual Conference of the IEEE, pages 1821–1826. IEEE, 2013.

ACTI14 – S. Chevalier, C. Josset, J.-C.Olivier, B. Auvity, D. Trichet and M. Machmoum.*Numerical simulation of localized impedance along a segmented PEM fuel cell.* in FDFC, Karlsruhe, Germany, apr. 2013.

ACTI15 – S. Slouma, K. Charradi, J.-C. Olivier and R. Chtourou. *Command and control of a fuel cell emulator.* In IEEE International Conference on Composite Materials & Renewable Energy Applications, 2014.

ACTI16 – D. Trichet, S. Chevalier, B. Auvity, C. Josset, J.-C. Olivier, M. Machmoum. *Water Management and Thermal Effects on PEMFC Accessories Consumption.* In IDHEA, International Discussion on Hydrogen Energy and Applications, Nantes, France, 2014.

ACTI17 – N. Bernard, L. Dang, J.-C. Olivier, N. Bracikowski, G. Wasselynck, and G. Berthiau. *Design optimization of high-speed pmsm for electric vehicles.* In Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), 2015 IEEE, pages 1–6. IEEE, 2015.

ACTI18 – S. Hmam, J.-C. Olivier, S. Bourguet, and L. Loron. *A multirate simulation method for large timescale systems applied for lifetime simulations.* In Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), 2015 IEEE, pages 1–6. IEEE, 2015.

ACTI19 – A. Houari, F. Auger, J.-C. Olivier, and M. Machmoum. *A new compensation technique for pmsm torque ripple minimization.* In Industry Applications Society Annual Meeting, 2015 IEEE, pages 1–6. IEEE, 2015.

ACTI20 – J.-C. Olivier, G. Wasselynck, S. Chevalier, C. Josset, B. Auvity, G. Squadrito, D. Trichet, N. Bernard, and S. Hmam. *Multiphysics modeling and driving strategy optimization of an urban-concept vehicle.* In Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), 2015 IEEE, pages 1–6. IEEE, 2015.

ACTI21 – A. Bouabdallah, J.-C. Olivier, S. Bourguet, A. Houari, M. Machmoum.*Robust sizing of a stand-alone multi-sources power system.* In IEEE International Conference on Industrial Technology, Taipei, Taiwan, mar. 2016.

ACTI22 – S. Hmam, J.-C. Olivier, S. Bourguet, L. Loron, N. Bernard. *Multirate Simulation Method Adapted to Large Time-Scale Multi-physics Systems : Application on an All-Electric Ferry Design.* EMHyTeC, Tunis, Tunisia, may 2016.

ACTI23 – A. Bouabdallah, J.-C. Olivier, S. Bourguet, M. Machmoum. *Sizing methodology using energy management for multi-sources renewable energy systems.* EMHyTeC, Tunis, Tunisia, may 2016.

Conférences nationales

ACTN1 – F. Auger and J.-C. Olivier. *La droite de williamson : une technique de régression linéaire injustement oubliée.* In 5ème Colloque Interdisciplinaire en Instrumentation, Le Mans, France, Jan. 2010.

ACTN2 – P. Fabre, X. Fonteneau, J.-C. Olivier, D. Trichet, G. Wasselynck, B. Auvity, C. Josset, C. Le Bozec, and P. Maindru. *Optimisation d'un convertisseur de puissance dédié à la propulsion d'un véhicule à pile à combustible de faible puissance.* In Electronique de Puissance du Futur, Saint-Nazaire, France, jun./jul. 2010.

ACTN3 – S. Trieste, J.-C. Olivier, S. Bourguet, L. Loron, and D. Harpin. *Optimisation économique du dimensionnement d'un ensemble convertisseur-supercondensateurs utilisé pour l'énergie principale d'un véhicule électrique de type plug-in.* In 14ème édition de la Conférence Electronique de Puissance du Futur. Bordeaux, july 2012.

ACTN4 – N. Bernard and J.-C. Olivier. *Méthodologie de dimensionnement sur cycle d'une machine synchrone rapide à aimants permanents - application au stockage inertiel longue durée.* In Symposium de Génie Electrique (SGE'14) : EF-EPF-MGE, ENS Cachan, France, july 2014.

ACTN5 – J.-C. Olivier, N. Bernard, S. Trieste, S. Bourguet, and L. M. Aranguren. *Techno-economic optimization of flywheel storage system in transportation.* In Symposium de Génie Electrique (SGE'14) : EF-EPF-MGE, ENS Cachan, France, july 2014.

ACTN6 – A. Mahé, J.-C. Olivier, A. Houari, M. Machmoum, and J. Deniaud. *Dimensionnement des éléments passifs d ?un convertisseur cascadé en vue de l ?intégration d ?organes de stockage au réseau.* In Symposium de Genie Electrique, 2016.

Autres publications, rapports et communications

AP1 – L. Loron, S. Bourguet, J.-C. Olivier, Etude de faisabilité pour un nouveau concept de navire écologique, Rapport contrat de recherche Société STX Europe, septembre 2008-janvier 2009.

AP2 – L. Loron, S. Bourguet, J.-C. Olivier, Etude complémentaire pour un nouveau concept de navire écologique, Rapport Société STX Europe, septembre 2009–février 2010.

AP3 – State of the art for energy collect, storage and regeneration technology, BESST WP13 IV.2, Rapport confidentiel, 2009.

AP4 – Efficient and Flexible Energy Storage - Achievements and results after the first year of activity, BESST WP13 IV.2, Rapport confidentiel, 2010.

AP5 – Efficient and Flexible Enery Storage - Achievements and results after the second year of activity, BESST WP13 IV.2, Rapport confidentiel, 2010.

AP6 – S. Chevalier, J.-C. Olivier, C. Josset , D. Trichet, B. Auvity and M. Machmoum, Modélisation Physique 2D de PEMFC : vers un outil d'interprétation des mesures d'impédancemétrie, GDR PACS, Belfort, France, 11–14 juin 2012.

AP7 – J.-C. Olivier, G. Wasselynck, D. Trichet, B. Auvity, and C. Josset, Modélisation et optimisation d'un véhicule prototype alimenté par une PEMFC, GDR PACS, Nantes, France, 7–9 juin 2012.

AP8 – J.-C. Olivier, Piles à combustible - Integration au système et exploitation, Séminaire de formation SEFRA, Hammamet, Tunisie, 15–18 mars 2015.

AP9 – J.-C. Olivier, Emulation d'organes Electromécaniques et Electrochimiques - Conception et mise en œuvre, Journées thématiques du club EEA, Gennevilliers, , France, 14–15 mars 2017.

Activités de Recherche

II

Introduction

Ce mémoire est consacré à mes activités de recherche portant principalement sur les problématiques de conception des systèmes de conversion et de production d'énergie électrique. Ce travail s'articule concrètement autour de trois thèses, étalées de 2009 à aujourd'hui. Ces thèses sont celles de Sony Trieste (Trieste, 2013), Ahmed Bouabdallah (Bouabdallah, 2014) et Sadok Hmam (Hmam, 2016). Vient s'ajouter à ces trois piliers un certain nombre de travaux tels que ceux menés avec le laboratoire LTN [1] sur le développement d'un démonstrateur de véhicule urbain, ainsi que ceux de la thèse de Stéphane Chevalier (Chevalier, 2013) à laquelle j'ai eu l'opportunité d'apporter ma contribution et qui porte sur le diagnostic des piles à combustible.

Ces activités de recherche ont démarré en 2008 par une collaboration avec les chantiers navals STX (Saint-Nazaire), qui souhaitaient proposer une solution innovante de navire tout électrique, destiné à assurer un service de navettes (traversée de la rade de Lorient). La particularité de l'application visée était le profil d'usage très répétitif, avec des cycles continus d'aller-retour entre deux rives, d'une durée moyenne d'une demi-heure. Compte tenu du cycle d'utilisation de cette navette, deux scénarios bien distincts ont été imaginés. Le premier consistait à considérer un cycle journalier, embarquant toute l'énergie utile pour assurer l'ensemble des aller-retours de la journée. Le second proposait de n'embarquer que l'énergie utile pour un aller-retour, avec une recharge en 5 minutes entre deux cycles. Très rapidement, il est apparu que les technologies de stockage disponibles à l'époque permettaient de répondre d'un point de vue technique à ces deux scénarios. Le premier, avec une recharge par jour, pouvait être assuré par des sources d'*énergie* (batteries de type Li-ion ou acide-plomb, pile à combustible), tandis que le second pouvait être assuré par des systèmes à accumulation rapide, tels que les supercondensateurs ou les volants d'inertie. Il est ainsi apparu que le choix d'une technologie et de sa stratégie de recharge associée ne reposait pas uniquement sur des critères classiques énergétiques (efficacité, densité de puissance,...), mais qu'il devait tenir compte d'un grand nombre de données, à la fois techniques et économiques.

Au démarrage de la thèse de Sony Trieste, différentes pré-études montraient que pour ce cas particulier d'application, les supercondensateurs étaient la solution technique *a priori* la plus

1. Laboratoire Thermocinétique de Nantes.

interessante. Nous avions alors pour objectif de proposer une méthodologie de dimensionnement optimisé de l'architecture de conversion et de stockage de ce navire à supercondensateur. Pour cela, nous devions proposer un ensemble de modèles multi-physiques des différents organes présents dans la chaîne de conversion, couplés entre eux. Ce travail s'est donc principalement tourné vers la mise œuvre d'outils d'optimisation technico-économique, en vue de dimensionner au mieux l'ensemble des éléments d'une chaîne de stockage, comprenant les supercondensateurs, les inductances de filtrage et le convertisseur de puissance. Cette application a ainsi été le point de départ de l'ensemble des activités présentées dans ce mémoire, avec pour objectif de répondre plus généralement aux problématiques rencontrées dans la phase de dimensionnement des chaînes de production d'énergie.

Pour plus de clarté, la figure 1 illustre de façon schématique l'imbrication des travaux de recherche que nous avons menés sur ces problématiques, et que nous pouvons décomposer en 3 thématiques principales, à savoir la modélisation multi-physique des systèmes électriques, leur optimisation sur cycle déterministe ou stochastique, et enfin leur simulation en tenant compte de la forte disparité des échelles de temps. L'objectif de ce rapport est de présenter ces différents travaux en essayant autant que possible de faire apparaître leurs recouvrements.

Nous commencerons donc par un premier chapitre général présentant succinctement les applications que nous avons été amenés à considérer ainsi que les différentes problématiques scientifiques qui leurs sont associées. Ces trois applications sont un navire à supercondensateurs (*Ar Vag Tredan*), une installation de production multi-sources en site isolé et un véhicule urbain à pile à combustible (*Cityjoule*). La deuxième partie de ce chapitre est consacrée au positionnement

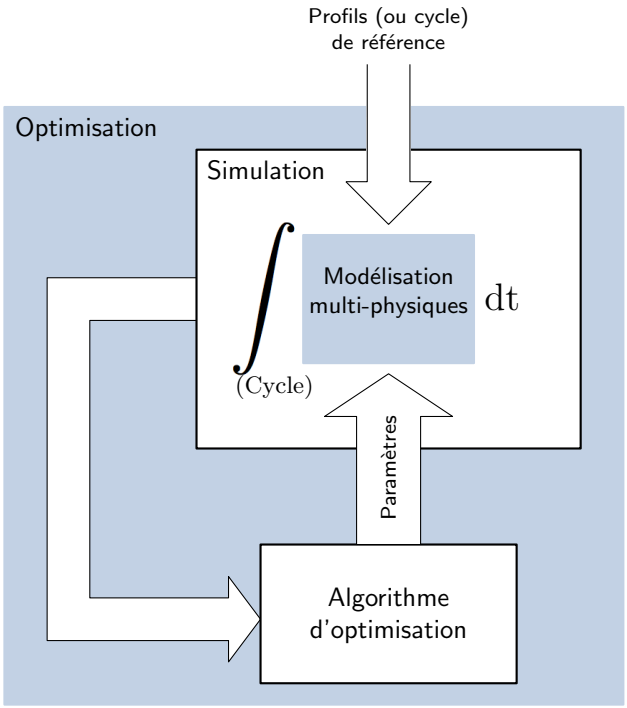


Figure. 1 – Illustration de la mise en œuvre d'un problème de dimensionnement optimisé.

de ces travaux. Elle s'appuyera sur un état de l'art au niveau national et relatif à la conception optimisée des systèmes électriques. Cela nous permettra de mettre en évidence les principaux verrous scientifiques encore existants dans ces thématiques.

Le second chapitre est dédié à la problématique de modélisation et d'optimisation des chaînes de production d'énergie. Nous commencerons par proposer un formalisme original de représentation des problèmes multi-physiques, qui peuvent alors être appréhendés de façon très générique et avec une démarche systématique [2]. Nous nous intéresserons ensuite à la problématique de dimensionnement technico-économique au travers de l'application du ferry tout électrique et d'un système de production multi-sources. Pour la première application, l'accent est mis sur la difficulté que représente la prise en compte simultanée de phénomènes ayant des dynamiques très éloignées. Ce problème est notamment lié ici à la très forte corrélation entre le cycle d'usage en tension des supercondensateurs, leur température, et la vitesse de dégradation de leurs paramètres électriques. Dans le cas de l'application de production d'énergie multi-sources, le principal verrou porte sur la très forte variabilité de l'environnement de ce système. En effet, dans le cas de l'application du ferry tout électrique, nous avions un cycle d'usage relativement bien établi et sur lequel il était possible de s'appuyer pour le dimensionnement de la chaîne de conversion. Or, cette hypothèse ne tient plus pour un système de production d'énergie électrique utilisant des énergies renouvelables. Les profils d'usage ainsi que ceux de la ressource naturelle vont en effet cette fois présenter un comportement stochastique. C'est pourquoi nous proposons d'intégrer la notion de robustesse au cœur de la problématique de dimensionnement optimisé, en cherchant notamment à tenir compte de cette nature stochastique de la ressource solaire. Nous montrerons alors que le résultat d'un dimensionnement ne sera plus analysé en réponse à un ensemble de critères unique et déterministe, mais à une probabilité de réponse à ces critères.

Nous finirons ce deuxième chapitre en présentant les différents travaux menés sur le développement du véhicule urbain *Cityjoule*, né de la collaboration entre le lycée de la Joliverie, de l'école d'ingénieurs Polytech'Nantes (départements *Thermique-Energétique* et *Génie Electrique*). Nous nous concentrerons ici sur les activités de modélisation et d'optimisation multi-physique ayant été menées sur ce véhicule, dont l'objectif unique est de minimiser la consommation globale d'énergie. Nous montrerons que sur une telle application, la difficulté réside dans la très grande dispersion des pertes au sein de la chaîne de conversion. Pour aboutir à un modèle qui soit suffisamment fidèle, nous avons ainsi été amené à tenir compte de l'ensemble des composants du véhicule, sur la base d'une modélisation multi-physique. Il se trouve également que dans le cadre de cette application, la recherche de performances extrêmes nous amène à considérer un mode de fonctionnement de la pile à combustible assez particulier, à savoir un fonctionnement à de faibles densités de courant (dans la zone d'activation), en anode bouchée sans purge (stœchiométrie unitaire côté hydrogène) et sans aucun conditionnement des gaz. Si ce mode de fonctionnement permet d'atteindre de hauts rendements de conversion, il reste particulièrement instable avec un risque élevé de noyade sur les durées d'utilisation considérées (de l'ordre d'une heure). Nous présenterons donc nos travaux portant sur le diagnostic des

2. Cette approche qui s'appuie sur une décomposition temporelle des domaines modélisés sera d'ailleurs étendue au chapitre 3.

systèmes pile à combustible, réalisés en partenariat avec nos collègues du Laboratoire Thermocinétique de Nantes. L'originalité de ce travail est l'application de la méthode de spectroscopie d'impédance à l'échelle d'un *stack* complet et l'utilisation d'une modélisation multi-physique pour l'identification de modes dégradés.

Le troisième et dernier chapitre porte sur la problématique générale de simulation des systèmes de production d'énergie électrique, en vue notamment d'optimiser leur dimensionnement. En effet, ces derniers sont généralement composés de divers organes de production, de stockage et de conversion, interconnectés entre eux, et ayant des caractéristiques physiques pouvant être très différentes. Pour que la résolution (c'est-à-dire la simulation) du problème direct soit compatible avec un objectif d'optimisation, il faut que son calcul soit suffisamment rapide. Il est donc nécessaire de simplifier la nature du problème initial, en négligeant ou en découplant un certain nombre de phénomènes entre eux. Il est par exemple assez courant dans des objectifs de dimensionnement de chaînes énergétiques, de considérer les dynamiques électriques comme étant instantanées, pour ne s'intéresser qu'aux variations moyennes et à leur influence sur les autres échelles de temps plus lentes. Il est ensuite possible de considérer les dynamiques plus lentes en régime établi, pour se concentrer sur la simulation des transitoires électriques rapides, qui ont été précédemment négligés. L'avantage de cette approche est que chaque échelle de temps peut être simulée sur un horizon adéquat et compatible avec le phénomène considéré. En revanche, elle impose un travail préliminaire d'analyse et de simplification du modèle initial, et nécessite de pouvoir découpler les phénomènes physiques entre eux, ce qui n'est pas toujours possible. Il nous a ainsi semblé intéressant de rechercher des solutions permettant de pallier à ces problématiques. Le travail développé dans ce chapitre 3 vise donc à proposer une méthodologie générique de modélisation et de simulation de ce type de système. Son originalité est de s'appuyer sur une représentation sous forme d'emboitement de cycles d'usage à différentes échelles de temps. Ce formalisme permet alors de recourir à des algorithmes d'extrapolation afin de s'affranchir d'un calcul exhaustif du cycle complet. Nous appliquerons alors cette méthode au navire *Ar Vag Tredan* utilisé dans le thèse de Sony Trieste, qui nécessite de prendre en compte le cycle d'usage électrique (échelle de temps de la seconde) sur une durée d'exploitation de 20 ans, soit environ 9 ordres de grandeur. Afin de montrer la nature générique du travail proposé, nous ajouterons à ce problème le convertisseur de puissance et son pilotage, nous amenant ainsi à simuler un problème ayant des écarts de dynamiques de plus de 13 ordres de grandeurs.

1 Applications considérées et positionnement des travaux

1.1 Introduction

Les chaînes de conversion d'énergie électrique deviennent de plus en plus complexes, de nature multi-physique, et nécessitent donc une expertise élevée dans la phase de modélisation et d'assemblage des différents sous-ensembles. De plus, dans une démarche d'optimisation du dimensionnement de tels systèmes, les critères de choix d'une solution technique ont connu une certaine évolution ces dernières années, et doivent aujourd'hui, pour être pertinents, intégrer des notions aussi complexes que le coût, le retour sur investissement, la fiabilité, ou encore le cycle de vie des composants. Enfin, ce même objectif d'optimisation impose d'avoir des modèles ayant un niveau de finesse limité pour assurer des temps de simulation raisonnables. C'est finalement dans ce contexte général que s'inscrit notre travail. Ce chapitre est une introduction aux différentes applications auxquelles nous nous sommes intéressés, depuis nos premiers travaux jusqu'à aujourd'hui. Nous présenterons ainsi un navire tout électrique à supercondensateurs, dont la chaîne de stockage a été modélisée et optimisée sur des critères technico-économiques.

Le deuxième cas d'étude présenté est un système de production d'énergie électrique multi-sources, dédié à l'alimentation d'un habitat isolé. Les problématiques traitées sont l'optimisation du dimensionnement sur les mêmes critères technico-économiques que pour l'application précédente, mais en tenant compte en plus d'une contrainte forte sur la nature stochastique de l'environnement, et en particulier pour la production photovoltaïque.

Enfin, la dernière application présentée est un véhicule urbain léger à très faible consommation énergétique, qui est développé dans le cadre d'une association d'élèves ingénieurs. Nous avons pu y développer un certain nombre de travaux portant sur l'optimisation énergétique de la chaîne de propulsion et sur le développement d'un outil de diagnostic par spectroscopie d'impédance.

Cette brève présentation est suivie d'un état de l'art visant à positionner au niveau national les problématiques scientifiques que nous avons abordées. Nous avons choisi de découper cet état de l'art afin de traiter d'un côté les travaux de modélisation et de simulation des systèmes multi-physiques, et de l'autre les travaux autour de l'optimisation de la conception de ces systèmes.

1.2 Applications considérées

1.2.1 Navire à supercondensateurs *Ar Vag Tredan*

La première application présentée dans ce chapitre est aussi celle avec laquelle nous avons démarré nos activités de modélisation et d'optimisation de systèmes. Elle concerne un ferry de type catamaran, dédié au transport de passagers et fabriqué par le chantier naval STX. Ce navire, baptisé *Ar Vag Tredan*, a pour mission d'assurer la traversée régulière de la rade de Lorient (Morbihan, Bretagne), à raison de 28 à 35 rotations quotidiennes d'une demi-heure (voir Figure 1.1).

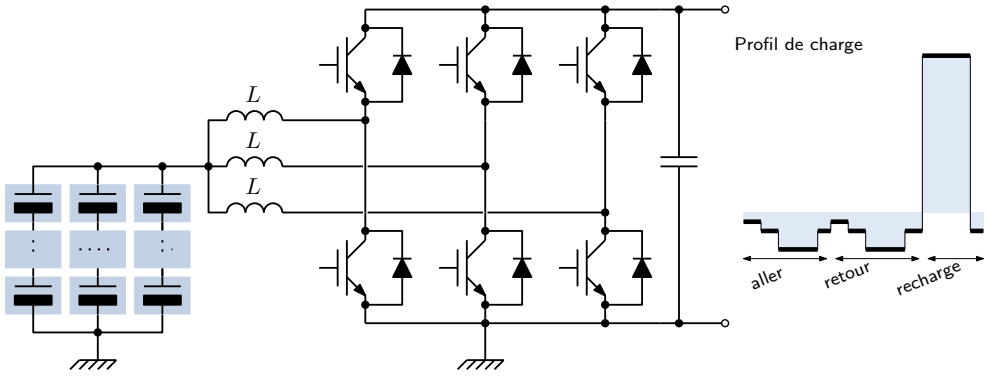


Figure. 1.1 – Illustration de la chaîne de conversion et de stockage à supercondensateurs du navire *Ar Vag Tredan*.

La première problématique à s'être posée pour cette application concerne le choix de la source d'énergie et de l'architecture de la chaîne de conversion. En effet, lors des premiers développements de ce navire (2008), plusieurs technologies concurrentes permettaient de répondre au cahier des charges techniques, que ce soit en terme de densité d'énergie, de puissance et d'encombrement. De même, compte tenu du cycle court de cette navette, deux stratégies pouvaient être envisagées, à savoir une recharge de plusieurs heures par jour en embarquant l'énergie nécessaire pour l'ensemble des traversées, ou une recharge rapide par trajet. Visualisée sur un diagramme de Ragone (voir Figure 1.4), la contrainte du temps de recharge est donnée par

une droite dont la pente est égale au temps caractéristique considéré. Une technologie située sous cette droite peut être interprétée comme étant surdimensionnée en énergie et sous dimensionnée en puissance. Il faudra alors surdimensionner le système de stockage pour atteindre la contrainte en puissance. Inversement, une technologie située au-dessus de la droite répondra naturellement aux besoins en puissance et le dimensionnement se fera uniquement sur le besoin énergétique. La prise en compte d'une contrainte supplémentaire d'encombrement ou de poids implique l'ajout de deux droites, l'une verticale et indiquant la densité d'énergie minimale, l'autre horizontale et fournissant la densité puissance minimale. Ainsi, la stratégie consistant à

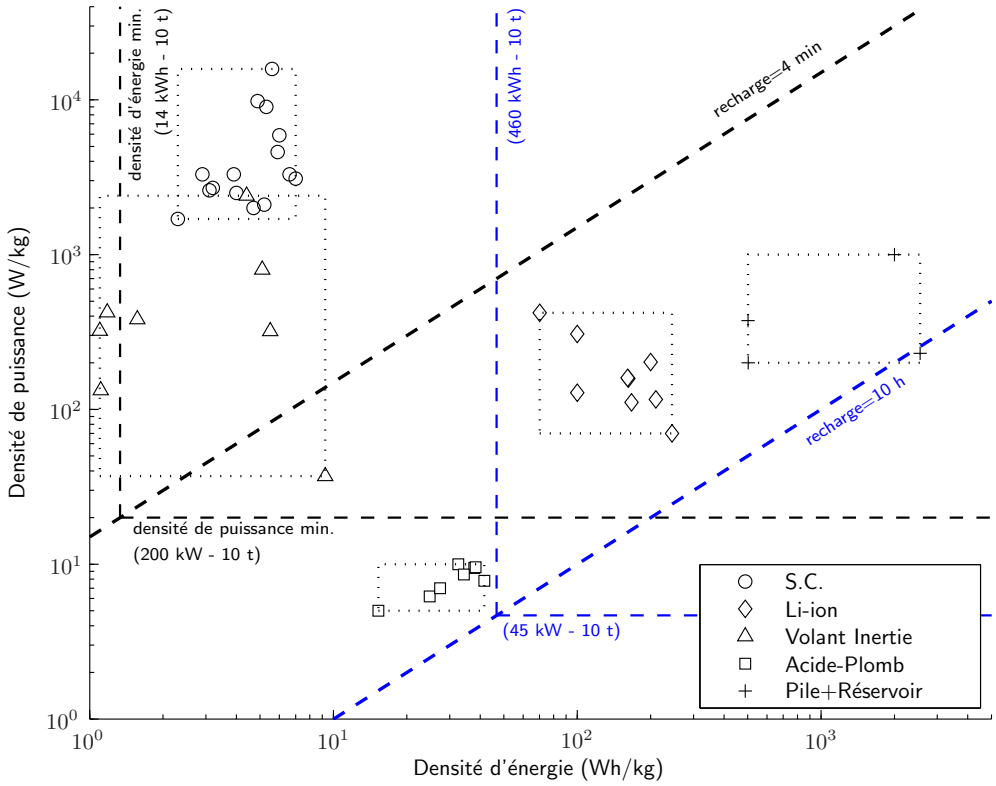


Figure. 1.2 – Diagramme de Ragone de différents systèmes de stockage et de production d'énergie électrique, en tenant compte des limites en recharge des technologies électrochimiques.

effectuer une recharge par jour peut être assurée par des batteries de forte densité d'énergie telles que les Li-ion, ou par une pile à combustible associée à un système de stockage haute pression. Cette dernière solution est la plus intéressante techniquement, du fait de la forte densité d'énergie de l'hydrogène et du faible temps de recharge du réservoir. Par contre, le coût élevé et la durée de vie limitée de cette solution fait des batteries électrochimiques la meilleure solution technique pour cette stratégie de recharge. Dans le cadre d'une stratégie avec une recharge par rotation et en tenant compte de l'ensemble des contraintes techniques de puissance, d'énergie et de poids, les deux technologies envisageables sont le stockage mécanique par volant d'inertie et le stockage électrostatique par supercondensateur. Ces deux technologies sont assez similaires d'un point de vue technique, puisqu'elles permettent d'atteindre les mêmes gammes de densité d'énergie et de puissance (avec des degrés de libertés supplémentaires pour le volant d'inertie)

et présentent des durées de vies équivalentes, compatibles avec la durée d'exploitation du navire qui est estimée à une vingtaine d'années. Dans (Olivier et al., 2014), le dimensionnement d'un système de stockage à volant d'inertie a été proposé pour cette application. Cette étude a ainsi montré la pertinence technique de cette technologie à savoir un encombrement et un poids plus faible, pour un rendement équivalent. Néanmoins, le stockage inertiel est une solution encore trop peu développée et structurellement complexe. La combinaison de ces différents éléments aboutit à un système très coûteux et dont la maturité n'est pas suffisante.

En synthèse [1], nous avons eu à arbitrer sur un choix entre deux solutions techniquement et économiquement viables, à savoir une stratégie de recharge journalière avec un stockage électrochimique de type Li-ion, et une stratégie de recharge par trajet, avec un stockage à supercondensateurs. Une analyse assez rapide de ces deux scénarios montre une différence significative quant à leur coût total annualisé. En effet, la durée de vie des supercondensateurs, sous certaines précautions d'usage, est telle qu'il peut être facilement envisagé de n'effectuer aucun remplacement de ces derniers sur toute la durée d'exploitation du navire. Au contraire, les batteries Li-ion ont une durée de vie limitée, qui est estimée pour cette application entre 5 et 7 ans. Cela implique de remplacer au moins deux fois la totalité du système de stockage. C'est finalement ce remplacement qui fait que la solution batterie est beaucoup plus coûteuse que la solution à supercondensateurs, en dépit de la moindre maturité technologique et du plus faible déploiement de cette dernière.

Notre travail, mené dans le cadre d'une collaboration avec le chantier naval STX, visait donc à proposer un outil de dimensionnement de la chaîne de conversion et de son système de stockage associé, en tenant compte des différentes contraintes techniques de l'application. L'objectif est alors de minimiser le coût de ce navire, en tenant compte des coûts cumulés d'acquisition, d'exploitation et de maintenance. Pour atteindre cet objectif, un certain nombre d'étapes ont été nécessaires. La première a consisté à faire un inventaire de l'ensemble des composants et sous systèmes à modéliser, ainsi que les différents domaines physiques qui leurs sont associés. L'étape suivante a été de mettre en œuvre ces modèles. Grâce à une littérature abondante et à une certaine maturité de la plupart des organes constituant la chaîne de conversion, une partie de cette tâche a pu être menée assez facilement et a essentiellement consisté en un travail de bibliographie et de synthèse. En revanche, la mise œuvre des modèles des supercondensateurs a nécessité un travail plus conséquent. Ces derniers constituent en effet à eux seuls près de 20 % du coût d'acquisition du navire [2]. De plus, la durée de vie de ces organes étant une donnée cruciale dans la phase d'optimisation, cette dernière doit pouvoir être estimée avec exactitude. Or, le vieillissement des supercondensateurs est très fortement corrélé à leur usage, et plus particulièrement à leur historique d'exposition en tension et température. Une modélisation multi-physique assez fine a donc dû être élaborée, avec la difficulté de devoir tenir compte d'échelles de temps très différentes, qui sont de l'ordre de la seconde pour le domaine électrique, de l'heure pour la thermique, et de plusieurs années pour le vieillissement. De plus, notre objectif

1. En introduction de (Trieste et al., 2015), une rapide analyse des stratégies de recharge et des technologies potentielles est présentée.

2. Le coût total de ce navire est de 3.2 M€ avec un coût estimé de 600 k€ pour les supercondensateurs, voir (Torregrossa, 2013) pour plus de détails.

principal étant l'optimisation du dimensionnement, le temps de simulation du problème *direct* doit être ramené à une valeur raisonnable. Un travail conséquent a ainsi été mené dans le but de rechercher pour les modèles les plus importants le bon équilibre entre complexité et fidélité.

En conclusion, cette application très innovante de par son architecture, son cycle d'usage et la technologie de stockage retenue, nous a amené à lever un certain nombre de verrous concernant la mise en œuvre et l'intégration de modèles multi-physiques et technico-économiques pour les différents sous-systèmes de la chaîne de propulsion de ce navire. C'est donc naturellement que nous nous appuierons sur cette application lors de la synthèse de nos travaux autour de la modélisation et de l'optimisation des chaînes de conversion d'énergie.

1.2.2 Système multi-sources de production d'énergie électrique

Cette section présente un système de production d'énergie multi-sources pour un habitat isolé qui nous a servi de support dans nos travaux de dimensionnement optimisé. Cette application a été en partie retenue car elle a la particularité d'être complémentaire de celle du navire présenté précédemment. Si les objectifs sont en eux-même plutôt similaires, les problématiques et degrés de libertés sont quant à eux différents. En effet, dans un système de production d'énergie tel que celui étudié, la ressource naturelle exploitée n'est généralement pas suffisante pour assurer le besoin énergique de la charge. Il est donc nécessaire de recourir à une hybridation du système de production d'énergie renouvelable, en y adjoignant des organes de stockage ou des auxiliaires de puissance. Nos études se sont alors portées sur un système relativement classique, composé de panneaux photovoltaïques pour la source principale, de batteries électrochimiques comme éléments de stockage et une pile à combustible utilisée en source auxiliaire, d'utilisation rationnée et permettant d'assurer *au mieux* la continuité de service de l'installation en cas de déficit énergétique (voir Figure 1.3). Ainsi, une différence majeure avec une application de transport telle que celle du navire à supercondensateurs est que, pour cette dernière, la garantie d'effectuer la mission dans sa totalité est une contrainte ferme. Inversement, une application de production d'énergie, notamment en site isolé, peut intégrer en amont une certaine latitude quant à la garantie de répondre à l'ensemble des solicitations de la charge. Une autre différence réside dans les degrés de liberté offerts par l'hybridation des sources et le système de stockage. En effet, pour éclaircir ces propos, il est possible de considérer un tel problème sous l'angle des flux de puissance, dont l'objectif est d'assurer au mieux l'équilibre entre la production, le stockage et la demande. Dans le cas d'une installation composée uniquement d'une source d'énergie renouvelable et d'un système de stockage, il n'existe pas de degré de liberté sur la stratégie de gestion, puisque l'unique solution pouvant être qualifiée d'optimale consiste à maximiser l'énergie fournie par la source et à stocker tout l'excédant d'énergie [3], qui sera par la suite utilisé dans les phases de sous-production de la source. En revanche, l'ajout d'un organe de stockage complémentaire ou d'un système de production auxiliaire permet d'avoir une infinité de solutions pour aboutir à un équilibre des puissances. C'est alors par le choix judicieux d'une

3. Une contrainte peut être appliquée sur la puissance maximale, fournie ou absorbée sur l'organe de stockage, permettant ainsi de tenir compte des caractéristiques énergétiques de la technologie utilisée.

stratégie de gestion de l'énergie qu'il est possible d'améliorer les performances du système, sur des critères d'optimisation qui peuvent être très variés.

Les problématiques abordées dans ce travail concernent principalement le dimensionnement de l'installation et sa robustesse vis-à-vis des variations stochastiques de l'environnement. Dans le cadre d'une production photovoltaïque, l'environnement se rapporte à la fois à l'ensoleillement et à la température, mais également au consommateur dont le comportement n'est pas déterministe. Concernant la ressource solaire, c'est en grande partie la couverture nuageuse

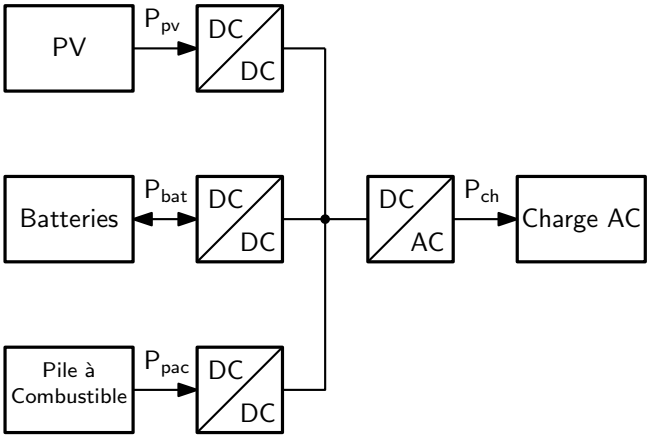


Figure. 1.3 – Architecture du système multi-sources étudié et appliqué à la production d'énergie électrique pour un habitat isolé.

qui est responsable des fluctuations aléatoires du rayonnement reçu. Or, dans une démarche classique d'optimisation du dimensionnement d'une installation, cette dernière est simulée pour une séquence d'ensoleillement et un profil de charge donnés, sur un horizon compris entre une et plusieurs années. Un algorithme d'optimisation va alors, par un jeu de sélections et d'évolutions successives, converger vers la ou les solutions de dimensionnement optimales. Or, il est évident qu'en se basant uniquement sur quelques années simulées, les résultats obtenus sont biaisés et qu'ils ne peuvent être garantis en dehors des profils utilisés comme référence. Il est bien sûr évident que l'idéal serait de pouvoir simuler chaque dimensionnement sur un très grand nombre d'années, dans l'absolu supérieur à la durée de vie de l'installation, afin de s'assurer de la justesse et de la fiabilité des solutions obtenues. Or ces données ne sont pas forcément disponibles pour le site étudié, et une telle approche nécessiterait des moyens de calculs particulièrement conséquents. Comme l'a très bien résumé P. Dessante (Dessante, 2012), *"Optimiser c'est se placer en limite de fiabilité"*. Cette dernière observation, associée aux très grandes fluctuations environnementales de ce type d'application, montre clairement la limite de telles approches de dimensionnement. Il est alors tentant de recourir à des méthodes conduisant à un surdimensionnement volontaire de l'installation, afin de s'assurer au moins en partie de sa robustesse.

Notre contribution sur ces problématiques a été de proposer une méthodologie générique de dimensionnement de telles installations, permettant de répondre à la fois au problème de la disponibilité des données et de l'analyse de robustesse d'un dimensionnement. Quelques

pistes ont également été dégagées en vue d'intégrer dans cette méthodologie une phase de définition d'un profil d'ensoleillement de référence, permettant d'aboutir naturellement à des dimensionnements fiables et robustes. Nous nous sommes également intéressés, mais dans une moindre mesure, à la gestion de l'énergie permettant d'assurer l'équilibre instantané des puissances. Plus précisément, cette gestion visait à définir la stratégie d'utilisation de la pile à combustible au sein du système multi-sources. En effet, bien que les mécanismes de vieillissement d'une pile à combustible soient très nombreux et encore peu maîtrisés, des préconisations d'usage existent. Le principe est alors de proposer une stratégie de gestion qui respecte ces préconisations, permettant ainsi d'assurer un fonctionnement nominal pour ce système.

1.2.3 Véhicule Urbain à pile à combustible *Cityjoule*

Depuis 1984, La Joliverie développe des véhicules prototypes à très faible consommation. Ils sont destinés à participer à des courses énergétiques, dont la plus célèbre est l'Eco-Marathon Shell. Le principe de ces compétitions est de parcourir une certaine distance, généralement comprise entre 20 et 30 km, en ayant consommé le moins d'énergie possible. La performance est alors calculée sur la base de la distance qui aurait été parcouru avec l'équivalent énergétique d'un litre d'essence [4]. La dernière génération de prototypes développés par La Joliverie, appelée

Figure. 1.4 – Véhicule *Cityjoule* lors de l'Eco-Marathon Shell à Londres en 2016.

Microjoule, est propulsée par un moteur à combustion interne. Il est, depuis 1992, le véhicule dans la catégorie essence le plus économe en énergie du monde, avec comme meilleur résultat 3771 km/l. Mais les marges de progression sur cette voiture étaient devenues si faibles que seule une rupture de technologie était à même d'améliorer ses performances. C'est en 2003

4. Cette notion d'équivalence vient du fait que de nombreuses technologies de véhicules ayant des sources d'énergie très différentes doivent être comparées. Le principe est donc de ramener toutes les performances à 1 litre d'essence sans plomb 95, qui est une référence facilement interprétable et compréhensible par le grand public.

que sont apparues à l'eco-marathon Shell les premières voitures à pile à combustible, qui ont intrinsèquement des rendements de conversion plus élevés. Ainsi, dès 2005, l'équipe de l'ETH Zurich réalise une performance équivalente de 3836 km/l_{SP95}. C'est dans ce contexte que s'est opéré dès 2005 le rapprochement entre le lycée de La Joliverie et l'école Polytech'Nantes, afin d'associer les compétences de ces deux établissements pour développer en quelques années un véhicule à pile à combustible à très faible consommation énergétique.

L'aventure *Polyjoule* a démarré. Le lycée de La Joliverie, fort de son expérience dans ce type de projet, s'occupe de la partie mécanique et de l'intégration de la nouvelle chaîne de conversion, en tenant compte de l'ensemble des contraintes réglementaires inhérentes à la technologie hydrogène. De leur côté, les étudiants de l'école d'ingénieur Polytech'Nantes se chargent de la conception de la chaîne de puissance, avec le département *Génie Electrique* pour la partie électronique de puissance et informatique, et le département *Thermique Energétique* pour le système pile à combustible. L'équipe *Polyjoule* est structurée autour d'une association d'étudiants de Polytech'Nantes et de La Joliverie. Une équipe enseignante dont je fais partie s'est alors formée pour donner les grandes orientations techniques et encadrer les projets d'ingénieurs et les stages de MASTER en lien avec le projet. C'est ainsi que dès 2009, une solution de chaîne de propulsion entièrement réalisée par l'équipe est intégrée dans le véhicule. Sa structure, qui a très peu évoluée depuis, est composée d'un moteur à courant continu, d'un convertisseur abaisseur et d'un système pile, lui même constitué de 28 cellules (développées par la société MES), d'un compresseur pour l'alimentation en air et d'un ventilateur de refroidissement (voir Figure 1.5). L'ensemble des ces organes est supervisé par un calculateur central, qui assure également les fonctions de protection et de sécurité. Depuis 2010, le véhicule *Polyjoule* a toujours fini premier de sa catégorie avec un record de 5136 km/l_{SP95} en 2011.

Bien qu'une grande part de la réalisation de cette chaîne de conversion soit le fruit du travail des étudiants de l'association, sa conception et son optimisation a été réalisée principalement par l'équipe enseignante dans le cadre de stages de MASTER 2 Recherche. L'idée plus générale est en fait d'utiliser ce véhicule comme support à des développements et études autour des

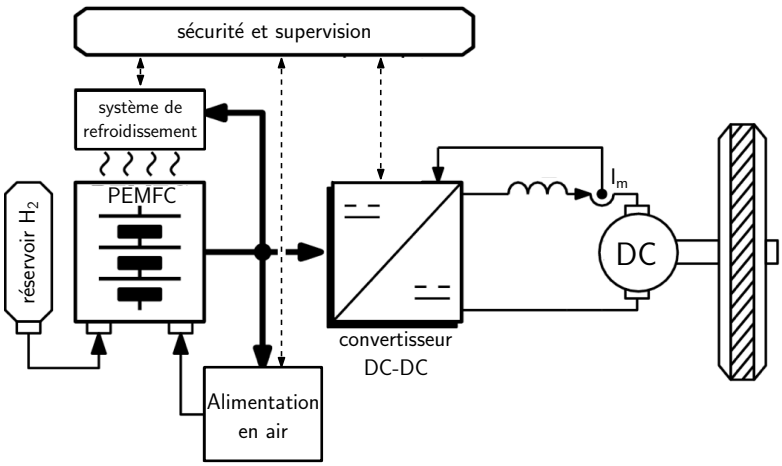


Figure. 1.5 – Structure de la chaîne de conversion du véhicule polyjoule.

problématiques de mobilité, avec pour critère la performance énergétique. C'est dans ce cadre qu'un deuxième véhicule a vu le jour en 2013, nommé *Cityjoule*, et qui entre dans la catégorie des *Urban-Concept*. Cette dernière vise à proposer des petits véhicules urbains plus proches de ceux pouvant être proposés dans le cadre d'un usage en conditions réelles. Les nouvelles dimensions de ce véhicule et son cycle de conduite se rapprochant d'un cycle urbain avec plusieurs démarrages et arrêts, permet d'imaginer des chaînes de conversions plus complexes, pouvant intégrer par exemple un système de stockage pour la récupération d'énergie au freinage ou encore de recourir à des hybridations entre plusieurs sources. Aujourd'hui, le véhicule *Cityjoule* fonctionne avec trois architectures différentes, à savoir une version pile à combustible pouvant être hybridée avec des supercondensateurs, une version batteries et enfin une version avec panneaux photovoltaïques couplés à des batteries tampon. Bien que ces trois architectures présentent des intérêts scientifiques réels et complémentaires, nous nous sommes plus particulièrement intéressés à la chaîne hydrogène. En effet, l'utilisation en régime instationnaire de ce système associé à une démarche d'optimisation des performances nous a conduit à travailler avec un mode de fonctionnement assez peu classique pour une pile à combustible. En premier lieu, la pile est configurée en *anode bouchée*, ce qui permet de fonctionner avec une stoechiométrie unitaire en hydrogène et donc de minimiser la consommation. Or, ce type d'usage s'accompagne généralement de purges régulières, nécessaires pour évacuer l'eau qui se serait accumulé à l'anode. Du fait de leur trop fort impact sur la consommation moyenne d'hydrogène, ces purges ont été supprimées de notre système. La pile doit ainsi fonctionner en mode bouché tout au long de la course qui peut durer entre 35 et 50 minutes (selon la course et le circuit). En second lieu, pour atteindre des performances élevées, la pile à combustible est utilisée dans sa zone d'activation, qui correspond aux plus faibles densités de courant et qui présente les meilleurs rendements de conversion électrochimique. Or, le fonctionnement d'une pile dans cette zone est particulièrement difficile à stabiliser et à maîtriser. De plus, elle nécessite de faire fonctionner ses accessoires d'alimentation en air et de refroidissement sur des points de fonctionnement qui ne sont pas optimaux. Enfin, plusieurs études que nous avons menées dans le cadre de projets ingénieurs ou de stages de MASTER ont montré que l'intégration d'un système de stockage pour la récupération d'énergie au freinage était difficilement viable, compte tenu des trop faibles masses et vitesses du véhicule. C'est pourquoi nous avons proposé dans un premier temps une chaîne de conversion sans élément de stockage et donc avec un couplage direct entre le besoin mécanique du véhicule et la puissance fournie par la pile. Or, un tel fonctionnement en régime instationnaire pose encore une fois des problématiques de performance et de fiabilité. De plus, le profil d'usage du véhicule étant directement corrélé à celui de la pile à combustible, il a été nécessaire de modéliser finement toute la chaîne de conversion, et une optimisation globale a dû être menée pour nous aider à définir les meilleures stratégies de pilotage. Cette application nous a donc amené à proposer une modélisation multi-physique du système complet et son optimisation sur cycle, tant pour sa conception que pour son pilotage.

Cette application qui à première vue peut sembler très spécifique et difficilement transposable, trouve en réalité de nombreux points communs avec toute une gamme de systèmes dont la problématique principale est l'efficacité énergétique. Sans être exhaustif, nous pouvons par exemple citer les applications de mobilité légère urbaine, les systèmes embarqués de surveillance

mobile, les drones, etc. Il était donc naturel de chercher à développer des outils couvrants un spectre plus large que cette application de véhicule urbain, en vue d'une part d'aider à la conception de systèmes pile plus performants, et d'autre part à mieux maîtriser leurs conditions opératoires malgré un nombre réduit d'accessoires. Toutes ces considérations nous on poussé à proposer des travaux originaux autour du diagnostic par impédancemétrie à l'échelle du *stack* en se basant sur une représentation multi-physique du modèle direct, utilisée pour la détection de conditions opératoires critiques. Plus particulièrement, nous avons proposé une procédure de détection d'engorgement en eau des canaux, grâce à une mesure indirecte de la stœchiométrie locale en air. Cette mesure s'appuie sur la prise en compte de la variation de concentration de réactif le long des canaux, qui permet de remonter à une signature spectrale caractéristique.

1.3 Etat de l'art et Positionnement

Nous avons essayé de montrer au travers de ces trois applications les principales problématiques sur lesquelles nous nous sommes penchés. Il en ressort qu'une part importante de notre travail vise la conception des systèmes, dont la complexité est surtout liée à la nature mutli-physique et multi-échelles de temps des phénomènes modélisés. S'ajoute à cela la recherche de critères de dimensionnement composites, s'appuyant sur des données aussi diverses que le coût, la durée de vie ou la fiabilité. Il s'avère que nos travaux portant sur le diagnostic des piles à combustible peut être ramené au moins en partie à un problème de modélisation multi-physique et d'optimisation, du fait d'une part de la prise en compte de domaines physiques couplés (électrochimique, thermique, fluidique) et d'autre part de la nécessité de remonter à un jeu de paramètres unique et identifié par inversion de modèle.

Nous avons donc essayé de faire un état des lieux synthétique des recherches menées au niveau national autour de ces différentes thématiques. Nous proposons de présenter dans un premier temps quelques travaux portant sur les méthodes et outils de modélisation et de simulation des systèmes multi-physiques, dans un objectif de réduction du temps de calcul. S'en suivra un état de l'art des méthodes d'optimisation du dimensionnement de ces systèmes, qui nous permettra d'apprécier les différentes approches utilisées, qu'elles soient mono-objectif ou multi-objectifs, ainsi que les objectifs d'optimisation retenus, qui le plus souvent seront à la fois techniques et économiques.

1.3.1 Outils de modélisation et de simulation multi-physique

La modélisation des systèmes énergétiques est un vaste sujet qu'il est difficile d'aborder dans son ensemble. Il doit en effet tenir compte de l'objectif visé, de la complexité du système à représenter, de la nature des phénomènes en jeu et enfin, pour être plus pragmatique, du niveau de connaissance que l'on a des dispositifs que l'on souhaite représenter ou encore des capacités de calcul disponibles.

Les travaux actuels des différents laboratoires de recherche en génie électrique portant sur la conception de chaînes de conversion sont nombreux. Ces études s'intéressent généralement aux

organes électromécaniques de conversion d'énergie, aux interfaces d'électronique de puissance et aux éventuels organes de production et de stockage. Les objectifs de dimensionnement visent alors à optimiser les aspects techniques d'une solution, comme le volume, la masse ou l'efficacité, et de plus en plus souvent en tenant compte d'aspects économiques, tels que les coûts d'acquisition ou d'exploitation (Dessante, 2012; Aubry, 2011; Robert et al., 2015).

Pour ces systèmes, les enjeux scientifiques sont multiples. Vu sous l'angle *multi-physique*, la difficulté réside dans la gestion des couplages entre domaines, et donc souvent entre différentes représentations et différents niveaux de granularité. Les travaux se rapportant à cette problématique visent à proposer des outils de représentation de multiples domaines physiques dans un formalisme unique. L'idée générale est alors de se focaliser sur les échanges énergétiques entre domaines, permettant ainsi de faciliter la structuration d'un modèle global. Un certain nombre de solutions opérationnelles existent. Par exemple, la représentation par *graphe* permet de répondre en grande partie à ces difficultés de couplage puisqu'elle permet d'appréhender qualitativement les relations de causalité entre sous-modèles. Elle est ainsi particulièrement bien adaptée à l'étude de systèmes interdisciplinaires (Bouscayrol, 2003; Boulon, 2009; Bressel et al., 2015). La problématique de modélisation multi-physique trouve également des réponses dans la co-simulation. Par exemple, la plupart des plateformes de simulation permettent aujourd'hui de faire co-exister différents environnements logiciels complémentaires et spécialisés. Ces outils permettent ainsi d'échanger aisément les données de couplages entre modèles, ces derniers pouvant alors être de natures différentes (modèle d'état, nodal, éléments finis, ...). Vu sous l'angle *multi-échelles de temps*, donc de la simulation temporelle, la principale contrainte réside dans le temps de simulation du système global qui peut être très élevé, et donc particulièrement critique dans un objectif d'optimisation. Cette fois l'enjeu est d'une part de chercher des outils de simulation adaptés à ces systèmes dit *raides*, i.e. présentant un couplage fort entre variables d'état ayant des dynamiques très éloignées les unes des autres, et d'autre part de chercher à réduire la complexité du système complet afin d'en faciliter le calcul. Dans ce domaine les solutions existantes sont nombreuses, mais leur choix reste souvent empirique et très sensible à la nature des domaines traités et des objectifs. Néanmoins, il est possible de regrouper en deux catégorie les approches existantes. La première regroupe les méthodes et outils tenant compte du système dans son ensemble, sans chercher *a priori* à découpler les dynamiques et les domaines physiques entre eux. L'enjeu est alors de proposer des outils de simulation, aussi appelés solveurs, adaptés à ces problèmes *raides* en étant capable d'assurer des tolérances de calcul assez faibles sans recourir à des pas d'intégration trop petits (et donc des temps de calcul prohibitifs). Ces solveurs peuvent être combinés à des outils de simulation multi-méthodes, dans lesquelles le système est partitionné en sous-modèles, dans le but d'associer à chacun une méthode et un pas d'intégration adéquats. C'est cette approche qui est par exemple intégrée dans des plateformes de simulation multi-physiques telles que Modelica ou Matlab/Simscape (Chouikh, 2012).

La seconde catégorie de méthodes pouvant être employées pour réduire les temps de calcul consiste à intervenir directement sur la modélisation du système. Il est par exemple possible de recourir à des méthodes de réduction de modèle, en particulier pour les représentations temporelles et spatiales utilisant des solveurs de type éléments finis (Hammadi, 2012; Pierquin, 2014;

Da Silva, 2015). Transposées à un système d'équations différentielles ordinaires, ces méthodes visent à conserver uniquement les *états* dominants du système. On peut par exemple supprimer les dynamiques les plus rapides, ayant peu d'influence sur l'évolution des variables les plus lentes. Il existe également des approches de réécriture de modèle *au sens des valeurs moyennes*. Cette méthode est très bien adaptée aux systèmes à structure variable tels que les convertisseurs de puissance. L'idée est de conserver en partie la dynamique de réponse d'un système, mais en moyennant l'ensemble des variables d'état à l'échelle d'un cycle complet de fonctionnement (Middlebrook and Cuk, 1976; Merdassi, 2009; Robert, 2015). En somme, la modélisation est une phase importante et délicate du travail menant à un problème d'optimisation et il nécessite souvent une grande expertise de la part du développeur. Car même si, comme nous avons pu le voir, de nombreux outils d'aide à l'organisation, à le représentation et à la résolution de systèmes complexes existent, le nombre de contraintes, de domaines d'étude, d'objectifs, et de moyens de calcul est tel qu'il est souvent difficile de s'appuyer sur une démarche systématique et générique. Pour conforter cette analyse, regardons plus en détails quelques travaux récents sur cette problématique de modélisation multi-physique.

Dans (Robert, 2015; Robert et al., 2015), l'objectif est de définir un modèle complet et dynamique de vanne EGR [5], tenant compte de cinq domaines physiques en interaction, à savoir un modèle CEM pour les perturbations conduites (échelle de temps de 10 ns), électrique pour le convertisseur de puissance (1 ms), électromagnétique pour la machine (1 s), mécanique pour la transmission (100 ms) et enfin thermique pour la prise en compte des pertes (1000 s). A ces modèles physiques doit être ajouté un modèle de commande pour la gestion des lois de régulation du système, couplé aux modèles mécaniques et électriques, et un modèle économique, qui lui n'est utilisé qu'une fois le problème physique résolu. Ainsi, pour cette application, le rapport entre la dynamique la plus lente et la dynamique la plus rapide, qui est à l'image de la raideur du problème, est de 11 ordres de grandeurs. La solution proposée dans ce travail pour arriver à un temps de simulation raisonnable est de découpler certains domaines physiques entre eux, soit en considérant les grandeurs lentes comme constantes, soit en transformant les modèles ayant des dynamiques rapides en des modèles au sens des valeurs moyennes, soit encore en cherchant, pour un niveau physique donné, les conditions de fonctionnement en régime établi. Cette dernière approche est notamment employée pour estimer le régime permanent thermique, puisque le cycle d'usage (9 secondes, voir Table 1.1) est beaucoup plus court que la constante de temps [6]. C'est en grande partie le choix et les méthodes utilisés pour rendre le problème *simulable* qui fait l'originalité de ce travail. L'aspect multi-physique de ce problème nécessite également une grande expertise scientifique équilibrée entre les différentes disciplines.

Un autre exemple de travail représentatif des problématiques en lien avec l'optimisation des

5. Exhaust Gas Recirculation.

6. Cette méthode est appelée méthode de relaxation et permet de trouver rapidement un *cycle limite* établi, sans avoir à simuler la totalité du régime transitoire. Dans l'exemple cité (Robert, 2015), la constante de temps thermique est de 1000 s alors que le cycle d'usage est de 9 s. Il aurait donc fallu simuler plusieurs centaines de cycles successifs pour atteindre le régime permanent. Cette méthode de relaxation permet d'arriver au même résultat en une dizaine d'évaluations.

systèmes électriques est celui mené depuis plusieurs années sur le houlogénérateur SEAREV [7]. En effet, dans sa formulation la plus complète, la modélisation de la chaîne de conversion doit tenir compte de la constante de temps mécanique d'un pendule (10 s), de la conversion électromagnétique de l'énergie cinétique récupérée (1 s), des phénomènes thermiques liés aux pertes (1 h), des phénomènes électriques liés au convertisseur de puissance (1 ms) et au système de stockage utilisant des supercondensateurs (1 s), et enfin la prise en compte du vieillissement des supercondensateurs (10 ans). S'il devait être considéré dans sa globalité, le système à modéliser afficherait un écart de dynamiques de 11 ordres de grandeur. Les travaux décrits dans (Ruellan et al., 2010; Aubry, 2011; Kovaltchouk et al., 2015) proposent ainsi de traiter séparément le système de stockage et la chaîne de conversion électromécanique, et de recourir à des modèles moyens pour le convertisseur de puissance et le modèle thermique. Cette fois encore, l'originalité du travail repose sur la mise en œuvre d'un certain nombre de modèles, dont la granularité a été adaptée au mieux, en réponse à des problématiques antagonistes de tolérance et de temps de simulation.

Nous finirons cette section en présentant un travail mené récemment par le L2EP (Pierquin, 2014) qui concerne l'optimisation sur cycle des dispositifs électrotechniques multi-échelles de temps. Ce travail méthodologique propose une démarche assez générique de couplage entre domaines physiques et niveaux de modélisation différents. Un modèle thermique et un modèle électromagnétique modélisés par éléments finis ont ainsi été couplés à un modèle de convertisseur en commutation avec sa commande rapprochée. Pour ramener le temps de calcul du modèle complet à une valeur raisonnable, des méthodes avancées de réduction de modèle et de couplage sont proposées. Ainsi, pour le domaine électromagnétique qui est le plus lourd à calculer, c'est une réduction de modèle par POD [8] qui est mise en œuvre. Les domaines thermiques et électriques sont conservés tels quels car suffisamment rapides à calculer. Pour pouvoir utiliser des pas de temps différents entre domaines, la méthode de couplage proposée est la relaxation des formes d'onde (Lelarasmee et al., 1982; Schöps et al., 2010). Cette méthode itérative consiste à simuler chaque sous-modèle isolément, en lui injectant la forme d'onde calculée par les autres sous-modèles. Ce processus est répété jusqu'à ce que la différence entre deux approximations successives devienne suffisamment faible. C'est cette méthode qui est utilisée pour coupler le modèle électrique au modèle électromagnétique et le modèle électromagnétique au modèle thermique. Ces différents outils permettent ainsi, sur un exemple représentatif de chaîne de conversion d'énergie, de passer d'un temps de calcul complet de 8 heures à 27 minutes, et ce sans ajouter d'erreur significative. Ce travail apporte donc une réelle contribution quant à l'intégration de méthodes éléments finis dans un modèle multi-physique. En particulier, ce que nous pouvons retenir vis-à-vis de nos propres travaux est l'intégration particulièrement efficace de la méthode de relaxation des formes d'onde qui permet de répondre de façon très générique aux problématiques de couplage entre domaines, ayant des échelles de temps très différentes.

En plus des trois travaux décrits précédemment, d'autres études qui ont été proposées ces

7. Système Électrique Autonome de Récupération de l'Energie des Vagues.
8. Décomposition Orthogonale aux Valeurs Propres.

dernières années sur cette problématique sont résumées dans la Table 1.1. Cette liste de travaux, loin d'être exhaustive, a pour unique objectif de montrer de façon synthétique les champs d'applications auquel nous pouvons être confrontés, ainsi que la difficulté liée à la nature multi-physique et donc multi-échelles en temps des problèmes modélisés.

référence	**application**	**objectif(s)**	**dynamique**	**cycle d'usage**
Robert (2015, GeePS)	Vanne EGR (véhicule automobile)	Volume	10ns-1h [10^{11}]	Cycle de puissance de 9 s
Aubry (2011, SATI)	Houlogénérateur SEAREV	Puissance et coût	1ms-10ans [10^{11}]	Ensemble d'états de mer représentatifs sur un horizon de 1000 s
Caillard (2015, L2EP)	Chaîne de traction électrique automobile	Autonomie et coût	1μs-1h [10^{10}]	Cycles de vitesse standardisés de 10 min
Mesbahi (2016, L2EP)	Chaîne de traction hybride automobile	Gestion de l'énergie	1s-10ans [10^{8}]	Cycles de vitesse de 3 h
Agbli (2012, FEMTO-ST)	Installation stationnaire photovoltaïque-PEM	gestion de l'énergie	1ms-24h [10^{8}]	Cycle de puissance d'une journée (PV+charge)
Pierquin (2014, L2EP)	Pilotage d'un transformateur de traction ferroviaire	Simulation des couplages électriques, électromagnétiques et thermiques	1μs-1000s [10^{9}]	Cycle de courant de 2 s

Table 1.1 – Synthèse des échelles de temps et degré de raideur de différentes applications traitées en vue d'un dimensionnement optimisé.

1.3.2 Dimensionnement optimisé des chaînes de conversion d'énergie

Si les travaux de modélisation en génie électrique tendent, comme nous venons de le voir, à essayer d'intégrer de façon efficace des domaines physiques de natures très différentes, les objectifs visés dans la phase d'optimisation sont quant à eux majoritairement économiques. En effet, les nouveaux organes de production d'énergie ou de stockage qui doivent permettre de proposer des solutions alternatives aux technologies plus anciennes, présentent l'inconvénient majeur d'avoir des coûts d'acquisition élevés. De même, leur durée de vie est généralement fortement conditionnée par l'usage qui en est fait, ce qui peut donc fortement impacter leurs coûts d'exploitation et de maintenance. Finalement, l'intégration de la dimension économique comme objectif d'optimisation permet souvent d'unifier un ensemble de critères techniques et de les ramener à un indicateur unique, homogène et interprétable. Cette idée a ainsi été parfaitement bien développée dans le travail de Dany Prieto (Prieto, 2015). Il vise à proposer l'optimisation d'un ensemble convertisseur-machine sur le seul critère de coût et sous contrainte de répondre à un besoin technique. Concernant le convertisseur de puissance, l'optimisation peut d'une manière générale porter sur de nombreux critères techniques, comme l'encombrement, le rendement ou, encore, la qualité de l'onde produite. Pour la machine électrique, la puissance massique ou le rendement sont des critères couramment rencontrés. Or, ces derniers sont souvent contradictoires et nécessitent alors de recourir à des approches multi-objectifs. Ici, le

passage à un objectif de minimisation du coût du système complet permet de ramener l'ensemble du problème à ce seul indicateur. Ainsi, le coût de l'onduleur est évalué à partir du calibre courant des interrupteurs de puissance et le coût de la machine est ramené à celui de la quantité de matière première, constituée de fer, de cuivre et d'aimants. La réponse technique du système vis-à-vis du cahier des charges est prise en compte au travers d'un ensemble de contraintes à respecter. Il est par ailleurs proposé dans ce travail de recourir à une approche multiobjectif originale, permettant de minimiser le coût de fabrication de la machine pour deux applications différentes. L'idée consiste à mutualiser les tôles utilisées pour les deux machines électriques, dans le but de réduire les coûts de production et d'outillage [9].

Une approche similaire est proposée dans la thèse de Judicaël Aubry (Aubry, 2011), qui a déjà été détaillée en partie à la section précédente. L'optimisation porte ici sur le dimensionnement de l'ensemble convertisseur-machine du houlogénérateur SEAREV, dans le but de minimiser le coût du kilowatt-heure produit. L'estimation du coût de la chaîne de conversion s'appuie cette fois encore sur des données constructeur pour le convertisseur d'électronique de puissance et sur les coûts de matière première pour la machine électrique. Un résultat peu intuitif montré dans ce travail est que la minimisation du coût de production de l'énergie électrique du système complet ne correspond pas à un dimensionnement de la chaîne de conversion de puissance ayant le meilleur rapport entre coût et énergie produite. En effet, le houlogénérateur est composé d'un grand nombre d'éléments subsidiaires, indépendants de la chaîne électrique elle même. Ne connaissant pas précisément le coût de tous ces éléments [10], la solution proposée consiste à formuler le problème de dimensionnement de la chaîne de puissance comme un problème d'optimisation multi-objectif cherchant les meilleurs compromis entre coût de la chaîne de conversion seule et la puissance produite. Par une construction mathématique astucieuse, chaque point du front de Pareto ainsi obtenu est interprété comme une solution optimale du système complet et pour un certain coût du reste du houlogénérateur.

Bien que le dimensionnement des systèmes énergétiques sur des critères d'optimisation technico-économiques soit une voie assez largement empruntée ces dernières années, elle présente toutefois un certain nombre de limitations et peut conduire par un manque d'expertise à des conclusions biaisées. Ceci est d'autant plus vrai qu'un certain nombre de notions économiques sont peu ou mal maîtrisées par les chercheurs de domaines scientifiques, dont le génie électrique fait partie. Plus concrètement, le coût d'un système est généralement décomposé en 4 postes distincts, à savoir le coût d'acquisition, de fonctionnement, de maintenance, et enfin le coût de remplacement. Le coût d'acquisition est certainement celui qui est le mieux maîtrisé par les acteurs des domaines scientifiques, car ils sont généralement à l'image de données techniques [11]. La difficulté rencontrée dans l'estimation de ce coût est alors liée à la notion de valeur ajoutée,

9. Plus précisément, les paramètres géométriques de la tôle sont identiques pour les deux cahiers des charges. L'adaptation de la machine pour chacune des applications est obtenue en ajustant la longueur, la quantité de cuivre et la quantité d'aimant.

10. Pour le houlogénérateur, le coût de cette partie annexe est estimée entre 1 et 4 millions d'euro, pour une chaîne électrique en valant quelques centaines de milliers.

11. Comme cela a déjà été vu avec la quantité de matière première pour une machine électrique ou les calibres courant et tension pour un convertisseur de puissance.

ainsi qu'aux effets d'échelles et de séries. Les problèmes de dimensionnement d'ensembles convertisseur-machine évoqués précédemment illustrent assez bien ce problème. En effet, dans (Ruellan, 2007; Aubry, 2011) le coût d'acquisition du convertisseur de puissance architecturé autour d'une structure *back-to-back* est paramétré sur la base de son calibre courant, obtenu à partir d'un ensemble de données commerciales. Or ce coût est additionné à celui de la machine électrique, qui est cette fois celui de la matière première et qui n'est donc pas un coût commercial. Dans (Prieto, 2015), cette incompatibilité est contournée en considérant un équivalent du coût de *matière première* pour le convertisseur, qui ne tient compte que des modules IGBT et de leur calibre courant. Dans (Caillard, 2015), le coût commercial de la machine est estimé par une décomposition en une part fixe indépendante du dimensionnement, et une part variable proportionnelle au coût matière. Ce dernier travail visant à dimensionner une chaîne de traction électrique d'un véhicule automobile, la même approche est utilisée pour l'estimation du coût du convertisseur, du système de stockage et de la transmission mécanique. Enfin, cette thèse ayant eu lieu dans le cadre d'un partenariat avec le constructeur automobile Renault, il peut être supposé que les données économiques utilisées, mais non communiquées [12], sont particulièrement pertinentes. A cette difficulté d'estimation du coût d'acquisition d'un système, s'ajoute celle du coût de fonctionnement et de maintenance. Parce qu'il est particulièrement délicat à estimer, il est considéré dans de nombreux travaux comme une donnée annualisée, calculée en proportion de la taille de l'installation (Walford, 2006; Diaf et al., 2008; Guinot et al., 2015). Cette approche *a priori* simpliste semble néanmoins être une bonne approximation.

De nombreux travaux tels que ceux présentés précédemment, s'intéressent à l'optimisation du dimensionnement d'un système en considérant des lois de commande rapprochées et de gestion de l'énergie *a priori* (Aubry, 2011; Pierquin, 2014; Prieto, 2015; Robert, 2015). Inversement, l'optimisation du superviseur des flux d'énergie est majoritairement abordée sous la contrainte de disposer d'un dimensionnement préalablement établi (Bouscayrol, 2003; Mbemba, 2012; Agbli, 2012; Buzila, 2015; Mesbahi, 2016). Certains travaux visent néanmoins à concilier ces deux approches complémentaires. Dans (Rigo-Mariani, 2014), un micro-réseau est dimensionné en vue de maximiser sa rentabilité sur le marché spot de l'électricité. Ce travail propose ainsi une démarche globale imbriquant des boucles de gestion de l'énergie et de dimensionnement, respectivement obtenues par un algorithme d'optimisation globale [13] et par programmation linéaire. Le choix de ces méthodes a été en grande partie guidée par des problématiques de temps de calcul, liées notamment à la nature imbriquée de la formulation du problème. Dans Reinbold (2014), la même problématique d'optimisation du dimensionnement et de la gestion d'énergie est abordée dans le cadre d'un véhicule hybride urbain thermique-électrique. Différentes démarches sont menées et comparées dans ce travail, dont l'une consiste en une optimisation couplée. Pour ce faire, un algorithme SQP (Sequential Quadratic Programming) est utilisé pour évaluer pas à pas la commande optimale minimisant la consommation de carburant du véhicule. L'avantage clairement mis en avant pour ce couplage est le gain sur le temps de calcul pour obtenir une solution optimale. Par contre, cette formulation ajoute un certain nombre de contraintes, et notamment celle de disposer de leur dérivée et de recourir en amont à un algorithme d'initialisa-

12. Dommage ;-)
13. Efficient Global Optimization (EGO).

tion du vecteur de paramètres autour de la solution finale (liée à la nature locale de la méthode d 'optimisation utilisée).

Nous retrouvons dans cette problématique d'optimisation conjointe *dimensionnement et gestion*, les mêmes verrous que pour la modélisation multi-physique, et donc multi-échelles de temps, évoquée à la section précédente. Car si la phase de dimensionnement peut se satisfaire de modèles énergétiques moyens avec une faible résolution temporelle, cette hypothèse ne tient plus dans le cadre général d'une optimisation des lois de supervision de l'énergie et notamment en présence d'organes de stockage à forte dynamique tels que les supercondensateurs ou les batteries de puissance. C'est la raison pour laquelle ces deux aspects sont généralement traités séparément ou de façon itérative.

Un troisième niveau dont nous n'avons pas encore parlé, très souvent traité isolément et qui opère à des constantes de temps encore plus faibles, porte sur la définition et le réglage des lois de commande rapprochées des différentes grandeurs physiques d'un système. Il s'avère que la grande majorité des applications accepte sans difficulté de considérer cette échelle de temps à part, puisqu'elle concerne plutôt des problématiques de stabilité, de robustesse ou de qualité de l'énergie, et présente de très faibles interférences avec la dimension de gestion des flux d'énergie qui, pour sa part, s'appuie sur une vision plus globale et macroscopique du système complet. Dans le cadre de systèmes complexes composés d'un grand nombre de sous-ensembles en interaction, la définition même de l'architecture de commande peut s'avérer être une étape relativement délicate. Certaines représentations par *bond-graph* ont été développées spécifiquement pour répondre à ces besoins. La plus diffusée à l'échelle nationale est la Représentation Energétique Macroscopique, qui intrinsèquement par son formalisme, permet de définir l'architecture globale de la commande du système à mettre œuvre, aussi appelée *Structure Maximale de Commande*. Cette démarche s'appuie sur le principe d'inversion du *Graph Informationnel Causal* (Hautier et al., 1999), elle même basée sur le principe de décomposition en effort-flux des composantes de la puissance. En effet, l'asservissement d'une des composantes de la puissance d'un système passe d'une manière générale par le réglage de la seconde [14]. La mise en œuvre de tels outils permet donc de représenter le système et sa commande, dans un formalisme unique et multi-domaines.

1.3.3 Positionnement de nos travaux

L'état de l'art qui vient d'être présenté, loin d'être exhaustif, montre néanmoins la très grande diversité des approches abordées en lien avec les problématiques de modélisation, de simulation et d'optimisation des systèmes électriques. Les travaux que nous avons menés depuis 2009 se positionnent au niveau national sur ces 3 thématiques, qui rappelons-le, sont étroitement reliées les unes aux autres.

Une contribution importante de nos travaux vis-à-vis des problématiques de modélisation

14. Par exemple, la régulation du courant dans une machine est obtenue par le contrôle de la tension de sortie du convertisseur qui lui est associé.

concerne la mise en œuvre et l'intégration de modèles multi-physiques de chaînes de conversions complètes, tenant compte de contraintes techniques et économiques. La démarche adoptée est relativement classique et nous pouvons la retrouver dans différents travaux déjà cités tels que ceux du SATIE, du L2EP ou du GeePS [15]. En revanche, leur originalité repose en premier lieu sur la tentative de traiter simultanément l'ensemble des composants et leurs domaines physiques respectifs, malgré la forte disparité des échelles de temps. Ainsi, nous proposons dans la thèse de Sony Trieste de dimensionner la chaîne de stockage d'un navire à supercondensateurs, dont l'usage en énergie est assez peu conventionnel. Un travail de synthèse important a été mené pour proposer un ensemble de modèles multi-physiques de chaque composant de la chaîne de conversion, en tenant compte des phénomènes électriques, thermiques et magnétiques, ainsi que du vieillissement du système de stockage. Il est a noter que cette synthèse a été nécessaire du fait du faible nombre d'études menées à l'époque qui s'intéressaient à la modélisation technico-économique des chaînes de conversion, ainsi qu'au peu de retours d'expériences alors acquis sur les phénomènes de vieillissement des supercondensateurs. En second lieu, des travaux réalisés sur un démonstrateur de véhicule urbain à pile à combustible nous ont amenés a proposer un modèle multi-physique et énergétique complet, tenant compte de l'ensemble des éléments et domaines (électriques, mécaniques, thermiques, ...). Ces travaux sont à rapprocher de ceux menés au L2EP, à l'IRH (Québec) ou au FEMTO-ST [16]. Dans ce cadre, l'originalité de nos travaux réside cette fois encore dans l'approche globale que nous avons mené en vue de minimiser la consommation énergétique du véhicule. Pour atteindre de telles performances, nous avons en effet proposé des conditions opératoires et une stratégie de contrôle des accessoires de la pile à combustible permettant d'optimiser le rendement de cette dernière. Or, il se trouve que ces conditions, qui sont très favorables à un bon rendement énergétique de la pile, posent de gros problèmes de fiabilité et de stabilité sur des temps d'utilisation élevés (plusieurs heures). La thèse menée par Stéphane Chevalier visait ainsi à proposer un modèle de diagnostic de pile à combustible, dans le but de fiabiliser les systèmes pile fonctionnant dans de telles conditions.

Il est intéressant de noter que les difficultés que nous avons pu rencontrer lors de la mise en œuvre de cet outil de diagnostic sont très proches de celles abordées dans un problème de conception optimisée de systèmes électriques. Premièrement, la modélisation du cœur de pile nécessite une approche multi-physique, qui considère donc des échelles de temps très différentes. Ici, ce problème est contourné en transformant la dimension temporelle en une représentation fréquentielle. Certes cette représentation limite l'utilisation du modèle aux solicitations sinusoïdales de faibles amplitudes (pour assurer l'hypothèse de linéarité), mais elle assure en contre partie une certaine facilité dans la résolution géométrique du problème électrochimique et fluidique. Deuxièmement, le modèle multi-physique développé est utilisé pour retrouver un jeu de paramètres physiques à même de nous permettre de remonter à la signature spectrale de l'impédance mesurée. Cette inversion de modèle a été réalisée à l'aide d'un algorithme d'optimisation par essaim de particules et en cherchant à minimiser l'erreur quadratique entre les mesures et le modèle sur un ensemble de fréquences. Nous avons donc

15. On pense notamment à (Ruellan, 2007; Aubry, 2011; Caillard, 2015; Robert, 2015).

16. Voir par exemple l'approche de modélisation utilisée dans les travaux de (Boulon et al., 2012; Agbli, 2012; Horrein, 2015; Agbossou, 2016).

été amenés à formuler le problème direct pour que sa résolution soit suffisamment rapide et permette une inversion en *temps réel*.

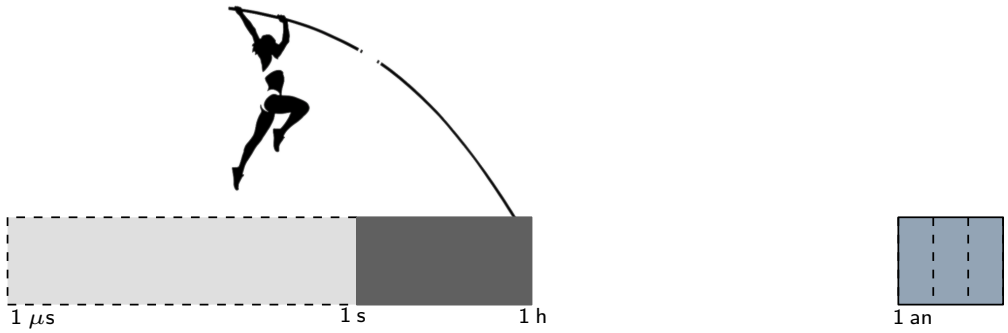
Pour rester sur les problématiques d'optimisation, nous avons essentiellement travaillé sur les aspects de conception des chaînes de conversion. Notre plus importante contribution sur cette problématique, concerne l'intégration de la dimension stochastique de l'environnement dans le processus d'optimisation. Cette activité a débuté au laboratoire avec les thèses de Jérôme Delanoë (Delanoë, 2008) et de Geoffroy Roblot (Roblot, 2012) dont l'idée était de chercher des méthodologies de dimensionnement de générateurs *au plus juste*, en utilisant des méthodes probabilistes d'apparition de charges sur le réseau. Cette idée a ensuite été appliquée par Gwenaëlle Souffran (Souffran, 2012) au dimensionnement d'un véhicule automobile hybride, en cherchant cette fois à générer automatiquement des profils de mission sur de très longues durées, à partir d'un échantillon de mesures plus court, mais représentatif. Dans la continuité de ces travaux, nous avons considéré ces méthodes stochastiques dans le cadre d'une application de production multi-sources, basée sur de la production photovoltaïque, du stockage par batterie électrochimique et utilisant une pile à combustible comme source auxiliaire. Plus précisément, nous avons proposé une démarche de dimensionnement de ces installations, en y intégrant un critère de robustesse. Ce dernier est obtenu *a posteriori* en testant un dimensionnement calculé à partir d'une année de mesure du rayonnement solaire, sur un ensemble d'années virtuelles, générées aléatoirement grâce à une modélisation de la couverture nuageuse sous la forme d'une chaîne de Markov, dont la matrice de transition est alimentée par des données expérimentales. De nombreuses études s'appuient généralement sur une ou quelques années de mesure pour dimensionner une installation. Les principales raisons sont le manque de données disponibles pour un site donné et l'alourdissement du processus d'optimisation, lié à l'augmentation du temps de simulation du problème direct. Notre contribution repose donc sur la proposition d'une méthodologie générique [17] permettant, sans alourdir la phase d'optimisation, de vérifier la robustesse ou encore la fiabilité de la réponse d'un dimensionnement obtenu.

Enfin, en ce qui concerne les problématiques de simulation abordées dans nos travaux, nous sommes partis du constat que dans de nombreuses études, un effort important a été mis dans la recherche de la bonne granularité des différents sous-modèles mis en interaction. L'objectif de cette recherche est de pouvoir simuler un système complet en assurant un niveau suffisant de fidélité, avec un temps de calcul raisonnable. Comme nous l'avons montré précédemment, une part importante du travail fourni pour *réduire* la complexité d'un modèle consiste à réécrire ce dernier en le moyennant aux échelles de temps les plus courtes, ou à proposer des méthodes de découplage des différents sous-modèles, permettant alors de recourir pour chaque domaine physique à des outils logiciels spécifiques. Ces deux approches sont particulièrement efficaces et de très nombreuses méthodologies et outils sont aujourd'hui accessibles pour mener à bien la simulation de systèmes multi-physiques ayant des écarts de dynamiques très grands. Mais cette efficacité se paye par un besoin d'expertise élevé dans la phase de développement des différents modèles et de leur couplage. Aussi, notre contribution à l'égard de ces problématiques

17. Bien que nos études se soient principalement concentrées sur la nature stochastique de la ressource solaire, elle peut être aisément étendue à tout type de profil de charge ou de ressource.

a été de proposer une méthode de simulation multi-physique, capable de fonctionner sur une représentation monolithique du problème, qui peut alors tenir compte de l'ensemble des interactions entre les différentes couches physiques. Les seules restrictions quant à la nature du système étudié est de pouvoir ramener son utilisation et son environnement à un ensemble de cycles déterministes. L'approche que nous proposons est donc complémentaire des approches classiquement rencontrées, et permet un gain de temps significatif dans la phase de mise en œuvre du modèle complet à simuler.

2 Modélisation et Optimisation des chaînes de conversion d'énergie



2.1 Introduction

Ce chapitre est dédié à la présentation plus précise de mes activités de recherche menées autour des problématiques de modélisation multi-physiques des chaînes de production et de conversion d'énergie, ainsi qu'à l'optimisation sur cycle de leur dimensionnement. Le travail qui a été réalisé s'appuie sur 3 applications distinctes, à savoir un ferry électrique à supercondensateurs, un système de production multi-sources en site isolé et, enfin, un véhicule urbain à pile combustible. Ces applications, aux finalités *a priori* assez différentes, montrent un certain nombre de similitudes quant à la démarche adoptée pour aboutir à leur dimensionnement optimisé. C'est ce que nous commencerons par présenter au travers d'un formalisme générique capable de décrire et de synthétiser la phase de modélisation multi-physique et technico-économique que nous avons adoptée au cours de nos différents travaux. Nous traiterons ensuite la modélisation multi-physique du navire à supercondateurs et l'application de production d'énergie multi-sources. Pour cette dernière, nous discuterons en particulier de la partie de nos travaux portant sur la prise en compte de la nature stochastique de l'environnement dans la phase de dimensionnement d'un système. Enfin, nous terminerons ce chapitre par l'application du véhicule urbain *Cityjoule* à pile à combustible, pour laquelle nous détaillerons nos activités autour des problématiques d'optimisation énergétique sur cycle, puis de diagnostic par impédancemétrie, dont l'originalité est de s'appuyer sur une modélisation multi-physique adaptée.

2.2 Formalisme de représentation et décomposition temporelle des problèmes multi-physiques

Le chapitre précédent a permis de présenter succinctement les trois applications de références qui ont servi de support pour nos différentes études. Bien qu'assez différentes au regard de leurs objectifs, ces applications présentent un certain nombre de similitudes quant aux problématiques rencontrées dans leur phase de modélisation. Leur premier point commun est qu'elles nécessitent toutes trois de tenir compte simultanément de domaines physiques différents. Pour l'application du navire *Ar Vag Tredan*, les phénomènes modélisés sont de natures électrique, électromagnétique, thermique et économique, avec également une prise en compte du vieillissement des supercondensateurs. Pour l'application du système multi-sources, les domaines concernés sont les mêmes que précédemment, auquel il faut ajouter la modélisation du rayonnement solaire et de la couverture nuageuse pour les panneaux photovoltaïques. Enfin, l'application du véhicule *polyjoule* nécessite de prendre en compte les phénomènes électriques, électromagnétiques et thermiques comme précédemment, mais aussi mécaniques et fluidiques. Pour l'ensemble de ces applications, différents modèles ont été développés dont certains ont pu être mutualisés. Une démarche systématique à ainsi pu être mise en œuvre afin de faciliter leur développement et leur intégration, permettant alors de former des chaînes de conversion complètes et multi-physiques.

Une étape importante lors de la modélisation d'un système multi-physique composé de plusieurs éléments est le choix des modèles associés à chaque organe. Ce choix s'effectue généralement sur une analyse préliminaire des objectifs du modèle, de l'expertise du concepteur et du temps disponible pour aboutir à un résultat. Cette étape finalement assez intuitive peut également s'appuyer sur les interconnections entre modèles et les échanges d'informations nécessaires. Le degré de complexité du modèle associé à un phénomène physique dépendra donc de sa sensibilité à l'objectif final et reste, cette fois encore, à l'appréciation du concepteur. Notre retour d'expérience sur les différentes applications traitées nous permet, en définitive, de présenter notre démarche de modélisation sous une forme synthétique. Pour cela, nous nous sommes appuyés sur trois opérations distinctes et complémentaires (voir Figure 2.1).

La première vise à définir globalement les domaines physiques nécessaires à la modélisation et à associer chacun d'entre-eux à une échelle de temps. Le choix du cycle d'usage de l'application permet de définir l'horizon de simulation minimum, nécessaire pour l'évaluation du modèle. L'idée est alors de considérer uniquement le comportement dynamique des grandeurs agissant aux échelles de temps proches de cet horizon de simulation. Ce choix très arbitraire nous renvoie à la notion de *raideur* d'un système d'équations différentielles ordinaires. Cette dernière exprime en partie le rapport des dynamiques entre variables d'état (Curtiss and Hirschfelder, 1952; Moler, 2008). Un solveur numérique classique de formulation explicite doit être configuré avec un pas de calcul plus petit que la dynamique la plus rapide du système. Pour pouvoir utiliser de tels solveurs, il est donc nécessaire que le rapport entre le pas de calcul et l'horizon de simulation du cycle ne soit pas trop grand, puisqu'il entraînerait inévitable des temps de simulation excessifs. Dans de nombreux travaux portant sur des objectifs d'optimisation, le choix de ce rapport de

dynamiques est généralement limité à 4 ordres de grandeur.

Une fois que cette plus petite échelle de temps est définie, l'ensemble des phénomènes physiques plus rapides que cette dernière ne peuvent plus être simulés en dynamique. Une seconde opération consiste alors à adapter la nature des modèles pour les rendre compatibles avec cette contrainte. Dans le cas de sollicitations périodiques telles que celles produites par un convertisseur statique ou une machine tournante, l'approche classiquement retenue est de proposer une modélisation *au sens des valeurs moyennes*, calculée à l'échelle d'un cycle. Si les sollicitations sont apériodiques et suffisamment lentes, comme c'est la cas pour les phénomènes thermiques, la méthode consiste cette fois à négliger les termes transitoires dans les équations pour ne conserver que le régime permanent. Les phénomènes modélisés sont alors considérés comme instantanés.

Enfin, la troisième opération réalisée consiste à extrapoler les résultats de simulation obtenus sur l'horizon temporel d'un ou plusieurs cycles, qui sont eux de longueur plus courte que celle du calcul complet. De même, il est possible de procéder à une seule extrapolation des résultats pour atteindre le temps final du problème, ou d'en calculer plusieurs successivement et de manière itérative, en s'appuyant sur une échelle de temps intermédiaire.

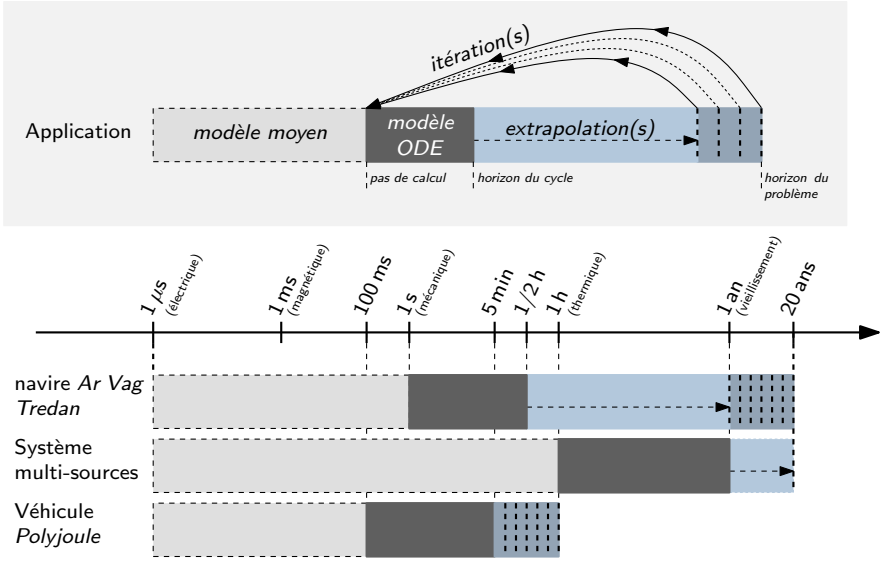


Figure. 2.1 – Diagramme illustrant la décomposition temporelle des trois problèmes multi-physiques traités au cours de nos travaux.

Pour illustrer cette méthodologie nous pouvons nous appuyer sur les trois cas d'applications présentées précédemment. Nous commencerons par celle du navire *Ar Vag Tredan*. L'objectif est ici de trouver le dimensionnement optimal d'un point de vue économique de la chaîne de stockage à supercondensateurs. L'architecture de cette chaîne est imposée et comprend des supercondensateurs, un convertisseur continu-continu réversible en courant et des inductances de lissage. L'horizon de simulation complet de ce problème est de 20 ans et correspond à la durée d'exploitation du navire. Ce sont les grandeurs électriques et notamment celles du convertisseur de puissance qui fournissent les dynamiques les plus élevées pour cette application. Comme

l'illustre la Figure 2.1, cette dernière nécessite donc *a priori* de tenir compte de phénomènes allant de la microseconde à 20 ans. Puisque le degré de *raideur* d'un système d'équations différentielles se définit en partie comme le rapport entre la dynamique la plus lente et la plus rapide, elle est de 15 ordres de grandeur pour l'application considérée. Cette valeur beaucoup trop élevée nécessite de réduire fortement le problème initial. Pour cela, nous proposons de nous baser sur un cycle d'usage standardisé, qui représente la puissance utile d'un aller-retour et d'une recharge rapide complète du système de stockage. Ce cycle d'une demi-heure est simulé en tenant compte uniquement du comportement dynamique des supercondensateurs, incluant les phénomènes électriques et de vieillissement. Les modèles électriques et électromagnétiques du convertisseur de puissance et des inductances de lissage, ainsi que le modèle thermique des supercondensateurs, sont quant à eux calculés sur la base de modèles moyens. Un pas d'échantillonnage de l'ordre de la seconde est alors utilisé pour la simulation. Pour cette application, l'horizon du problème ne peut pas être atteint en une seule extrapolation du cycle simulé correspondant à un aller-retour. En effet, l'écart entre les deux échelles de temps est trop grand et implique de négliger certains couplages entre les différents phénomènes physiques. C'est pourquoi il est proposé d'extrapoler les résultats obtenus à l'échelle du cycle sur uniquement une année. Le processus est alors répété de manière itérative pour les 20 années d'exploitation du navire. Ainsi, le problème complet est évalué sur la base de seulement 20 cycles d'une demi-heure.

L'approche utilisée pour la modélisation du système multi-sources est à peu près similaire. La présence de convertisseurs de puissance nous amène, comme pour le problème précédent à fixer l'échelle de temps la plus petite. De même, le dimensionnement de l'installation est envisagé pour une durée classique de 20 ans d'exploitation, ce qui fixe notre horizon de simulation. La principale différence est cette fois l'absence de cycle représentatif et déterministe, et ce malgré la présence de pseudo-périodicités annuelles et journalières. En effet, la ressource solaire est fortement modulée par la couverture nuageuse qui s'apparente à un processus stochastique. De même, le profil de consommation présente ce même comportement aléatoire, avec une forte corrélation saisonnière. L'ensemble de ces variations rendent difficile le choix d'un horizon de simulation court, tel que celui d'une journée ou d'un mois représentatif. Certaines études s'appuient pour le dimensionnement d'installations photovoltaïques sur le mois le moins ensoleillé sur une ou plusieurs années mesurées (Celik, 2002; Kusakana and Vermaak, 2013). Cette approche permet de réduire le temps de simulation et d'assurer un dimensionnement robuste, mais au prix d'un surdimensionnement de l'installation. De même, le choix du mois ou du jour le moins ensoleillé ne représente pas nécessairement le *pire cas* et peut aboutir à des dimensionnements mal adaptés. Cette rapide analyse du problème, qui sera détaillée à la section 2.3.2, nous amène finalement à envisager une simulation exhaustive sur l'horizon du problème. La difficulté est alors l'augmentation significative du temps de calcul et la difficulté de disposer de données de mesures sur de telles durées. En s'appuyant sur ces considérations, le choix d'une année pour la simulation a été retenu. De plus, le rapport entre cet horizon de simulation et celui du problème étant faible, nous ne considérerons qu'une seule extrapolation des résultats, et donc sans itérations. Enfin, un pas d'échantillonnage d'une heure a été retenu. Ce pas de temps est stratégique puisqu'il correspond à celui utilisé dans de nombreuses campagnes de mesures dans le domaine résidentiel. En revanche, il contraint à simplifier un certain nombre de modèles

et ne permet pas d'explorer les technologies de stockage d'énergie électrique les plus rapides, telles que les supercondensateurs ou les volants d'inertie. Les grandeurs dynamiques prisent en compte dans ce travail sont l'état de charge des batteries et la consommation d'hydrogène. Les autres phénomènes, majoritairement thermiques et électriques, sont obtenus à partir de modèles moyens instantanés.

Nous finirons cette analyse de la décomposition temporelle de nos problèmes multi-physiques par l'application du véhicule *Polyjoule*. Pour rappel, l'objectif de ce véhicule est de minimiser la consommation d'énergie sur un parcours imposé. La distance totale étant d'une vingtaine de kilomètres, la course est en fait effectuée sur un circuit d'environ 2 km et sur lequel une dizaine de tours est réalisée. A chaque tour, un arrêt est imposé à un endroit fixe du circuit. Ainsi, notre problème peut être réduit à l'analyse d'une succession de tours au profil de vitesse identique. C'est la raison pour laquelle l'horizon du cycle choisi est de l'ordre de 5 minutes (ce qui correspond à un circuit de 2 km à une vitesse moyenne de 25 km/h). Ici, la chaîne de conversion doit tenir compte principalement des dynamiques mécaniques pour le calcul du profil de vitesse et thermique pour l'estimation de la consommation des accessoires de pile au cours du temps. Ainsi, cela nous amène à considérer une échelle de temps minimale inférieure à la seconde pour la prise en compte des phénomènes mécaniques transitoires. Ici, la différence entre la durée du cycle de simulation et l'horizon du problème est faible. Elle devrait donc *a priori* nous permettre de procéder à une unique extrapolation pour passer d'une échelle à l'autre. Mais cette opération est en réalité rendue impossible par le régime transitoire thermique qui opère sur toute la durée d'une course. Ainsi, cette décomposition du problème en cycles unitaires ne permet aucune réduction de l'effort de calcul. Pour que la simulation du problème direct ne soit pas trop long, nous proposons donc de simuler le cycle de conduite en régime permanent thermique, qui correspond à un cas défavorable pour lequel les accessoires de pile, et plus particulièrement le système de refroidissement, fonctionnent en continu. La démarche classiquement rencontrée consiste à opérer une relaxation sur cette variable d'état pour aboutir à un régime établi en un nombre réduit d'itérations (Prieto, 2015; Robert, 2015). C'est la méthode que nous avons retenue dans la phase d'optimisation, en initialisant la température à la valeur de seuil bas du régulateur à hysteresis. Cette dernière opération permet d'accélérer la convergence de la méthode de relaxation pour aboutir en une ou deux itérations au régime permanent désiré [1].

Nous avons donc pu montrer et illustrer au travers de 3 applications assez différentes, une démarche de décomposition temporelle des problèmes multi-physiques et multi-échelles de temps. Cette dernière nous permet de définir de façon générique la nature des modèles à associer aux phénomènes physiques considérés, sur la base de la recherche de cycles d'usage représentatifs et de phases d'extrapolation, en ayant pour objectif premier de réduire le temps de résolution du problème complet. Ce n'est qu'une fois cette structure de simulation établie que le développement des différents modèles multi-physiques peut être engagé. Notre choix s'est très rapidement porté vers une modélisation dynamique reposant sur un ou plusieurs systèmes d'équations différentielles ordinaires. Ce type de modélisation est en effet très bien adapté

1. Il est a noter que ce régime établi est en fait obtenu après une demi-heure de trajet environ, soit à mi-parcourt d'une course complète.

aux problèmes qui nous intéressent, à savoir lorsque l'ensemble des grandeurs dynamiques et d'échanges sont définies par des variables localisées. Une telle représentation facilite le couplage des différents sous-modèles puisque chaque phénomène physique, qu'il soit dynamique ou statique, est réduit à une simple variable. La principale difficulté rencontrée dans l'utilisation de cette approche est le respect de la causalité des échanges entre modèles. En effet, chaque composant avec ses couches physiques associées est en général développé de façon indépendante. Il peut alors exister des incompatibilités dans les données de couplage entre composants, se traduisant la plupart du temps par l'apparition de boucles (ou contraintes) algébriques. Une situation classique faisant apparaitre de tels problèmes est celle qui consiste à faire coexister des modèles dynamiques physiques, basés sur des représentations de type *effort-flux*, avec des modèles décrivant uniquement les flux de puissance entre organes. Pour l'application du navire électrique *Ar Vag Tredan*, le profil de charge est défini par un cycle de puissance alors que le système de stockage à supercondensateurs est décrit par un modèle électrique faisant intervenir la tension et le courant. Pour le véhicule urbain *Cityjoule*, c'est le couplage entre la pile à combustible et le convertisseur statique qui est problématique, puisque dans ce cas, seule la puissance fournie au système est donnée et c'est alors le couple *tension-courant* de la pile à combustible qui doit être déduit. Enfin, dans le cas du système multi-sources, la majorité des organes représentés par des modèles moyens équivalents s'appuient sur une représentation par flux de puissance. En revanche, nous avons utilisé dans cette étude un modèle de batterie acide-plomb *CIEMAT*, qui a été utilisé dans de nombreuses études et fait aujourd'hui référence pour cette technologie de batterie. Or, ce modèle dynamique décrit un circuit électrique équivalent de type Thevenin, dont les composants sont paramétrés par l'état de charge et le courant. Ainsi, une boucle algébrique apparaît du fait de son association à une modélisation en flux de puissance. Nous verrons au travers de chacune de ces applications différentes méthodes permettant de contourner de manière plus ou moins efficace et en fonction du degré de précision attendu, ces boucles et contraintes algébriques.

Ainsi s'achève cette section qui nous a permis de poser les contours de nos problématiques et de décrire de façon relativement générique notre approche méthodologique dans la décomposition et le choix du niveau de modélisation des différents domaines physiques associés à chaque organe. Pour le reste, chacune des applications a son lot de spécificités, tant sur son cahier des charges que sur les objectifs même de la modélisation. Il devient donc difficile de chercher à traîter ces travaux simultanément et nous proposons donc de les présenter séparément, sur la base des problématiques scientifiques qui leurs sont propres. Ainsi, les problématiques de modélisation technico-économiques seront abordées au travers des études menées sur le navire électrique *Ar Vag Tredan* et sur le système de production d'énergie électrique multi-sources. Cette dernière application nous amènera alors à proposer une démarche de dimensionnement optimisé tenant compte de la nature stochastique de la ressource solaire. Enfin, nous nous appuierons sur l'application de véhicule urbain pour présenter nos travaux de modélisation. Ces derniers concernent d'une part la modélisation multi-physique du véhicule et de son environnement, en vue d'optimiser ses performances énergétiques, et d'autre part la modélisation multi-physique du système pile à des fins de diagnostic.

2.3 Approche technico-économique pour le dimensionnement optimisé des chaînes de conversion

Nous l'avons évoqué précédemment, une part importante de notre activité de recherche s'est portée sur l'optimisation de chaînes de conversion électrique. Bien qu'il existe encore des verrous techniques au déploiement de certaines solutions alternatives aux systèmes de production ou de conversion standards, le principal frein dans leur développement reste généralement lié à un coût d'acquisition et d'entretien élevé associé à une durée de vie parfois limitée. Ainsi, pour les applications de transport, les anciennes technologies de moteurs à combustion interne trouvent aujourd'hui des équivalences électriques basées principalement sur du stockage électrochimique ou des systèmes pile à combustible, qui présentent toutes deux des performances suffisantes pour être des solutions alternatives sérieuses. Pour les batteries, les limitations technologiques concernent leur densité de puissance, notamment dans la phase de recharge, ainsi que leur vieillissement rapide qui est fortement couplé à l'usage qui en est fait. Côté économique, cette technologie est relativement coûteuse, notamment au regard de sa durée de vie limitée.

Pour les solutions pile à combustible, et plus particulièrement pour la technologie hydrogène basse température à membrane, la densité d'énergie de stockage (autour de 1 kWh/kg) est particulièrement intéressante et permet d'atteindre des autonomies importantes avec des durées de recharge relativement courtes. De plus, les très grands progrès de ces dernières années ont permis d'allonger significativement leur durée de vie et de réduire leur coût d'acquisition. A titre d'exemple, le fabriquant Canadien Ballard annonce pour ses produits des durées de vies comprises entre 8 000 et 20 000 h, contre 2 000 h il y a une dizaine d'années. Pour le coût, les évolutions sont plus difficiles à quantifier, mais il reste nettement plus élevé que celui des solutions standard à moteur à combustion interne. Enfin, la problématique du stockage de l'hydrogène ainsi que la complexité de mise en œuvre de telles chaînes de conversion d'énergie sont autant de freins au déploiement de cette technologie pourtant prometteuse. Pour les solutions de production stationnaire, l'intégration d'énergies renouvelables, en plus des considérations écologiques classiques, offre des alternatives intéressantes pour la production d'énergie électrique. Plus particulièrement, dans le contexte des sites isolés ou îlotés dont l'accès peut être difficile, les énergies renouvelable telles que le solaire ou l'éolien apportent des réponses techniques adaptées et innovantes aux problématiques d'autonomie énergétique, permettant ainsi d'élargir le champ des applications potentielles. Cette fois encore, le coût élevé de ces installations entrave en grande partie leur déploiement et finalement seules les applications critiques n'ayant pas d'autres alternatives sont développées. C'est donc pour répondre en partie à ces différents enjeux que nous avons proposés différents travaux portant sur l'optimisation technico-économique de chaînes de conversion d'énergie électrique. Nous nous sommes pour cela appuyés sur deux applications différentes, à savoir le navire *Ar Vag Tredan* et le système de production multi-sources.

2.3.1 Optimisation technico-économique appliquée au transport naval

Nous commencerons ici par traiter l'application du navire électrique *Ar Vag Tredan*, principalement pour des raisons historiques (et par nostalgie), cette étude étant la première que nous ayons mené en tenant compte de critères économiques dans la démarche de dimensionnement. Elle nous a par ailleurs amené à développer un certain nombre d'autres travaux connexes que nous présenterons succinctement en fin de section.

Pour rappel, l'architecture du navire *Ar Vag Tredan* est composée d'un unique organe de stockage à supercondensateurs, permettant de lui assurer une autonomie d'une demi-heure environ, associé à un convertisseur statique à trois phases entrelacées (voir Figure 2.2). Nous avons choisi de découper ce problème en trois organes distincts, à savoir le stockeur à supercondensateurs, les inductances de filtrage et le pont de puissance triphasé à IGBT. L'ensemble des charges et le système de propulsion ont été réduits à un simple profil de charge, permettant de synthétiser les principales phases du parcours prévu pour cette navette. Ce profil respecte ainsi le temps moyen de la traversée, ses besoins énergétiques, ainsi que les différents paliers de puissance et notamment lors de la phase de recharge rapide à quai. Pour le choix du niveau de modélisation et des domaines physiques à prendre en compte pour les différents organes considérés, nous nous sommes principalement appuyés sur des considérations économiques. En effet, les pré-études réalisées dans le cadre de contrats de recherche avec le chantier naval STX (Loron et al., 2009, 2010) nous ont rapidement amené à la conclusion que le coût d'acquisition de la chaîne complète reposait à plus de 95 % sur le système de stockage. A première vue, il est donc tentant de conclure de ces premières études que seuls les supercondensateurs doivent être pris en considération pour aboutir à une solution optimisée économiquement. Or, pour cette application, la durée d'utilisation prévue est d'au moins 20 ans. A une telle échelle de temps, les coûts d'exploitation, répartis entre la puissance utile, les pertes et la maintenance, deviennent comparables au coût d'acquisition de la solution. La prise en compte de ces nouveaux éléments nécessite donc d'avoir une modélisation électrique suffisamment fine pour que l'évaluation des pertes soit la plus exacte possible. De plus, les supercondensateurs ont une durée de vie qui peut être très variable

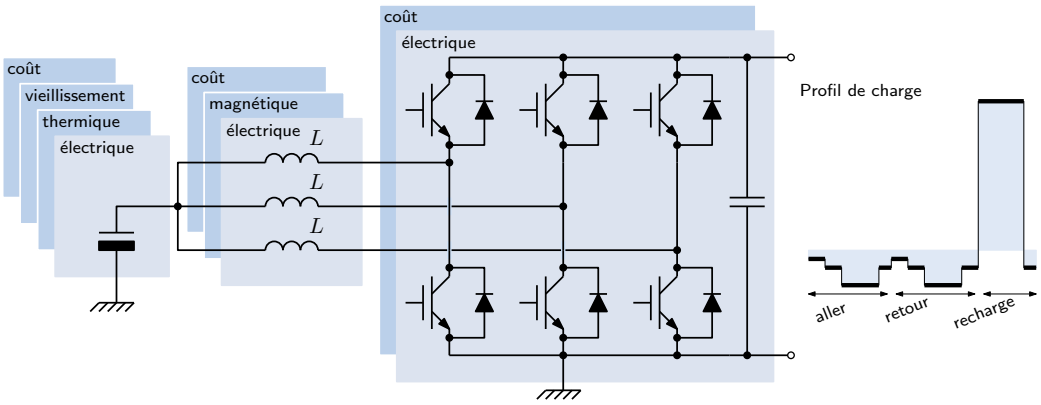


Figure. 2.2 – Modélisation multi-physique de la chaîne de stockage à supercondensateur du navire *Ar Vag Tredan*.

en fonction des niveaux et des durées d'exposition en tension et en température. Il devient donc nécessaire de tenir compte des différents couplages entre la dégradation des paramètres électriques des supercondensateurs et le cycle d'usage. C'est finalement l'ensemble de ces considérations qui nous a amené à proposer une modélisation multi-physique de la chaîne de conversion, dans le but de définir une stratégie d'exploitation et un dimensionnement permettant de minimiser le coût annualisé du système. Ce dernier est composé du coût d'acquisition des différents organes, du coût d'exploitation réparti entre les besoins énergétiques du navire pour faire ses traversées et les pertes dans les différents étages de la chaîne.

Nous avons donc proposé pour le convertisseur statique une modélisation électrique *au sens des valeurs moyennes*, permettant de s'affranchir du calcul des régimes transitoires à l'échelle de la période de découpage. Ainsi, cette modélisation tient uniquement compte des pertes en conduction et en commutation des interrupteurs de puissance. De même, l'entrelacement permet de disposer en sortie du convertisseur d'une ondulation de courant réduite. Or, l'ondulation du courant par phase étant trois fois plus élevée et le courant transmis trois fois plus faible (état réparti sur les trois phases), le rapport entre l'amplitude de l'ondulation et celle du courant efficace peut être important. Nous avons donc choisi de tenir compte de cette ondulation dans le calcul des pertes du convertisseur. L'objectif étant d'optimiser le dimensionnement de cette chaîne de conversion, les calibres nominaux en tension et en courant du convertisseur doivent pouvoir être modifiés et corrélés à son coût d'acquisition. Ici, nous nous sommes fortement inspirés des travaux de (Aubry, 2011) et (Ruellan, 2007) , qui proposent respectivement de relier les paramètres électriques des interrupteurs de puissance à leur calibre en courant et le coût d'acquisition du pont complet à sa puissance apparente. Ces relations qui avaient été obtenues empiriquement à partir de données constructeurs ont été réévaluées en tenant compte de données récentes (Olivier et al., 2014; Trieste et al., 2015). Une démarche assez similaire a été menée pour le développement du modèle des inductances de lissage. Nous avons en effet essayé de proposer une modélisation générique, utilisant un minimum de paramètres dimensionnants et à même de tenir compte des pertes électriques et magnétiques. La méthode proposée dans (Undeland et al., 1996) et (McLyman, 2016) a été utilisée et généralisée pour aboutir à un modèle d'inductance dimensionnée uniquement sur la base de l'énergie maximale stockée. Ce dimensionnement est synthétisé par une longueur caractéristique permettant de remonter aisément à l'ensemble des données géométriques. Ce modèle est paramétré par un jeu de grandeurs physiques classiques telles que la densité de courant maximale dans le bobinage, le coefficient de remplissage ou encore l'induction maximale dans le circuit magnétique. Une fois les dimensions de l'inductance obtenues, les grandeurs électriques et magnétiques sont déduites, ainsi que les pertes dans le fer et dans le bobinage qui sont obtenues respectivement à partir d'un modèle de Steinmetz et de la résistance équivalente électrique. Cette approche relativement simple et efficace permet d'assurer un dimensionnement optimal de l'inductance, respectant à la fois les contraintes de densité maximale de courant dans le circuit électrique et l'induction maximale dans le circuit magnétique. En revanche, ce modèle ne tient pas compte de contraintes thermiques liées à l'évacuation des pertes. En effet, comme nous l'avons précisé précédemment, le profil du courant par phase est susceptible de présenter un facteur de forme particulièrement contraignant (forte ondulation de découpage par rapport au courant efficace). Mais la difficulté

que représente la prise en compte de cette contrainte supplémentaire en comparaison du gain apporté sur l'estimation du dimensionnement est telle qu'il ne nous a pas semblé judicieux pour cette étude de complexifier la modélisation de cet élément [2]. Concernant la prise en compte du coût d'acquisition des inductances, nous avons suivi une démarche similaire à celle utilisée notamment dans les travaux de (Prieto, 2015; Robert, 2015; Aubry, 2011). L'idée est de ramener le coût de l'organe dimensionné à celui de sa matière première. Pour une inductance, c'est donc à partir de la quantité de cuivre et de fer qu'est déduit ce coût de matière première, auquel est ensuite ajouté un facteur multiplicateur obtenu empiriquement sur la base d'un certain nombre d'offres commerciales.

L'étape suivante consiste à définir l'ensemble des variables de dimensionnement qui seront utilisées pour évaluer une solution et son coût annualisé. Nous avons ainsi abouti à un jeu réduit de 4 paramètres physiques pour définir le dimensionnement complet de cette chaîne de conversion. Ces paramètres sont le nombre de modules de supercondensateurs avec leur répartition série-parallèle (soit deux variables), leur profondeur de décharge et le taux d'ondulation de courant après entrelacement. Les deux premières variables permettent de définir la taille du système de stockage. La profondeur de décharge est ensuite utilisée pour calculer le profil de courant obtenu sur un cycle d'utilisation complet et permet de déduire le calibre des interrupteurs de puissance ainsi que le courant maximum traversant les inductances de lissage. Ces dernières sont alors dimensionnées à partir du taux d'ondulation choisi. La simulation temporelle est ensuite réalisée afin de calculer à l'échelle d'un aller-retour l'évolution des différentes grandeurs électriques. Ces dernières permettent de calculer l'élévation de température des modules de supercondensateur, qui est utilisée pour évaluer leur vieillissement. Ces pertes ainsi que celles dans le convertisseur de puissance et les inductances de lissage, sont utilisées pour le calcul de l'énergie perdue à chaque cycle, qui est alors convertie en un coût équivalent, basé sur le prix d'achat de l'énergie électrique. Pour tenir compte de la dégradation des paramètres des supercondensateurs, à savoir une diminution de leur capacité et une augmentation de leur résistance équivalente de transfert, le cycle d'usage est réévalué de manière itérative pour chaque année. Il est à noter que dans cette étude, le profil d'usage du navire est défini par un cycle en puissance échangé au niveau du bus continu du système de conversion. Le problème rencontré avec une telle approche, qui a par ailleurs déjà été évoqué à la section 2.2, est l'apparition d'une contrainte algébrique au niveau de l'équation électrique des supercondensateurs. Cette contrainte algébrique a pu être contournée en opérant un changement de variable et en ramenant le problème à la résolution d'une équation du second degré (Trieste et al., 2015).

Enfin, nous avons proposé dans ce travail une stratégie d'exploitation à tension de recharge variable. L'idée est en fait de fixer la tension minimale, pour ensuite faire évoluer la tension maximale de recharge à mesure de la diminution de la capacité des supercondensateurs. Cette stratégie a donc deux avantages. Le premier est que la tension minimale de décharge devient fixe sur toute la durée d'exploitation. Nous l'avons vu précédemment, c'est en grande partie

2. Cette contrainte a par la suite été intégrée dans quelques uns de nos travaux réalisés en collaboration avec Nicolas Bernard. Ces études visaient à proposer une modélisation sur cycle des machines électriques pour des applications de stockage inertiel (Bernard and Olivier, 2014; Olivier et al., 2014) et de transport (Bernard et al., 2015).

cette tension minimale qui est dimensionnante pour le convertisseur de puissance et les inductances de lissage. Il est donc judicieux de ne pas faire évoluer ce paramètre pour assurer un dimensionnement nominal de la chaîne de conversion. Le second avantage est que cette stratégie tend à augmenter la durée de vie des supercondensateurs en les exposant à des niveaux de tension plus faibles en début de vie. En revanche, cette stratégie présente également quelques contraintes. Il est notamment nécessaire de suivre régulièrement l'évolution de la capacité des supercondensateurs pour adapter au mieux leur tension de recharge, ce qui implique des contraintes supplémentaires en terme d'instrumentation et de maintenance.

Ce travail nous a finalement permis d'aboutir à un certain nombre de résultats. Premièrement, nous avons pu mettre en œuvre un outil complet d'optimisation technico-économique de chaînes de conversion, proposant un ensemble de modèles synthétiques et équilibrés entre les différents domaines physiques considérés. Nous avons de plus montré la pertinence de tenir compte des différents couplages entre ces domaines pour aboutir à un dimensionnement optimisé et validé sur toute la durée d'exploitation de l'application. Enfin, le coût du dimensionnement optimisé s'avère être plus de 10 % en dessous de celui obtenu avec une approche classique, pour la part optimisable du système, c'est à dire sans considérer le coût de l'énergie électrique utile pour faire les traversées. Deuxièmement, nous avons pu au travers de plusieurs travaux réutiliser notre démarche ainsi qu'un certain nombre de nos modèles pour les appliquer à d'autres architectures (voir Table 2.1). Ainsi, nous avons proposé dans (Olivier et al., 2014) de dimensionner une

références	**objectif(s)**
(Trieste et al., 2015, Applied Energy, Elsevier), (Trieste et al., 2012, EPF) (Trieste et al., 2011, EPE)	Synthèse des travaux de thèse de Sony Trieste sur l'optimisation technico-économique du navire et sur la modélisation énergétique des supercondensateurs.
(Olivier et al., 2014, SGE) (Bernard and Olivier, 2014, SGE) (Aranguren, 2013, Master 2R)	Etudes sur le remplacement des supercondensateurs du navire par un volant d'inertie. Analyse de dimensionnement technico-économique.
(Tao, 2016, Master 2R)	Etude sur l'intégration d'une pile à combustible afin d'augmenter l'autonomie du navire pour des missions spécifiques. Modélisation et dimensionnement.
(Sajadi, 2016, Master 2R)	Etude d'un navire de pêche hybride pile à combustible et batteries. Modélisation et dimensionnement optimisé sur des critères technico-économiques.

Table 2.1 – Liste de nos travaux sur l'optimisation technico-économique autour des applications de navire électrique.

solution alternative pour ce navire en remplaçant les supercondensateurs par un système de stockage inertiel. Cette fois, nous avons préféré une approche d'optimisation multi-objectifs. En effet, cette technologie présente une très grande souplesse quant au choix des caractéristiques de densité énergétique, de puissance et de coût. Il se trouve par exemple que la solution la plus intéressante en terme de coût énergétique est aussi une solution à très faible densité massique. Dans le cadre de l'intégration d'un tel système pour une application de transport mais n'ayant pas de contrainte précise sur la masse de la solution, nous avons donc proposé de relâcher cette contrainte et de la transformer en un objectif d'optimisation. Un jeu de solutions

optimales est alors obtenu sur la base des meilleurs compromis entre le coût annualisé et la masse. Nous avons également appliqué cette démarche dans le cadre des travaux de deux MASTER récents (Sajadi, 2016) et (Tao, 2016). Le premier travail traite de l'intégration d'un système pile à combustible à l'architecture existante du navire *Ar Vag Tredan*, afin d'augmenter pour des missions ponctuelles sa zone de navigation. La pile étant dans cette étude utilisée en générateur d'électricité auxiliaire, elle peut être sous-dimensionnée en puissance, permettant ainsi de maintenir un coût raisonnable de la chaîne de conversion. Le second, financé dans le cadre des appels à projets internes SEEDS, vise à proposer une solution hybride pile à combustible et batteries, pour assurer l'autonomie énergétique d'un navire de pêche. Cette étude utilise les mêmes outils et méthodes que ceux présentés précédemment, à savoir la définition d'un cycle d'usage type pour le navire, une modélisation multi-physique de la chaîne de puissance et une optimisation du dimensionnement sur des critères technico-économiques.

Pour les lecteurs souhaitant plus de détails sur ce travail d'optimisation technico-économique, un article publié en 2015 dans la revue *Applied Energy* (Elsevier) est présenté à l'annexe A. Il synthétise et illustre les principaux résultats obtenus lors de la thèse de Sony Trieste.

2.3.2 Optimisation technico-économique d'un système multi-sources et prise en compte de la nature stochastique de l'environnement

Dans la continuité des travaux réalisés par Sony Trieste, nous nous sommes intéressés à une application de production d'énergie électrique multi-sources, avec pour objectif de proposer des solutions techniques pour des sites isolés (voir la description plus détaillée de l'application en section 1.2.2). Une des problématiques abordée dans ce travail concerne l'optimisation technico-économique du dimensionnement de ce système de production. Comme dans le cadre de l'application précédente, nous avons été amené à développer un certain nombre de modèles pour les différents organes de conversion et de stockage (voir Figure 2.3).

Nous ne développerons pas ici la démarche de modélisation adoptée pour ce travail, puisque elle est assez similaire à celle que nous avons utilisée dans les différentes études déjà présentées. La principale différence d'approche réside ici dans la nature des modèles électriques qui sont majoritairement représentés en flux de puissance. En effet, avec l'interconnexion de plusieurs chaînes de conversion, des contraintes d'équilibre entre les différentes puissances doivent être assurées. L'utilisation de modèles séparant les grandeurs classiques de tension et de courant font apparaître des contraintes supplémentaires et il devient nécessaire de rechercher à chaque pas de temps le produit de ces deux variables qui permet de respecter le niveau de puissance échangé avec le reste du système. Une telle contrainte algébrique a d'ailleurs été rencontrée dans l'application du navire lors du passage du cycle d'usage exprimé par un profil en puissance aux grandeurs électriques tension et courant des supercondensateurs. Mais bien que la majorité des organes de ce système multi-sources ait été modélisée sur la base de flux de puissance, nous avons choisi de ne pas appliquer cette approche pour les batteries. En effet, le modèle le plus répandu pour cet organe, en particulier pour la technologie plomb-acide, se présente comme un générateur de Thevenin équivalent, dont les paramètres électriques associés dépendent de

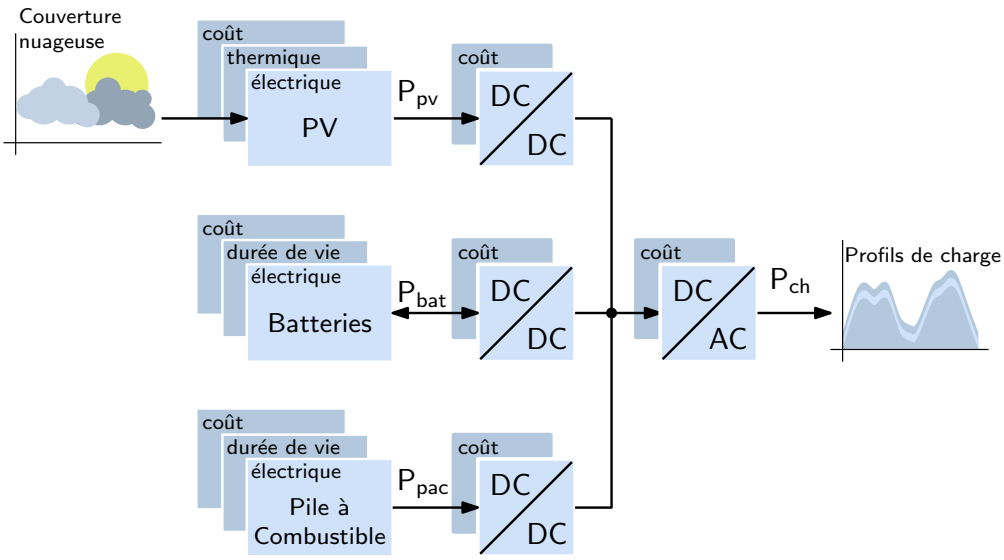


Figure. 2.3 – Modélisation multi-physique du système de production multi-sources.

l'état de charge, de la température et du courant échangé. Or, l'utilisation d'un modèle en flux de puissance nécessite de réduire ce modèle à un simple rendement. Cette réduction s'avère ici particulièrement délicate au vu du nombre de paramètres à prendre en compte et à la forme fortement non linéaire des équations électriques décrivant ces variations et couplages. Pour contourner la contrainte algébrique dû à cette modélisation, nous avons introduit un retard temporel d'un pas de temps pour permettre de calculer à chaque itération la nouvelle valeur du courant à partir de la puissance instantanée et de la valeur de la tension au pas précédent [3].

Une fois cette phase de modélisation établie, nous avons cherché à optimiser le dimensionnement de cette installation. Le choix d'une optimisation multi-objectif a été retenu afin de tenir compte de critères économiques et de continuité de service. Le coût est ici ramené à celui de l'énergie électrique produite et inclut les coûts d'acquisition, de remplacement, d'exploitation et de maintenance. La qualité de service est quant à elle estimée sur la base d'un indicateur normalisé de taux de non satisfaction de la demande, aussi appelé LPSP [4]. Cet indicateur est calculé à partir de l'énergie électrique demandée par la charge mais qui n'a pas pu être fournie par le système. La mise en balance de ces deux objectifs permet de construire un front de Pareto des solutions de dimensionnement optimales.

Reste qu'une des difficultés rencontrée dans ce processus d'optimisation est liée à la prise en compte de l'environnement. Ce dernier est composé des ressources d'énergies renouvelables d'une part et de l'utilisateur et de ses besoins d'autre part. Pour notre étude, nous avons uniquement considéré l'exploitation de l'énergie photovoltaïque, qui est aujourd'hui la solution la plus développée pour assurer le déploiement des énergies renouvelables dans le secteur de l'habitat. Pour tenir compte des fluctuations d'ensoleillement, il est donc nécessaire de tenir

3. Cette approche très courante peut aussi être interprétée comme une méthode de relaxation avec une unique itération.

4. Pour *Loss of Power Supply Probability.*

compte d'un horizon de temps suffisamment grand pour pouvoir considérer les fluctuations saisonnières, avec un pas de calcul suffisamment faible pour tenir compte des variations les plus rapides, liées cette fois à la couverture nuageuse. Les mêmes conclusions peuvent être faites quant à la prise en compte de la courbe de charge. Cette dernière intègre en effet un grand nombre de dispositifs ayant des profils de consommation très différents, variables dans le temps et corrélés aux besoins de l'usager pour un certain nombre d'entre eux. De même, les conditions climatiques telles que l'ensoleillement ou la température ont une forte influence sur l'utilisation de certaines charges. Il est donc nécessaire de prendre en compte ces couplages lors de la définition et de la synthèse du profil d'usage. Nous avons eu l'occasion d'en parler précédemment, le choix de l'horizon de simulation et du pas de temps a été guidé par la recherche d'un compromis entre le temps de simulation et la représentativité du cycle considéré. Nous sommes ainsi parti sur un horizon d'une année de simulation, avec un pas d'échantillonnage d'une heure. Pour le profil de charge, il n'est pas évident de disposer de données représentatives du type d'habitat que nous souhaitons étudier avec une durée et un échantillonnage adaptés. Il a donc été proposé de recourir à une méthode de synthèse de profil de consommation, obtenue à partir d'une journée type. L'idée est de moduler ce profil journalier en fonction du mois de l'année et sur la base de coefficients saisonniers déduits d'un panel de données expérimentales. Cette méthode nous permet alors de générer à partir de données réduites, un profil annuel respectant les différentes variations énergétiques observées. Une démarche assez similaire a été adoptée pour la modélisation du rayonnement solaire. En effet, parce que cette ressource correspond à la part d'énergie principale dans notre système, nous avons souhaité tenir compte le plus fidèlement possible de ses caractéristiques temporelles et de la nature stochastique de la couverture nuageuse. De nombreuses études se contentent d'exploiter directement les données de mesures d'un site pour l'optimisation du dimensionnement. Mais du fait de la variabilité importante des profils d'ensoleillement d'une année sur l'autre, il semble difficile de prévoir le comportement d'un tel dimensionnement sur toute sa durée d'exploitation.

Nous avons ainsi proposé, dans un premier temps, de partir d'un jeu de mesures de 5 années, entre 2009 et 2013, obtenues sur le site de Golden du NREL, Colorado. Afin de vérifier la robustesse d'un dimensionnement, chacune de ces 5 années est utilisée successivement comme référence pour l'optimisation du dimensionnement. Ce dernier est ensuite testé sur les 4 autres années de mesure. Ces projections nous permettent alors d'apprécier les variations obtenues sur chacun des deux objectifs. La figure 2.4 illustre ces résultats de projection pour les deux années 2009 et 2012 prises en référence, qui représentent respectivement l'année la moins énergétique et l'année la plus énergétique vis-à-vis de l'ensoleillement annuel. Il est possible de constater que la projection des dimensionnements obtenus sur l'année 2009 est globalement dominante. Ces derniers peuvent donc être qualifiés de fiables puisqu'ils répondent convenablement à l'ensemble des données annuelles de 2010 à 2012. L'analyse de la projection des dimensionnements obtenus sur l'année 2012 donne des résultats très différents. En effet, la quasi-totalité des solutions sont dans ce cas dominées et présentent une dispersion importante. Ainsi, les dimensionnement obtenus en utilisant le profil de rayonnement de l'année 2012 ne sont pas fiables au sens qu'ils ne permettent pas d'assurer les critères de coût et de satisfaction de ce système de production. Cette première analyse nous permet de conclure que les solutions présentant les résultats les plus

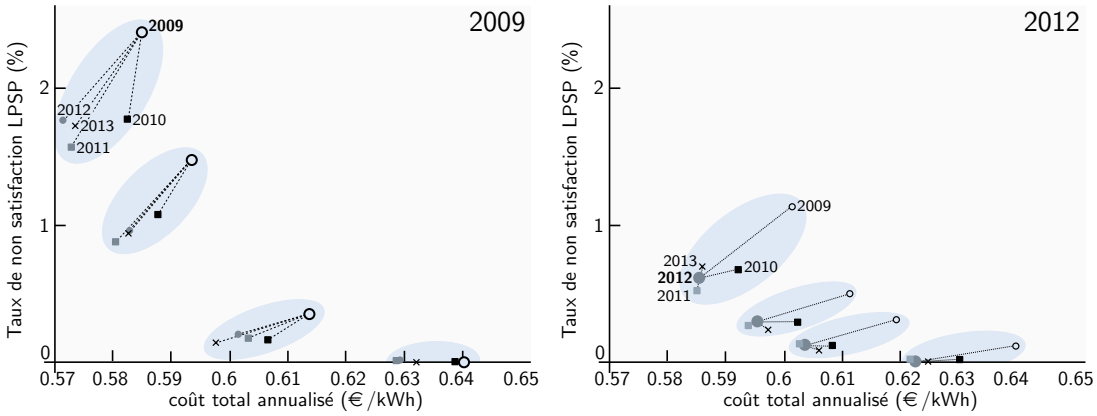


Figure. 2.4 – Projection des dimensionnements optimisés sur deux années de références différentes.

fiables sont celles obtenues avec le profil d'ensoleillement le moins énergétique, correspondant ici à l'année 2009. Inversement, les dimensionnements obtenus avec l'année la plus énergétique sont globalement peu fiables et aboutissent à des solutions pouvant être plus onéreuses et ayant des taux de satisfaction de la charge plus faibles.

Ces résultats soulèvent de nombreuses questions. Nous nous sommes dans un premier temps demandé s'il était possible d'estimer la réponse d'un dimensionnement vis-à-vis de la variation des profils d'ensoleillements annuels. Pour lever cette interrogation, une méthode simple a consisté à trouver un nombre de données de mesures suffisant pour pouvoir projeter un dimensionnement sur un très grand nombre d'années différentes. Nous avons ainsi utilisé une base de données de 14 années, obtenue pour le même site que précédemment et avec les mêmes instruments de mesure. Nous avons ensuite cherché à analyser la répartition des résultats de projection obtenus. Il est alors apparu qu'une telle étude pouvait être ramenée à une analyse statistique de la répartition des objectifs de coût et de satisfaction de la charge. Or, pour qu'une telle analyse soit valable, il est nécessaire d'avoir un nombre très élevé de données, bien supérieur aux quelques dizaines d'années de mesure dont nous pourrions disposer dans le meilleur des cas. Notre idée a donc été de proposer une méthodologie de génération de profils de rayonnement solaires qui s'appuie sur une modélisation de la couverture nuageuse. Cette dernière peut en effet être considérée comme un processus stochastique de type Markovien, i.e. une série discrète dont l'évolution future ne dépend que de l'état présent et d'une part de hasard. Un tel processus est décrit par une matrice de transition qui permet de définir la probabilité de passage de l'état présent vers un des états futurs accessible. Cette matrice peut être construite soit sur la base d'une analyse empirique des règles d'évolution des phénomènes modélisés, soit directement à partir de données de mesure en enregistrant le nombre de transitions entre les différents états. C'est cette deuxième approche que nous avons retenu pour cette étude. L'indice de clarté, qui est un coefficient correspondant à l'opacité moyenne de la couverture nuageuse, est décomposé en 10 états distincts qui nous permettent de construire une matrice de transition de taille 10 par 10. Une fois cette matrice de transition construite, il devient possible de générer des profils de couverture nuageuse respectant un certain nombre de caractéristiques statistiques

de la série de mesure initiale et en particulier sa dynamique temporelle et sa loi de distribution stationnaire. Grâce à cet outil, nous pouvons qualifier un dimensionnement non plus sur sa réponse à une année particulière, mais sur la répartition statistique de ses projections pour un ensemble d'autres profils générés. Pour illustrer cette idée, considérons une solution optimisée en ayant pris l'année 2009 comme référence et cherchons la répartition de ses projections sur un panel de 1000 années virtuelles générées à l'aide d'une matrice de transition. Nous obtenons alors un nuage de points autour de la solution de référence, traduisant les variations de coût et de non satisfaction de la charge liées à la variation des 1000 profils d'ensoleillement. Une solution peut alors être analysée sous une forme statistique, en proposant par exemple de construire l'histogramme de répartition de ces projections.

Un article de synthèse de ce travail d'analyse publié en 2015 dans la revue *Renewable Energy* (Elsevier) est donné à l'annexe B. Ce papier présente en détail la démarche qui nous a permis d'aboutir à cette approche de dimensionnement. Cette dernière nous permet de qualifier une solution obtenue de fiable, au sens où ses performances mêmes dégradées par certains profils d'ensoleillement particulièrement sévère sont prédites et associées à une probabilité d'apparition. Par exemple, nous montrons qu'un dimensionnement optimisé donnant un coût de 2 € du kWh produit [5] et un LPSP de 0.02 %, présente des fluctuations très importantes en fonction du profil d'ensoleillement généré, en particulier pour la valeur du LPSP qui peut varier entre 0 % et plus de 2 % (soit l'équivalent d'une semaine de non satisfaction de la charge par an). Il est également possible de prédire la probabilité d'avoir pour chaque année un LPSP inférieur à un certain seuil. Appliqué à ce même exemple, nous pouvons estimer que nous avons une probabilité de 90 % d'avoir un LPSP inférieur à 1 jour par an.

Face à ces premiers résultats plutôt encourageants, nous avons cherché à aller un peu plus loin en essayant de réunir l'analyse statistique précédemment décrite avec une démarche de dimensionnement optimisé. En effet, nous avons constaté qu'il existait une corrélation assez forte entre la fiabilité d'un résultat de dimensionnement et l'énergie moyenne annuelle du profil d'ensoleillement utilisé comme référence. Notre idée a donc été de chercher à isoler dans un premier temps le profil généré à partir de la matrice de transition de Markov ayant le plus faible ensoleillement annuel. Ce profil est alors utilisé dans le processus d'optimisation du dimensionnement. Un résultat de dimensionnement a ainsi été obtenu en retenant le profil le moins énergétique parmi 1000 années générées (voir figure 2.5). Il se trouve que ces résultats sont assez proches de ceux obtenus en considérant l'année 2009 comme référence pour le dimensionnement. Il se trouve qu'en effet, cette année était très différente des autres et avec une énergie annuelle nettement plus faible. Le dimensionnement obtenu avec l'année virtuelle la moins énergétique est donc globalement dominée par l'ensemble des autres années de mesure. Ce résultat tend donc à démontrer la fiabilité du critère retenu pour le choix du profil de référence.

Mais les bons résultats obtenus par cette étude doivent néanmoins être nuancés. En effet, il est

5. Ce coût ne doit pas être comparé à celui donné à la figure 2.4 puisque le lieu considéré pour ces deux études est différent, de même que l'architecture du système considéré. En effet, dans le papier présenté en annexe, nous avons considéré uniquement des panneaux photovoltaïques et des batteries de stockage, sans pile à combustible.

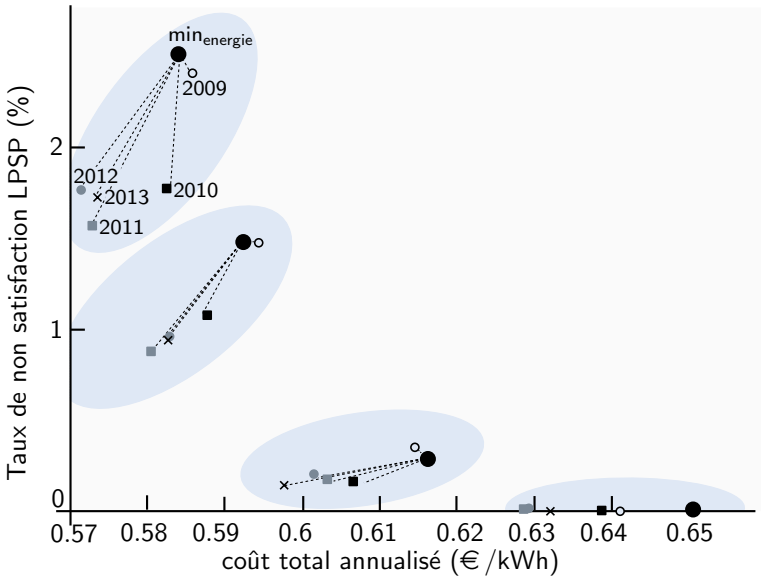


Figure. 2.5 – Projection des dimensionnements optimisés sur l'année la moins énergétique générée à partir de la matrice de transition de Markov.

tentant de chercher le ou les critères clés d'un profil d'ensoleillement, qui permettrait d'aboutir à un dimensionnement dominé par la totalité des autres années mesurées ou simulées. Ainsi, en poussant ce raisonnement jusqu'au bout, le tirage d'un nombre infini de profils aléatoires finirait par donner un profil d'énergie annuelle nulle, ce qui aboutirait à un dimensionnement de taille infinie et donc capable de répondre à n'importe quel autre scénario. L'enjeu semble donc plutôt de rechercher des compromis réalistes entre le surdimensionnement d'une installation, donc son surcoût, et son gain réel en termes de taux de non satisfaction. C'est autour de ces perspectives que nous travaillons actuellement en cherchant également à étendre la prise en compte du comportement stochastique au profil de charge de l'usager.

références	**objectif(s)**
(Bouabdallah et al., 2013a, ICRERA) (Bouabdallah et al., 2013b, IECON)	Dimensionnement technico-économique de systèmes de productions multi-sources photovoltaïques.
(Bouabdallah et al., 2015, Renewable Energy, Elsevier), (Bouabdallah et al., 2016, ICIT)	Prise en compte de la nature stochastique de la ressource solaire dans le dimensionnement d'une installation de production photovoltaïque.

Table 2.2 – Liste de nos travaux sur le dimensionnement des systèmes de production d'énergie électrique multi-sources.

2.4 Modélisation multi-physique d'un système pile à combustible

Nos travaux menés sur l'intégration de systèmes pile à combustible au sein de chaînes de conversion d'énergie ont démarré en même temps que s'est mis en place le projet pédagogique

Polyjoule (voir section 1.2.3). Cette activité est assez peu standard dans sa forme, puisqu'elle est, dès le départ, orientée prioritairement vers un objectif de formation par projet d'étudiants ingénieurs. C'est alors l'ensemble des tâches et travaux complémentaires à ceux des étudiants qui nous a permis d'amorcer une activité parallèle et orientée vers la recherche. Ces travaux concernent principalement la modélisation multi-physique de systèmes pile à combustible pour, d'une part, aboutir à un dimensionnement optimal de la chaîne de conversion et, d'autre part, proposer un outil de diagnostic performant et adapté à des modes de fonctionnement instationnaires.

Nos activités de modélisation en vue d'optimiser les performances d'une chaîne de conversion sont en lien direct avec les objectifs du projet *Polyjoule* qui consiste, pour rappel, à minimiser la consommation globale d'un véhicule, dont la conception mécanique et électrique est à la charge des participants. Pour des raisons pratiques, les premières réalisations de la chaîne de conversion se sont très largement appuyées sur des solutions industrielles. Or, ces solutions n'ayant pas été conçues sur le seul critère d'efficacité, il s'est rapidement avéré qu'elles étaient mal adaptées à nos objectifs. Nous nous sommes donc rapidement lancés dans la conception d'une chaîne électrique complète. Pour le véhicule urbain *Cityjoule*, cette dernière se compose d'une pile à combustible construite autour d'un empilement de 28 cellules de la société MES, d'un convertisseur de puissance comprenant un bras de pont et une inductance de lissage, d'un moteur à courant continu sans fer de la société MAXON et d'une transmission mécanique par chaîne. Cette architecture de base peut ensuite être dupliquée et adaptée en fonction des besoins de la course et du circuit.

2.4.1 Conception optimale de la chaîne électrique : Du réservoir à la roue

Le premier travail d'optimisation que nous avons mené concerne la gestion des accessoires de pile. En effet, la plupart des systèmes commerciaux ont une gestion tournée vers la fiabilité et la durée de vie des cellules, au détriment des performances énergétiques. Notamment, de par leur fonctionnement en anode bouchée et afin d'assurer des conditions hydriques optimales en cœur de pile, des purges et courts-circuits sont réalisés à intervalles réguliers [6]. La suppression de ces deux opérations nous amène alors à un fonctionnement en mode exclusivement bouché côté hydrogène et à ne plus maîtriser aussi parfaitement l'état du cœur de pile. Cela entraîne donc une dégradation des performances dans le temps et nécessite de redéfinir la stoechiométrie en air, qui dépend principalement de la température de fonctionnement et du courant fourni. Un premier travail proposé dans (Buaud et al., 2008) a consisté à définir expérimentalement la stoechiométrie critique en utilisant un indicateur appelé *flooding number*, qui s'avère dépendre principalement de la température de pile. A cette valeur de stoechiométrie minimale, les meilleures performances sont obtenues mais avec un risque de noyage important sur la durée d'utilisation correspondant à une course complète (environ 1 h). L'utilisation d'une stoechiométrie supérieure va plutôt entraîner des conditions de fonctionnement asséchantes pour la membrane, ce qui éloigne les risques de noyages, mais dégrade également les performances de la pile ainsi que sa durée de

6. Ce mode de fonctionnement est par exemple rencontré sur les solutions MES et Horizon.

vie. Nous verrons un peu plus loin, à la section 2.4.2, que cette problématique de compromis entre fiabilité et performance des systèmes pile à combustible nous a amené à rechercher des outils de diagnostic de cet état hydrique en cœur de pile.

Un second travail mené sur cette chaîne de conversion a été l'optimisation du convertisseur de puissance avec un objectif d'efficacité énergétique. Ce convertisseur, directement connecté au moteur électrique de propulsion, présente une architecture classique composée d'un bras de pont et d'une inductance de filtrage (le moteur utilisé étant un moteur à courant continu sans fer). Pour le véhicule *Cityjoule*, 2 chaînes de conversion sont utilisées, chacune étant dédiée à l'alimentation de l'une des 2 roues arrières. La puissance que doit pouvoir fournir chaque convertisseur varie en fonction du point de fonctionnement et est située entre 40 et 250 W. Compte tenu des faibles puissances mises en jeu dans la propulsion du véhicule, une des difficultés rencontrée dans le phase de modélisation a été que chaque composant, qu'il soit dédié à la partie puissance ou à la commande, doit être pris en compte pour aboutir à une bonne estimation du rendement de ce convertisseur. Nous avons ainsi été amenés à considérer les pertes en conduction et en commutation de l'étage de puissance, les pertes électriques et magnétiques de l'inductance de lissage, les pertes dans le câblage et les liaisons de raccordement, ainsi que la consommation de la partie contrôle-commande et de l'instrumentation. Ce travail, développé en détails dans (Olivier et al., 2012), nous a alors permis d'optimiser la structure et le dimensionnement du convertisseur sur un cycle d'usage représentatif d'une course complète (voir Figure 2.6).

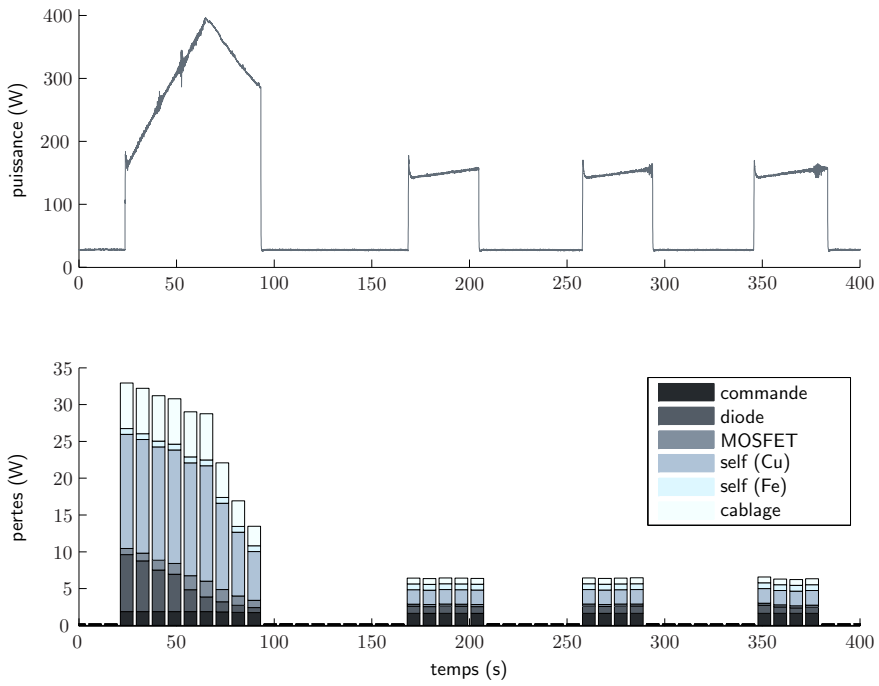


Figure. 2.6 – Evolution des pertes du convertisseur de puissance du véhicule *Cityjoule*, sur une séquence composée d'un démarrage et de 3 accélérations successives.

Cette démarche de modélisation a dans un second temps été généralisée à la chaîne de conversion complète. En effet, la recherche du ou des points de fonctionnement optimaux du véhicule ne peut pas être traitée en étudiant séparément chaque organe mais plutôt en ayant une approche globale permettant de tenir compte des différents couplages physiques. Par exemple, l'estimation du rendement de conversion du système pile avec ses accessoires doit tenir compte du profil de puissance fourni par la pile, qui dépendra lui même du besoin mécanique et du rendement de conversion de l'ensemble moteur-convertisseur. De même, ce profil en puissance nous permet de remonter au besoin en oxygène et aux pertes dans la pile, pour finalement aboutir à une estimation de la consommation des accessoires de refroidissement et d'alimentation en air. La Figure 2.7 illustre de façon schématique la chaîne de conversion et les différents organes pris en compte dans cette étude, ainsi que les différents domaines physiques qui leur sont associés. Ce véhicule a un usage défini par un parcours imposé qui doit respecter un certain nombre de contraintes, telles que la vitesse moyenne qui ne peut être inférieure à une certaine valeur minimale (entre 20 et 30 km/h selon le circuit) ou encore l'obligation de faire un arrêt à chaque tour. L'optimisation de ce véhicule nécessite donc de tenir compte de ce profil d'usage et doit être optimisé sur cycle. Nous avons ainsi proposé une modélisation qui tient compte des régimes dynamiques à la fois mécaniques et thermiques. Pour les phénomènes électriques, nous avons retenu une modélisation statique pour la pile et le moteur, et une modélisation au sens des valeurs moyennes pour le convertisseur de puissance Olivier et al. (2012); Wasselynck et al. (2012). Malgré son apparente simplicité, la modélisation thermique de la pile à combustible a nécessité un travail relativement conséquent, que nous avons par ailleurs mené en collaboration avec nos collègues du Laboratoire Thermocinétique de Nantes. En effet, la difficulté a été de réussir à proposer un modèle qui soit le plus simple possible, tout en étant capable de tenir compte des principaux flux de chaleur produits et évacués. Il se trouve que l'estimation de la chaleur produite est assez simple puisqu'elle est essentiellement liée à la réaction exothermique de l'hydrogène avec l'oxygène. Il est en revanche plus complexe d'estimer l'ensemble des phénomènes d'évacuation de cette chaleur. Nos investigations nous ont finalement amené à considérer la chaleur évacuée par convection naturelle, par convection forcée dans les canaux

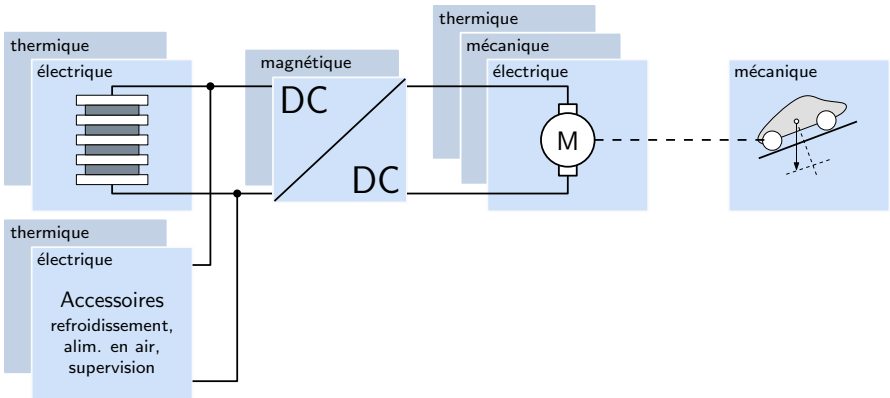


Figure. 2.7 – Architecture de la chaîne de conversion du véhicule *Cityjoule* faisant apparaître les différents domaines physiques modélisés.

d'alimentation en air et produite par le ventilateur de refroidissement, ainsi que par le changement de phase liquide-vapeur de l'eau produite par la réaction électrochimique. L'équation bilan de ces différents flux de chaleur permet ainsi d'estimer la variation de température de la pile à combustible, avec en retour une action sur le ventilateur de refroidissement qui est alors utilisé comme actionneur principal pour la régulation de température de la pile Olivier et al. (2015). Une fois que l'ensemble des organes a été modélisé, nous avons proposé d'optimiser la stratégie de pilotage dans le but de minimiser la consommation totale d'hydrogène sur une course complète. Il se trouve en effet que les organes du système de propulsion présentent tous un optimum énergétique, mais à des points de fonctionnement possiblement très différents. La pile à combustible avec ses accessoires va par exemple présenter ses plus forts rendements à faible charge. Inversement, le moteur de propulsion aura des rendements électromécaniques maximums à haute vitesse et fort couple, c'est à dire à son fonctionnement à puissance nominale. Nous avons donc réalisé une cartographie complète du rendement de la chaîne de propulsion, en fonction de la vitesse du véhicule et du courant moteur, qui n'est autre que l'image du couple à la roue. Cette cartographie nous a ainsi permis de localiser la zone de fonctionnement *vitesse-couple* optimale. La Figure 2.8 illustre un tel résultat de cartographie auquel a été ajouté les courbes de fonctionnement statique pour différentes vitesses de vent. La zone située aux dessus de ces courbes de charge donne lieu à une accélération du véhicule. Inversement, en

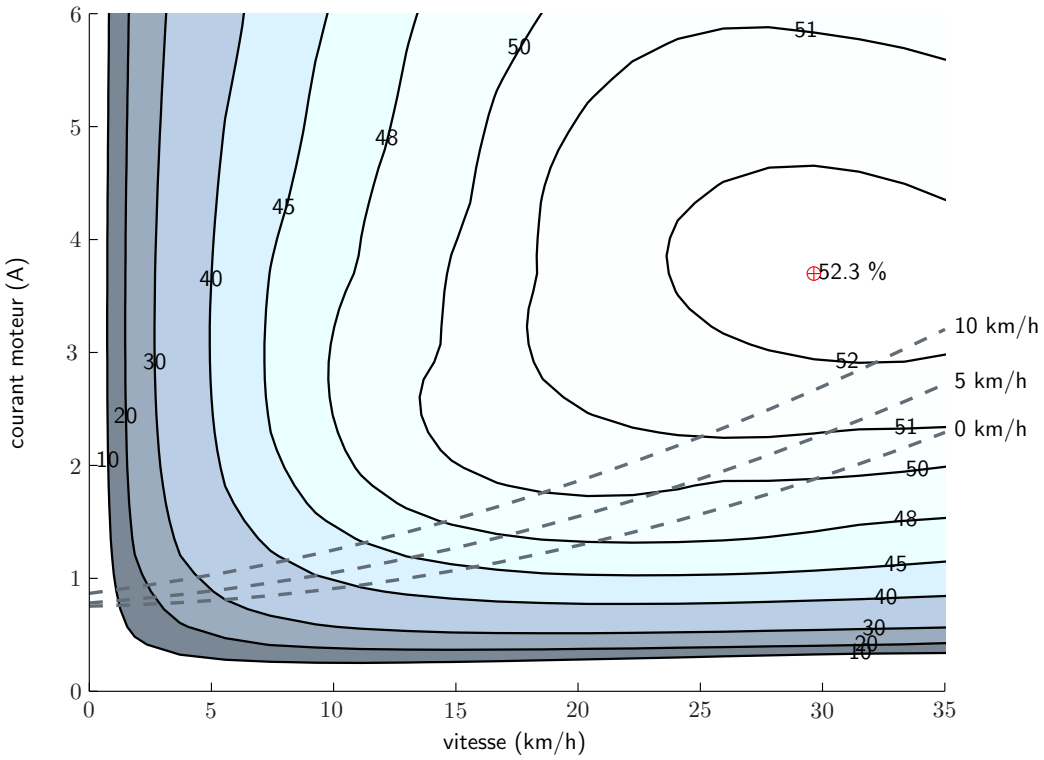


Figure. 2.8 – Cartographie du rendement de la chaîne de conversion du véhicule *Cityjoule* pour une température ambiante de 25 °C et une température de pile de 50 °C. En pointillé sont indiquées les points de fonctionnement statique pour différentes vitesses de vent.

se plaçant en dessous, le véhicule décélère. A la vitesse moyenne imposée, qui est comprise entre 25 et 30 km/h, le point de fonctionnement optimum de plus de 52 %, situé autour de 3.5 A moteur. Il donne donc lieu à une accélération du véhicule. De ce fait, en voulant assurer une vitesse constante, le rendement de chaîne passe en dessous des 50 % avec des conditions sans vent. C'est la raison pour laquelle nous avons proposé un fonctionnement cyclique en tout-ou-rien, constitué d'une succession de phases d'accélérations avec un courant optimum et de phases de décélérations à courant nul. Grâce à une stratégie de mise en veille d'un certain nombre d'organes lors de ces phases de roue libre, le rendement énergétique moyen obtenu est très proche du rendement maximum. Ce mode de fonctionnement nécessite donc de définir les bornes minimales et maximales du cycle de vitesse, qui peut aussi être ramené à la superposition d'une vitesse moyenne et d'une ondulation. Dans (Wasselynck et al., 2012; Trichet et al., 2011), une analyse paramétrique nous a conduit à la conclusion assez logique que le compromis se situe entre les pertes aérodynamiques additionnelles liées à l'ondulation de vitesse qu'il faut minimiser, d'une part, et les pertes inertielles liées à la mise en vitesse du moteur de propulsion et de sa transmission pour atteindre la vitesse d'accrochage de la roue libre, d'autre part. Une autre problématique dans le choix de la stratégie de pilotage de ce véhicule est liée cette fois à la nature du cycle d'usage, qui impose un arrêt complet à la fin de chaque tour. Il est donc nécessaire d'intégrer une phase de démarrage, qui pose le problème du choix de la meilleure trajectoire à prendre dans le plan *vitesse-courant*. Dans nos derniers travaux présentés dans (Olivier et al., 2015), nous proposons d'optimiser cette stratégie de pilotage en nous appuyant sur une modélisation dynamique du véhicule et en l'associant à un algorithme d'optimisation pas essaim particulaire. Les variables de dimensionnement son réduits à des paramètres du profil de vitesse (vitesses minimales et maximales) et aux valeurs de courant moteurs à associer aux différentes phases de fonctionnement (démarrage puis vitesse moyenne constante). Nous avons également considéré le rapport de transmission comme une variable d'optimisation, ce dernier permettant d'assurer l'alignement du point de fonctionnement optimum avec la vitesse moyenne.

Cet outil nous sert aujourd'hui à valider un certain nombre de choix stratégiques lors de nos tentatives, en fonction des conditions météorologiques (température et vent) et de la configuration du circuit (longueur et pentes). Nous avons pu valider en partie ce modèle multi-physique grâce à différentes mesures réalisées en course. Il reste néanmoins difficile d'instrumenter l'ensemble des grandeurs utiles, certaines d'entre elles n'étant pas forcément accessibles.

Outre les challenges scientifiques et techniques que nous avons été amenés à relever toutes ces années, ce projet constitue à lui seul un véritable outil pédagogique. Sa nature pluridisciplinaire a notamment favorisé le rapprochement de plusieurs structures d'enseignement ayant des spécialités et niveaux de formations complémentaires, ce qui a permis de mettre en place des projets scientifiques entre étudiants de BTS, DUT et écoles d'ingénieurs. Au départ, ces projets étaient réalisés principalement en dernière année de cycle ingénieur au travers de projets de fin d'études. Depuis 2012, se sont ajoutés des stages de MASTER Recherche, qui nous ont permis de mener un certain nombre d'études en amont, en parallèle des activités menées par l'association d'étudiants.

2.4.2 Diagnostic des piles à combustible par une approche de modélisation multi-physique

Entre 2010 et 2013, la thèse de doctorat de Stéphane Chevalier [7] nous a permis de nous concentrer sur les problématiques de diagnostic par spectroscopie d'impédance des piles à combustible, en nous appuyant sur une modélisation multi-physique du cœur de pile. La principale ambition de ce travail était de proposer un outil de diagnostic fonctionnant à l'échelle d'un *stack* complet, réalisé à partir de l'assemblage d'un nombre important de cellules. Or, dans une telle configuration, il existe de nombreuses interactions entre les domaines fluidiques, électriques et thermiques entre cellules, ce qui nécessite alors le développement d'outils complexes, capables de détecter de tels phénomènes au niveau local. Nous nous sommes ainsi appuyés sur la technique de spectroscopie d'impédance, qui s'est avérée avec le temps être une méthode particulièrement efficace pour discriminer les nombreux phénomènes couplés en cœur de pile. Cette méthode consiste à imposer un point de fonctionnement de la pile et à réaliser de légères perturbations en courant ou en tension. Les procédés les plus classiques utilisent une stimulation en courant sinusoïdale dont la fréquence évolue dans la bande des dynamiques que l'on souhaite analyser. Ainsi, à chaque fréquence correspond une valeur d'impédance complexe, pouvant être représentée par un module et un argument. Mais pour pouvoir être interprété correctement, ce spectre d'impédance doit être associé à un modèle direct suffisamment riche pour permettre par un processus d'inversion de remonter à d'éventuels défauts locaux. Pour le diagnostic, ce modèle s'appuie en règle générale sur des circuits équivalents, pour lesquels chaque composant électrique représente un phénomène bien précis. Le succès de cette méthode repose sur sa facilité d'implémentation et sa simplicité, qui lui permettent d'être aisément intégré dans un processus d'analyse de mesures en temps réel. Reste que certains phénomènes physiques ne peuvent pas être modélisés facilement par de simples composants électriques. Il est alors nécessaire d'ajouter des éléments non linéaires tels que l'impédance de Warburg, dont le module est décrit par une puissance non entière de la fréquence, ou encore les CPE (pour *constante phase element*) qui modélise très bien le comportement fréquentiel d'une capacité double couche. Reste qu'une telle approche de modélisation de type circuit pose de nombreux problèmes d'interprétation physique des phénomènes mesurés et en particulier du fait de la présence de couplages entre les cellules d'un même *stack*.

Nous avons donc choisi de développer un modèle multi-physique de pile à combustible, suffisamment simple pour être réglé par un nombre raisonnable de paramètres, mais également avec suffisamment de physique pour tenir compte, de façon efficace, des principaux phénomènes à l'œuvre en cœur de pile. Ce modèle est basé sur une représentation 1D au niveau de l'assemblage (canal, GDL, électrode et membrane), puis dans un second temps le long du canal pour tenir compte de la variation de concentration en oxygène entre deux mailles successives du canal. Ce modèle est alors calculé pour l'ensemble des cellules de la pile, ces dernières ayant chacune leur propre jeu de paramètres à identifier. Outre la mise en œuvre d'un tel modèle multi-physique pour le diagnostic, un apport important de ce travail concerne la prise en compte de la sensibilité

7. Thèse ayant reçue un financement de la région Pays de Loire via le programme de recherche PERLE2.

des paramètres à identifier en fonction du point de fonctionnement du système. Ce travail d'analyse nous a conduit à réduire significativement le nombre de paramètres à identifier, passant de 7 à 4 pour chaque cellule. Il a de plus été montré qu'un seul jeu de paramètres était à même de reproduire fidèlement le comportement d'une cellule pour un large ensemble de points de fonctionnement.

Cette approche de diagnostic de *stacks* complets à partir d'une modélisation physique du cœur de pile a pu être validée expérimentalement sur un banc dédié. Ce banc est à même de contrôler l'ensemble des conditions opératoires thermiques, électriques et fluidiques et dispose d'un analyseur d'impédance qui permet de mesurer simultanément l'impédance de chaque cellule. L'objectif que nous nous sommes fixé est d'être capable de détecter en un temps suffisamment court les conditions opératoires locales, i.e. à l'échelle de la cellule, pouvant engendrer à moyen terme un noyage ou un assèchement. Pour cela, il a été proposé d'ajouter la stœchiométrie en air aux précédents paramètres physiques à identifier. Il se trouve en effet que chaque point de fonctionnement sur la courbe de polarisation peut être associé à un *flooding number*, qui, pour rappel, permet de remonter à la valeur de stœchiométrie critique. Ainsi, une mesure locale de stœchiométrie permet pour chaque cellule de prédire ses conditions de fonctionnement et leur degré de criticité. La Figure 2.9 montre un exemple de test réalisé sur un *stack* de 16 cellules, pour lequel nous avons volontairement réduit l'alimentation en air afin de s'approcher des conditions de fonctionnement à la limite de noyage. Cet essai se focalise sur 3 cellules ayant des conditions de fonctionnement assez différentes. Une première analyse d'impédance est réalisée au bout de 1350 secondes, après une phase d'initialisation suivie d'une purge à la cathode. Une seconde mesure d'impédance est réalisée 1000 secondes plus tard et enfin une dernière analyse est effectuée au bout de 3200 secondes, suite à une purge à l'anode visant à revenir vers un état initial stable. La cellule (7) qui a la stœchiométrie la plus basse (variant entre 2 et 3) est aussi la cellule montrant la plus grande instabilité dans son fonctionnement, avec un écroulement de la tension autour des 3000 secondes, qui est une conséquence typique d'un noyage de la cellule. La cellule (3) qui à une stœchiométrie constante autour de 3.0 présente des performances légèrement altérées, mais reste stable tout au long l'expérience. Enfin, la cellule (10) est identifiée comme ayant la stœchiométrie la plus élevée (autour de 6) et s'avère être la cellule montrant les performances de fonctionnement les plus stables.

Ce seul essai est particulièrement intéressant pour trois raisons. La première est qu'il montre une réelle corrélation entre la stœchiométrie locale au niveau de chaque cellule et sa tendance à l'engorgement. La seconde est qu'il est potentiellement possible de prédire un éventuel noyage avant que ce dernier n'apparaisse. En effet, une première mesure d'impédance est réalisée autour de t=1350 s, et permet déjà d'identifier les cellules ayant les stœchiométries les plus critiques et donc en condition de noyage. Enfin, il permet de montrer qu'à l'échelle d'un *stack* les stœchiométries de chaque cellule sont très dispersées et que ce phénomène est même amplifié par l'engorgement de certaines d'entre elles. Ces dernières vont en effet présenter une résistance hydraulique plus forte, qui renforcera donc l'apport de réactifs vers les cellules saines. Un tel effet nous amènent à conclure que de grandes disparités d'état apparaissent à l'approche de conditions de fonctionnement en sous stœchiométrie et qu'il est donc particulièrement utile de

disposer d'un outil de diagnostic pour anticiper ce type de défaut, en particulier lorsque l'on cherche des fonctionnements optimaux qui nous amènes à jouer avec ces frontières.

2.5 Conclusion

Ce chapitre nous a permis de présenter l'ensemble de nos activités portant sur la modélisation des chaînes de conversion, en vue de leur optimisation et de leur diagnostic. Nous avons essayé de montrer du mieux possible la cohérence quant à notre approche de différents problèmes. Le point commun de tous nos travaux repose sur la nécessité d'optimiser leur dimensionnement et leur fonctionnement, pour des raisons de viabilité économique dans le cas du navire *Ar Vag Tredan*, pour des raisons purement fonctionnelles dans le cas du véhicule *Cityjoule*, et pour ces deux raisons avec le système de production d'énergie multi-sources. Dans le cadre de l'application de navire, nous avons porté un effort particulier sur la mise en œuvre des très nombreux modèles techniques et économiques, à même de nous permettre d'aboutir à une solution de dimensionnement optimisée en coût et sous contrainte de durée de vie. La principale difficulté rencontrée dans l'application du véhicule urbain *Cityjoule* était due à la forte dispersion des pertes et consommations entre les différents étages de la chaîne de conversion. Une modélisation fine de tous ces étages a abouti à un modèle énergétique particulièrement fidèle, qui nous a permis de proposer plusieurs optimisations successives tant sur l'architecture de cette chaîne que sur son pilotage. Cette même application nous a amené à proposer une modélisation multiphysique de la pile à combustible, mais dans un objectif de développer cette

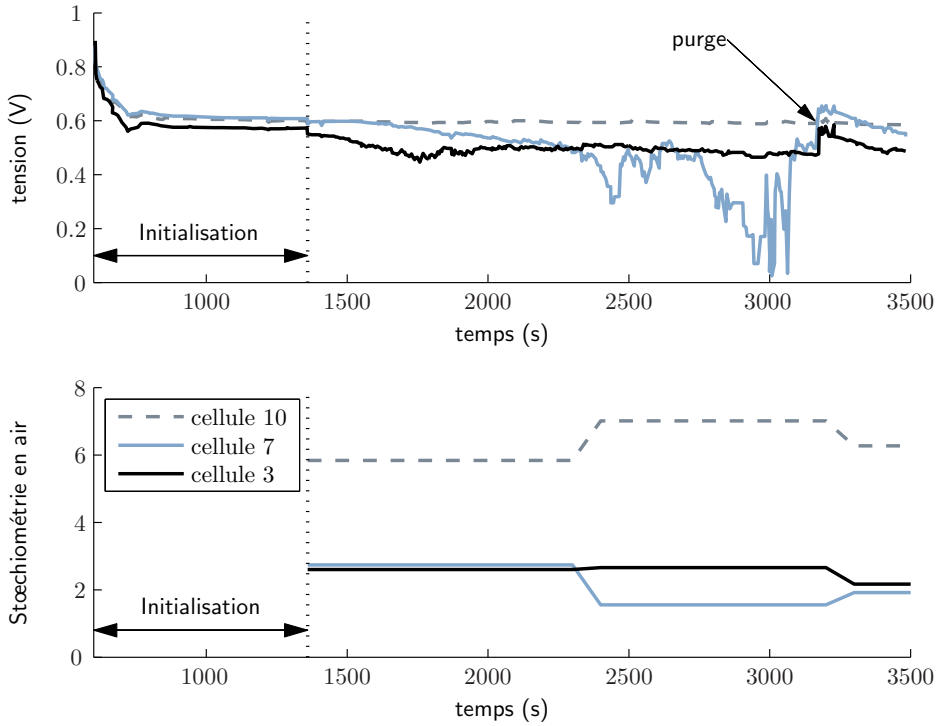


Figure. 2.9 – Exemple d'estimation locale de la stœchiométrie en air, à l'échelle de chaque cellule.

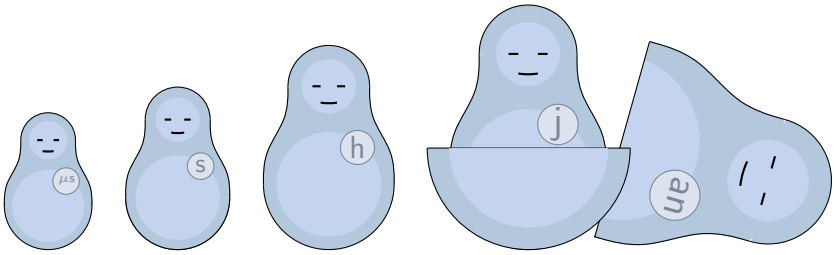
références	**objectif(s)**
(Olivier et al., 2010b, VPPC) (Trichet et al., 2011, VPPC) (Wasselynck et al., 2012, Energy, Elsevier) (Olivier et al., 2012, EJEE journal) (Olivier et al., 2015, VPPC)	Dimensionnement et optimisation de chaînes à pile combustible pour des véhicules à très haute efficacité énergétique.
(Chevalier et al., 2012, EMHyTec) (Chevalier et al., 2013a, IEEE PHM) (Chevalier et al., 2013b, FDFC) (Chevalier et al., 2013c, IJHE, Elsevier) (Chevalier et al., 2014, Fuel Cells, Willey) (Barbouche et al., 2016, Energy Procedia, Elsevier)	Modélisation multi-physique de systèmes pile à combustible en vue de leur diagnostic par spectroscopie d'impédance.

Table 2.3 – Liste de nos travaux sur la modélisation multi-physique et l'optimisation de système pile à combustible.

fois un outil de diagnostic capable d'estimer les conditions hydriques en cœur de pile. Enfin, l'application de production multi-sources nous a amené à nous interroger sur l'influence d'un environnement complexe vis-à-vis du dimensionnement technico-économique d'un tel système.

Pour tous ces travaux d'optimisation, nous avons été confrontés de façon récurrente au problème du temps de calcul. Même si nous avons essayé de proposer une approche méthodologique assez générique pour formuler nos problèmes de simulation (voir section 2.2), il n'en demeure pas moins que plusieurs itérations sont nécessaires pour aboutir à un temps de simulation acceptable. Ces itérations concernent la nature des modèles et des couplages à prendre en compte, les paramètres de simulation en termes d'horizon et de pas de calcul (ou de tolérance), ainsi que les réglages de l'algorithme d'optimisation. C'est généralement un compromis entre ces trois leviers qui permet d'aboutir à des résultats *justes satisfaisants*, qui présentent un bon compromis entre le temps de résolution et la précision obtenue. Il se trouve que ce travail de formulation n'a pas été trivial dans le cas de l'application du navire électrique. En effet, ce dernier nécessitait de tenir compte de couplages entre domaines physiques à de multiples dynamiques. Ainsi, la dégradation des supercondensateurs doit tenir compte du cycle en tension et en température, qui eux-mêmes dépendent des paramètres électriques des supercondensateurs. S'ajoute à cela un cycle d'usage décrit à différentes échelles de temps, allant de la traversée à la durée de vie de plusieurs dizaines d'années, nécessitant alors de calculer les phénomènes transitoires de différents domaines physiques (en particulier thermique et électrique). Il est difficile de découpler tous ces phénomènes ; seule une approche empirique nous permet d'aboutir à une formulation du problème et à une méthode de simulation compatible avec un objectif d'optimisation. N'ayant pas trouvé cette démarche satisfaisante, nous avons cherché une formulation des problèmes multi-physiques capable de tenir compte automatiquement de l'ensemble de ces contraintes de simulation. C'est ce travail, développé au court de la thèse de Sadok Hmam, qui fait l'objet du chapitre suivant.

3 Outils de simulation des systèmes multi-physiques et multi-échelles de temps



3.1 Introduction

Le chapitre précédent a présenté nos différents de travaux autour de la modélisation et de l'optimisation des systèmes électriques. Le point commun de tous ces travaux est de prendre en compte des phénomènes physiques de natures différentes et agissant à des échelles de temps très éloignées les unes des autres. Ainsi, la modélisation du navire *Ar Vag Tredan*, qui est sans doute l'application la plus contraignante que nous ayons eu à considérer, tient compte de manière couplée des domaines électriques et thermiques, ainsi que du phénomène de vieillissement des supercondensateurs. Si nous devions considérer le problème complet, nous aurions à tenir compte de phénomènes transitoires électriques liés aux commutations de l'étage de puissance, sur un horizon temporel de 20 années, correspondant à la durée d'exploitation attendue pour ce navire.

Bien sûr, se lancer dans un tel calcul a peu de sens et pour plusieurs raisons. La première est que tous ces phénomènes n'ont pas forcément besoin d'être pris en compte simultanément. Le découpage du convertisseur de puissance peut être utile à l'estimation des pertes et du niveau de pollution électromagnétique, mais n'aura que peut d'intérêt pour le calcul du vieillissement des supercondensateurs. Ce même vieillissement peut de même être négligé aux échelles de temps

inférieurs à quelques mois voire quelques années, en particulier pour le calcul des transitoires électriques. Une seconde raison est que la simulation d'un tel système multi-physique nécessite rarement de procéder à un calcul exhaustif de la variation de ses états sur toute sa durée de vie. De nombreuses phases vont en effet être successibles de se répéter régulièrement et l'information obtenue à un certain instant peut être extrapolée sur des durées pouvant être importantes. Enfin, le contournement de la résolution complète d'un tel problème s'explique surtout par sa durée de simulation trop importante pour être compatible avec un objectif d'optimisation. Car si les deux premiers points évoqués permettent d'optimiser le temps de simulation en omettant le calcul d'un certain nombre de couplage et d'intervalles de temps, ils nécessitent un travail en amont d'analyse particulièrement important, afin d'aboutir à une formulation réduite du problème initiale. C'est ce retour d'expérience par rapport aux applications que nous avons eu a traiter dans nos différents travaux qui nous a motivé à proposer des solutions et des outils méthodologiques pour répondre en partie à ces problèmes de simulation des systèmes multi-physiques.

Ce chapitre est donc consacré aux derniers travaux que nous avons menés dans le cadre de la thèse Sadok Hmam (Hmam, 2016). Ils visent à proposer une nouvelle formulation de problèmes multi-physiques, s'appuyant sur une décomposition en cycles d'usage. Nous verrons que cette formulation est inspirée de nos tous premiers travaux réalisés sur l'analyse des cycles limites apparaissant au sein de correcteurs auto-oscillants. Ces derniers peuvent en effet être étudiés en ramenant un problème continu périodique à un système récursif discret. Cette formulation réduite ne considère alors que les variations d'état lors du passage d'un cycle au suivant, sans chercher à décrire plus finement la trajectoire entre ces deux instants. Cette approche peut être interprétée comme une homogénéisation temporelle permettant de ne plus considérer les dynamiques inférieures à l'échelle du cycle, mais uniquement leur influence apparente aux échelles supérieures. Le résultat de cette étape n'est pas très différent d'une modélisation au sens des valeurs moyennes qui permet donc de découpler les dynamiques les plus lentes des plus rapides. De plus, cette formulation sur cycles a été écrite de manière suffisamment générique pour permettre de construire aisément des cycles complexes en s'appuyant de manière récursive sur des ensembles de cycles de plus bas niveaux. Nous verrons ainsi qu'une année pourra être décomposée en cycles journaliers, eux-mêmes décomposés en cycles horaires, qui eux mêmes seront décomposés en une succession de cycles de découpage. Plusieurs extrapolations pourront alors être réalisées à des échelles de temps différentes, selon un schéma récursif tel qu'illustré à la Figure 3.1. L'ensemble de ce travail de formulation sur cycles est présenté à la section 3.2.

Nous avons ensuite proposé une reformulation d'une classe de solveurs numériques classiques, pour que ces derniers puissent réaliser des extrapolations temporelles entre ces différents cycles. Nous verrons alors que la seule contrainte venant s'ajouter à une formulation continue classique est le nombre de pas d'extrapolation qui ne pourra pas être égal à n'importe quelle valeur entière. Hormis cette limitation, nous montrerons que cette réécriture présente d'aussi bonnes performances, dans le cas de solveurs explicites comme implicites. Ce travail sera présenté à la section 3.3.

Enfin, cette méthodologie sera illustrée à la section 3.4 en nous appuyant sur l'application du

navire électrique *Ar Vag Tredan*. Nous montrerons ainsi que sans faire aucune hypothèse *a priori* sur le modèle et en suivant notre formalisme de décomposition de problèmes sur cycles, nous sommes capables de tenir compte des lois de commande et de régulation en courant à l'échelle de la période de découpage du convertisseur de puissance, tout en tenant compte des dynamiques thermiques, ainsi que du vieillissement des supercondensateurs, et ce sur les 20 ans d'exploitation du navire.

3.2 Formulation sur cycles d'un problème multi-physique

Les travaux effectués dans le cadre de ma thèse de doctorat portaient sur la mise en œuvre d'un régulateur auto-oscillant utilisé pour assurer l'asservissement des grandeurs électriques d'un émulateur de puissance (Olivier, 2006). Bien que ce travail reste dans ses objectifs et son contexte assez éloigné de nos préoccupations actuelles, nous pouvons néanmoins y trouver un certain nombre d'éléments clés qui nous ont guidés et orientés dans la mise en place de ces outils. En effet, une partie importante de ce travail de thèse portait sur la caractérisation et la modélisation de ces régulateurs dont l'originalité est d'assurer simultanément la fonction de correction et de modulation en tout-ou-rien de l'étage de puissance. Les régulateurs de courant à hystérésis font par exemple partie de cette classe de systèmes non linéaires. Leur étude repose ainsi sur deux aspects différents, à savoir leur comportement basse fréquence, d'une part, qui sera analysé comme pour un régulateur standard à partir d'indicateurs de précision et de dynamique, et leur comportement haute fréquence, d'autre part, qui consistera cette fois à analyser les caractéristiques statiques et dynamiques du cycle limite lié à la fonction de modulation. Or, il se trouve que ces deux aspects doivent être traités simultanément. La caractérisation du comportement *moyen* du correcteur nécessite de caractériser le système à l'échelle d'un cycle, qui n'est obtenu qu'en étudiant ses conditions d'apparition. Car à la différence d'un modulateur classique à porteuse, c'est une fonction de l'état du système lui-même qui définit les instants de commutation. La démarche adoptée consiste donc à prédéfinir un état initial du système et à chercher les conditions de commutation aboutissant à un cycle fermé, c'est à dire à assurer ce même état du système en début et en fin de cycle. Or l'obtention de ce résultat n'est pas trivial puisqu'il nécessite de passer par la résolution d'une équation implicite, dû au fait que la période est variable et fait donc partie des inconnues du problème. Une fois les instants de commutation établis, le comportement statique du système peut être étudié en calculant la valeur moyenne

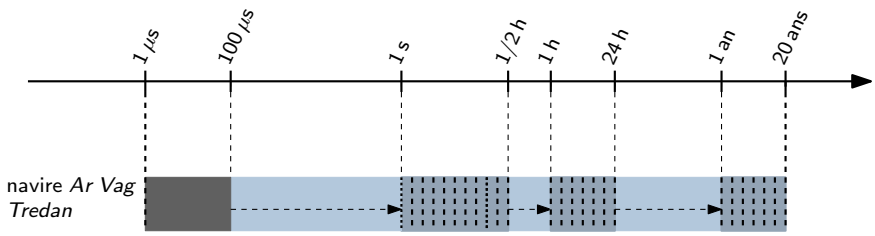


Figure. 3.1 – Diagramme illustrant la décomposition temporelle d'un problème, avec la mise en abîme de phases de simulation et extrapolation à des échelles de temps différentes.

des états du système à l'échelle d'une période de découpage. C'est ainsi que nous avons pu proposer une approche généralisée de modélisation *au sens des valeurs moyennes* de ce type de modulateur (Olivier et al., 2010a), calculé à partir des cycles limites. De même, par une simple réécriture du problème il est possible de définir localement le comportement dynamique du système, i.e. autour de la solution périodique [1].

Il se trouve que cette idée peut très facilement être étendue à d'autres usages pour lesquels un cycle ne correspond pas uniquement à la définition d'un interval de temps entre deux commutations. Dans le cas par exemple d'une modulation tout-ou-rien avec porteuse, les instants de commutation sont connus à l'avance et la définition d'un cycle de découpage se résume à la connaissance de sa période et à l'état initial du système. Le passage d'un cycle au suivant peut ainsi se faire de manière itérative en propageant de proche en proche la valeur du vecteur d'état obtenu a chaque fin de période. C'est d'ailleurs de cette manière que sont établis les modélisations de convertisseur *au sens des valeurs moyennes*, qui consistent à définir les relations moyennes entre la variation des états du système et les grandeurs de commande à l'échelle d'une période de découpage. Dans le cas de l'application de navire à supercondensateurs auquel nous nous sommes intéressé, le profil d'usage a pu être ramené à un ensemble de cycles déterministes correspondant à différentes phases de fonctionnement. Ainsi, une journée de fonctionnement a pu être définie par une série d'allers-retours d'une demi-heure, suivie d'une phase de repos. Nous sentons bien ici que l'état du système entre un aller-retour et le suivant subira des évolutions *prévisibles*. Les grandeurs électriques évolueront selon un cycle fermé quasi-périodique, puisque la valeur finale de l'état de charge des supercondensateurs sera normalement égale à sa valeur initiale. Pour les grandeurs thermiques, nous nous attendons en revanche à un cycle ouvert dans un premier temps, avec une variation de la température selon un schéma itératif du premier ordre et qui doit à terme converger vers un cycle stationnaire. Enfin, la variation des paramètres électriques des supercondensateurs ne pourront quant à eux que se dégrader dans la temps sans jamais atteindre un état périodique.

Aussi, pour pouvoir tenir compte de façon cohérente de l'ensemble de ces phénomènes à partir d'un formalisme unique, nous proposons de réduire l'évolution de chaque cycle de fonctionnement à son point de départ, c'est à dire son vecteur d'état initial, et son point d'arrivée (qui sera alors le point de départ du cycle suivant). En d'autres termes, la simulation numérique complète du système est décomposée en une succession de cycles que nous supposerons être proches les uns des autres (voir Figure 3.2). La mise en équation de cette idée simple est la suivante. Soit un problème dynamique décrit par un système d'équation différentielles de la forme :

$$\frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{dt}} = f(x,t) \tag{3.1}$$

où x représente le vecteur d'état du système. Lors de la simulation d'un cycle de fonctionnement, l'évolution temporelle des états du système est obtenue par intégration de l'équation (3.1) à

1. Dans nos travaux, nous avons notamment utilisé cette réécriture pour vérifier la stabilité locale des cycles limites, sans en exploiter sa capacité à modéliser le modulateur en régime variable.

partir d'un instant initial t_n et d'un vecteur initial x_n. Soit :

$$x_{n+1} = x_n + \int_{t_n}^{t_{n+1}} f(x,t)\,\mathrm{dt} \tag{3.2}$$

Cette dernière équation permet de nous approcher d'un problème discret, puisque chaque nouvel état est calculé à interval régulier et de façon itérative. Une autre manière de voir les choses est de ne plus considérer cette écriture comme une forme discrétisée du problème initial, mais plutôt comme une forme homogénéisée. Ainsi, nous proposons de reformuler l'équation (3.2) de manière à faire apparaitre un schéma d'intégration du premier ordre explicite de la forme :

$$x_{n+1} = x_n + T\,F(x_n, t_n) \tag{3.3}$$

avec

$$F(x_n, t_n) = \frac{1}{T}\int_{t_n}^{t_{n+1}} f(x,t)\,\mathrm{dt},\ \text{avec } x(t_n) = x_n \tag{3.4}$$

Bien que l'équation (3.3) s'apparente à une approximation d'Euler, elle permet en fait de calculer la solution exacte sur l'intervalle T, ce dernier correspondant à la durée du cycle.

Nous allons essayer à présent de montrer qu'une telle formulation peut facilement être généra-

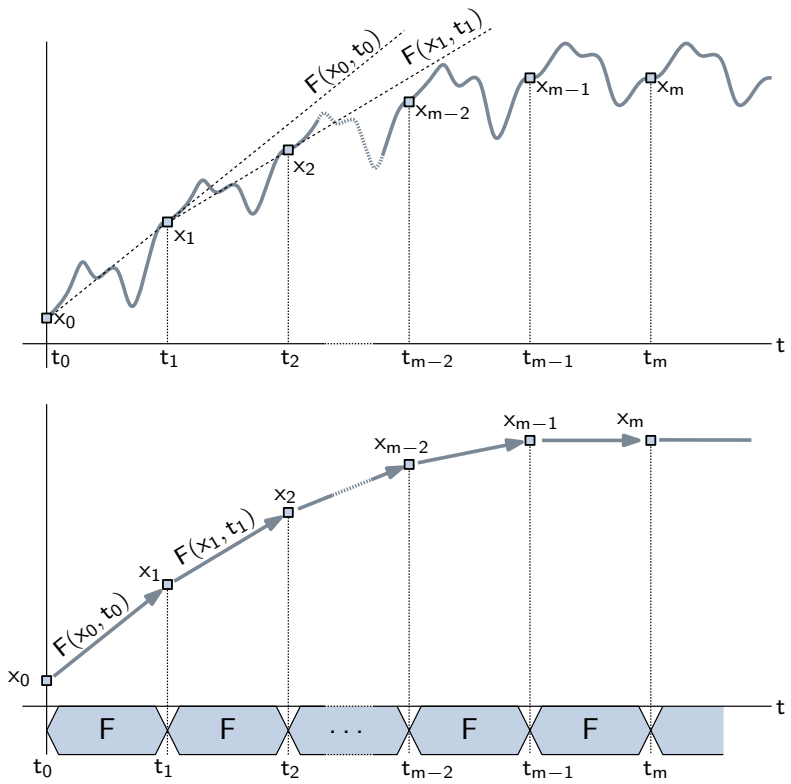


Figure. 3.2 – Illustration du principe d'homogénéisation de cycles de fonctionnement.

lisée pour tenir compte de séquences d'usages complexes, dont nous pourrons dans un second temps optimiser la résolution grâce à la mise en œuvre de méthodes d'extrapolations adaptées. Le principe élémentaire de toute méthode d'intégration numérique est d'estimer, à partir d'un ou plusieurs états précédents, les états futurs du système à un horizon plus ou moins lointain. Pour cela, il est utile de poser un certain nombre d'hypothèses se rapportant notamment à la régularité de la fonction à intégrer. Dans de nombreux cas pratiques, c'est le non respect de cette dernière hypothèse qui limite les performances des solveurs numériques les plus évolués. Pour illustrer cette idée, prenons le cas classique d'un convertisseur de puissance piloté par un étage de modulation naturelle et connecté à une charge inductive. En supposant le convertisseur idéal et en modélisant la charge par une inductance en série avec une résistance, le système complet est très simple, de raideur faible et ne doit poser *a priori* aucun problème dans sa simulation. Ce qui limite en fait les performances du solveur est le changement régulier de topologie correspondant aux commutations successives et périodiques de l'étage de puissance. C'est ainsi que localement, les variables d'état subissent des variations permanentes sans jamais se stabiliser. En revanche, en regardant plus globalement le comportement du système, un régime permanent est en général atteint et correspond à un cycle limite fermé et périodique. En s'appuyant sur le formalisme sur cycle donné par l'équation (3.3), un tel signal périodique peut être réduit en lui opérant une simple application de récurrence décrivant l'évolution de l'état du système à la fin de chaque période de découpage. Il se trouve que dans ce nouveau repère, un cycle fermé est un point fixe, comme le montre de manière schématique les derniers cycles de la Figure 3.2. Même si cette transformation du système initial nous fait perdre une part importante de l'information, elle nous permet de relier sous une forme récurrente et *linéarisée* l'évolution des états successifs entre ces différents cycles. De même, lorsqu'une séquence est composée d'une suite de périodes décrites par la même fonction d'intégration F, il sera possible de faire des extrapolations et en particulier à l'approche de régimes de fonctionnement établis.

Nous avons ainsi cherché à généraliser cette idée pour proposer une formulation capable d'homogénéiser également des cycles plus complexes construits de manière récursive à partir de séquences de sous-cycles. L'idée est cette fois encore d'aboutir à une succession de séquences décrites par les mêmes fonctions d'intégration. Pour illustrer notre méthodologie, considérons l'exemple du cycle complexe donné à la Figure 3.3, pour lequel trois fonctions d'intégration notées A, B et C sont utilisées pour décrire son fonctionnement.

Ces fonctions sont déjà des homogénéisations obtenues par l'application de l'équation (3.4). N'étant pas décrite par une seule et même fonction, cette succession de cycles ne fournit pas nécessairement une solution récurrente avec des variations continues lors du passage entre cycles de natures différentes. Nous proposons donc de créer un deuxième niveau de cycle qui va homogénéiser ces séquences récurrentes. En s'appuyant sur l'exemple donné à la Figure 3.3, cette séquence est celle qui est formée par la succession des cycles A et B de durées respectives T_A et T_B. Un cycle "A *suivi de* B" peut donc être calculé selon l'équation suivante :

$$x_{n+2} = x_n + [T_A\, A(x_n, t_n) + T_B\, B(x_{n+1}, t_{n+1})] \tag{3.5}$$

En opérant un changement de niveau de description de ce cycle, nous pouvons directement

exprimer le passage de x_n à x_{n+2} en posant :

$$x^\star_{n+1} = x^\star_n + T^\star A^\star(x^\star_n, t^\star_n), \text{ avec } T^\star = T_A + T_B \tag{3.6}$$

où le symbole ($\star$) permet de préciser le passage à une couche supérieure de description des cycles. Le nouveau problème ainsi formulé est alors constitué d'une succession de 7 cycles $A^\star$ suivi d'un cycle C qui lui n'a pas été modifié. Cette nouvelle séquence peut à son tour être homogénéisée de manière à faire apparaître une série de cycles définis par une unique fonction d'intégration, que nous notons $A^{\star\star}$ et qui sera résolue selon l'équation suivante :

$$x^{\star\star}_{n+1} = x^{\star\star}_n + T^{\star\star} A^{\star\star}(x^{\star\star}_n, t^{\star\star}_n) \tag{3.7}$$

Jusqu'ici, nous n'avons opéré qu'une réécriture du problème en nous appuyant sur une construction par récurrence de cycles de niveau de plus en plus élevé, jusqu'à faire naître une séquence de périodes homogénéisées et décrites par une seule et même fonction d'intégration. Or, il se trouve que le simple fait d'aboutir à une telle séquence va nous aider à résoudre le problème complet de manière approchée et donc potentiellement en un temps réduit. Pour cela, nous avons proposé une formulation originale des solveurs à pas variables, que nous utiliserons pour réaliser des extrapolations de cycles sur toutes les couches de description du problème.

3.3 Méthodes d'extrapolation sur cycle

La section précédente nous a permis de présenter une formulation originale de problèmes dynamiques par une représentation récursive de ses cycles d'usage. L'intérêt de cette description particulière est d'aboutir, malgré la présence de périodicités complexes, à un système homo-

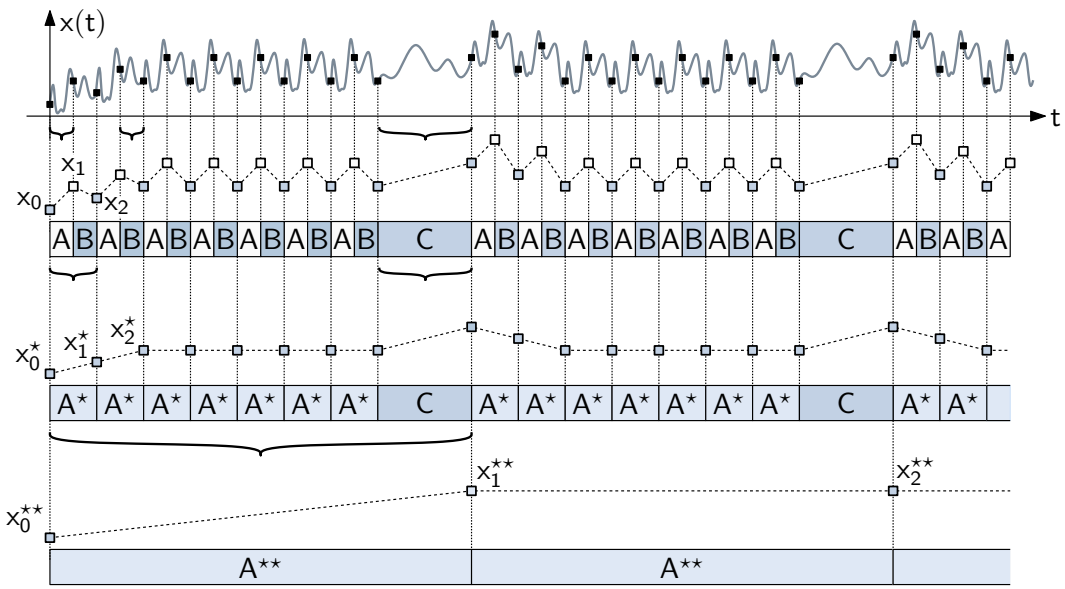


Figure. 3.3 – Illustration dd'une homogénéisation de cycle complexe.

généisé et discrétisé, présentant des variations continues lors du passage d'un état au suivant. C'est cette caractéristique qui va nous permettre de réaliser des extrapolations de cycles. Pour décrire plus en détail cette méthode, reprenons le résultat d'homogénéisation d'un cycle donné par l'équation (3.3). Cette dernière s'apparente à un schéma d'intégration d'Euler classique, mais pour lequel la fonction $F(.)$ ne représente plus la dérivée pour un état et un temps donné, mais la variation *moyenne* de cet état sur un intervalle T correspondant à la durée du cycle. De ce fait, un calcul exact consiste à évaluer de manière itérative cette fonction, en considérant comme valeur initiale du nouveau cycle, la valeur finale du précédent. Dans l'hypothèse où la variation d'un cycle au suivant ne subit pas de discontinuité importante, une évaluation exhaustive de tous ces états successifs n'est pas nécessairement utile si on tolère un certain niveau d'erreur dans la solution calculée. Nous nous sommes donc inspirés des approximations de solutions d'équations différentielles et plus particulièrement des méthodes à un pas de type Runge et Kutta. Ces méthodes sont basées sur une composition progressive de la solution finale, obtenue par itération. Une méthode d'ordre 2 va par exemple évaluer la fonction de dérivée en deux points de l'intervalle et approcher l'intégrale par une méthode de quadrature. De plus, ces méthodes sont en général utilisées avec un pas variable afin de contrôler de façon optimale l'erreur d'intégration. Il est donc assez courant de recourir à des méthodes dites *intégrées*, qui utilisent de manière imbriquée deux schémas d'intégration ayant des ordres différents. L'erreur est alors calculée en utilisant la différence de résultat entre les deux estimations. Mais pour ces méthodes, la fonction évaluée fournit des valeurs locales de la dérivée. Or, dans notre formalisme, la dérivée est une valeur moyenne calculée sur un intervalle. Il est donc nécessaire d'adapter ces schémas pour les rendre compatibles avec une représentation basée sur des cycles. Pour illustrer ce travail, nous proposons de nous appuyer sur le cas le plus simple de méthode intégrée, qui consiste à imbriquer les méthodes de Euler (ordre 1) et de Heun (ordre 2). Considérons donc une fonction f à intégrer sur un intervalle h. Dans le cas continu, cette méthode calcule dans un premier temps une solution d'ordre 1 selon un schéma classique d'Euler :

$$k_1 = f(x_n, t_n) \tag{3.8}$$

$$\tilde{x}_{n+1} = x_n + h\, k_1 \tag{3.9}$$

Puis cette solution approchée est réutilisée comme valeur de référence pour calculer la dérivée à la fin de l'intervalle :

$$k_2 = f(\tilde{x}_{n+1}, t_n + h) \tag{3.10}$$

Finalement, la solution d'ordre 2 est calculée à partir de la moyenne de ces 2 pentes k_1 et k_2, en même temps qu'une estimation de l'erreur :

$$x_{n+1} = x_n + \frac{h}{2}(k_1 + k_2) \tag{3.11}$$

$$\varepsilon_{n+1} = \tilde{x}_{n+1} - x_{n+1} = \frac{h}{2}(k_2 - k_1) \tag{3.12}$$

Dans le cas d'une formulation sur cycles, le même principe peut être utilisé, mais en tenant compte cette fois que pour calculer la fonction F, il a fallu avancer d'une période T et que l'extrapolation devra être composée d'un nombre entier de cycles. Nous proposons donc de noter m le nombre de cycles contenus dans l'intervalle et x_{n+m} la valeur finale du vecteur d'état. Cette méthode modifiée est illustrée à la Figure 3.4.

Mise en équation, la formulation sur cycles du schéma d'intégration Heun-Euler s'écrit comme précédemment en deux étapes, mais légèrement modifiées. La première consiste toujours à calculer une période pour estimer la dérivée moyenne du cycle. Cette dérivée est alors extrapolée jusqu'au début du dernier cycle, qui est évalué en utilisant une solution approchée par la méthode d'Euler :

$$k_1 = f(x_n, t_n) \tag{3.13}$$

$$k_2 = f(x_n + (m-1)\,T\,k_1,\; t_{n+m-1}) \tag{3.14}$$

Puisque le fait d'évaluer les pentes k_1 et k_2 nécessite d'avancer d'une période, ces calculs sont capitalisés pour estimer la solution d'ordre 2 et la solution approchée d'ordre 1, soit :

$$x_{n+m} = x_n + \frac{m\,T}{2}\,(k_1 + k_2) \tag{3.15}$$

$$\tilde{x}_{n+m} = x_n + T\,((m-1)\,k_1 + k_2) \tag{3.16}$$

$$\varepsilon_{n+1} = T\,\frac{m-2}{2}\,(k_2 - k_1) \tag{3.17}$$

Maintenant que le solveur est adapté à une formulation sur cycle, il est nécessaire de mettre en place un mécanisme d'adaptation automatique du pas. Cette adaptation a pour but de minimiser l'effort de calcul tout en respectant la tolérance fixée par l ?utilisateur. Un certain nombre de

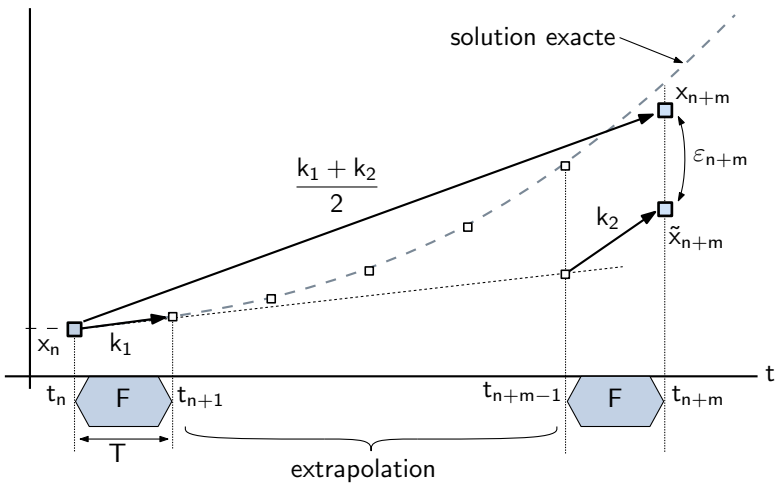


Figure. 3.4 – Utilisation du principe de résolution de la méthode intégrée *Heun-Euler* pour l'extrapolation de cycles.

méthodes existent. La plus simple consiste à multiplier ou diviser successivement le pas d'un certain facteur, en fonction de l'erreur estimée. Lorsque ce facteur est de 2, on parle de méthode de doublement du pas. Cette méthode très robuste reste peu efficace lors de variations rapides du vecteur d'état. Une méthode plus couramment utilisée s'appuie sur une adaptation variable du pas, en fonction de l'écart entre la tolérance désirée et la valeur de l'erreur :

$$h \leftarrow 0.9\, h \left(\frac{\text{tolérance}}{\varepsilon} \right)^{\frac{1}{1+o}} \tag{3.18}$$

où o est l'ordre de la méthode d'extrapolation. C'est finalement cette dernière que nous avons retenu ici, en procédant cette fois encore à son adaptation sur cycles, en remplaçant dans un second temps le pas h par un nombre de cycles entiers m. Il est à noter que des méthodes plus évoluées existent, mais leur application à notre problème n'a pas révélé d'amélioration notable Hmam et al. (2016b).

Il est intéressant à présent d'analyser ces nouvelles formulations en les comparants à leur version continue classique. La première différence réside ici dans la nécessité de calculer deux périodes de durée T sur la longueur de l'intervalle. L'extrapolation est donc réduite de 2 pas, qui est aussi la taille minimale de l'intervalle entre deux évaluations. Le cas où un seul cycle doit être calculé est donné par le schéma d'Euler de l'équation (3.3). Une autre différence avec un solveur continu est le choix de l'intervalle, qui en plus de nécessiter un nombre entier de cycles, doit parfois respecter des contraintes plus complexes. Par exemple, la méthode de Ralston, qui est la méthode d'ordre 2 minimisant l'erreur locale, nécessite dans sa forme continue d'évaluer la fonction aux 3/4 du pas d'intégration. Dans sa formulation sur cycles, cette méthode impose de laisser 3 fois plus de pas d'extrapolation à gauche qu'à droite, sans compter les 2 cycles évalués. Tous calculs faits, nous arrivons à la contrainte de $4\,p + 1$ cycles par intervalle, avec $p \in \mathbb{N}^*$. Le choix de la méthode conditionne nettement cette contrainte et nous pouvons ainsi être amenés à préférer la méthode de Heun qui a pour contrainte $p + 1$ cycles par intervalle, ou encore la méthode du point milieu avec $2\,p$ cycles par intervalle. Une dernière différence concerne l'estimation de l'erreur qui peut être nulle pour les valeurs les plus faibles d'intervalle. Pour les méthodes d'ordre 2, un intervalle constitué de deux cycles consécutifs ne demande ainsi aucune extrapolation, ce qui a pour conséquence d'annuler l'erreur. En soi, ce résultat n'enlève rien à l'intérêt d'une formulation sur cycles. Le réel problème concerne en fait le mécanisme d'adaptation du pas, qui s'appuie sur le rapport entre l'erreur estimée et la tolérance maximale accordée. Or, si l'erreur est nulle, cette adaptation automatique ne fonctionne plus et fait tendre le pas d'intégration vers l'infini. Pour cette raison, ces méthodes de contrôle du pas doivent aussi être adaptées. Sans avoir trouvé de reformulation élégante à ce problème, nous avons proposé plusieurs moyens de contournement. Par exemple, un biais constant et suffisamment faible peut être ajouté à l'erreur estimée. Une autre solution consiste à calculer l'erreur pour un intervalle de 2 cycles comme s'il y avait une extrapolation d'un cycle, ce qui revient à considérer $m = 3$.

Nous avons étendu ce travail d'adaptation de solveurs afin de disposer d'une palette d'outils suffisante pour répondre de façon adaptée à différents problèmes. Nous avons ainsi généralisé

la réécriture des méthodes intégrées d'ordre 2, ces dernières étant très efficaces sur les systèmes ayant des écarts de dynamique faible et des variations assez douces. Pour les problèmes nécessitant des tolérances plus faibles, nous avons adapté un schéma intégré utilisant une composition de Runge-Kutta d'ordre 3 et du point milieu. Enfin, dans les cas où le nombre de cycles successifs à calculer est très important, les schémas explicites ne sont plus suffisants et une méthode de résolution implicite doit être utilisée. Nous avons donc adapté la méthode implicite et intégrée de Rosenbrock d'ordres 2 et 3, qui est l'équivalent de la fonction `ode23s` développée dans la suite ODE de Matlab (Shampine and Reichelt, 1997). Ce solveur sera notamment utilisé pour passer du cycle de la MLI à un trajet complet d'une demi-heure, le rapport entre les deux échelles de temps étant particulièrement élevé.

3.4 Application à la simulation du navire à supercondensateurs *Ar Vag Tredan*

Pour illustrer le potentiel de cette formulation sur cycles, nous avons choisi de nous appuyer sur l'application de navire *Ar Vag Tredan*, qui présente deux intérêts majeurs. Le premier est qu'elle considère dans sa formulation la plus complète, les phénomènes électriques transitoires du découpage de l'étage de puissance, agissant à l'échelle de quelques microsecondes, jusqu'au vieillissement des supercondensateurs qui est visible à l'échelle de plusieurs années d'exploitation. Le second intérêt de cette application est qu'elle peut être entièrement décrite par un faible nombre de cycles d'usages différents, tout en présentant des séquences relativement complexes. La Figure 3.5 présente un diagramme simplifié du système modélisé et simulé. Il intègre les supercondensateurs, le convertisseur de puissance avec son inductance de lissage et le régulateur de courant utilisé pour assurer les transferts de puissance avec l'application.

La Figure 3.6 illustre une décomposition possible du cycle d'usage de ce navire en quatre couches distinctes. La première est la représentation d'un aller-retour $C_n(x,t)$ en considérant des cycles successifs de modulation de largeur d'impulsion $M(x,t)$ de l'étage de puissance. La seconde est la représentation d'une journée normale $J_n(x,t)$ à partir de cycles d'allers-retours et de cycles de repos $C_r(x,t)$, qui correspondent à des phases d'arrêt du navire. La troisième couche représente une année de fonctionnement $A(x,t)$ calculée à partir de jours normaux de fonctionnement et de jours de maintenance $J_m(x,t)$, qui sont décrits par le même jeu d'équations que pour les cycles de repos. Enfin, la dernière couche est calcul du problème complet $P_b(x,t)$, composé de vingt années successives. La couche la plus basse, qui représente ici le cycle de MLI, est construite à partir d'un solveur numérique classique d'équation différentielle, sur lequel n'est conservé que le premier et le dernier point de simulation. Ce formalisme nous permet de recourir à une large palette d'outils et de plateformes de simulation. Dans la thèse de Sadok Hmam, nous avons privilégié une implémentation des modèles sous matlab/Simscape, afin notamment de faciliter la saisie des différents phénomènes et couplages multi-physiques. Ici, nous avons préféré mettre en œuvre ces modèles en utilisant directement les équations décrivant ce système dynamique, en utilisant un prototype de fonction Matlab qui respecte la forme donnée par l'équation (3.1). Sans entrer dans les détails techniques concernant le choix des différents modèles utilisés pour

ce cas d'étude, nous avons abouti à un système décrit par 6 variables d'états. Les 2 variables électriques sont celles de la tension des supercondensateur et du courant dans l'inductance de lissage. La variable thermique permet de prendre en compte l'élévation de température dans les modules de supercondensateurs, qui est calculée à partir des pertes d'équilibrage et de transfert. Les 2 variables de vieillissement utilisées sont la valeur de la capacité et de la résistance série des modules, dont l'évolution de la dégradation suit une loi classique d'Arrhenius paramétrée en tension et en température. Enfin, la dernière variable d'état est celle de l'intégrateur d'erreur du correcteur de courant, dont la référence est déduite du profil de puissance de l'application et de la tension des supercondensateurs. Le premier calcul que nous proposons d'effectuer est celui du problème complet, en considérant une approche classique de simulation numérique. Pour cela, nous devons définir le pas de calcul minimum, lié à la reconstruction du signal périodique de MLI qui est dans cette application de 10 kHz. Il est courant de considérer une centaine de points par période, ce qui nous amène à un pas de calcul de l'ordre de la microseconde. Sachant que cette modulation sera effective 18 heures par jours, durant 335 jours par an, nous arrivons à un temps de fonctionnement annuel du navire de 6030 heures. Pour les phases de repos journalières (6 heures par jour) et annuelles (30 jours par an), le navire n'est pas sollicité et le modèle se limite à traduire les dynamiques de tension et de température avec un scénario de décharge des supercondensateurs dans une résistance. Ces simulations sont très peu coûteuses en nombre d'itération et elles peuvent donc être négligées dans ces calculs. Ainsi, en ne comptabilisant que les périodes d'activité du navire et au rythme d'un point toutes les microsecondes, le nombre d'évaluations du système est alors de plus de 10^{14} pour les vingts années d'exploitation.

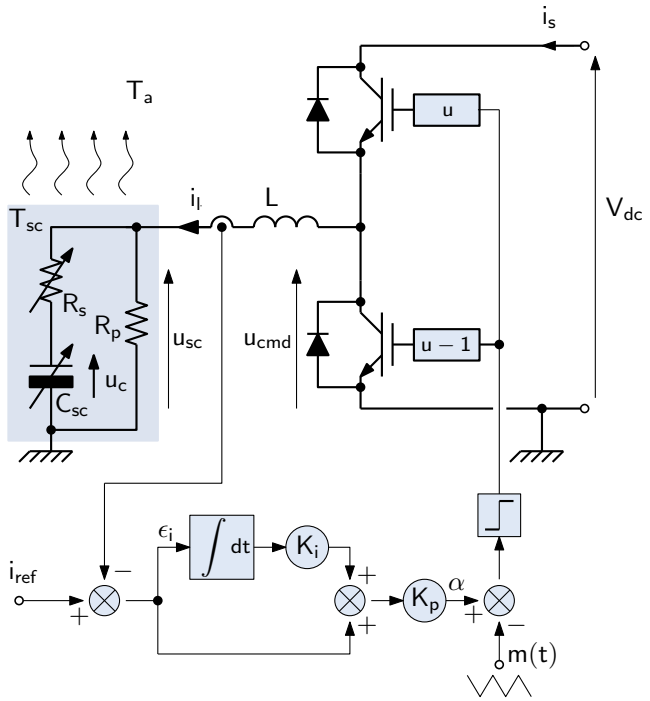


Figure. 3.5 – Diagramme de la chaîne de puissance du navire *Ar Vag Tredan* et de sa commande.

La décomposition temporelle du problème en 4 couches présentée à la Figure 3.6 va nous permettre de réduire considérablement ce nombre d'évaluations. En effet, chaque niveau de description étant construit de manière récursive à partir des couches plus basses, les gains sur les efforts de calcul se multiplient. D'autre part, le développement d'outils d'extrapolation génériques nous permet de choisir pour chaque niveau de cycle un solveur et une tolérance adaptés. A l'échelle de la durée de vie, nous devons simuler 20 cycles annuels successifs pour lesquels le phénomène prépondérant est le vieillissement. Nous avons donc choisi un solveur implicite d'ordre 2 (Heun-Euler) qui présente l'avantage de nécessiter peu d'évaluations et donc d'être potentiellement efficace compte tenu du faible nombre de cycles consécutifs de cette couche. La tolérance tenue est de 1 %, qui correspond au degré de précision attendu pour l'évaluation du vieillissement. Pour la simulation d'une année, qui est constituée de 365 cycles journaliers, le choix d'un solveur implicite de Runge et Kutta d'ordre 3 est choisi pour permettre des pas d'extrapolation pouvant atteindre plusieurs centaines de jours. A cette échelle, c'est cette fois encore le vieillissement qui est prépondérant, ce qui nous a conduit à imposer une tolérance de 1 %. Chaque journée étant décomposée en cycles d'une demi-heure, nous devons considérer 48 cycles consécutifs pour cette couche, avec comme dynamique principale celle de la température. Compte tenu de ce faible nombre de cycles, nous avons retenu une méthode implicite de Heun-Euler avec cette fois une tolérance de 0.1 %, qui permet d'assurer un calcul suffisamment juste pour les couches supérieures. La couche la plus basse qui correspond à un cycle d'aller-retour est constituée d'une succession de cycles de MLI. C'est très certainement la couche sur laquelle le plus fort gain peut être réalisé. A cette échelle de temps, les phénomènes prépondérants sont les transitoires des variables électriques et de commande. Ici, le rapport entre

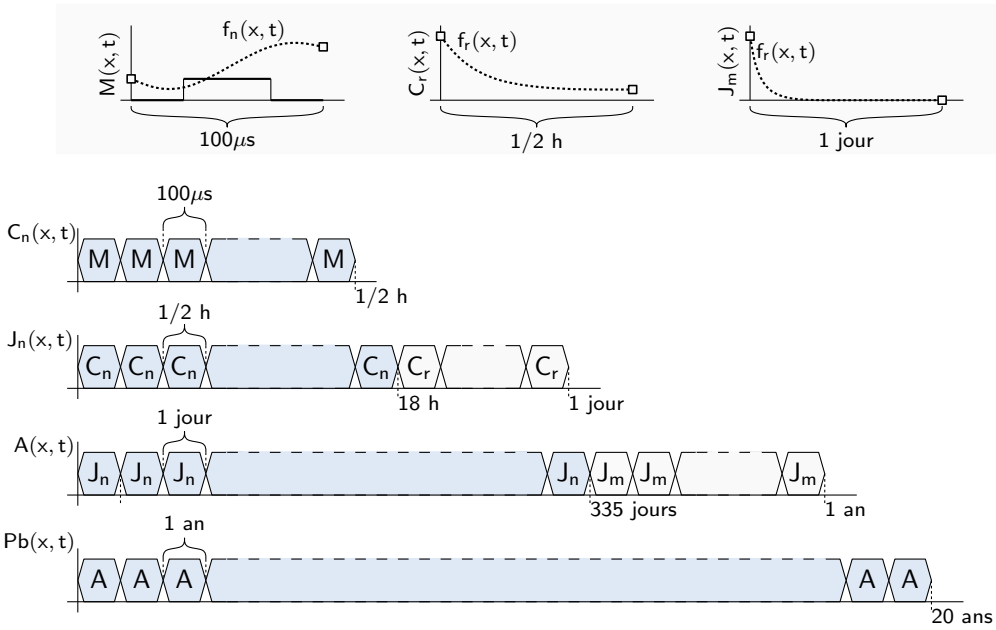


Figure. 3.6 – Décomposition en cycles d'usage du navire *Ar Vag Tredan*, de la modulation de largeur d'impulsion aux 20 années d'exploitation.

l'horizon de simulation d'1/2 heure et les dynamiques les plus rapides de quelques millisecondes nécessite de recourir à un solveur implicite capable d'assurer un bon niveau de stabilité avec des pas d'extrapolation importants. Nous avons ainsi retenu un solveur intégré de Rosenbrock utilisant des méthodes d'ordre 2 et 3 (l'équivalent discret du solveur continu `ode23s` de Matlab), avec une tolérance de 0.1 %. Enfin, chaque cycle de MLI est finalement simulé avec un solveur continu intégré et explicite de Runge-Kutta d'ordres 4 et 5 (fonction `ode45` de la suite ODE de Matlab), qui est une méthode très efficace pour atteindre des tolérances faibles sur des systèmes non raides. Ici, nous avons choisi une tolérance de 10^{-6} pour s'assurer de ne pas répercuter de trop grandes erreurs de calculs sur le cycle d'allers-retours qui est celui qui nécessite les extrapolations avec le plus grand nombre de cycles.

Il est difficile de présenter de façon synthétique les résultats de simulation pour l'ensemble des 4 couches. Nous prenons donc le parti de les présenter successivement, en partant de l'échelle de temps la plus petite, jusqu'au calcul complet des 20 années d'exploitation. Le premier résultat présenté par la Figure 3.7 illustre ainsi le régime transitoire du courant, pour une référence constante, en utilisant une formulation décrite par des cycles de MLI pour simuler un aller-retour. Nous avons uniquement représenté sur cette figure les variables électriques,

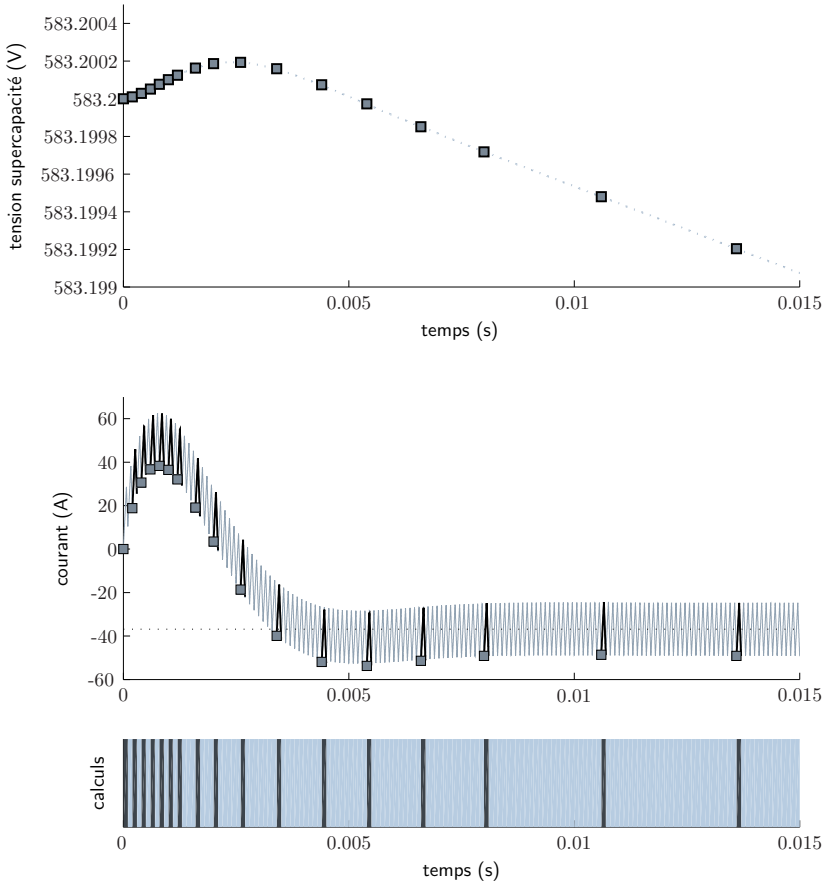


Figure. 3.7 – Régime transitoire du courant et de la tension des supercondensateurs, obtenu en utilisant un solveur discret implicite et s'appuyant sur une série de cycles de MLI.

qui sont prépondérantes à cet horizon de temps. De même, la variable d'état correspondant au terme intégral du correcteur n'est pas illustrée car cette dernière n'apporte pas d'information particulièrement utile. Nous voyons bien au travers de cet essai l'intérêt d'une formulation sur cycles. En effet, alors que dans une approche classique le cycle régulier de MLI nous interdit tout pas de calcul supérieur à la moitié de la période de découpage, la formulation par cycle nous autorise à procéder à ces extrapolations, sans limite *a priori* sur la taille des pas. Le recours à une méthode intégrée permet à chaque évaluation de calculer le cycle suivant avec une estimation de l'erreur commise. Cette erreur est alors utilisée pour adapter le nombre de cycles extrapolés. Nous voyons bien ici que le pas s'adapte automatiquement à la dynamique des signaux électriques avec des évaluations rapprochées pour suivre les variations rapides, puis de plus en plus espacées à mesure que l'on s'approche du régime établi. Le cycle complet d'un aller-retour calculé sur ce principe est illustré à la Figure 3.8. On voit bien ici que les efforts de calculs se concentrent sur les transitoires de courant, qui coïncident avec les changements de puissance du cycle d'usage. Globalement, pour ce cycle d'aller-retour avec une tolérance de 0.1 %, le facteur d'accélération est d'environ 3000 avec un taux de rejet de 20 %. Ce taux de rejet qui est particulièrement élevé s'explique par les phases de variation brutale de la puissance, qui nécessitent une réadaptation importante du pas d'extrapolation. De même, lors de la phase de recharge des supercondensateurs, un mode à puissance constante est suivi d'un mode de régulation de tension, permettant de gérer sans dépassement la tension de fin de charge. Ce mode faisant intervenir une contre-réaction assez dynamique, il nécessite de réduire le pas de calcul pour assurer la stabilité de la régulation.

La simulation d'une série de 36 allers-retours suivie d'une période de 6 heures de repos permet de construire une journée complète (voir Figure 3.9).

Ici, la constante de temps thermique est proche de l'horizon de simulation, ce qui nous amène à suivre le régime transitoire de la température sur une grande partie du cycle. Ainsi, le gain de calcul pour cette couche n'est que de 1.5, ce qui dans l'absolu est une valeur plutôt faible. Il peut toutefois être noté que le nombre de cycles consécutifs étant de seulement 36 pour la phase d'activité puis de 12 pour la phase de repos, une méthode d'ordre 2 qui nécessite l'évaluation d'au moins 2 cycles par phase ne permettra d'aboutir qu'à un gain maximum et potentiel de 12. Cette faible valeur de départ montre bien que le formalisme proposé sera d'autant plus efficace qu'il décrira un grand nombre de périodes successives.

Nous avons appliqué le même principe de décomposition pour la couche annuelle en utilisant 335 cycles de fonctionnement journalier et 30 jours d'arrêt (voir Figure 3.10). La simulation complète est obtenue en évaluant au total 18 journées sur 365, soit un facteur de gain de calcul de 20. Enfin, la Figure 3.11 illustre les résultats obtenus pour toute la durée d'exploitation du navire, calculée sur la base d'une succession de 20 années est obtenue après l'évaluation de 4 années (soit 8 cycles avec une méthode d'ordre 2), soit un gain de 2.5. Au total, les gains sur chaque couche se multipliant les uns les autres, nous arrivons à un facteur d'accélération total pour ce cas particulier de :

$$k_{acc} = 3000 \times 1.5 \times 20 \times 2.5 = 225\,000 \tag{3.19}$$

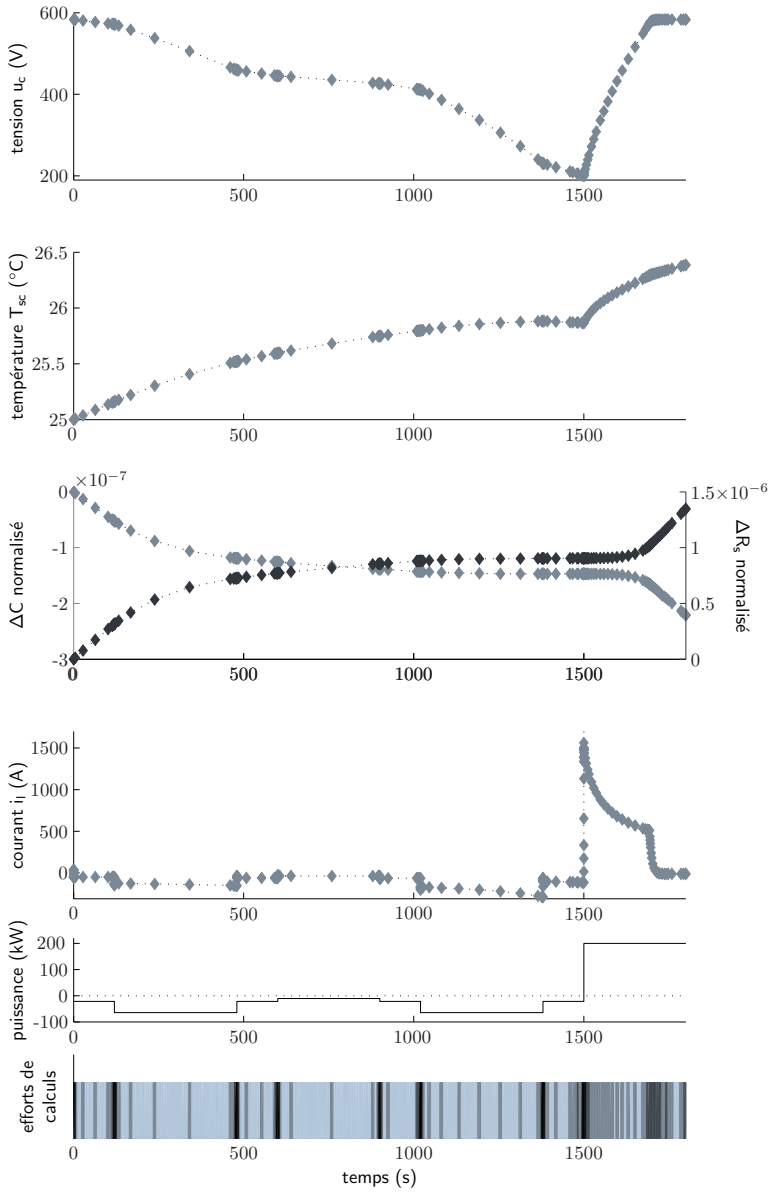


Figure. 3.8 – Simulation d'un aller-retour du navire, obtenu en utilisant une formulation du problème utilisant des cycles de MLI.

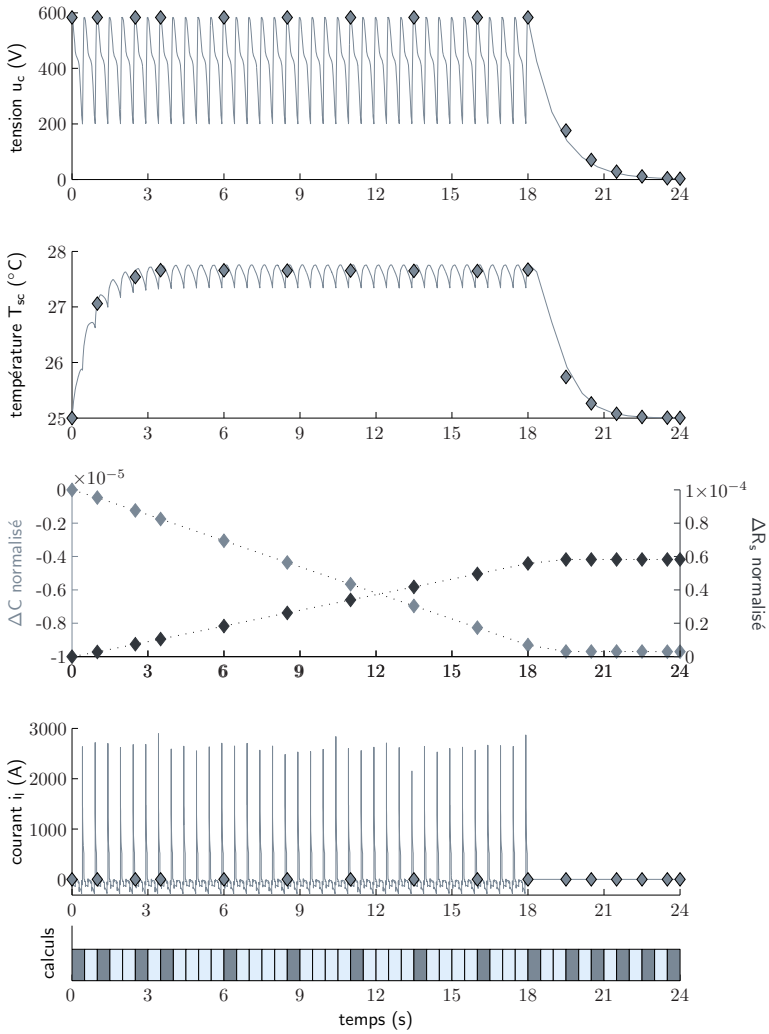


Figure. 3.9 – Simulation d'une journée complète en utilisant une séquence de 36 cycles d'aller-retour (soit 18 heures) et d'une phase de repos (de 6 h).

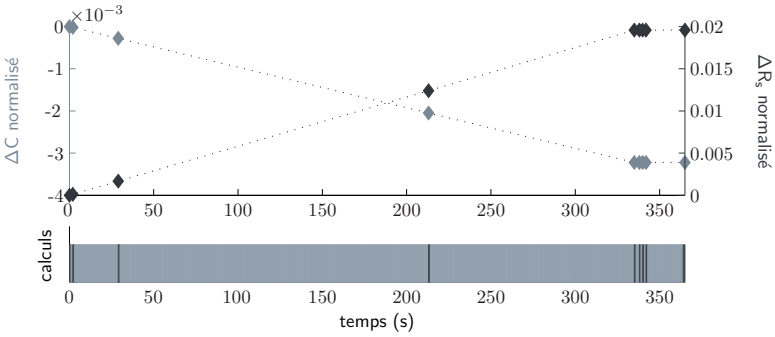


Figure. 3.10 – Simulation d'une année complète en utilisant une séquence de 335 jours de fonctionnement et 30 jours d'arrêt (période annuelle de maintenance).

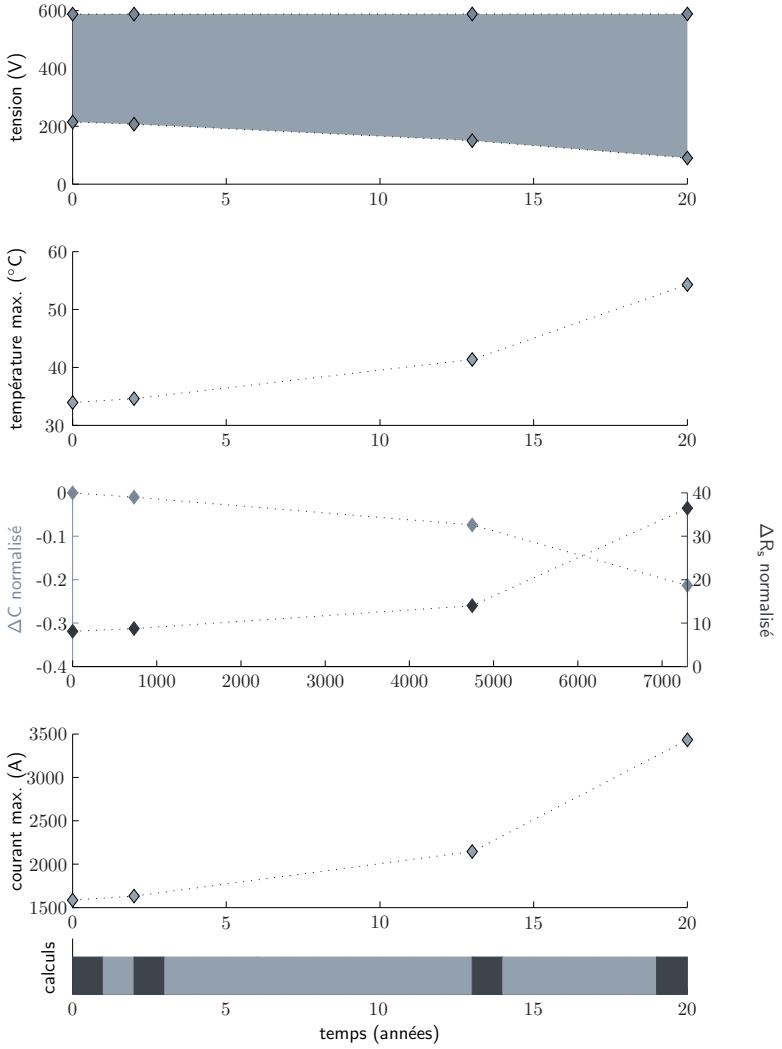


Figure. 3.11 – Simulation des 20 années d'exploitation du navire.

Il est clair que ce gain de calcul particulièrement élevé est surtout dû à la très grande efficacité de la méthode à l'échelle des cycles de MLI. Cette couche est en effet composée d'un très grand nombre de cycles successifs, ce qui autorise des extrapolations pouvant atteindre plusieurs dizaines de milliers de cycles.

Plus de détails sont donnés sur cette méthodologie dans le papier de synthèse Hmam et al. (2016a), publié en 2016 dans *Journal of Energy Storage, Elsevier*. Ce dernier présente une version simplifiée de ce problème, sans tenir compte de la commande en modulation de largeur d'impulsion du convertisseur et sans phase de maintenance annuelle (les 30 jours de repos par an du navire).

3.5 Conclusion

Pour achever ce chapitre, nous proposons de dresser un bilan sur cette nouvelle formulation. Pour rappel, nous avions comme ambition au démarrage de ce travail de proposer une méthodologie générique susceptible de réduire simultanément les efforts de modélisation et de simulation. En d'autres termes, nous souhaitions proposer une méthode de simulation reposant sur une formulation complète du problème, en ne se posant de questions ni sur la nature et la force des couplages entre domaines, ni sur la résolution numérique. Cette possibilité est d'ailleurs particulièrement bien adaptée aux nouveaux outils de *modélisation acausale*, tels que rencontrés avec les logiciels Modelica ou Matlab/Simscape. De ce fait, un autre levier doit être trouvé pour aboutir à la réduction du temps de simulation attendue. Nous nous sommes donc appuyés sur une hypothèse couramment rencontrée dans le cadre d'études visant au dimensionnement optimisé de systèmes électriques et qui concerne son fonctionnement sur un ensemble plus ou moins complexe de cycles d'usage. Cette hypothèse, associée à une reformulation des solveurs numériques classiques, nous a permis de proposer un outil très générique capable d'extrapoler les résultats obtenus à l'échelle d'un cycle, nous dispensant ainsi du calcul fastidieux de l'ensemble des séquences successives. De plus, nous avons adjoint à cette formulation une estimation d'erreur permettant d'adapter les pas d'extrapolation sous contrainte de respecter une tolérance préétablie. Enfin, nous avons généralisé cette formulation sur cycles pour qu'elle puisse être utilisée sur des séquences d'usage plus complexes et à des échelles de temps différentes. Pour cela, nous nous sommes inspirés du principe des *poupées russes* en proposant une écriture récursive des cycles d'usage, qui peuvent être construits par un assemblage de couches successives. Le navire *Ar Vag Tredan*, qui nous a servi d'exemple, a ainsi vu son cycle d'usage annuel construit à partir de cycles journaliers, eux-mêmes construits à partir de cycles de traversées, qui pour finir ont été simulées en considérant une succession de cycles à l'échelle de la modulation du convertisseur de puissance. Cette réécriture du problème nous permet ainsi de traiter de manière ascendante les différentes échelles temporelles du problème. Les gains potentiels en effort de calcul s'avèrent être particulièrement importants dans plusieurs cas. Premièrement, si la description d'un cycle complexe s'appuie sur une construction en de nombreux niveaux, les gains de calcul seront démultipliés lors du passage d'une couche à la suivante. Deuxièmement, la construction d'un cycle reposant sur un nombre très élevé de séquences identiques successives augmente d'autant les pas d'extrapolation et donc l'efficacité de la méthode. Enfin, lorsque les phénomènes physiques sont mis en jeu à des échelles de temps différentes, leur traitement peut être opéré sur des couches bien distinct et donc de façon performante. C'est pour toutes ces raisons que le gain de calcul est si important dans l'exemple de navire que nous avons traité. Ce dernier est en effet décomposé en 4 couches successives, la couche la plus basse fait intervenir plusieurs millions de cycles de modulation successifs, et enfin les phénomènes transitoires électriques, thermiques ainsi que le vieillissement, sont clairement dissociés sur les couches correspondant respectivement à la description d'un aller-retour, d'une journée, puis d'une année.

Un tel gain de calcul nous permet finalement d'envisager, pour une telle application, l'optimisation conjointe du dimensionnement et de la commande. Outre la possibilité d'aboutir à des

solutions plus optimales qu'en considérant séparément la commande (ou gestion de l'énergie) et le dimensionnement, cette approche permet de valider les différentes lois de commande sur l'ensemble des scénarios d'usage possibles, tout en tenant compte du vieillissement des composants.

Reste que ce travail repose sur une hypothèse forte concernant l'environnement du système et ses cycles de mission, qui doivent être d'une part déterministes et d'autre part répétitifs. Si cette hypothèse est bien respectée dans un grand nombre d'applications de transport, elle reste difficile à généraliser à un ensemble plus large de systèmes de conversion d'énergie électrique. Nous pouvons citer par exemple les applications de production utilisant des ressources naturelles telles que le solaire ou l'éolien. En effet, ces applications sont soumises à des fluctuations importantes de l'environnement et le comportement de la charge, dans le cas notamment d'applications résidentielles, est relativement éloigné d'un cycle répétitif. Un autre cas qui ne peut pas être aisément traité par cette nouvelle formulation est celui du véhicule automobile, pour lequel les différents cycles normalisés existant sont peu représentatifs d'un cycle d'usage réel beaucoup plus variable. Ils ne permettent donc pas de tenir compte des phénomènes de vieillissement des composants qui nécessitent des horizons de simulation beaucoup plus grands. Pouvoir lever au moins en partie ces limitations de notre formulation sur cycles fait partie des perspectives de recherches que nous souhaiterions mener à moyen terme.

références	**objectif(s)**
(Hmam et al., 2016b, IET) (Hmam et al., 2016a, JES, Elsevier) (Hmam et al., 2015b, VPPC) (Hmam et al., 2015a, 3EI)	Simulation de systèmes dynamiques multi-échelles de temps.

Table 3.1 – Liste de nos travaux sur la simulation multi-échelles de temps des chaînes de conversion d'énergie.

Projet III

1 Projet de recherche

Il est difficile de proposer un projet de recherche ambitieux, sans pour autant être trop spéculatif. Nous pouvons toutefois nous appuyer sur notre expérience passée pour avancer un certain nombre d'idées et proposer quelques pistes de recherches qui puissent contribuer à lever au moins quelques verrous. Nous l'avons vu au travers des précédents chapitres, nos activités se sont tout particulièrement concentrées autour des problématiques de dimensionnement optimisé de chaînes de conversion électrique. Mon projet de recherche, qui s'inscrit en grande partie dans la continuité de ces activités, peut se décliner en deux axes principaux, qui correspondent, d'une part, à des travaux méthodologiques de simulation des systèmes dynamiques multi-physiques et, d'autre part, au transfert des différents outils de modélisation et d'optimisation vers un objectif de pilotage et de gestion d'énergie des systèmes électriques.

1.1 Du cycle déterministe au profil stochastique

Comme nous l'avons rappelé en conclusion du chapitre précédent, la problématique de simulation des systèmes multi-physiques a ici été abordée sous l'angle des multiples échelles de temps, inhérentes à la prise en compte simultanée des nombreux domaines physiques et de leurs couplages. Nos travaux les plus récents apportent une réponse satisfaisante quant à la réduction à la fois de l'effort de modélisation et du temps de simulation, notamment en présence d'une grande disparité de constantes de temps du système. Reste que tout le formalisme de décomposition temporelle du problème repose sur un empilement de cycles parfaitement déterministes. Une telle représentation n'est donc pas à même de répondre directement à toute une classe de problèmes dont l'environnement complexe et non déterministe ne peut être réduit à de simples cycles périodiques. Nous pouvons citer par exemple l'usage d'un véhicule automobile, pouvant avoir des profils de missions très variables dans le temps, ou encore une installation de production à énergies renouvelables dont la ressource et la charge présentent un comportement stochastique. Cette contrainte sur le profil de mission est aujourd'hui un verrou majeur dans le contexte de la

conception optimale des chaînes de conversion électrique complexes et multi-physiques. Nous souhaitons donc poursuivre notre travail de modélisation et de simulation, notamment en vue de répondre à cette contrainte forte sur la nature complexe et stochastique de l'environnement du système et de ses profils de mission. Nous pourrons d'ailleurs pour cela nous appuyer sur nos précédents travaux autour de ces problématiques de modélisation stochastique (chaînes de Markov, méthodes de Monte-Carlo, ...) mais également nous tourner vers des méthodes dédiées, comme par exemple les méthodes intervalles qui permettent de propager une part d'incertitude dans les états successifs du système. Une approche complémentaire pourrait également consister à définir un ensemble de cycles *réduits* et représentatifs, à même de traduire fidèlement le comportement du système, mais sur un horizon de simulation plus court que celui du profil d'usage initial. Cette idée a d'ailleurs été développée dans (Jaafar, 2011) dans l'optique de réduire le temps de calcul d'un problème de dimensionnement optimisé et a montré une efficacité certaine. Nous pourrons donc nous appuyer sur ces travaux pour tenter de les adapter à notre propre formalisme de décomposition temporelle multi-couches. Une autre difficulté soulevée par la prise en compte d'un environnement plus réaliste dans le processus de dimensionnement optimisé concerne les interactions fortes qui peuvent exister entre l'usager et le système, et tout particulièrement dans le contexte de la production d'énergie électrique pour un usage résidentiel, pour lequel la définition d'un profil de consommation cohérent et représentatif est loin d'être évident. En effet, la thèse de Ahmed Bouabdallah nous a amené à considérer le dimensionnement d'une installation multi-sources non pas sur un profil d'ensoleillement annuel unique mais sur un nombre beaucoup plus élevé, en utilisant notamment des matrices de probabilité de transition pour générer une grande quantité de données à partir d'un échantillon de mesures. A cette diversité des profils a alors été associé un indicateur du taux de satisfaction de la demande en puissance qui nous a permis de trouver les dimensionnements donnant les meilleurs compromis entre coût et robustesse. Reste que dans cette étude, nous n'avons pris en compte ni les éventuelles variations de charge traduisant la diversité des comportements des usagers, ni son interaction avec l'état énergétique du système. Sur ce dernier point, en effet, de nombreuses études ont été menées ces dix dernières années, visant à analyser l'influence de la mise à disposition d'informations et données sur l'attitude même du consommateur (Darby et al., 2006). Les modifications de comportement attendues concernent principalement une meilleure gestion de la consommation énergétique moyenne, l'investissement dans de nouveaux équipements plus performants ou encore le décalage temporel de certaines charges lors de phases de production critiques (Daniel et al., 2016; Thiaux, 2010). Différentes études montrent également que la principale motivation des usagers est économique (Buchanan et al., 2014; Daniel et al., 2016). Il se trouve que dans le cadre d'installations de production autonomes, ce critère économique intervient à la fois lors de la phase de conception via le coût d'acquisition et lors de la phase d'usage via la maintenance et le vieillissement des différents organes (Thiaux, 2010). A ce critère économique s'ajoute celui de continuité de service, puisque étant déconnecté du réseau, il est probable de ne pas être à même d'assurer la demande énergétique lors de certaines périodes de sous-production. Pour de telles installations, peu de travaux se sont intéressés, d'une part, aux potentielles réductions ou modifications de consommation nécessaires pour assurer la continuité de service et, d'autre part, à la perception de l'usager vis-à-vis de ces

contraintes. Sans vouloir mener d'études sociologiques poussées sur ce sujet, ce qui serait hors champs et surtout hors de nos compétences, nous souhaiterions toutefois intégrer ces différents critères dans nos démarches de conception et de pilotage, en cherchant notamment à amorcer des collaborations avec des laboratoires impliqués dans ces thématiques.

1.2 Gestion de l'énergie et critères technico-économiques

Jusqu'à présent, une très large partie de nos travaux portait sur des problématiques d'optimisation des systèmes électrique dans leur phase de conception. Nous avons pu montrer dans la thèse de Sony Trieste que le dimensionnement seul de la chaîne de conversion ne suffisait pas à définir un optimum et qu'il était nécessaire de tenir compte de l'usage du système et de son pilotage. Le cas simple que nous avons eu à traiter portait sur la stratégie d'utilisation des supercondensateurs vis-à-vis de leur vieillissement. En effet, ayant une diminution de leur capacité dans le temps, il est nécessaire pour assurer un même échange énergétique, de modifier au fur et à mesure les bornes minimales et maximales de tension. En choisissant de maintenir la tension maximale et en faisant donc varier la tension minimale de décharge, cela nous permet d'assurer un vieillissement quasiment constant des supercondensateurs, mais nécessite en revanche de surdimensionner l'étage de conversion statique (ayant des courants en fin de décharge plus importants). Inversement, maintenir une tension de décharge fixe et ajuster la tension maximale de recharge réduit à la fois les pertes et la taille du convertisseur statique, mais engendre une accélération du vieillissement en fin de vie des supercondensateurs. Un compromis doit donc être trouvé entre ces deux stratégies.

Ce cas pourtant simple, qui ne fait appel qu'à un seul organe de stockage, montre clairement le rôle essentiel de la stratégie de pilotage du système. Dans le cadre de nos activités menées sur les systèmes multi-sources en site isolé, nous n'avons pas traité de manière approfondie ces problèmes de pilotage, qui dans ce contexte particulier peuvent être plutôt ramenés à un problème de gestion d'énergie. Cette gestion doit pouvoir contribuer à répondre aux enjeux économiques et de continuité de service décrits précédemment. Nous souhaitons donc orienter une part de nos activités autour de ces problématiques de gestion optimale de l'énergie, en cherchant à proposer des stratégies qui s'appuieront non seulement sur des critères énergétiques classiques, mais également sur des critères plus originaux tels que la durée de vie des composants ou le coût d'exploitation de ces derniers. Nous pourrons pour cela partir d'un dimensionnement optimisé en amont, en utilisant des lois de gestion énergétique simplifiées.

Ce travail tourné vers le pilotage et la gestion énergétique du système serait ainsi une transposition directe de nos différentes études menées sur la conception optimale des systèmes. Plus précisément, nous avons pour idée d'utiliser les degrés de liberté introduits par la multiplicité des sources et systèmes de stockage, pour essayer de minimiser le coût global d'exploitation de l'installation. Il est pour cela nécessaire de disposer de modèles comportementaux suffisamment fidèles pour qu'ils soient à même de tenir compte des nombreuses interactions entre les grandeurs énergétiques et le vieillissement des différents organes. Ce pose alors deux problèmes. Le premier concerne l'implémentation des algorithmes de gestion de l'énergie, qui devront respec-

ter des contraintes fortes de temps calcul tout en s'appuyant sur une modélisation suffisamment riche. En ce sens, la commande prédictive pourrait être une technique de commande particulièrement bien adaptée dans ce cas. Le second concerne la capacité à exprimer le vieillissement d'un organe avec son environnement et son usage. Car si de tels modèles existent pour un certain nombre de composants tels que les batteries ou les supercondensateurs, ils peuvent s'avérés très incomplets voir inexistants pour d'autres, comme c'est le cas pour les piles à combustibles ou les convertisseurs de puissance [1]. Nous devrons donc impérativement tenir compte de cet état de fait dans le développement de nos algorithmes de gestion et proposer des solutions de contournement, qui pourront éventuellement s'appuyer sur des descriptions partielles de certains phénomènes.

1.3 Approche unifiée Dimensionnement-Gestion

Si nous essayons de faire une synthèse de l'ensemble des activités que nous avons pu mener jusqu'à présent, un objectif plus large mais aussi plus lointain se dessine. C'est celui d'aboutir finalement à une démarche unifiée de conception optimale des systèmes électrique, intégrant dans un même processus le dimensionnement et la gestion de l'énergie. L'idée n'est pas uniquement que ces différentes *strates* soient optimisées conjointement, mais bien que le résultat d'optimisation nous fournisse un ensemble complet de données et d'algorithmes qui puisse être implémenté directement.

Pour être plus précis, nous voyons bien que le objectifs de gestion d'énergie peuvent prendre la forme d'un problème d'optimisation technico-économique, notamment en utilisant les techniques de commande prédictive. Or, de telles méthodes nécessitent, dans leur forme la plus générale, les mêmes modèles et outils de simulation que pour la phase de dimensionnement. Le fait d'intégrer également la gestion de l'énergie dans la phase de dimensionnement laisse donc entrevoir une formulation récursive très proche de celle dont nous avons eu à faire au cours de nos travaux sur la simulation multi-échelles de de temps. Cette forme d'autosimilarité entre dimensionnement et gestion présente au moins trois intérêts. Premièrement, l'ensemble du processus de conception peut être assuré par un unique modèle multi-physique et qui peut donc *a priori* être traité en une seule passe. Cette approche conjointe permet également d'atteindre des performances possiblement plus élevées qu'avec une démarche classique traitant ces deux aspects séparément. Enfin, et c'est peut être l'intérêt principal d'une telle méthode, tout effort de calcul opéré sur un aspect du problème (dimensionnement ou gestion) sera naturellement répercuté sur l'autre. Par exemple, le gain de simulation obtenu avec notre formulation sur cycles apporte simultanément une réponse au problème du dimensionnement et de la gestion de l'énergie, d'un côté pour que le processus d'optimisation du dimensionnement puisse être réalisé en un temps raisonnable, et de l'autre pour que le l'établissement de chaque nouvelle commande soit obtenue le plus rapidement possible. Par exemple encore, le fait de disposer d'une simulation *locale* du système pour des fins de gestion de l'énergie, doit permettre de capitaliser un certain nombre de calculs aux petites échelles de temps (horizon de quelques

1. On pense ici tout particulièrement au vieillissement de ces organes.

secondes à quelques heures) pour la simulation *globale*, à des fins cette fois de dimensionnement.

Reste que la formulation d'un tel problème de conception globale nécessitera de lever un certain nombre de verrous que nous avons par ailleurs déjà évoqué précédemment. Les principaux enjeux seront ainsi de réduire encore plus les efforts de calcul pour la simulation et de disposer d'un ensemble complet de modèles technico-économiques pour chaque organe.

1.4 Moyens mis en œuvre

Nous ne devons pas perdre de vue que ces thématiques sont en grande partie tournées vers le développement d'outils pour l'optimisation de chaînes de conversion électriques innovantes, au travers de leur conception et de leur exploitation. Dans ce contexte général, les moyens dont nous disposons pour développer ces thématiques sont finalement assez nombreux (voir Figure 1.1). En premier lieu, le laboratoire dispose d'un environnement industriel assez favorable, à même de nous alimenter avec des problématiques concrètes autour notamment des applications de stockage d'énergie et de transport naval. Même si cet environnement ne nous laisse pas toujours l'opportunité et le temps de proposer de nouveaux outils en rupture avec les approches plus traditionnelles, il doit nous permettre *a minima* d'appliquer nos outils sur des cas concrets et réalistes. Dans ce cadre, nous avons pu mener un certain nombre d'études avec la société COMECA Power (Le Mans) autour de la conception et du pilotage de convertisseurs statiques de forte puissance (de 100 à 1000 kVA) en vue de l'intégration d'organes de stockage au réseau. Ces études ont données suite à une thèse (Alexis MAHE), démarrée fin 2014, et qui vise à proposer des solutions de connexion directe à un réseau haute tension, en utilisant notamment une structure de convertisseur multi-cellulaire. Ce travail intègre à la fois une démarche de dimensionnement optimisé multi-critères (coût, encombrement, efficacité) et une recherche de stratégie de pilotage et de gestion de l'énergie optimisée pour pallier aux problèmes de vieillissement et donc de déséquilibre entre les différents organes de stockages. Ces lois de gestions visent à optimiser à la fois des critères de qualité de l'énergie et de rendement. En second lieu, nous disposons assez régulièrement de bourses de thèse ministérielle, qui nous permettent de développer les aspects les plus méthodologiques de ce type d'activité. Les thèses d'Ahmed Bouabdallah et de Sadok Hmam ont d'ailleurs été réalisées dans ce cadre de financement. En troisième lieu, le contexte régional de ces dernières années est particulièrement propice au développement de nos problématiques, au travers notamment des différents projets d'envergures. C'est ainsi que le laboratoire a intégré le RFI WISE (Recherche Formation et Innovation pour la filière électronique professionnelle du Grand Ouest) en tant que pilote de l'axe *Smart Power*, qui vise au développement des solutions de production d'énergie électrique alternatives. Dans ce cadre, nous sommes en train de mettre en place une plateforme expérimentale sur le mix énergétique et les systèmes multi-sources. Cette plateforme sera destinée en priorité aux activités de recherches du laboratoire IREENA autour des problématiques de gestion de l'énergie, de diagnostic et de stabilité des réseaux décentralisés. Toujours dans ce contexte, nous venons d'obtenir un financement de thèse (Ramzi SAIDI) pour amorcer nos activités autour de la gestion d'énergie des systèmes multisources sur des critères de durée de vie et de coût d'exploitation. De manière complémentaire à ce travail nettement orienté vers les algorithmes de gestion

d'énergie, nous avons démarré dans le même temps une seconde thèse (Chaima Mahjoubi) en co-tutelle avec l'ENIT, Tunisie, et qui s'intéresse plus spécifiquement aux aspects de modélisation multi-physique des organes de production et de stockage, en vue de leur intégration au sein de systèmes de production d'énergie. L'idée principale est de chercher à modéliser l'ensemble des phénomènes physiques d'un même composant pour nous aider à définir les meilleures stratégies de gestion d'énergie. Enfin, la région Pays de la Loire vient d'être Lauréate de l'appel

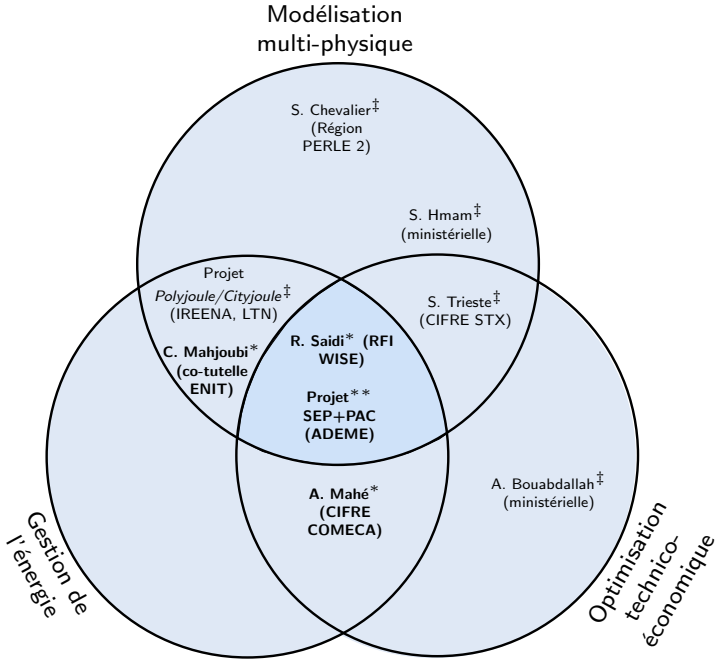


Figure. 1.1 – Représentation schématique des principaux travaux réalisés (‡), engagés (*) et envisagés (**).

à projets national "Territoires hydrogènes" sur deux projets, dont l'un d'entre eux est soutenu par l'ADEME et concerne le développement de chaînes de conversion hydrogène pour des applications navales de forte puissance (autour de 500 kW). Les études proposées dans ce projet portent sur la marinisation des systèmes pile à combustible, sur leur diagnostic en régime instationnaire, et sur leur parallélisation. La partie marinisation sera en grande partie traitée par nos collègues du laboratoire LTN, le diagnostic en régime instationnaire sera quant à lui assuré à la fois par les collègues du LTN et de l'IREENA. Pour notre part, nous nous concentrerons sur la parallélisation de systèmes pile à combustible, en nous intéressant plus particulièrement à la gestion d'énergie de la chaîne de conversion complète, en vue d'optimiser sa fiabilité et sa durée de vie.

2 Projet Pédagogique

Au cours de mes études de DUT en GEII à l'IUT de Nantes, j'ai eu l'opportunité d'intégrer le club de robotique dès ma première année. L'objectif était de concevoir un robot autonome pour participer à la coupe de France de Robotique. J'ai donc participé activement à cette association lors de mes 2 années de DUT (association *Serinus*), puis plus tard au cours de mes deux premières années d'école d'ingénieur (association *Polygelec*). En 2008, année de mon recrutement en tant que maître de conférences à l'IUT de Saint-Nazaire, j'ai été invité à rejoindre l'équipe enseignante du projet polyjoule, composée à l'époque de Didier Trichet (polytech'Nantes, département Génie Electrique), Bruno Auvity (département Thermique Energétique) et Christophe Le Bozec (ingénieur polytech'Nantes).

Toutes ces expériences me poussent aujourd'hui à donner une place importante à l'apprentissage par projet. Ce court chapitre vise donc à présenter les différents projets pédagogiques qui sont ou seront mis en œuvre prochainement.

2.1 Polyjoule…l'aventure continue

L'association *polyjoule* a connu depuis 10 ans nombreux succès. Aujourd'hui, deux véhicules fonctionnels nous permettent de mettre en œuvre des solutions et architectures particulièrement innovantes. Le véhicule *polyjoule* (catégorie prototype) a été conçu pour fonctionner en pile à combustible ou batterie. Le véhicule *Cityjoule* (catégorie urban) peut quant à lui fonctionner indifféremment avec une pile à combustible (pouvant être hybridée avec des supercondensateurs), des batteries ou encore des panneaux photovoltaïques. Pour ces deux véhicules et pour toutes ces technologies, nous avons depuis 2010 remporté la première place des différentes compétitions auxquelles nous avons participé.

Un tel palmarès est certes un réel indicateur de réussite, mais c'est aussi l'indicateur d'un projet pour lequel les marges de progression sont devenues faibles. C'est en partie la raison pour laquelle nous connaissons depuis quelques temps des difficultés à mobiliser des étudiants pour

ce projet, et tout particulièrement sur les aspects plus techniques. L'autre raison à cette baisse de dynamisme est certainement liée à la complexité croissante des véhicules, qui nécessitent de maitriser un ensemble de compétences de plus en plus large.

Dans ce contexte difficile, un certain nombre d'actions ont été mises en œuvre pour donner un nouvel élan de dynamisme à ce projet. Premièrement, nous avons proposé d'élargir l'association en intégrant des étudiants du département Mesures Physiques de l'IUT de Saint-Nazaire, ainsi qu'aux étudiants de polytech'Nantes département ETN (Electronique et Technologies Numériques), afin de mieux répartir les besoins de développement du véhicule sur les compétences des uns et des autres. Les étudiants de Mesures Physiques se sont ainsi vu attribué des projets autour de l'instrumentation du véhicule. Les étudiants du département ETN ont quant à eux proposé des solutions de télétransmission d'information durant la course.

Une deuxième action mise en œuvre depuis cette année au département GE (Génie Electrique) est de proposer une décharge de certains enseignements à un petit groupe d'étudiants, qui pourra utilisé ce temps pour mener à bien des projets conséquents.

Enfin, sous l'impulsion de Luc Loron, actuel directeur de département GE, une des trois options de dernière année d'ingénieur est effectuée sous la forme d'enseignement par projet. Depuis 2 ans, ce projet est orienté vers la mise en œuvre d'un système de récupération d'énergie au freinage. Ce dernier s'appuie sur un cahier des charges très proche de celui du véhicule *Cityjoule*.

Cette fonction de récupération d'énergie fait par ailleurs partie des futurs grand projets. En effet, nous souhaitons faire évoluer l'architecture du véhicule *Cityjoule* vers une solution hybride thermique-électrique. Or, une telle solution ne peut être énergiquement intéressante (en comparaison d'une solution thermique seule) qu'en présence d'un système de freinage régénératif. Or, la chaîne de propulsion actuelle n'est pas dimensionnée pour assurer les puissance mises en jeu lors de ces phases de récupération. Il est donc nécessaire de revoir intégralement l'architecture de la chaîne électrique.

Enfin, nous serons certainement amenés à l'avenir à tester de multiples configurations hybrides. Or, l'architecture de commande actuelle manque de souplesse et rend difficile ces modifications. Nous avons donc pour projet de repenser intégralement la structure de contrôle-commande et de communication du véhicule, en y intégrant un bus standardisé (de type bus CAN).

2.2 Production d'énergie en site isolé

La production d'énergie électrique en site isolé trouve aujourd'hui de très nombreuses solutions techniques, mais très rarement économiques. Or, de nombreux sites souffrent de ne pas pouvoir disposer d'un raccordement à un réseau, sans avoir non plus les moyens d'acquérir des systèmes de production autonomes.

C'est dans ce contexte qu'avec mon collègue Guillaume Wasselynck, qui fait également partie de l'équipe enseignante *polyjoule*, nous souhaitons lancer un projet au département Mesures-Physiques autour de ces problèmes de production d'énergie à bas coût. L'idée générale est de concevoir un système autonome, qui puisse être transportable et qui soit réalisable, ou tout du

moins maintenable, uniquement à partir de pièces de récupération. Ce système doit pouvoir fournir l'énergie produite et stockée sous forme électrique, mais aussi sous d'autres formes, telles que la génération de chaud ou de froid.

Depuis cette année, un groupe de 10 étudiants de deuxième année réalise son projet tutoré sur cette problématique. L'objectif est de les amener à proposer des solutions de production et de stockage fonctionnelles, dont les principaux critères sont leur simplicité, i.e. qu'ils puissent être réalisés aisément à partir d'éléments de récupération, et leur adaptabilité à l'environnement du système, i.e. qu'ils ne soient pas contraignants vis-à-vis de la nature de la ressource.

A plus long terme, nous aimerions que ce travail puisse aboutir à des réalisations concrètes en partenariat avec le département GIM (Génie Industriel et Maintenance). Il se trouve en effet que ce département dispose de moyens important en conception mécanique. Nous pourrions nous appuyer sur ces outils pour les éventuelles réalisations.

Pour donner corps à ce projet, une forme envisagée est la création d'une association pérenne, gérée par les étudiants, et qui œuvrerait dans le cadre de missions humanitaires. Enfin, étant responsable des enseignements d'énergie renouvelable, je souhaiterais utiliser ces créneaux comme support à ce projet. Nous pourrions alors traiter des chaînes de conversion originales, dont la conception serait faite par les étudiants eux-mêmes. Cela irai encore un peu plus dans le sens d'un apprentissage par projet, qui me semble être une voie nécessaire et d'avenir.

Bibliographie

Agbli, K. S. (2012). *Modélisation multiphysique des flux énergétiques d'un Couplage Photovoltaïque-Electrolyseur PEM–Pile à Combustible PEM en vue d'une application stationnaire.* PhD thesis, Institut FEMTO-ST, Université de Cocody-Abidjan.

Agbossou, K. (2016). Energy management strategy for a fuel cell hybrid vehicle based on maximum efficiency and maximum power identification. *IET Electrical Systems in Transportation.*

Aranguren, L. M. (2013). Flywheel energy storage system for transport application. Master's thesis, Université de Nantes.

Aubry, J. (2011). *Optimisation du dimensionnement d'une chaîne de conversion électrique directe incluant un système de lissage de production par supercondensateurs : application au houlogénérateur SEAREV.* PhD thesis, Cachan, Ecole normale supérieure.

Barbouche, M., Ahmed, Z., Charradi, K., Goubantini, H., Beji, Z., Krout, F., Azzouni, S., Chtourou, R., Olivier, J.-C., and Squadrito, G. (2016). Tunisian european cooperation project : Pem fuel cells technology. *Energy Procedia*, 93 :89–95.

Bernard, N., Dang, L., Olivier, J.-C., Bracikowski, N., Wasselynck, G., and Berthiau, G. (2015). Design optimization of high-speed pmsm for electric vehicles. In *Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), 2015 IEEE*, pages 1–6. IEEE.

Bernard, N. and Olivier, J.-C. (2014). Méthodologie de dimensionnement sur cycle d'une machine synchrone rapide à aimants permanents-application au stockage inertiel longue durée. In *Symposium de Génie Électrique 2014.*

Bouabdallah, A. (2014). *Méthodologie de dimensionnement et d'optimisation des systèmes multi-sources à énergies renouvelables pour l'habitat.* PhD thesis, Université de Nantes.

Bouabdallah, A., Bourguet, S., Olivier, J.-C., and Machmoum, M. (2013a). Optimal sizing of a stand-alone photovoltaic system. In *Renewable Energy Research and Applications (ICRERA), 2013 International Conference on*, pages 543–548. IEEE.

Bouabdallah, A., Bourguet, S., Olivier, J.-C., and Machmoum, M. (2013b). Photovoltaic energy for the fixed and tracking system based on the modeling of solar radiation. In *Industrial Electronics Society, IECON 2013-39th Annual Conference of the IEEE*, pages 1821–1826. IEEE.

Bouabdallah, A., Olivier, J.-C., Bourguet, S., Houari, A., and Machmoum, M. (2016). Robust sizing of a stand-alone multi-sources power system. In *2016 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*, pages 448–453. IEEE.

Bouabdallah, A., Olivier, J.-C., Bourguet, S., Machmoum, M., and Schaeffer, E. (2015). Safe sizing methodology applied to a standalone photovoltaic system. *Renewable Energy*, 80 :266 – 274.

Boulon, L. (2009). *Modélisation multiphysique des éléments de stockage et de conversion d'énergie pour les véhicules électriques hybrides. Approche systémique pour la gestion d'énergie.* PhD thesis, Université de Franche-Comté.

Boulon, L., Agbossou, K., Hissel, D., Sicard, P., Bouscayrol, A., and Péra, M.-C. (2012). A macroscopic pem fuel cell model including water phenomena for vehicle simulation. *Renewable energy*, 46 :81–91.

Bouscayrol, A. (2003). *Formalismes de représentation et de commande appliqués aus systèmes électromécaniques multimachines multiconvertisseurs.* Habilitation à diriger des Recherches, Université des sciences et technologies de Lille.

Bressel, M., Bouamama, B. O., Hissel, D., and Hilairet, M. (2015). A review on graphical methods for modeling a pem fuel cell.

Buaud, F., Lelandais, D., and Auvity, B. (2008). Evidence of a non-dimensional parameter controlling the flooding of pemfc stack. *International Journal of Hydrogen Energy*, 33(11) :2765–2773.

Buchanan, K., Russo, R., and Anderson, B. (2014). Feeding back about eco-feedback : How do consumers use and respond to energy monitors ? *Energy Policy*, 73 :138–146.

Buzila, P.-V. (2015). *Gestion énergétique optimale des installations fixes de traction électrique ferroviaire hybrides.* PhD thesis, Lille 1.

Caillard, P. (2015). *Conception par optimisation d'une chaine de traction électrique et de son contrôle par modélisation multi-physique.* PhD thesis, Ecole Centrale de Lille, L2EP.

Celik, A. (2002). Optimisation and techno-economic analysis of autonomous photovoltaic–wind hybrid energy systems in comparison to single photovoltaic and wind systems. *Energy Conversion and Management*, 43(18) :2453–2468.

Chevalier, S. (2013). *Modélisation multiphysique de l'impédance des piles à combustible PEM : application au diagnostic de stack par spectroscopie.* PhD thesis, Nantes.

Chevalier, S., Auvity, B., Olivier, J.-C., Josset, C., Trichet, D., and Machmoum, M. (2014). Detection of cells state-of-health in pem fuel cell stack using eis measurements coupled with multiphysics modeling. *Fuel Cells*, 14(3) :416–429.

Chevalier, S., Josset, C., Olivier, J.-C., Auvity, B., Trichet, D., and Machmoum, M. (2013a). Experimental validation of an identification procedure for degraded pem fuel cell state using eis combined with a physical impedance modelling. In *Chemical Engineering Transactions, IEEE PHM*, volume 33, pages 1015–1020.

Chevalier, S., Josset, C., Olivier, J.-C., Trichet, D., Auvity, B., and Machmoum, M. (2012). Physical modeling of the electrochemical impedance of pemfc. In *EMHyTeC*, Hammamet, Tunisia.

Chevalier, S., Josset, C., Olvier, J.-C., Auvity, B., Trichet, D., and Machmoum, M. (2013b). Numerical simulation of localized impedance along a segmented pem fuel cell. In *FDFC*.

Chevalier, S., Trichet, D., Auvity, B., Olivier, J.-C., Josset, C., and Machmoum, M. (2013c). Multiphysics dc and ac models of a pemfc for the detection of degraded cell parameters. *International Journal of Hydrogen Energy*, 38(26) :11609–11618.

Chouikh, S. G. (2012). *Interopérabilité basée sur les standards Modelica et composant logiciel pour la simulation énergétique des systèmes de bâtiment.* PhD thesis, Thèse de doctorat, Université de Grenoble.

Curtiss, C. and Hirschfelder, J. O. (1952). Integration of stiff equations. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 38(3) :235.

Da Silva, F. (2015). *Méthodologies de réduction de modèles multiphysiques pour la conception et la commande d'une chaîne de traction électrique.* PhD thesis, Paris Saclay.

Daniel, M., Rivière, G., Couture, N., and Kreckelbergh, S. (2016). Une analyse des systèmes interactifs et persuasifs pour la maîtrise de l'énergie. In *Actes de la 28ième conférence francophone sur l'Interaction Homme-Machine*, pages 197–210.

Darby, S. et al. (2006). The effectiveness of feedback on energy consumption. *A Review for DEFRA of the Literature on Metering, Billing and direct Displays*, 486 :2006.

Delanoë, J. (2008). *Analyse prévisionnelle et stochastique des consommations électriques de charges multiples : application aux systèmes embarqués des véhicules de combat mobiles terrestres.* PhD thesis, Nantes.

Dessante, P. (2012). *Optimisation, conception et modélisation des systèmes électrotechniques.* Habilitation à diriger des Recherches, Université Paris-Sud 11.

Diaf, S., Notton, G., Belhamel, M., Haddadi, M., and Louche, A. (2008). Design and techno-economical optimization for hybrid pv/wind system under various meteorological conditions. *Applied Energy*, 85(10) :968 – 987.

Guinot, B., Champel, B., Montignac, F., Lemaire, E., Vannucci, D., Sailler, S., and Bultel, Y. (2015). Techno-economic study of a pv-hydrogen-battery hybrid system for off-grid power supply : Impact of performances' ageing on optimal system sizing and competitiveness. *International Journal of Hydrogen Energy*, 40(1) :623 – 632.

Hammadi, M. (2012). *Contribution à l'intégration de la modélisation et la simulation multi-physique pour la conception des systèmes mécatroniques.* PhD thesis, École Centrale Paris.

Hautier, J.-P., Faucher, J., and Caron, J.-P. (1999). Le graphe informationnel causal, un outil pour analyser, comprendre, représenter. *Journées 3EI, Cachan*, page 308.

Hmam, S. (2016). *Méthodologie de conception optimale de chaines de conversion et de stockage de l'énergie électrique.* PhD thesis, Université de Nantes.

Hmam, S., Olivier, J.-C., Bourguet, S., and Loron, L. (2015a). Modélisation et simulation d'un système multiphysique application à un stockeur d'énergie d'un ferry tout électrique. *Enseigner l'électrotechnique et l'électronique industrielle*, (82) :49.

Hmam, S., Olivier, J.-C., Bourguet, S., and Loron, L. (2015b). A multirate simulation method for large timescale systems applied for lifetime simulations. In *Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), 2015 IEEE*, pages 1–6. IEEE.

Hmam, S., Olivier, J.-C., Bourguet, S., and Loron, L. (2016a). A cycle-based and multirate approach for power system simulation application to the ageing estimation of a supercapacitor-based ferry. *Journal of Energy Storage.*

Hmam, S., Olivier, J.-C., Bourguet, S., and Loron, L. (2016b). Efficient multirate simulation techniques for multi-physics systems with different time scales : Application on an all-electric ferry design. *IET Electrical Systems in Transportation.*

Horrein, L. (2015). *Gestion d'énergie décomposée d'un véhicule hybride intégrant les aspects thermiques via la représentation énergétique macroscopique.* PhD thesis, Université de Lille.

Jaafar, A. (2011). *Traitement de la mission et des variables environnementales et intégration au processus de conception systémique.* PhD thesis, Institut National Polytechnique de Toulouse-INPT.

Kovaltchouk, T., Multon, B., Ben Ahmed, H., Aubry, J., and Venet, P. (2015). Enhanced aging model for supercapacitors taking into account power cycling : Application to the sizing of an energy storage system in a direct wave energy converter. *Industry Applications, IEEE Transactions on*, 51(3) :2405–2414.

Kusakana, K. and Vermaak, H. J. (2013). Hybrid renewable power systems for mobile telephony base stations in developing countries. *Renewable Energy*, 51 :419–425.

Lelarasmee, E., Ruehli, A. E., and Sangiovanni-Vincentelli, A. L. (1982). The waveform relaxation method for time-domain analysis of large scale integrated circuits. *Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems, IEEE Transactions on*, 1(3) :131–145.

Loron, L., Bourguet, S., and Olivier, J.-C. (2009). Etude de faisabilité pour un nouveau concept de navire écologique. Rapport de contrat de recherche société stx europe, IREENA.

Loron, L., Bourguet, S., and Olivier, J.-C. (2010). Etude complémentaire pour un nouveau concept de navire écologique. Rapport de contrat de recherche société stx europe, IREENA.

Mbemba, D. C. E. L. B. (2012). *Modélisation, conception et expérimentation d'un véhicule hybride léger pour usages urbains.* PhD thesis, Université de Franche-Comté.

McLyman, C. W. T. (2016). *Transformer and inductor design handbook.* CRC press.

Merdassi, A. (2009). *Outil d'aide à la modélisation moyenne de convertisseurs statiques pour la simulation de systèmes mécatroniques.* PhD thesis, Institut National Polytechnique de Grenoble-INPG.

Mesbahi, T. (2016). *Influence des stratégies de gestion d'une source hybride de véhicule électrique sur son dimensionnement et sa durée de vie par intégration d'un modèle multi-physique.* PhD thesis, ESTACA Laval and L2EP Lilles.

Middlebrook, R. and Cuk, S. (1976). A general unified approach to modelling switching-converter power stages. In *Power Electronics Specialists Conference, 1976 IEEE*, pages 18–34. IEEE.

Moler, C. B. (2008). *Numerical Computing with MATLAB : Revised Reprint.* Siam.

Olivier, J.-C. (2006). *Modélisation et Conception d'un Modulateur Auto-Oscillant Adapté à l'Emulation d'Organes de Puissance.* PhD thesis, IREENA, Université de Nantes.

Olivier, J.-C., Bernard, N., Trieste, S., Bourguet, S., and Aranguren, L. M. (2014). Techno-economic Optimization of Flywheel Storage System in transportation. *Symposium de Génie Électrique 2014.*

Olivier, J.-C., Loron, L., Auger, F., and Le Claire, J.-C. (2010a). Improved linear model of self oscillating systems such as relay feedback current controllers. *Control Engineering Practice*, 18(8) :927–935.

Olivier, J.-C., Wasselynck, G., Chevalier, S., Josset, C., Auvity, B., Squadrito, G., Trichet, D., Bernard, N., and Hmam, S. (2015). Multiphysics modeling and driving strategy optimization of an urban-concept vehicle. In *Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), 2015 IEEE*, pages 1–6. IEEE.

Olivier, J.-C., Wasselynck, G., Ireena, D. T., Auvity, B., Josset, C., and Le-Bozec, C. (2010b). Power source to wheel model of a high efficiency fuel cell based vehicle. In *2010 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, pages 1–6. IEEE.

Olivier, J.-C., Wasselynck, G., Trichet, D., Auvity, B., Josset, C., Maindru, P., and Machmoum, M. (2012). Light-duty fuel-cell vehicle designed for energetic races : high efficiency power converter design. *European journal of electrical engineering*, 15(1) :39–61.

Pierquin, A. (2014). *Conception de systèmes électriques multidynamiques par optimisation multi-granularité.* PhD thesis, Ecole Centrale de Lille.

Prieto, D. (2015). *Modélisation et optimisation des machines synchro-réluctantes à aimants permanents et de leur électronique.* PhD thesis, Supélec.

Reinbold, V. (2014). *Méthodologie de dimensionnement d'un moteur électrique pour véhicules hybrides Optimisation conjointe des composants et de la gestion d'énergie.* PhD thesis, Université de Grenoble.

Rigo-Mariani, R. (2014). Méthodes de conception intégrée" dimensionnement-gestion" par optimisation d'un micro-réseau avec stockage.

Robert, F. (2015). *Optimisation multi-physique d'une chaine d'actionnement pour application automobile.* PhD thesis, CentraleSupélec, Université Paris-Saclay.

Robert, F., Taki, J., Bensetti, M., and Dessante, P. (2015). Emc modeling approach for multi-physic optimizations. In *International Symposium on Electro-Magnetic Fields (ISEF) 2015.*

Roblot, G. (2012). *Méthodologie de pré-dimensionnement de la puissance électrique des générateurs d'un réseau embarqué à partir d'analyses statistiques des consommateurs.* PhD thesis, Nantes.

Ruellan, M. (2007). *Méthodologie de dimensionnement d'un système de récupération de l'énergie des vagues.* Theses, École normale supérieure de Cachan - ENS Cachan.

Ruellan, M., BenAhmed, H., Multon, B., Josset, C., Babarit, A., and Clement, A. (2010). Design methodology for a searev wave energy converter. *Energy Conversion, IEEE Transactions on*, 25(3) :760–767.

Sajadi, M. (2016). Techno-economic optimization of the hydrogen energy production from marine renewable energy. Master's thesis, Université de Nantes.

Schöps, S., De Gersem, H., and Bartel, A. (2010). A cosimulation framework for multirate time integration of field/circuit coupled problems. *Magnetics, IEEE Transactions on*, 46(8) :3233–3236.

Shampine, L. F. and Reichelt, M. W. (1997). The matlab ode suite. *SIAM journal on scientific computing*, 18(1) :1–22.

Souffran, G. (2012). *Dimensionnement de la chaine de traction d'un véhicule électrique hybride basé sur une modélisation stochastique de ses profils de mission.* PhD thesis, Université de Nantes.

Tao, N. (2016). Multi-physics simulation of a hybrid fuel-cell/batteries powertrain for the main propulsion of a full-electric ship. Master's thesis, Université de Nantes.

Thiaux, Y. (2010). *Optimisation des profils de consommation pour minimiser les coûts économique et énergétique sur cycle de vie des systèmes photovoltaïques autonomes et hybrides-Evaluation de la technologie Li-ion.* PhD thesis, École normale supérieure de Cachan-ENS Cachan.

Torregrossa, M. (2013). Lorient inaugure son bateau électrique. http ://www.avem.fr/actualite-lorient-inaugure-son-bateau-electrique-4417.html.

Trichet, D., Chevalier, S., Wasselynck, G., Olivier, J.-C., Auvity, B., Josset, C., and Machmoum, M. (2011). Global energy optimization of a light-duty fuel cell vehicle. In *Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), 2011 IEEE*, pages 1–6.

Trieste, S. (2013). *Modélisation et optimisation technico-économique d'une chaine de conversion et de stockage d'énergie d'un navire électrique zéro émission.* PhD thesis, Université de Nantes.

Trieste, S., Bourguet, S., Olivier, J.-C., Loron, L., and Le Claire, J.-C. (2011). Accurate sizing of supercapacitors storage system considering its capacitance variation. In *Power Electronics and Applications (EPE 2011), Proceedings of the 2011-14th European Conference on*, pages 1–10. IEEE.

Trieste, S., Hmam, S., Olivier, J.-C., Bourguet, S., and Loron, L. (2015). Techno-economic optimization of a supercapacitor-based energy storage unit chain : Application on the first quick charge plug-in ferry. *Applied Energy.*

Trieste, S., Olivier, J.-C., Bourguet, S., Loron, L., and Harpin, D. (2012). Optimisation économique du dimensionnement d'un ensemble convertisseur-supercondensateurs utilisé pour l'énergie principale d'un véhicule électrique de type plug-in. In *14ème édition de la Conférence Electronique de Puissance du Futur, Bordeaux.*

Undeland, T. M., Lode, J., Nilssen, R., Robbins, W. P., and Mohan, N. (1996). A single-pass design method for high-frequency inductors. *IEEE Industry Applications Magazine*, 2(5) :44–51.

Walford, C. A. (2006). *Wind turbine reliability : understanding and minimizing wind turbine operation and maintenance costs.* United States. Department of Energy.

Wasselynck, G., Auvity, B., Olivier, J.-C., Trichet, D., Josset, C., and Maindru, P. (2012). Design and testing of a fuel cell powertrain with energy constraints. *Energy*, 38(1) :414–424.

A Article de synthèse du navire *Ar Vag Tredan*

Applied Energy, Elsevier

Techno-economic optimization of a supercapacitor-based energy storage unit chain: Application on the first quick charge plug-in ferry ☆

S. Trieste, S. Hmam, J.-C. Olivier *, S. Bourguet, L. Loron

IREENA – Institut de Recherche en Énergie Électrique de Nantes-Atlantique (EA 4642), Université de Nantes, 37 Boulevard de l'Université, BP 406, 44602 Saint-Nazaire Cedex, France

HIGHLIGHTS

- Paper dedicated to the sizing optimization of a quick-charge ferry.
- Development of technical and economic models of supercapacitors.
- Optimization taking into account the whole power chain.
- Proposal of a charging strategy to increase the lifetime of supercapacitors.

ABSTRACT

This article elaborates a techno-economic approach that aims to optimize the conversion and energy storage unit chain of the first quick charge plug-in ferry. The choice of supercapacitors is motivated and then compared to other energy storage units for different kind of ferry exploitation. Several models were developed to be coupled with a global techno-economic model considering an exploitation strategy. In the last part, a typical application illustrates the cost reduction compared to the standard sizing approach.

1. Introduction

For a sustainable future, the passengers shipping transport is facing different problems [1–4]. In 2005, the CO2 emissions represent 14.2% of the overall transport emissions. 36% are rejected at less than 40 km from the coast [5]. The daily river transportation in cities is increasing every year and this growth should carry on in the next ten years. At the same time, although the oil prices are fluctuated with time being, the general trend is increased with the consumption of fossil fuels. For example, the oil prices is 20 €/barrel in 2002 and it reached 120 €/barrel in 2012. Some pessimistic scenarios are talking about oil scarce in the next 30 years. To deal with these emissions figures, the International Maritime Organization (IMO) and the European Union are introducing new policies making greenhouse gases emissions solutions green. Some policies limited the SOx gases rejections to 1.5% from 2010. Other policies such as European and American Emission Control Areas (ECA) brought rejections limits to 1% from 2010 and 0.1% from 2015 [6,7].

In order to face these environmental and price constraints, shipyards had to innovate. In 2009, the European Union launched the BESST consortium project (Breakthrough in European Shipyard and Shipbuilding Technologies) with the four main European shipyards and other naval subcontractors in order to find new solutions to overcome these problems. In fact, most of the all-electric ferries use a diesel generator to feed the on-board energy. This solution is widely spread but it does not respect the future ECA policies [2].

As the all-electric architecture offers flexible reconfiguration for energy sources, one of the 4 biggest European shipyard (STX France) has decided to develop a zero emission short commuter concept based on the all-electric ship architecture for ferries with length under 200 m. Through the BESST project, STX France chosed to develop a full-electric ferry solution with high crossing rotations. This requirement raised some questions about the exploitation case and the energy storage unit attached with. Indeed, depending on the nature of the selected storage system, it is possible to consider an exploitation scenario with one recharge per trip or per day. So in

☆ This paper is included in the Special Issue of Electrochemical Supercapacitors for Energy Storage and Conversion, Advanced Materials, Technologies and Applications edited by Dr. Jiujun Zhang, Dr. Lei Zhang, Dr. Radenka Maric, Dr. Zhongwei Chen, Dr. Aiping Yu and Prof. Yan.

* Corresponding author. Tel.: +33 240 172 692; fax: +33 240 172 618.
E-mail address: Jean-Christophe.Olivier@univ-nantes.fr (J.-C. Olivier).

Nomenclature

Supercapacitors

r_s	transfer resistance of supercapacitor modules (Ω)
r_p	equivalent balancing resistor of supercapacitor modules (Ω)
c_{sc}	nominal capacitance of supercapacitor modules (F)
C_{sc0}	initial capacitance of supercapacitor modules (F)
$\langle k_C \rangle$	average ageing of the capacitance (%/yr)
$\langle k_R \rangle$	average ageing of the transfer resistance (%/yr)
i_{sc}	supercapacitor current (A)
u_{sc}	supercapacitor voltage (V)
u_c	capacitance voltage of the supercapacitor (F)
P_{sc}	supercapacitor power (W)
E_{Rs}	energy losses per trip in the transfer resistance (J)
E_{Rp}	energy losses per trip in the balancing resistance (J)
T_{sc}	average temperature of a supercapacitor module (°C)
N_s	number of supercapacitor modules in serie
N_p	number of supercapacitor branches in parallel

Power converter

V_{DC}	DC-bus value of the power converter (V)
V_{d0}	drop voltage of the diodes (V)
V_{ce0}	drop voltage of the IGBT (V)
R_d	serial resistance of the diode (Ω)
R_{ce}	serial resistance of the IGBT (Ω)
f_{sw}	switching frequency of the power stage (Hz)
α	duty cycle of the power stage (%)
I_{rated}	rated current of the power stage (A)
i_l	output current of the power stage (A)
P_{conv}	rated power of the power converter (W)
P_{igbt}	total average losses in the IGBT (J)
P_{diode}	total average losses in the diodes (J)
E_{sw}	switching energy losses (J)

Smoothing inductors

L	inductance value (H)
B_{max}	maximal induction (T)
J_{max}	maximal current density (A/m^2)
k_w	copper fill factor of the winding (%)
A_e	core area (m^2)
A_w	winding area (m^2)
V_{core}	volume of iron (m^3)
V_{co}	volume of copper (m^3)
a	characteristic length of the smoothing inductor (m)
n_{turns}	number of turns of the coil
P_{copper}	copper losses (W)
P_{core}	iron losses (W)

Economic parameters

C_{losses}	cost of total losses per year (€r)
C_{acq}	acquisition cost (€)
C_{exp}	exploitation cost (€)
C_{ga}	global annual cost (€)/yr
C_{conv}	converter cost (€)
C_{self}	cost of the smoothing inductor (€)

Global parameters

T_{amb}	ambiant temperature (°C)
Δt_{utd}	time between two updates (h)
τ_{lft}	lifetime of the solution (yr)
T_s	sampling time of the simulation (s)
T_{trip}	trip duration of the boat (min)
δi_{sc}	relative current ripple of supercapacitor (%)
P_{rech}	maximum recharge power (W)

this paper, we first define, through a simplified approach given in Section 2, the choice of the scenario (one recharge per day or one recharge per trip) and the nature of the storage system. Resulting from this first definition we demonstrate that the best choice, based on a techno-economic criterion, is a recharge per trip, with supercapacitors. In Section 3, we present the structure of the conversion and energy storage unit chain (CESU). Next, in Section 4, we propose a techno-economic modelizations for each subsystem part. It includes the storage elements and the power converter, composed of an IGBT power bridge and smoothing inductors. This Section also presents an original energy management, which takes into account the ageing of the supercapacitor. Optimization results are given in Section 5, based on a classical trip of the full-electric ferry. Conclusions are given in Section 6.

2. Energy storage technology selection

To compare energy storage technologies, a classical Ragone chart is used (see Fig. 1). It results from this figure that two exploitation cases are highlighted, with different possible energy storage units [8–10,4]. The first exploitation case consists in one recharge per day. The operator recharges the energy storage unit during the night when the ship is not under operation. This kind of exploitation requires an energy storage unit in zone (1) of the Fig. 1 with high energy density and enough power density to deliver power [11,12]. Thanks to their characteristics and their high energy densities, batteries (NiMH, Pb/PbO2, Li-ion) and the PEM Fuel Cell (PEMFC) are potential technologies for such *scenario* [9]. The second exploitation case consists in one recharge per trip. Before each trip, the energy storage units are recharged. So, it must have high power density to quickly absorb the journey energy. The Fig. 1 shows that the zone (2) gathers energy storage systems where the typical recharge time is less than 5 min. In this case, the potential systems are supercapacitors and flywheel storage systems [12,9].

These two exploitation cases are compared regarding technical and economic aspect in Table 1 with an exploitation scenario of a plug-in ferry [11–13]. The ferry makes 35 rotations per day with

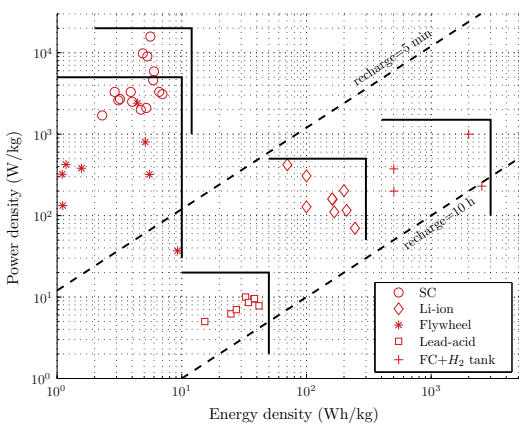


Fig. 1. Simplified Ragone chart.

Table 1
Techno-economic comparison of storage systems, for the 2 exploitation cases.

Exploitation case	1 recharge per day			1 recharge per trip	
Technology	PEMFC	Lead-acid bat.	Li-ion bat.	Flywheel	Supercapacitor
Safety norms	– –	–	–	– –	–
Maturity	– –	+	+	–	+
Lifetime	1 year	3 years	4 years	15–20 years	10–20 years
	– –	–	–	+	+
Acquisition cost	20 €/kW h 60 €/kW	0.23 €/W h	2 €/W h	10–30 €/W h 50–300 €/kW	20–50 €/W h
Over 20 years	2 M€	14 M€	80 M€	2–7 M€	5–12 M€

5 min spent to charge an energy storage unit and has to ensure a 20 min crossing mission. The energy needed for a rotation per day is approximately 8 155 kW h and it is around 233 kW h for a rotation per trip. As the ship should be functional for about 20 years, the choice should consider the energy storage lifetime. At last, the unit should be ready for an immediate use with low safety standards. From the technical perspective, the Table 1 shows the non-maturity and the short lifetime of the PEMFC for the recharge per day solution [12,9,14]. In addition, with its other characteristics and regarding our criteria, the fuel cell is not ready for a zero emission plug-in ferry [9]. From the economic perspective, if there is a yearly replacement of the fuel cell stack and a 5 years replacement of the hydrogen tank at 700 bars, this solution is not so much expensive compared to the battery solution. Face to the hydrogen solution, the battery energy solution seems viable for ferry exploitation [11,3]. Indeed, most of the existing stationary solutions use lead-acid batteries for their availability, cost and maturity [11,15]. But the low specific energy of such storage technologies makes them difficult to be integrated in transportation applications. Thus, a promising solution is Li-ion battery, which has higher energy density than lead-acid batteries. But if the technology meets the technical problems of transport applications, its high acquisition cost and its short lifetime limit its integration within such systems. The recharge per trip solution is attractive thanks to a longer lifetime of the energy storage system. The cheapest solution use flywheel [4] but it is not ready to be integrated into a plug-in ferry to due integration consideration [9]. Finally, according to our techno-economic criteria, the best compromise solution is to recharge per trip the supercapacitor based energy storage unit.

3. Structure of the energy storage unit

The ferry is designed like a catamaran and for safety and redundancy, a power electronics converter with its supercapacitors is implemented per ferry hull. This implementation ensures, in case of emergency, that a part of the stored energy is still available to end the mission. As the DC distribution bus value is constant and the supercapacitor has variable voltage related to the stored energy, a 3-phase power electronics converter is implemented to adapt the supercapacitor voltage and to transfer energy. The power electronics converter and the supercapacitor modules form a set called a conversion and energy storage unit (CESU) chain (cf. Fig. 2). During the development phase, we focused on the global cost per year to stay competitive with the standard diesel-generator solution. As illustrated in the Table 1, the supercapacitor has a high acquisition cost which could represent 20% of the overall ferry cost. It is the reason why it is important to develop a techno-economic model considering the naval specifications, determine the dominant variables, and find the best compromise to cut the cost.

To reach these objectives, different kind of models of the CESU elements must be developed. They are presented in the following section.

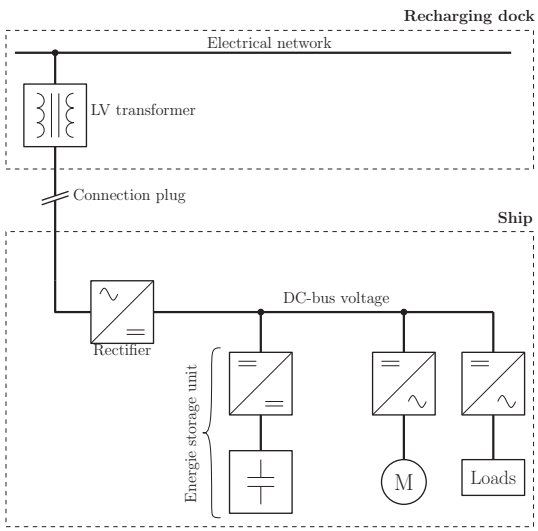


Fig. 2. Conversion and Energy Storage Unit chain.

4. Techno-economic modeling

This section is dedicated to the techno-economic modeling of the CESU subsystems, including the storage elements, the IGBT converter and the smoothing inductors. With the energetics models, we can estimate the losses, the apparent power and the number of supercapacitor. The thermal and ageing models permit to evaluate the temperature increase and the lifetime. At last, the economic models estimate the acquisition and exploitation costs. The final objective is the estimation and the minimization of the global annual cost C_{ga} given by [16]:

$$C_{ga} = \frac{C_{acq} + C_{exp}}{\tau_{lft}} \tag{1}$$

where C_{acq} and C_{exp} are respectively the global acquisition and exploitation costs (in €), and τ_{lft} is the lifetime of the solution (in years).

4.1. Supercapacitors

Supercapacitors is the key part of the CESU, because it alone accounts for 20% of the total ship cost. If the electric model of supercapacitors is relatively simple, ageing is much less. And yet it is directly involved in the overall annual cost given in Eq. (1). It is the reason why a special attention is paid to this element. From the electrical model, it is possible to deduce the voltage and current profiles, and calculate the losses during the energy

transfers. From these losses and based on a thermal model, heating is calculated and used in the ageing model, which depends on both the temperature and voltage profiles seen by each cell of supercapacitors.

4.1.1. Electrical model

Concerning the electrical model, a simple one-branch is used [17,8,18]. A supercapacitor module is then composed of a serial resistance r_s which represents the losses during the energy transfer, a capacitance c_{sc} which represents the stored energy and a parallel resistance r_p which represents the balancing losses. Each module coming out the production lines does not have exactly the same capacitance and serial resistance values. In order to ensure a minimum value, manufacturers are conservative by choosing the minimum capacitance value and the maximum serial resistance as shown on the Fig. 3, obtained from a sample of 130 modules Batscap, 375 F/65V.

The maximum scattering of this sample is of about 5% on capacitance value and 10% on the transfer resistance r_s. By security, we consider the manufacturer data. We also introduced the number of serial modules per branch N_s and the number of parallel branches N_p. Finally, the equivalent storage element is deduced from module parameters (as illustrated in Figs. 4 and 5):

$$R_s = r_s \frac{N_s}{N_p}; \quad R_p = r_p \frac{N_s}{N_p}; \quad C_{sc} = c_{sc} \frac{N_p}{N_s} \tag{2}$$

The differential equation governing the state of charge u_c of the storage device is given by:

$$i_{sc} = C_{sc} \frac{\mathrm{d}u_c}{\mathrm{d}t} + \frac{u_{sc}}{R_p} \tag{3}$$

$$u_{sc} = R_s C_{sc} \frac{\mathrm{d}u_c}{\mathrm{d}t} + u_c \tag{4}$$

In this study, the charge and discharge of the supercapacitors are defined through a power profile. So, it is assumed that the value imposed across the storage device is the power $P_{sc} = i_{sc} u_{sc}$. From Eqs. (3) and (4), it is found:

$$P_{sc} = \left(R_s + \frac{R_s^2}{R_p}\right) C_{sc}^2 \left(\frac{\mathrm{d}u_c}{\mathrm{d}t}\right)^2 + \left(1 + 2\frac{R_s}{R_p}\right) C_{sc} u_c \frac{\mathrm{d}u_c}{\mathrm{d}t} + \frac{u_c^2}{R_p} \tag{5}$$

Because this nonlinear differential equation can not be solved analytically, the numerical Euler method is used and gives:

$$u_c(t + T_s) = u_c(t) + T_s \frac{\mathrm{d}u_{c(t)}}{\mathrm{d}t} \tag{6}$$

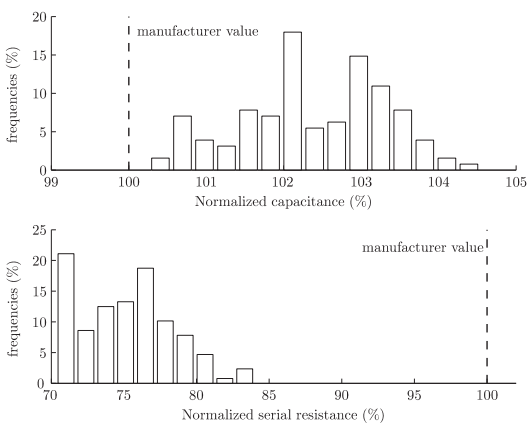


Fig. 3. Electrical parameter scattering for a sample of 130 supercapacitor modules.

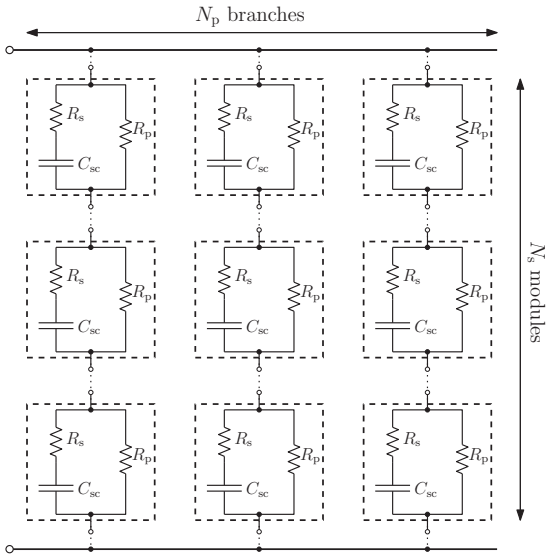


Fig. 4. Equivalent model of the storage, made by module associations.

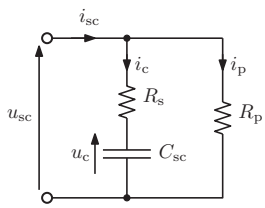


Fig. 5. Equivalent storage element.

where T_s is the sampling time and $du_{c(t)}/dt = x$ is the solution of the following equation, obtained from Eq. (5):

$$\left(R_s + \frac{R_s^2}{R_p}\right) C_{sc}^2 x^2 + \left(1 + 2\frac{R_s}{R_p}\right) C_{sc} u_c x + \frac{u_c^2}{R_p} - P_{sc} = 0 \tag{7}$$

This second-order equation has two solutions depending on the sign of the imposed power P_{sc}. For a positive power P_{sc}, i.e. during the recharge of the supercapacitors, the chosen solution is the positive one. During de discharge, it is the negative one.

Finally, from Eqs. (6), (3) and (4), the voltage and current variations can be computed and used to evaluate the serial and balancing losses in the equivalent storage element:

$$E_{Rs} = R_s \int_0^{T_{trip}} i_c^2 \, \mathrm{d}t; \quad E_{Rp} = \frac{1}{R_p} \int_0^{T_{trip}} u_{sc}^2 \, \mathrm{d}t \tag{8}$$

where T_{trip} is the duration of each trip between two recharges and i_c is the current in the equivalent serial transfer resistance R_s. Balancing losses depend on the technology used. Passive balancing consists in placing a bypass resistor in parallel with each cell. To reduce losses, it is possible to use an active balancing circuit, which act only beyond a given threshold. In this study, for reasons of simplicity, security and robustness, we consider a passive balancing technology.

4.1.2. Thermal model for ageing

As the plug-in ferry is a long term application of about 20 years, the ageing of supercapacitors must be taken into account. It turns out that the ageing mainly depends on the thermal and electrical solicitations of a cell [19–22]. The temperature increase of each module is due to the energy transfer and balancing losses [23]. Both resistances are inside the module and the heat evacuation is done through natural convection. Moreover, its thermal time constant, close to 1 h, is much greater than the trip duration (half hour). For simplicity, only the average value of power losses and temperature increasing are taken into account. Thanks to this simplified average thermal model, it is possible to estimate the temperature increase, knowing the internal average losses during one cycle:

$$T_{sc} = T_{amb} + \frac{1}{T_{trip}} \frac{R_{th}}{N_s N_p} (E_{Rs} + E_{Rp}) \tag{9}$$

with R_{th} the thermal resistance of each module given by the manufacturer, T_{sc} the average temperature of the module and T_{amb} the ambient temperature.

4.1.3. Ageing model

Thanks to many works [24,20,21,25,19], it is clearly demonstrated that the supercapacitor ageing is characterized by a loss of capacitance and an increase of the serial resistance. Moreover, the rate of degradation of these parameters is due to the temperature and voltage cycle [20]. In general, the end of life criteria are defined as either 20% capacitance loss or 100% increase in internal resistance. Two kinds of experimental tests are used to model the capacitance losses, which are the calendar and cycling ageing. The calendar ageing consists on the measurement of the capacitance under a constant temperature and a constant voltage [22,20,25,26]. During the test, the temperature and voltage values are greater than the nominal use, in order to accelerate the ageing. Taking ageing data from [20,25], a synthesis is done for different calendar voltages and temperatures. This synthesis is given by Fig. 6. As expected, the lifetime is shorter for high voltage and high temperature.

Obviously, it is difficult to identify a clear generic degradation profile, due to the high dispersion of the operating conditions and the lifetimes. But, comparing all the data according to their lifetime by time normalization, a single common ageing profile appears regardless of the voltage and the temperature with a linear decrease after 20% of the lifetime (see Fig. 7).

In order to estimate the lifetime, an asymptote is introduced and can be shown on Fig. 7. It passes by 90% of the nominal capacitance and is governed by an Arrhenius law, given by [20,27,28,19]:

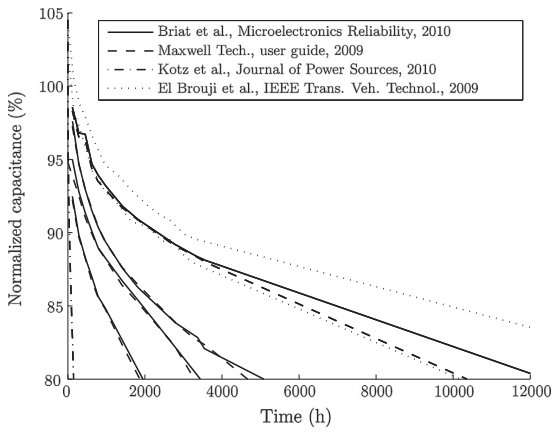


Fig. 6. Capacitance ageing synthesis.

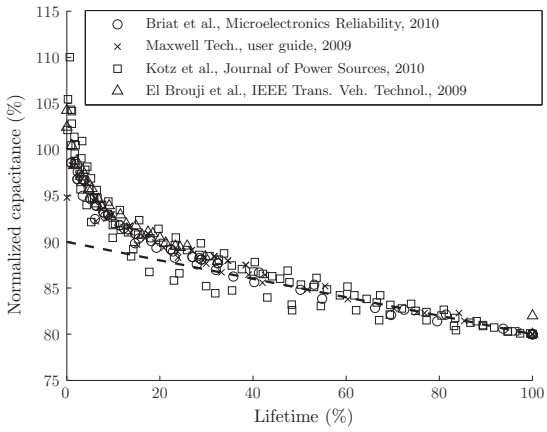


Fig. 7. Capacitance evolution after a lifetime normalization (in %).

$$C_{sc}(t) = 0.9 C_{sc0}(1 - k_C t) \tag{10}$$

$$k_C = k_{C0} 2^{\frac{V_c - V_0}{\Delta V}} 2^{\frac{T_c - T_0}{\Delta T}} \tag{11}$$

where V_c and T_c are respectively the voltage and temperature values, applied during the ageing procedure. In the same way, the ageing of the serial resistance is given by:

$$R_s(t) = R_{s0}(1 + k_R t) \tag{12}$$

$$k_R = k_{R0} 2^{\frac{V_c - V_0}{\Delta V}} 2^{\frac{T_c - T_0}{\Delta T}} \tag{13}$$

It is common to impose the parameters V_0 and T_0 at nominal operating values of a supercapacitor cell, that are respectively 2.5 V and 25°. It remains to define the four parameters k_{C0}, k_{R0}, ΔV and ΔT to fit the degradation factors k_C and k_R to experimental measurements. This parameter identification was done for various supercapacitors. To ensure that the identification is correct, verifications are made based on other measurement datas [29,21]. The parameters set obtained from these experimental datas is given by Table 2 and are illustrated by Fig. 8.

In several studies, the degradation profile is extended to voltage and temperature cycling. This operating mode is classically encountered in real applications and is therefore more representative [30,31]. The cycling ageing consists on the measurement of the capacitance variation, during a variable cycle of voltage and temperature. At the end of the cycle, a degradation factor is obtained and expressed as a percentage of capacitance loss per cycle. The previous Eq. (11) is then rewritten in an integral form. Then, the general equation of the average ageing $\langle k_C \rangle$, at the scale of one trip, are given by [32,33]:

$$\langle k_C \rangle = \frac{1}{T_{trip}} k_{C0} \int_0^{T_{trip}} 2^{\frac{u_{sc}(t) - V_0}{\Delta V}} 2^{\frac{T_{sc}(t) - T_0}{\Delta T}} \mathrm{d}t \tag{14}$$

$$\langle k_R \rangle = \frac{1}{T_{trip}} k_{R0} \int_0^{T_{trip}} 2^{\frac{u_{sc}(t) - V_0}{\Delta V}} 2^{\frac{T_{sc}(t) - T_0}{\Delta T}} \mathrm{d}t \tag{15}$$

Because the temperature T_{sc} of each supercapacitor module is considered constant during one trip, only the voltage term remains in the integral:

Table 2
Ageing parameters of the Arrhenius law.

V_0	T_0	ΔV	ΔT	k_{C0}	k_{R0}
2.5 V	25 °C	0.2 V	10 °C	1.5%/yr	10.0%/yr

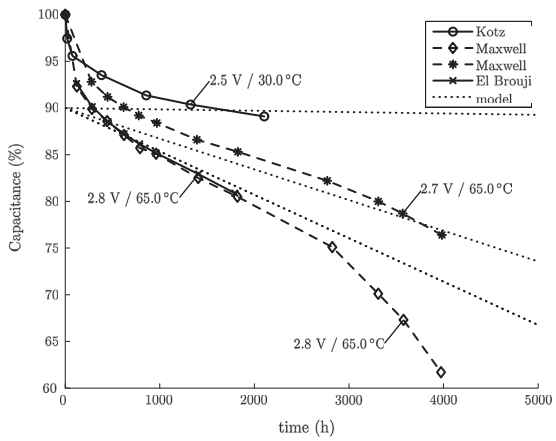


Fig. 8. Ageing model results compare to the experimental tests.

$$\langle k_C \rangle = \frac{1}{T_{trip}} k_{C0} 2^{\frac{T_{sc}-T_0}{\Delta T}} \int_0^{T_{trip}} 2^{\frac{u_{sc}(t)-V_0}{\Delta V}} dt \quad (16)$$

$$\langle k_R \rangle = \frac{1}{T_{trip}} k_{R0} 2^{\frac{T_{sc}-T_0}{\Delta T}} \int_0^{T_{trip}} 2^{\frac{u_{sc}(t)-V_0}{\Delta V}} dt \quad (17)$$

These average factors $\langle k_C \rangle$ and $\langle k_R \rangle$ can then be directly used with Eqs. (10) and (12), by substitution of the coefficients k_C and k_R, obtained from a calendar ageing [20,25]. Due to the degradation of the capacitance with time, the voltage profile changes over time. So, the average degradation factor $\langle k_C \rangle$ must be recalculated regularly, to take into account this change in the voltage cycle.

4.1.4. Economic model

The proposed economical model of the supercapacitors is based on the unit cost of a single module. In the optimization phase, the number of these modules is adjusted to better meet the needs of the application. Because the number of modules is considered as an integer, the choice of its size is an important parameter. Fig. 9 gives a synthesis of various commercial costs of a large scale of supercapacitor modules.

This figure clearly shows that there is a tradeoff between cost and precision sizing. Indeed, with a large number of small modules, the design will be more accurate (due to a smaller quantum of energy), but ultimately may be more expensive. Instead, the choice of large modules reduces the energy cost, but gives a less accurate and over sizing. Nevertheless, the targeted application needs a total stored energy of about 15 kW h. The biggest module size commercially available is of about 200 W h. The energy quantum is lower than 1.5% of the total needed energy. It is therefore clear to retain these large modules (Batscap 375 F/65V) whose energy cost C_{mod} is of 25 €/W h.

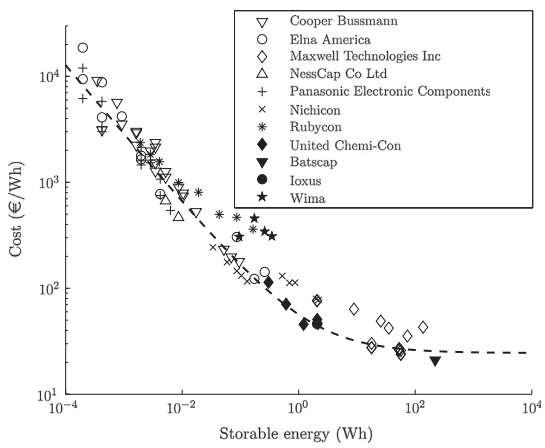


Fig. 9. Supercapacitor cost in €/W h, obtained from manufacturer quotations.

4.2. Power converter and smoothing inductor

The power converter is a 3-phase IGBT bridge, used in interleaving to reduce the output current ripple in the supercapacitors [34]. This IGBT converter is associated with three smoothing inductors (see Fig. 10). For the electrical model of the converter, conduction and switching losses are considered. For the smoothing inductor, electric and magnetic losses are calculated, based on its geometrical parameters. Economical modeling is also presented in this section.

4.2.1. Power converter modeling

In this section, the design and sizing of the power electronics converter is presented. The topology of such device consists of two IGBT and two parallel diodes per branch. The control is assumed to be a classical symmetric pulse-width modulation (PWM) with interleaving. The first step of this study is the sizing of the IGBT bridge, which depends on the rated current and voltage (noted V_{rated} and I_{rated}). Here, the DC-bus voltage V_{DC} and the switching frequency f_{sw} were imposed by the manufacturer and are respectively equal to 600 V and 7 kHz. These specifications impose for the IGBT devices a rated voltage of 1200 V. Then, the design of the power converter depends only on the rated current I_{rated}, which must be defined.

The current i_{sc} in the supercapacitors and i_l in each inductor are the sum of a mean value and a ripple due to the PWM:

$$|i_{sc}| = |I_{sc}| + \Delta i_{sc}, \quad |i_l| = |I_l| + \Delta i_l \quad (18)$$

the relationship between these currents, considering a three-phases interleaving, is given by:

$$I_{sc} = 3 I_l, \quad \Delta i_{sc} = \frac{\Delta i_l}{3} \quad (19)$$

Now, considering perfect inductors, the duty cycle α of the power stage is given by:

$$\alpha = \frac{u_{sc}}{V_{DC}} \quad (20)$$

With a constant switching frequency f_{sw} and an inductor value L, the peak-to-peak current ripple Δi_l is given by [35]:

$$\Delta i_l = \frac{V_{DC}}{L f_{sw}} \alpha (1 - \alpha) \quad (21)$$

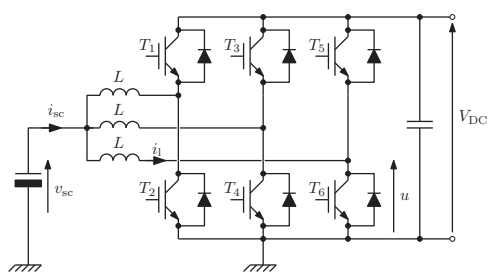


Fig. 10. IGBT power converter structure.

Finally, the rated current I_{rated} of the IGBT converter is calculated considering a full trip of the ship and defined by:

$$I_{rated} = \max\left(\Delta i_l + i_l\right) \tag{22}$$

Once the sizing of the converter is performed, it is possible to infer the electrical parameters of devices given by empirical relationships [36,16,37]. The considered electrical parameters are the drop voltage in IGBT (V_{ce0}) and diode (V_{d0}), the serial resistance of IGBT (R_{ce}) and diode (R_d), and the switching losses E_{sw} per PWM period. Based on a larger sample of 1200V-IGBTs from different manufacturers and with rated currents between 50 and 3600 A, we get the next relationships for the electrical parameters of devices [16]:

$$\begin{cases} V_{d0} = V_{ce0} = V_{drop}\,[V] \\ R_{ce} = k_{rce}\, I_{rated}^{-1}\,[\Omega] \\ R_d = k_{rd}\, I_{rated}^{-1}\,[\Omega] \\ E_{sw} = k_{esw}\, i_l\,[\mu J] \end{cases} \tag{23}$$

where V_{drop}, k_{rce}, k_{rd} and k_{esw} are coefficients summarized in Table 3.

With this set of parameters and considering simplified waveform such as in [36], the following equations permit to estimate the conduction and switching losses in a three-phases IGBT bridge:

$$P_{igbt} = \begin{cases} \alpha\left[R_{ds}\left(\frac{\Delta i_l^2}{12} + I_l^2\right) + V_{ce0} I_l\right] \text{ for } i_l > 0 \\ (1-\alpha)\left[R_{ds}\left(\frac{\Delta i_l^2}{12} + I_l^2\right) + V_{ce0} I_l\right] \text{ for } i_l < 0 \end{cases} \tag{24}$$

$$P_{diode} = \begin{cases} (1-\alpha)\left[R_d\left(\frac{\Delta i_l^2}{12} + I_l^2\right) + V_{d0} I_l\right] \text{ for } i_l > 0 \\ \alpha\left[R_d\left(\frac{\Delta i_l^2}{12} + I_l^2\right) + V_{d0} I_l\right] \text{ for } i_l < 0 \end{cases} \tag{25}$$

$$P_{sw} = 400\,|I_l|\,f_{sw} \tag{26}$$

Table 3
List of used parameters for the optimization.

Supercapacitor modules		
C_{sc0}	Initial module capacitance	375 F
r_s	Module serial resistance	3 mΩ
r_p	Module balancing resistance	200 Ω
V_{mod}	Module rated voltage	65 V
R_{th}	Module thermal resistance	°C W^{-1}
C_{mod}	Unitary module cost	5500 €
Power converter		
V_{rated}	Rated voltage of IGBT	1200 V
V_{drop}	Diode and IGBT drop voltages	1.2 V
k_{rd}	Diode serial resistance coef.	0.5 Ω A^{-1}
k_{rce}	IGBT serial resistance coef.	0.85 Ω A^{-1}
k_{esw}	Switching energy coef.	400 μJ A^{-1}
Smoothing inductors		
J_{max}	Max. current density	5 A mm^{-2}
B_{max}	Max. core induction	1.2 Tesla
k_w	Winding fill factor	0.3
ρ_{co}	Copper conductivity	17.10^{-9} Ω m
$m\,v_{core}$	Core density	7180 kg m^{-3}
$m\,v_{co}$	Copper density	7870 kg m^{-3}
C_{core}	Core material cost	3 € kg^{-1}
C_{co}	Copper cost	6 € kg^{-1}
K_{self}	Raw cost factor	8
Other application settings		
V_{DC}	DC-bus voltage	600 V
T_{amb}	Ambiant temperature	25 °C
f_{sw}	Converter switching frequency	7 kHz
T_{trip}	Travel time (round-trip)	30 min
E_u	Useful energy of the round-trip	16.6 kW h
C_{kWh}	Cost of electricity	0.11 c€ kW h^{-1}
T_s	Simulation sample time	1 s

The power converter losses can then be summarized for one trip T_{trip} as follows:

$$E_{conv} = 3\int_0^{T_{trip}} P_{diode}(t) + P_{igbt}(t) + P_{sw}(t)\,dt \tag{27}$$

For the power converter cost, most work suggests to base it on the rated power. In [38–41], the studied structures are dedicated to single phase inverter for grid connection of PV systems. They are well suited for the cost estimation of inverters with a rated power between 1 and 5 kW. There is, however, few studies on three-phase IGBT converters. In [16,42], the authors deal with three phase AC–DC–AC converter for wind turbine which is more expensive than a simple IGBT inverter. Additional datas are obtained from quotes of manufacturers, of three-phase IGBT inverters, including current sensors and DC-bus capacitor. These cost datas are summarized in Fig. 11.

The power converter cost (in €) can be approximated by a trendline (c.f. Fig. 11):

$$C_{conv} = 35\,P_{conv}^{0.5} \tag{28}$$

where P_{conv} is the maximal output power of the converter, obtained from rated voltage (V_{rated}) and current (I_{rated}) of the IGBT:

$$P_{conv} = \frac{3}{4} V_{rated}\, I_{rated} \tag{29}$$

4.2.2. Smoothing inductor modeling

The smoothing inductor is based on the standard normalized geometry double E-core given by Fig. 12. The sizing of this device is done for the maximum inductor current I_{rated} given by Eq. (22) and considering a maximum current ripple Δi_l of 15% of I_{rated}. The chosen material is the Metglas 2605SA1, well known for its low core loss.

The design of an inductor is based on the stored energy and can be reduced to the definition of the winding area A_w and the core area A_e [43,44]:

$$A_e A_w = \frac{L I_{rated}^2}{B_{max} J_{max} k_w}, \quad \text{with} \quad A_e = \frac{2}{3} A_w \tag{30}$$

where L is the self inductance value, B_{max} the maximal induction in the core, J_{max} the maximal current density in the coil and k_w the copper fill factor of the winding. With the geometry given by Fig. 12 the characteristic length a is deduced from Eq. (30):

$$a = \left(\frac{2}{3} A_e A_w\right)^{\frac{1}{4}} = \left(\frac{2}{3}\frac{L I_{rated}^2}{B_{max} J_{max} k_w}\right)^{\frac{1}{4}} \tag{31}$$

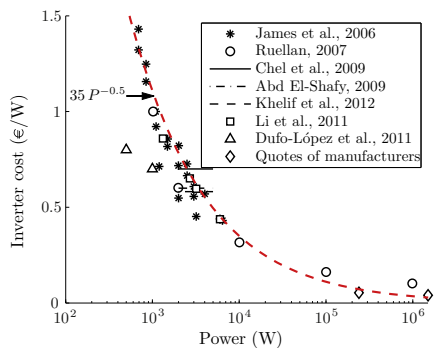


Fig. 11. Synthesis of power converter costs, according to the rated power.

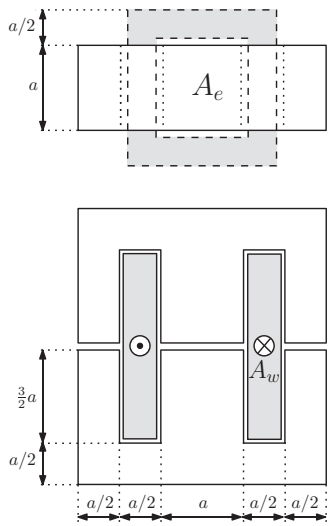


Fig. 12. Standard geometry of the smoothing inductors.

With this characteristic length a, it is possible to easily calculate the number of turns of the coil (n_{turns}), the serial resistance (R_w) and the volume of iron and copper (V_{co} and V_{core}):

$$n_{turns} = \frac{A_w J_{max} k_w}{I_{rated}} \tag{32}$$

$$R_w = \rho_{co} \frac{6 a n_{turns}^2}{k_w A_w} \tag{33}$$

$$V_{co} = 9 k_w a^3 \tag{34}$$

$$V_{core} = 9 a^3 \tag{35}$$

From Eq. (33), the average copper losses for one switching period of the power converter can be calculated considering a triangular waveform for the current ripple Δi_l [45,44]:

$$P_{copper} = R_w \left(\frac{\Delta i_l^2}{12} + I_l^2 \right) \tag{36}$$

For the Metglas amorphous alloy 2605SA1 [46], the core losses expression p_{core} (in W m^{-3}) is given by manufacturers uses the following Steinmetz equation:

$$p_{core} = 0.412 f_{sw}^{1.51} \Delta B^{1.74} \tag{37}$$

where f_{sw} is the switching frequency of the power stage and ΔB the peak-to-peak induction ripple. With the core volume V_{core} given by Eq. (35) and assuming that the magnetic circuit is not saturated, the core losses P_{core} are given by:

$$P_{core} = 0.412 V_{core} f_{sw}^{1.51} \left(\frac{B_{max}}{I_{rated}} \Delta i_l \right)^{1.74} \tag{38}$$

As for the supercapacitors and power converter, the total losses for one trip is given by:

$$E_{self} = 3 \int_0^{T_{trip}} P_{copper}(t) + P_{core}(t)\, dt \tag{39}$$

From various commercial datas, it appears that the cost of an inductor is proportional to the total cost of raw material:

$$C_{self} = K_{self} (V_{core}\, m v_{core}\, C_{core} + V_{co}\, m v_{co}\, C_{co}\, k_w) \tag{40}$$

where $m v_{core}$ and $m v_{co}$ are the specific densities of the core material and copper, C_{core} and C_{co} the costs of raw materials (in €/kg) and K_{self} an additional factor reflecting the ratio between the cost of an inductor and the cost of the raw material. Using Eqs. (34) and (35) in Eq. (41), the cost of the inductance can be expressed with the stored magnetic energy:

$$C_{self} = K_{self} \frac{m v_{core}\, C_{core} + m v_{co}\, C_{co}\, k_w}{2.86 (B_{max} J_{max} k_w)^{3/4}} \left(L I_{rated}^2 \right)^{3/4} \tag{41}$$

Based on commercial offers, the coefficient K_{self} is set equal to 8.

4.3. Exploitation strategy

The ageing model developed in the preceding section shows that the supercapacitor voltage seen all along the exploitation time is an influent parameter. For a supercapacitor, the higher the end of charge voltage, the shorter the lifetime. In order to extend this lifetime, an exploitation strategy is developed. The standard strategy keeps a constant value of the end of charge voltage all along the lifetime of the system, calculated in the worst case, i.e. for the lowest capacitance value. In this work, this end of charge voltage is adapted to the capacitance loss, considering the needed energy for a trip (see Fig. 13). Thus, the supercapacitor voltage is minimized and the lifetime is increased.

But to be effective, this operating strategy needs a time Δt_{utd} between two updates short enough. It also requires to well know the value of the capacity and energy needs of a trip. It is therefore expected for this application an annual maintenance (Δt_{utd} = 1 year) in order to update both the values of the capacitance and the end of charge voltage.

5. Optimization results

The optimization of the supercapacitor energy storage unit is applied to the electrical catamaran *Ar Vag Tredan*, operating since September 2013 and crossing the harbor of Lorient, France. The objective of this work concerns the optimization of the total acquisition and operating cost, for a duration of 20 years. This ship has two identical propulsion chains, spread on each hull. Here, the study is based on one storage unit only. So the total cost is then twice that calculated in this work. The power cycle of each chain for one round-trip is illustrated by Fig. 14. It is assumed that the average number of crosses per day is 35 and a single crossing is made in 10 min plus a 5 min stop at each dock. But the ferry charges its supercapacitors only at the dock (R).

The four parameters used for this techno-economic optimization are the number of modules in series N_s, the number of

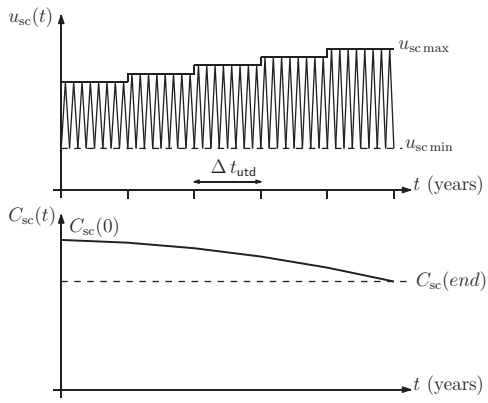


Fig. 13. Proposed exploitation strategy.

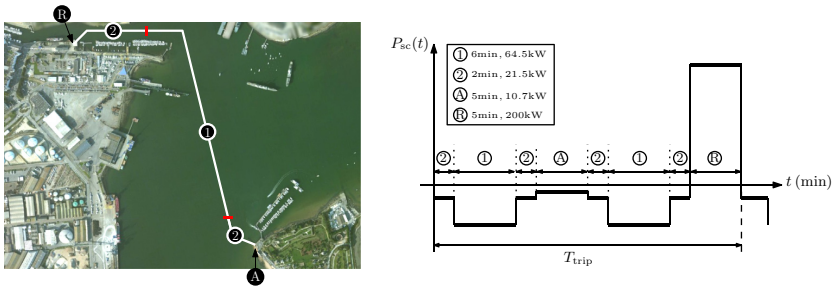


Fig. 14. Power cycle specifications for the plug-in ferry *Ar Vag Tredan*.

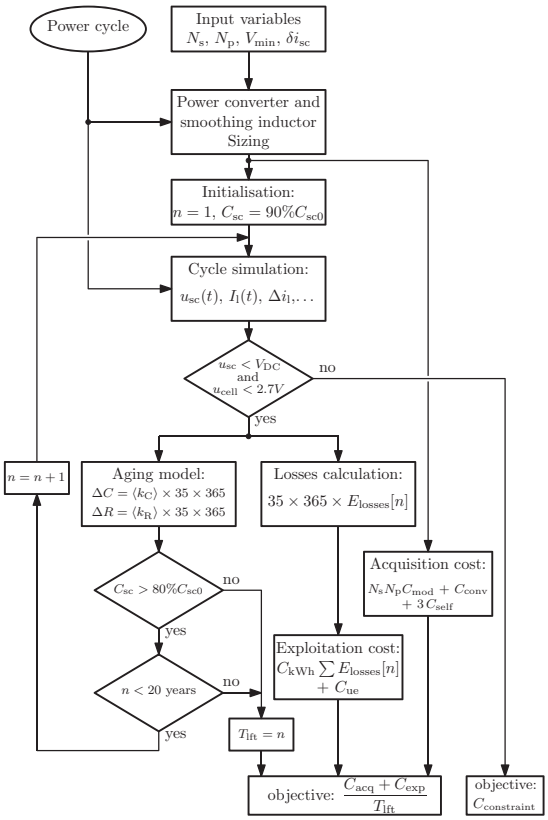


Fig. 15. Flowchart of the objective function calculation.

branches in parallel N_p, the minimum voltage on the each cell of supercapacitor V_{min} and the peak-to-peak current ripple ratio δi_{sc}, given in percent of the maximum current I_{sc}, such as:

$$\Delta i_{sc} = \delta i_{sc} \max(I_{sc}) \tag{42}$$

The integer variables N_s and N_p permit to define the size of the storage unit. The minimum voltage V_{min} affects both the amount of energy exchanged by each supercapacitor module and the rated current of the converter. Finally, the current ripple δi_{sc} permits to balance the smoothing inductor size and the additional losses due to this ripple.

Table 4
Techno-economic optimization result compared to a classical sizing.

	Standard	Optimized
Maintenance	–	1 yr
N_s	9	7
N_p	11	12
V_{min}	30%$u_{sc\,max}$	18%$u_{sc\,max}$
δi_{sc}	1%	1.8%
I_{rated}	570 A	798 A
L	218 µH	90 µH
ΔT	5.5–6.5 °C	5–6 °C
$C_{sc(end)}$	83%C_{sc0}	82%C_{sc0}
$R_{s(end)}$	165%R_{s0}	180%R_{s0}
τ_{lft}	20 yrs	20 yrs
Acquisition costs		
Supercapacitors	544.6 k€	462.1 k€
Power converter	17.7 k€	21.0 k€
Inductors	4.1 k€	3.5 k€
Exploitation costs		
Trip	491.83 k€	491.83 k€
Supercapacitors:		
Serial resistance	2.8 k€	12.9 k€
Parallel resistance	17.3 k€	14.6 k€
Power converter:		
Conduction losses	2.8 k€	3.6 k€
Switching losses	7.0 k€	9.8 k€
Smoothing inductors:		
Copper losses	0.54 k€	0.6 k€
Core losses	0.59 k€	1.78 k€
Total cost	54.5 k€ yr^{-1}	51.1 k€ yr^{-1}

5.1. Objective function and constraints

From the four input parameters and power cycle, the objective function implemented for this optimization must calculate the total acquisition and operation cost, as given by Eq. (1). The acquisition cost include the number of supercapacitor modules, the power converter and the three smoothing inductors:

$$C_{acq} = N_s N_p C_{mod} + C_{conv} + 3\,C_{self} \tag{43}$$

The sizing of the power converter needs the maximum current I_{rated} supplied on an entire trip. Considering the load profile given by Fig. 14, this rated current is obtained at the beginning of the recharge. Indeed, the supercapacitor voltage is at the minimum and the power at the maximum value. From the minimum supercapacitor voltage V_{min}, the recharge power P_{rech} and the current ripple δi_{sc}, this peak current is given by:

$$I_{rated} = \frac{P_{rech}}{V_{min}} \left(\frac{1}{3} + \frac{3}{2} \delta i_{sc} \right) \tag{44}$$

The computation of the smoothing inductor cost is based on the power converter rated current I_{rated} and the self inductance value L. L is obtained from the supercapacitor current ripple ratio δi_{sc} and the DC-bus voltage. In the worst case, i.e. for a duty cycle of 0.5, this inductance can be calculated from Eqs. (19) and (21):

$$L = \frac{V_{DC}}{24 f_{sw}\, \delta i_{sc}} \tag{45}$$

The exploitation cost C_{exp} includes the total cost of useful energy C_{ue} and losses C_{losses} all along the lifetime of the ship:

$$C_{exp} = C_{ue} + C_{losses} \tag{46}$$

The useful energy is easily obtained knowing the energy needed for one trip E_{trip} (in J) and considering 35 trips per day. Based on the kW h cost (C_{kWh}) and for a solution lifetime τ_{lft}, we get:

$$C_{ue} = \frac{35 \times 365 \times \tau_{lft}}{3.6 \cdot 10^6} E_{trip}\, C_{kWh} \tag{47}$$

It remains to determine of the total electrical losses. Here, the problem is that these losses depend on the ageing of the supercapacitor parameters. So, their calculation requires a simulation of all the trips of the ship throughout its lifetime. To reduce the computation time, the calculation of these losses is made once a year and for one cycle (see Fig. 13). Indeed, for such a period, there are little changes of the electrical parameters of the supercapacitor and the calculated cycle can be extrapolated over this time. The ageing of supercapacitor is then updated only each year. With this method, the number of calculations is reduced without causing significant error in the final result. To summarize, the calculation of the cost of these losses is in the following form:

$$C_{losses} = C_{kWh} \times 35 \times 365 \times E_{losses} \tag{48}$$

with

$$E_{losses} = \sum_{n=1}^{T_{lft}} E_{Rs}[n] + E_{Rp}[n] + E_{conv}[n] + E_{self}[n] \tag{49}$$

where $[n]$ is the year index of the losses calculation, based on the average ageing in one year of supercapacitor parameters.

This objective function must respect some constraints. Considering manufacturer recommendations, the lifetime of supercapacitor is not yet secured for more than 20 years. So, the lifetime is limited to this value. To ensure the control of the power converter, the maximum voltage of supercapacitors u_{sc} should not exceed the DC-bus voltage V_{DC}. Finally, in order to avoid overheating and explosion risks, a supercapacitor cell voltage u_{cell} should not exceed its nominal value of 2.7 V. If at least one constraint is not satisfied, the objective function is penalized by a very high cost $C_{constraint}$. The simplified flowchart of this objective function is given by Fig. 15 and the parameter set used for the optimization is shown in Table 3.

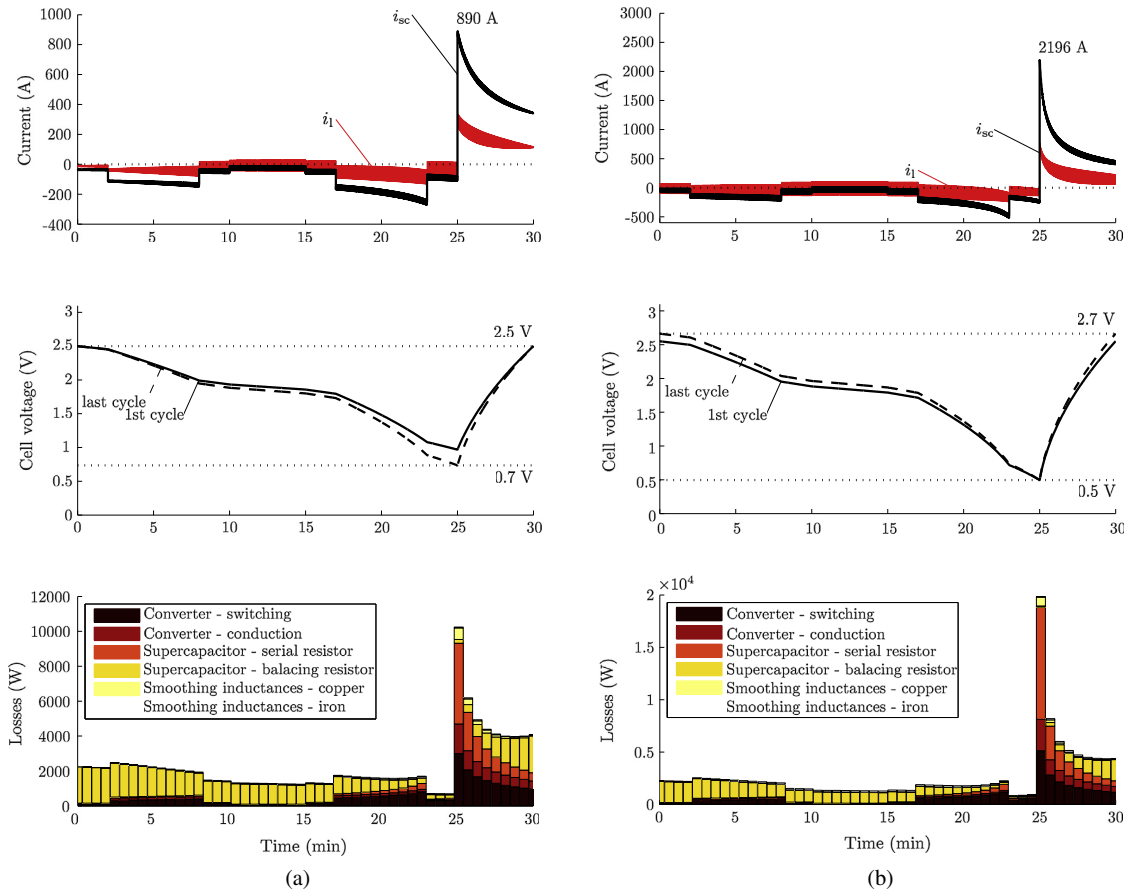


Fig. 16. Simulation results for a classical sizing (a) and for the optimized sizing (b).

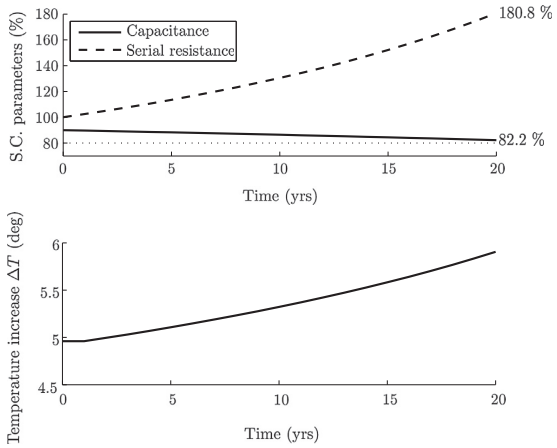


Fig. 17. Ageing of supercapacitor parameters and temperature increase in modules.

5.2. Optimization results

For the optimization of this techno-economic problem, a particle swarm algorithm is used. Both variables N_s and N_p are integer ranging from 5 to 15. The minimum supercapacitor voltage value V_{min} can be between 0% and 100% of the maximum supercapacitor voltage. The current ripple δi_{sc} is between 0% and 10% of the maximum supercapacitor current. The tuning of the particle swarm algorithm is classical, with a population of 50 particles and a maximum number of iterations of 200. The optimized sizing result obtained with the proposed exploitation strategy is compared to a classical sizing, which is obtained by considering a maximum cell voltage of 2.5 V and a depth of discharge of 70% (i.e. a minimum cell voltage of 0.75 V). The minimum cell voltage is calculated considering the end of life capacitor value and the energy needed for a trip. The exploitation strategy for this classical sizing consists in charging the supercapacitors to their nominal value (2.5 V per cell) over the entire life of the ship. It is then the minimum voltage which evolves depending on the ageing of supercapacitors.

A comparison of the optimization result with the classical sizing strategy is given by Table 4 and Fig. 16. The techno-economic optimization evaluates a minimum global cost of 51.1 k€per year for a lifetime of 20 years. The standard sizing gives a global annual cost of 54.5 k€, almost 6% more than the optimized solution. That gain is achieved mainly on the number of modules of supercapacitors, passing from 99 to 84. However, reducing the number of modules necessarily leads to an increase of the depth of discharge and an increase of the maximum supercapacitor voltage (see Fig. 16). It also leads to an increase in the supercapacitor current and therefore increases the size of the converter, the smoothing inductors and the conduction losses. Overall, the optimization results show that it can be economically advantageous to reasonably oversize the power conversion chain to allow a reduction in the storage system, which is the most expensive part.

Concerning the losses distribution, Fig. 16 shows that it is the balancing resistance of supercapacitors that is predominant (56% of the total losses). It is mainly due to the passive balancing technology, which is the most robust but also has the highest consumption. Nevertheless, this ship is the first of its kind and it was then preferred the safety to the performance, which explains the choice of the passive balancing system.

Fig. 17 shows the capacitance and serial resistance variations of the supercapacitor during the lifetime of the ship, for an optimized sizing. After 20 years, the capacitance is about 82% of the initial value and the serial resistance 180% of the initial one. Increasing the series resistance increases the losses in the supercapacitor modules. This explains the temperature increase over time, from 5 to 6 °C.

6. Conclusions

This paper presents a techno-economic optimization tool aiming to minimize the overall cost of the energy storage system used in the first supercapacitor ship. This new ship is in operation since September 2013 in the harbor of Lorient. A major challenge of this application is to provide a lifetime of 20 years for the storage system. In order to solve such an optimization problem, it was necessary to implement a set of technical and economic models for each subset of the conversion chain. A generic ageing model of supercapacitors was presented and used on cycle operation. It has been shown that the high cost of such storage elements tends to increase the depth of discharge, in spite of the oversizing of other elements of the chain. Compared to a conventional design, the cost of an optimized solution can be decreased by 6%, reducing by 15% the number of storage elements.

References

[1] Song S. Ship emissions inventory, social cost and eco-efficiency in shanghai yangshan port. Atmos Environ 2014;82:288–97.
[2] International Maritime Organization, Second IMO GHG Study, Technical Report MEPC 59/INF.10, 2009.
[3] Zahedi B, Norum LE, Ludvigsen KB. Optimized efficiency of all-electric ships by dc hybrid power systems. J Power Sources 2014.
[4] Olivier JC, Bernard N, Trieste S, Bourguet S, Aranguren LM. Techno-economic optimization of flywheel storage system in transportation. In: SGE'14, ENS Cachan, France; 2014.
[5] Michaelowa A, Krause K. International maritime transport and climate policy. Intereconomics 2000;35:127–36.
[6] MARPOL IMO, Consolidated edition 2006, marpol annex vi: Regulations for the prevention of air pollution from ships. London: International Maritime Organization; 2006.
[7] Doulgeris G, Korakianitis T, Pilidis P, Tsoudis E. Techno-economic and environmental risk analysis for advanced marine propulsion systems. Appl Energy 2012;99:1–12.
[8] Thounthong P, Chunkag V, Sethakul P, Sikkabut S, Pierfederici S, Davat B. Energy management of fuel cell/solar cell/supercapacitor hybrid power source. J Power Sources 2011;196:313–24.
[9] Doucette RT, McCulloch MD. A comparison of high-speed flywheels, batteries, and ultracapacitors on the bases of cost and fuel economy as the energy storage system in a fuel cell based hybrid electric vehicle. J Power Sources 2011;196:1163–70.
[10] Vasallo MJ, Bravo JM, Andújar JM. Optimal sizing for ups systems based on batteries and/or fuel cell. Appl Energy 2013;105:170–81.
[11] Ferreira HL, Garde R, Fulli G, Kling W, Lopes JP. Characterisation of electrical energy storage technologies. Energy 2013.
[12] Díaz-González F, Sumper A, Gomis-Bellmunt O, Villafáfila-Robles R. A review of energy storage technologies for wind power applications. Renew Sustain Energy Rev 2012;16:2154–71.
[13] Bouabdallah A, Olivier JC, Bourguet S, Machmoum M, Schaeffer E. Safe sizing methodology applied to a standalone photovoltaic system. Renew Energy 2015;80:266–74.
[14] Barelli L, Bidini G, Ottaviano A. Optimization of a pemfc/battery pack power system for a bus application. Appl Energy 2012;97:777–84.
[15] Rydh CJ. Environmental assessment of vanadium redox and lead-acid batteries for stationary energy storage. J Power Sources 1999;80:21–9.
[16] Aubry J, Bydlowski P, Multon B, Ahmed HB, Borgarino B. Energy storage system sizing for smoothing power generation of direct wave energy converters. In: 3rd International conference on ocean energy. Bilbao (Spain); 2010.
[17] Devillers N, Jemei S, Péra M-C, Bienaimé D, Gustin F. Review of characterization methods for supercapacitor modelling. J Power Sources 2014;246:596–608.
[18] Syed IM, Venkatesh B, Wu B, Nassif AB. Two-layer control scheme for a supercapacitor energy storage system coupled to a doubly fed induction generator. Electric Power Syst Res 2012;86:76–83.
[19] Uno M, Tanaka K. Accelerated charge–discharge cycling test and cycle life prediction model for supercapacitors in alternative battery applications. IEEE Trans Ind Electron 2012;59:4704–12.
[20] Bohlen O, Kowal J, Sauer DU. Ageing behaviour of electrochemical double layer capacitors: Part I. experimental study and ageing model. J Power Sources 2007;172:468–75.

[21] Kötz R, Ruch P, Cericola D. Aging and failure mode of electrochemical double layer capacitors during accelerated constant load tests. J Power Sources 2010;195:923–8.
[22] Oukaour A, Tala-Ighil B, AlSakka M, Gualous H, Gallay R, Boudart B. Calendar ageing and health diagnosis of supercapacitor. Electric Power Syst Res 2012.
[23] Al Sakka M, Gualous H, Van Mierlo J, Culcu H. Thermal modeling and heat management of supercapacitor modules for vehicle applications. J Power Sources 2009;194:581–7.
[24] El Brouji E-H, Briat O, Vinassa J-M, Bertrand N, Woirgard E. Impact of calendar life and cycling ageing on supercapacitor performance. IEEE Trans Vehicular Technol 2009;58:3917–29.
[25] Maxwell Technologies, Product Guide – Maxwell Technologies BOOSTCAP Ultracapacitors; 2009.
[26] Briat O, Vinassa J-M, Bertrand N, El Brouji H, Delétage J-Y, Woirgard E. Contribution of calendar ageing modes in the performances degradation of supercapacitors during power cycling. Microelectron Reliab 2010;50: 1796–803.
[27] Bohlen O, Kowal J, Sauer DU. Ageing behaviour of electrochemical double layer capacitors: Part II. lifetime simulation model for dynamic applications. J Power Sources 2007;173:626–32.
[28] Alcicek G, Gualous H, Venet P, Gallay R, Miraoui A. Experimental study of temperature effect on ultracapacitor ageing. In: 2007 European conference on power electronics and applications. IEEE; 2007. p. 1–7.
[29] Gualous H, Gallay R, Alcicek G, Tala-Ighil B, Oukaour A, Boudart B, et al. Supercapacitor ageing at constant temperature and constant voltage and thermal shock. Microelectron Reliab 2010;50:1783–8.
[30] Murray DB, Hayes JG, O'Sullivan DL, Egan MG. Supercapacitor testing for power smoothing in a variable speed offshore wave energy converter. IEEE J Oceanic Eng 2012;37:301–8.
[31] Pell WG, Conway BE, Adams WA, de Oliveira J. Electrochemical efficiency in multiple discharge/recharge cycling of supercapacitors in hybrid ev applications. J Power Sources 1999;80:134–41.
[32] Kreczanik P, VENET P, Hijazi A, Clerc G, et al. Study of supercapacitor ageing and lifetime estimation according to voltage, temperature and rms current. IEEE Trans PP Ind Electron 2013:1.
[33] Rizoug N, Bartholomeus P, Le Moigne P. Modeling and characterizing supercapacitors using an online method. IEEE Trans Ind Electron 2010;57: 3980–90.
[34] Miwa BA, Otten DM, Schlecht MF. High efficiency power factor correction using interleaving techniques. In: Seventh annual applied power electronics conference and exposition. IEEE; 1992. p. 557–68.
[35] Olivier J-C, Le Claire J-C, Loron L. Indirect synchronization phenomenon on self-oscillating current controllers. In: 33rd Annual conference of the IEEE industrial electronics society. Taipei (Japan); 2007, p. 1598–603.
[36] Graovac D, Purschel M. IGBT Power Losses Calculation Using the Data-Sheet Parameters, Technical Report Application Note 1.1, Infineon; 2009.
[37] Backlund B, Schnell R, Schlapbach U, Fischer R, Tsyplakov E. Applying IGBTs, Technical Report 5SYA2053, ABB Switzerland Ltd; 2012.
[38] James P, Bahaj A, Braid R. Pv array <5 kWp + single inverter = grid connected pv system: are multiple inverter alternatives economic? Solar Energy 2006;80:1179–88.
[39] Li Z, Boyle F, Reynolds A. Domestic application of solar PV systems in ireland: the reality of their economic viability. Energy 2011;36:5865–76.
[40] Chel A, Tiwari G, Chandra A. Economic analysis of a stand-alone pv system to electrify a residential home in malaysia. Int J Agile Syst Manage 2009;4:21–40.
[41] Dufo-López R, Bernal-Agustín JL, Yusta-Loyo JM, Domínguez-Navarro JA, Ramírez-Rosado IJ, Lujano J, et al. Multi-objective optimization minimizing cost and life cycle emissions of stand-alone pv-wind-diesel systems with batteries storage. Appl Energy 2011;88:4033–41.
[42] Aubry J, Ruellan M, Ahmed HB, Multon B, et al., Minimization of the kW h cost by optimization of an all-electric chain for the SEAREV wave energy converter. In: Proc. of the 2nd international conference on ocean energy; 2008, p. 1–7.
[43] Undeland TM, Lode J, Nilssen R, Robbins WP, Mohan N. A single-pass design method for high-frequency inductors. IEEE Ind Appl Magaz 1996;2:44–51.
[44] McLyman CWT. Transformer and inductor design handbook, vol. 121. CRC press; 2004.
[45] Olivier J-C, Wasselynck G, Trichet D, Auvity B, Josset C, Maindru P, et al. Light-duty fuel-cell vehicle designed for energetic races: high efficiency power converter design. Eur J Electric Eng 2012;15:39–61.
[46] Powerlite Inductor Cores, Metglass Technical Bulletin, PLC 05092011; 2011.

B Article sur la prise en compte de la nature stochastique de l'environnement dans le processus de dimensionnement

Renewable Energy, Elsevier

Safe sizing methodology applied to a standalone photovoltaic system

A. Bouabdallah*, J.C. Olivier, S. Bourguet, M. Machmoum, E. Schaeffer

IREENA – Institut de Recherche en Énergie Électrique de Nantes-Atlantique (EA 4642), Université de Nantes, 37 Boulevard de l'Université, BP 406, 44602 Saint-Nazaire Cedex, France

A B S T R A C T

In this paper, safe techno-economic sizing methodology of a standalone photovoltaic system is investigated. It is proposed to size the system on the basis of solar radiation measurements. Then, Markov transition matrices (MTM) are used to simulate stochastic cloud cover sequences. Each sizing is then tested on a large number of scenarios. It is thus possible to use a statistical approach of the sizing results, in particular on the Loss of Power Supply Probability (LPSP), which is highly sensitive to the stochastic nature of cloud cover. A case study (*Saint-Martin en Haut*, in France) is given to illustrate this methodology.

1. Introduction

For remote locations, the production of clean electrical energy at low-cost and safely is not an easy task [1–4]. Where the solar energy is sufficient, photovoltaic technology (PV) is regarded as an interesting solution to produce electrical energy [5,6]. For recent years, PV technology has been much improved to achieve high energy efficiency with high durability. However, this technology has a high acquisition cost. Moreover, solar energy is intermittent and therefore requires storage devices such as batteries to ensure the consumer demand [7]. Then, to be a cost-effective candidates, such a technology imposes a sizing to the fairest. Optimal sizing is mainly done through bi-objective techno-economic optimization, based on the best trade off between the cost and the Loss of Power Supply Probability (LPSP). This approach permits to let to the user the choice of the technical solution that satisfies its demand with an acceptable cost [8,9]. Nevertheless, a major difficulty in the design of such systems lies in the long-term prediction of the solar resource. Indeed, an optimized design is usually done from few years of available measurements. These data are then extrapolated over the lifetime of the project. It is therefore natural to ask the question of the relevance of such a design that does not take into account the diversity of daily, monthly or annual insolation [10]. To overcome this problem of availability of measurement data on a few decades, a common solution is to generate sunshine scenarios from stochastic modeling of cloud cover [11–15].

Among the stochastic modeling, Markov transition matrix (MTM) appears to be well adapted to the generation of solar radiation data, which consists to model the clearness index, i.e. the ratio of the received solar radiation to the extraterrestrial solar radiation [14,16–18]. In Refs. [16], authors used a second-order Markov model with a transition matrix of the clearness index of 100 states, in order to generate 1-min solar radiation data. The transition matrix is built from two set of 3 years data. In Refs. [17], 15 standard sky types are considered to generate 10-min solar radiation. A first-order Markov transition matrix is used and results are compared to 3 years of measurements. In Refs. [14], authors used an Oktas scale with 9 states to generate 6-min data. Lastly, in Refs. [18], hourly solar radiation is generated with a first-order transition matrix, based on 20 years of measurements.

Even if such stochastic models seem to be enough to generate accurate solar radiation data, their integration into the sizing phase remains difficult. Indeed, an optimal sizing using several decades with step times of few minutes involves too high computation time. Moreover, it is still not obvious that the proposed sizing is well adapted to the diversity of possible scenarios of solar radiation and few studies deal with the sensitivity of a sizing to the potential variability of sunlight profiles.

In this paper, the proposed methodology is to consider a sizing optimization of a standalone photovoltaic system, taking into account the solar radiation variability. To do this, a first step is to find all the best set of PV-batteries, projected in the *Cost-LPSP plan*. In a

* Corresponding author. Tel.: +33 240 172 692; fax: +33 240 172 618.
E-mail address: ahmed.bouabdallah@univ-nantes.fr (A. Bouabdallah).

second step, the verification of the reliability of each sizing is obtained through a variety of scenarios generated by a Markov model. Thus, each sizing is no longer characterized by a single value of LPSP, but by a probability density that assesses quantitatively the robustness of a solution. The proposed methodology is applied on hourly data given for *Saint-Martin en haut*, France (45° 39′N-4° 33′E).

2. System description and models

2.1. System description

Architecture of the standalone photovoltaic system considered in this work is presented in Fig. 1. This system can be decomposed in four main parts, which are the photovoltaic generator with its power converter, the electrochemical storage with its converter, the DC to AC inverter with the load power demand and the solar radiation data. For a techno-economic optimization, each device needs electric and economic models. These models are presented in the next section.

2.2. Physical models

2.2.1. Photovoltaic panels

Photovoltaic panel can be seen as an electrical generator, whose maximum power depends on cell temperature and solar radiation. In order to ensure a maximum efficiency whatever the conditions of sunlight and temperature, the photovoltaic panel are associated to a power converter controlled with a Maximum Power Point Tracking algorithm (MPPT). Then, considering the photovoltaic panel with its power converter, the estimation of the maximal electric power P_{pv} produced by a photovoltaic surface S_{pv} is usually obtained from the next mathematical model [1,4,19]:

$$P_{pv}(T_a, G_{tot}) = \eta_{pv}(T_a, G_{tot})\, S_{pv}\, G_{tot} \tag{1}$$

where T_a is the ambient temperature, G_{tot} the total solar radiation received by the panel and η_{pv} the photovoltaic panel efficiency. To be more convenient, the efficiency of the solar panel can be rewritten from the cell temperature T_c:

$$\eta_{pv}(T_c, G_{tot}) = \eta_{manuf}\left(1 - \beta_{pv}(T_c - T_r)\right) \tag{2}$$

where η_{manuf} is the nominal efficiency given by the manufacturer, β_{pv} the temperature coefficient and T_r a reference temperature. Temperature cell is deduced from the solar radiation G_{tot} and the ambient temperature T_a such as:

$$T_c = T_a + \left(T_{NOCT} - T_{a,NOCT}\right)\frac{G_{tot}}{G_{NOCT}} \tag{3}$$

with T_{NOCT} the nominal cell temperature, $T_{a,NOCT}$ and G_{NOCT} respectively the ambient temperature and solar radiation under the Nominal Operating Cell Temperature (NOCT) conditions. This model is clearly too simple for taking into account some phenomena related to the implantation conditions of the panels. Indeed, for panels with a large area and then with a large number of cells, a mismatching can appear, mainly due to shadowing phenomena and to parametric differences in the cells [20–22]. In this work, such cases are not taken into account and it is assumed that all cells are identical and subject to the same irradiance and temperature conditions. Moreover, no shading obstacles such as trees or chimneys are considered. The calculation of the total solar energy received by the photovoltaic panels is detailed in section 3.

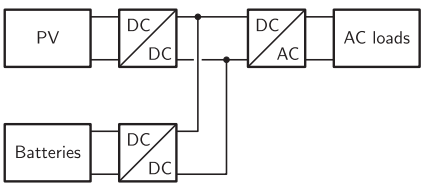


Fig. 1. Stand-alone photovoltaic system.

2.2.2. Battery

In this work, lead-acid battery is chosen as storage energy component. Indeed, this technology is mature and low-cost. Although it has the drawback of having a low specific energy, its application to a standalone house does not raise any constraint of size and weight for the storage system. A well-known energy model for lead acid batteries is the CIEMAT model [23,24]. This model is based on an electrical representation, whose electromotive force and equivalent internal resistance depend on the state of charge SOC and battery current I_{bat}. For N_{bat} battery cell, the battery voltage V_{bat} during the charge is given by Refs. [25,26]:

$$V_{bat} = N_{bat}\,(2 + 0.16\,\mathrm{SOC}) + \frac{N_{bat}|I_{bat}|}{C_{10}}\left(\frac{6}{1 + \left(\left|I_{bat}\right|\frac{C_{10}}{C_{bat}}\right)^{0.86}} + \frac{0.48}{1 - \mathrm{SOC}^{1.2}} + 0.036\right) \tag{4}$$

and during the discharge:

$$V_{bat} = N_{bat}\,(1.965 + 0.12\,\mathrm{SOC}) - \frac{N_{bat}|I_{bat}|}{C_{10}}\left(\frac{4}{1 + \left(\left|I_{bat}\right|\frac{C_{10}}{C_{bat}}\right)^{1.3}} + \frac{0.27}{\mathrm{SOC}^{1.5}} + 0.02\right) \tag{5}$$

with C_{bat} the real capacity, whose value is obtained from:

$$C_{bat} = \frac{1.67}{1 + 1.67\left(\frac{10\, I_{bat}}{C_{10}}\right)^{0.9}}\left(1 + 0.005\Delta T\right) \tag{6}$$

where C_{10} is the nominal capacity given by the manufacturer, which is the battery capacity for a discharge in 10 h. The SOC value is updated at each sample time Δt and calculated from the next numerical integration:

$$\mathrm{SOC}(t) = \mathrm{SOC}(t - \Delta t) - \frac{I_{bat}\Delta t}{C_{bat}} \tag{7}$$

where I_{bat} is considered positive during a discharge.

2.2.3. Power converters

Here, the electrical losses in the power converters are taken into account through a normalized efficiency curve. It is obtained considering power converter losses as the sum of a constant power (no-load consumption) and a term depending on the output power reflecting losses in the power switches [27–29]. The efficiency can then be writen such as [30]:

$$\eta_{conv} = \frac{p}{p_0 + p + k\,p^2} \tag{8}$$

where p_0 and k are two parameters deduced from the manufacturer data [30], and p the ratio between the useful power P_u and the nominal power of the converter P_n:

$$p = \frac{P_u}{P_n} \tag{9}$$

P_n is calculated using the maximum power consumption of the annual load profile, with a security factor of 10%:

$$P_n = 1.1\ P_{u(max)} \tag{10}$$

To properly select the parameters p_0 and k, some manufacturers data are used. Fig. 2 shows the efficiency curves for different converter topologies and power rates. For the DC–DC converter and both inverters, the efficiency curves are slightly scattered regardless of the topology. It is therefore preferred to select an average curve for all the converters. The dot line in Fig. 2 gives this efficiency curve used for this study, obtained from the following set of parameters:

$$p_0 = 0.0143 \quad k = 0.061 \tag{11}$$

This efficiency curve is used for the inverter (noted η_{inv}) and for the PV (η_{cPV}) and battery (η_{cbat}) DC–DC converters. The nominal power of the inverter is directly deduced from the maximal load consumption:

$$P_{n,inv} = 1.1\ P_{load(max)} \tag{12}$$

For PV, the nominal power of the DC–DC converter is based on the maximum power of the photovoltaic panels:

$$P_{n,pv} = 1.1\ \max(P_{pv}) \tag{13}$$

The sizing of battery converter must consider both powers and is obtained by:

$$P_{n,bat} = \max(P_{n,pv}, P_{n,inv}) \tag{14}$$

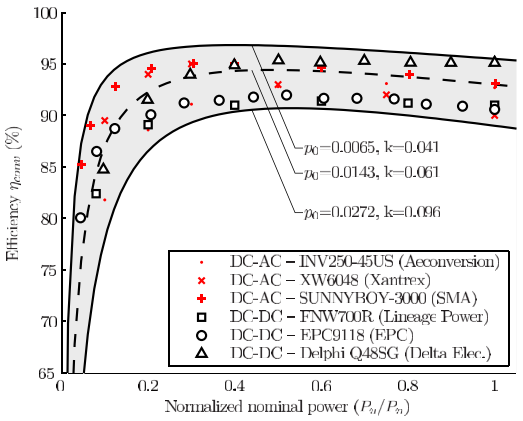


Fig. 2. Normalized efficiency curve of the power converter, based on manufacturers data.

2.2.4. Load profile

The load profile is chosen to be representative of consumers in remote areas and where the heating is non-electric [31]. A database of real measurements [32] is used to build a typical day per month. An extrapolation is then done to obtain the 8760 h of a year (see Fig. 3). The average power is equal to 100 W and the maximum power is 300 W, in March. This maximum value is used for the sizing of the inverter, as given by Eq. (10).

2.3. Economic models

To evaluate the cost of this standalone PV system, the concept of annualized cost of the system is used [30,33,34]. The total annualized cost C_{tot} of a photovoltaic system solution (in /*year*) is defined as the sum of capital $C_{cap,a}$, operation and maintenance $C_{o\&m,a}$ and replacement $C_{rep,a}$ annualized cost:

$$C_{tot,a} = \sum_{device} C_{cap,a} + C_{o\&m,a} + C_{rep,a} \tag{15}$$

From economic data given by Table 1, the capital cost of battery, PV and converters are given by:

$$C_{bat(cap)} = N_{bat}\ C_{10}\ V_{bat}\ c_{bat(cap)} \tag{16}$$

$$C_{pv(cap)} = N_{pv}\ S_{pv}\ c_{pv(cap)} \tag{17}$$

$$C_{conv(cap)} = 600 + 0.35\,(P_{n,pv} + P_{n,bat} + P_{n,inv}) \tag{18}$$

The annual costs are obtained from each device costs, taking into account there lifetime Y_{rep} and the nominal interest and inflation rates. These economic data are summarized in Table 1. The annualized capital cost takes into account the cost of the battery, PV and power converters, such as:

$$C_{cap,a} = \left(C_{bat(cap)} + C_{pv(cap)} + C_{conv(cap)}\right)\mathrm{CRF}(\mathrm{i}, \mathrm{Y}_{prj}) \tag{19}$$

where CRF is the capital recovery factor, i is the *real* interest rate, calculated from the nominal interest rate i' and the annual inflation rate f [33,34]:

$$\mathrm{CRF}(i, Y) = \frac{i(1+i)^Y}{(1+i)^Y - 1} \tag{20}$$

with

$$i = \frac{i' - f}{1 + f} \tag{21}$$

The annualized operation and maintenance cost is classically specified in €/year. This cost is taken into account for the battery and PV systems, such as:

$$C_{o\&m,a} = C_{bat(o\&m)} + C_{pv(o\&m)} \tag{22}$$

where the operation and maintenance cost of battery and PV are given by:

$$C_{bat(o\&m)} = N_{bat}\ C_{10}\ V_{bat}\ c_{bat(o\&m)} \tag{23}$$

$$C_{pv(o\&m)} = N_{pv}\ S_{pv}\ c_{pv(o\&m)} \tag{24}$$

Considering the lifetime Y_{rep} of each device, it needs 4 replacements for batteries, 2 for the power converters and neither for photovoltaic panels. For all devices, replacement cost is assumed to be equal to the capital cost given by Eqs. (16)–(18). Then, the

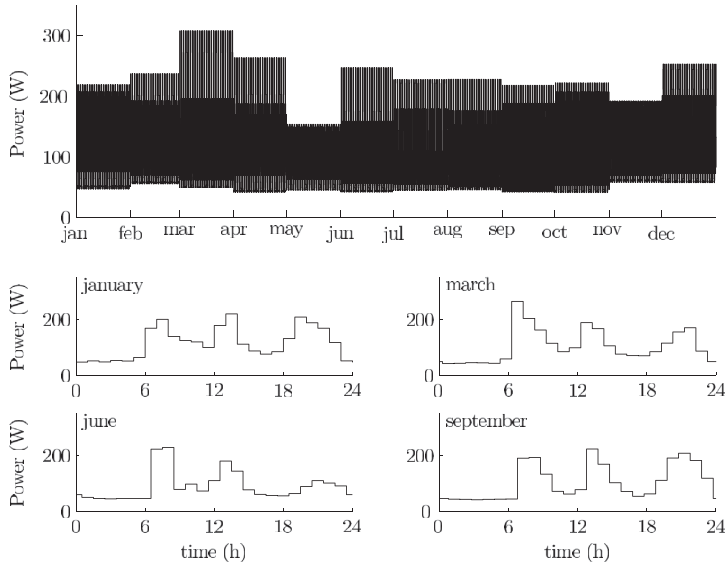


Fig. 3. Annual load profile obtained from one typical day per month.

calculation of the annualized replacement cost for each component is given by Refs. [33,34]:

$$C_{comp(rep),a} = C_{comp(rep)} \left[f_{rep}\ \mathrm{SFF}(Y_{rep}) - \frac{Y_{rem}}{Y_{rep}} \mathrm{SFF}(Y_{prj}) \right] \tag{25}$$

with

$$\mathrm{SFF}(Y_{rep}) = \frac{i}{(1+i)^{Y_{rep}} - 1} \tag{26}$$

Table 1
System parameters.

Parameter	Symbol	Value
PV pannel		
Peak power (W)	$\max(P_{pv})$	130
Surface (m^2)	S_{pv}	0.5
Nominal efficiency (%)	η_{manuf}	12.35
Reference temp. (° C)	T_r	20
Nominal cell temp. (° C)	T_{NOCT}	47
Nominal ambient temp. (° C)	$T_{a,NOCT}$	20
Nominal solar radiation (W/m^2)	G_{NOCT}	800
Temperature coefficient (%/° C)	β_{pv}	0.45
MPPT + converter efficiency (%)	η_{conv}	95
Capital cost (€/m^2)	$c_{pv(cap)}$	190
O&M cost (€/m^2/year)	$c_{pv(o\&m)}$	1.4
Lifetime (years)	$Y_{rep(pv)}$	25
Battery		
Nominal capacity (Ah)	C_{10}	50
Nominal cell voltage (V)	$V_{bat\ n}$	2.0
State of charge max.	$\mathrm{SOC}_{\max}$	1.0
State of charge min.	$\mathrm{SOC}_{\min}$	0.2
Capital cost (€/Wh)	$c_{bat(cap)}$	0.55
O&M cost (€/Wh/year)	$c_{bat(o\&m)}$	0.0165
Lifetime (years)	$Y_{rep(bat)}$	5
Power converters		
Nominal power (W)	P_n	1.2 $P_{u(max)}$
Captial Cost (€)	$c_{conv(cap)}$	200 + 0.35P_n
O&M cost (€/kWh/year)	$c_{conv(o\&m)}$	–
Lifetime (years)	$Y_{rep(conv)}$	10
nominal interest rate	i'	3.5%
inflation rate	f	1.5%

and where Y_{rem} is the remaining life of the component at the end of the project lifetime (i.e. equal to 5 years for the converters and null for the battery) and where f_{rep} is a factor arising of the components lifetime which can be different from the project lifetime. Considering a number of replacement n_{rep}, this factor is given by:

$$f_{rep} = \frac{\mathrm{CRF}(i, Y_{prj})}{\mathrm{CRF}(i, n_{rep}\ Y_{rep})} \tag{27}$$

Finally, the Levelized Cost Of Energy (LCOE) is calculated from the total annualized cost $C_{tot,a}$ given by Eq. (15) and the annual load energy E_{load}:

$$\mathrm{LCOE} = \frac{C_{tot,a}}{E_{load}} \tag{28}$$

3. Stochastic model of solar radiation by Markov chain

The solar radiation received by inclined photovoltaic panel is a key parameter for the sizing of a standalone power unit. The simplest case for the calculation of the solar radiation is to consider *clear sky* models. Several works [35,36] are carried out on the base of Hottel, Liu and Jordan works. These models permit to calculate the potential of a site. However, without taking into account the cloud cover, these models have limitations in the calculations of the real solar radiation received on-site. Hay-Davies-Klucher-Reindl (HDKR) anisotropic model permits to take into account the effect of clouds on terrestrial irradiance through a clearness index k_t and a diffuse fraction $f(k_t)$. To estimate this diffuse fraction, there are several functions, usually given as piecewise polynomial functions and evaluated empirically from local measurements [37–39]. Because these models give fairly similar solutions, a generic function is proposed in Ref. [19]. It is built on the basis of an averaging of the classical Erbs, Orgill-Hollands, Miguel, Mondol, and Reindl functions. The obtained piecewise function is given by:

$$f(k_t) = \begin{cases} 1.0 - 0.13\,k_t,\ k_t \le 0.22 \\ 0.58 + 3.7\,k_t - 10.4k_t^2 + 6.4k_t^3,\ 0.22 \le k_t \le 0.78 \\ 0.27 - 0.09\,k_t,\ k_t > 0.78 \end{cases} \tag{29}$$

However, the clearness index, which characterizes the cloud cover, can only be obtained from measurements on site. Its

measurement is carried out indirectly, comparing the measured radiation and the radiation obtained from a clear sky model. Cloud cover, or more precisely the clearness index k_t, must be treated as random variable. It is therefore not obvious that the available measurement data are sufficient to reflect the diversity of possible solar radiation sequences. Also, to ensure the reliability of the optimal sizing of the photovoltaic power unit, it is evaluated on a large number of possible scenarios, randomly generated using a Markov transition matrix.

3.1. HDKR anisotropic model in cloudy sky

The total radiation G_{tot} received by a surface is the sum of direct G_{dir}, diffused G_{dif} and reflected G_r components:

$$G_{tot} = G_{dir} + G_{dif} + G_r \tag{30}$$

HDKR model considers the sky as anisotropic [39,35]. Then, the diffused component G_{dif} is divided into three sub-components, which are isotropic diffused, circumsolar diffused and a last component diffused by the horizon. Such modeling of solar radiation is widely discussed in the literature [12,13,15,18,19,35,36,40,41,39]. Thus, in this paper, only the main results are presented. For calculation details, readers can refer to [1,13,39]. So, considering the HDKR model, each component of Eq. (30) can be detailed and expressed as a function of the clearness index k_t, the diffuse fraction $f(k_t)$ and tilt angle β of the photovoltaic panel (see Fig. 4):

$$G_{dir} = G_h\,(1 - f(k_t))\,R_b \tag{31}$$

$$G_{dif} = G_h\,f(k_t) \times \left[A_i\,R_b + (1 - A_i)R_{dif}\left(1 + f_c\,\sin^3\left(\frac{\beta}{2}\right)\right)\right] \tag{32}$$

$$G_r = \rho\,G_h\,R_r \tag{33}$$

where G_h is the solar radiation received on a horizontal surface, R_b the ratio of direct radiation between tilted and horizontal plane, R_{dif} the tilt factor of the diffused component, R_r the tilt factor for the reflected component, f_c a correction factor, ρ the albedo and A_i the anisotropic index. All of these coefficients are defined by the following set of equations:

$$R_b = \frac{\cos(\theta_i)}{\cos(\theta_z)} \tag{34}$$

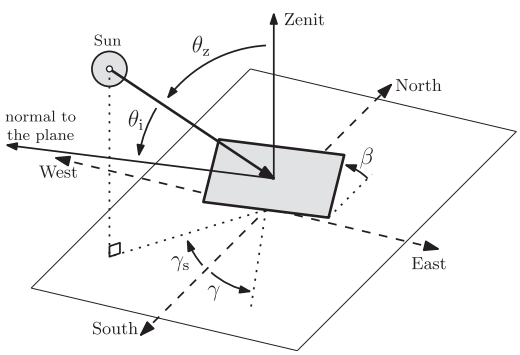


Fig. 4. Solar angles shown with a PV panel.

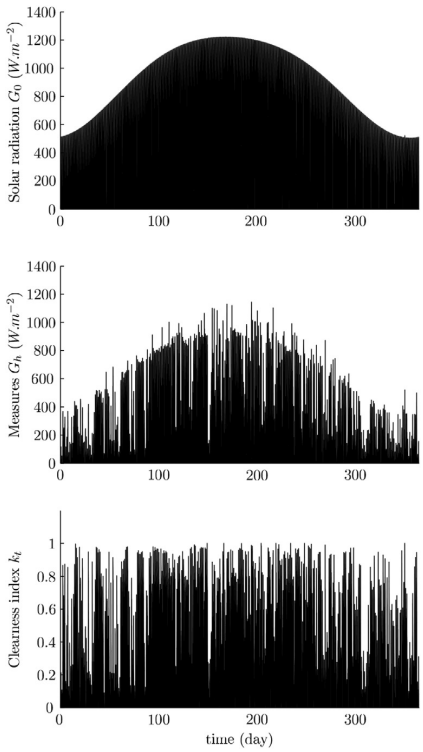


Fig. 5. Clearness index computation from measurement data G_h (St-Martin en Haut, France) and horizontal component of the extraterrestrial solar radiation G_0.

$$R_{dif} = \frac{1 + \cos(\beta)}{2} \tag{35}$$

$$R_r = \frac{1 - \cos(\beta)}{2} \tag{36}$$

$$f_c = \sqrt{1 - f(k_t)} \tag{37}$$

$$A_i = k_t\,(1 - f(k_t)) \tag{38}$$

$$G_h = k_t\,G_0 \tag{39}$$

$$G_0 = 1367\left(1 + 0.033\cos\left(\frac{360^\circ N}{365}\right)\right)\cos(\theta_z) \tag{40}$$

where N represents the day of year. Eq. (39) shows that the clearness index k_t. is defined as the ratio between the solar radiation received on a horizontal surface G_h and the horizontal component of the extraterrestrial solar radiation G_0.

3.2. Experimental data

The clearness index is easily obtained from measurements on horizontal surface, which are typical experimental conditions. Here, application is based on data of *Saint-Martin en Haut*, France, at a longitude of 4.55° E, latitude of 45.66° N and with an elevation of

730 m [19]. The data used for this study are those of the year 2011 with a sampling interval of 1 h. From the analytical model, the horizontal component G_0 is computed and compared to the experimental measurements G_h to calculate the clearness index k_t (see Figure 5).

Due to measuring errors, few values of the clearness index k_t can be above 1 or below 0. Thus, a saturation is introduced to solve this problem of measurement accuracy. Now that the part corresponding to the cloud cover is extracted from the measurements, it is possible to model it with a statistical approach using a Markov transition matrix.

3.3. State transition matrix building

To solve the problem of the diversity of possible configurations and sequences of cloud cover, many studies use a stochastic approach. This paper deals with the stochastic modeling of solar radiation using the Markov transition matrices (MTM) [16,18,41–43]. These matrices are used to generate a host of cloud cover data, based on the HDKR model introduced in section 3.1. Markov models are mathematical representations of stochastic processes for which any future state only depends on the current state. For a set of n given states (E_1; E_2; …; E_n), the MTM M (of size $m \times m$) gives all the transition probabilities $p_{i,j}$ of moving in one time step from actual state E_i to the future state E_j:

$$M = \left\{p_{i,j}\right\} \text{ with } p_{i,j} = P(E_j|E_i) \tag{41}$$

and is typically represented by:

$$M = \begin{array}{cc} & \text{Futur state} \\ & \begin{array}{cccc} E_1 & E_2 & \cdot & E_m \end{array} \\ \begin{array}{c} \text{Actual} \\ \text{state} \end{array} \begin{array}{c} E_1 \\ E_2 \\ \vdots \\ E_m \end{array} & \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & \cdots & p_{1m} \\ p_{21} & p_{22} & \cdots & p_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{m1} & p_{m2} & \cdots & p_{mm} \end{bmatrix} \end{array} \tag{42}$$

A property of MTM is that the probability of moving from a state E_i to one of the other possible states is 1. Then, this matrix must be a right stochastic matrix:

$$\sum_{j=1}^{j=m} P_{i,j} = 1 \tag{43}$$

The use of MTM methods to model the clearness index k_t imposes a data quantification with a predetermined number of states. This quantification can vary between few states and few hundred [12,16,41,42]. In this paper, 10 states are considered for clearness index, uniformly distributed between 0 and 1, with a step of 0.1 (see Table 2). Indeed, standard observations are done according to the Oktas-scale, which divides the cloud coverage into nine parts [14,44]. So, the use of 10 states permits to be close to this well-known scale. The MTM is built from the annual cloud cover [45]. This approach allows to take into account all the possible cloud cover sequences while integrating the well-known worst month, usually used for the design of such systems [46]. The application of MTM method to the clearness index measurements of Fig. 5 gives the 10× 10 matrix illustrated in Fig. 6.

Table 2
Clearness index quantification.

k_t	State	Cloud cover
[0; 0.1]	E_1	
[0.1; 0.2]	E_2	
[0.2; 0.3]	E_3	
⋮	⋮	⋮
[0.8; 0.9]	E_9	
[0.9; 1.0]	E_{10}	

4. Safe sizing of a stand-alone photovoltaic system

4.1. Safe sizing methodology

Now that the different technical and economic models are presented, safe sizing methodology is developed. Concerning the energy management, the algorithm consists for each step time (i) in a comparison between the produced energy by the PV panels E_{pv} and the energy E_{load} to supply to the load. In the case of $E_{pv} > E_{load}$, excess energy is used to charge the batteries. Otherwise, the batteries are discharged to provide the missing energy. This algorithm also takes into account the boundary $SOC_{min,max}$ of the state of charge of the batteries. Firstly, this algorithm consists in the computation of the energy difference ΔE between the PV production and the load consumption:

$$\Delta E[i] = \left(\eta_{cPV} P_{pv}[i] - \frac{P_{load}[i]}{\eta_{inv}}\right)\Delta t \tag{44}$$

Taking into account the converter efficiency η_{cbat}, the computation of the power exchanged with the batteries depends on the sign of ΔE, such as:

$$P_{bat}[i] = \begin{cases} \eta_{cbat} \dfrac{\Delta E[i]}{\Delta t}, & \text{if } \Delta E[i] \geq 0 \\ \dfrac{1}{\eta_{cbat}} \dfrac{\Delta E[i]}{\Delta t}, & \text{if } \Delta E[i] < 0 \end{cases} \tag{45}$$

Using Eqs. (4) and (5), the current I_{bat} is deduced from the needed power P_{bat}. The state of charge SOC is then computed from Eq. (7):

$$\mathrm{SOC[i]} = \mathrm{SOC[i-1]} - \frac{\mathrm{I}_{bat}\,\Delta t}{\mathrm{C}_{bat}} \tag{46}$$

In case of loss of energy, i.e. if SOC[i] is lower than SOC_{min}, loads are no longer supplied. This loss of energy is taken into account through the Loss of Power Supply Probability (LPSP) concept, defined by:

$$\mathrm{LPSP} = \frac{1}{E_{year}} \sum_{i=1}^{8760} LPS[i] \tag{47}$$

where E_{year} is the total energy consumption of the load during one year, and with:

$$\mathrm{LPS}[i] = \begin{cases} \delta E[i], & \text{if } \mathrm{SOC[i]} < \mathrm{SOC}_{min} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \tag{48}$$

where $\delta E[i]$ is the loss of energy, which can not be supplied to the load. Under the conditions of Eq. (48), this loss of energy $\delta E[i]$ can be calculated from the state of charge at time i, such as:

$$\delta E[i] = SOC_{min} - SOC[i] \tag{49}$$

E_n \ E_{n+1}	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	38.6	17.7	6.8	3.9	3.3	1.6	3.5	2.3	1.0	21.4
2	26.8	32.4	14.1	6.0	3.3	2.1	1.7	1.4	1.7	10.6
3	10.5	26.5	25.7	14.1	5.5	3.8	2.5	3.8	3.0	4.6
4	16.0	14.2	25.1	17.0	9.1	3.8	3.0	6.1	2.3	3.3
5	11.1	14.2	20.8	19.1	7.6	8.3	5.2	5.2	5.6	2.8
6	1.1	7.2	7.9	23.1	32.9	11.9	6.5	6.9	0.7	1.8
7	0.8	4.9	7.1	6.0	8.5	31.4	27.3	7.7	4.6	1.6
8	0.5	1.8	5.2	4.8	3.2	3.9	24.7	50.4	4.5	0.9
9	0.3	2.6	4.3	3.5	2.9	2.6	7.0	37.7	36.2	2.9
10	0.3	2.8	6.8	5.6	4.6	5.9	5.6	6.5	37.2	24.8

Fig. 6. Markov transition matrix for the clearness index k_t, given in %.

For optimal sizing, optimisation variables are the number of photovoltaic panels N_{pv} and the number of battery cells N_{bat}. All possible configurations are tested, with a maximum number of batteries and photovoltaic panels equal to 200. This exhaustive search ensures to find the best possible balance between cost and LPSP. The simplified flowchart of this algorithm is shown in Fig. 7.

In this work, each solution $(N_{pv}; N_{bat})$ is evaluated from the measurements data of *Saint-Martin en Haut*, detailed is section 3.2. The results are then extrapolated on the lifetime of the project, which is considered equal to 25 years. For each design corresponds a point in the *cost-LPSP plan*. Because this problem is bi-objective, only the Pareto optimum solutions are therefore retained.

Once the set of optimum sizing obtained, it remains to verify its reliability and safety. Indeed, the results obtained from a reference year will vary every other year, due to the stochastic nature of the cloud cover. It is also difficult to optimize a set of sizing for a very large number of years, due to a too high computation time. The methodology proposed in this paper will allow, with a reasonable computation time, to test the safety of a design. To do this, each optimal sizing obtained from a single year of measurements is tested on a large number of cloud cover *scenarios*, generated by the Markov transition matrix.

Then, a sizing is no longer represented by single point in the *cost-LPSP plan*, but by a set of points, which can be analyzed as a density function of LPSP. Indeed, it should be noted that this methodology does not change the sizing obtained in the optimization phase, and therefore does not change its cost. Only the LPSP can be different from one *scenario* to an other one. All in all, this methodology permits to treat the result of the sizing of a photovoltaic system using a statistical approach of the LPSP.

4.2. Results ans discussion

The proposed methodology is applied to the site of *Saint-Martin en Haut* and is based on data measurements of the year 2011. In Refs. [19], the optimal inclination β of the photovoltaic panel is studied. In case of fixed panel, the deduced optimal angle is 35° S. Using this value with Eqs. (30), (31) and (34), and with the clearness index sequence deduced from data measurement (see Fig. 5), all possible combinations of number of photovoltaic panels N_{pv} and batteries N_{bat} are tested to lead to optimal Pareto front in the cost-LPSP plan. Next, each optimal sizing is tested with 1000 cloud covers simulations of 1 year. Each simulation corresponds to a

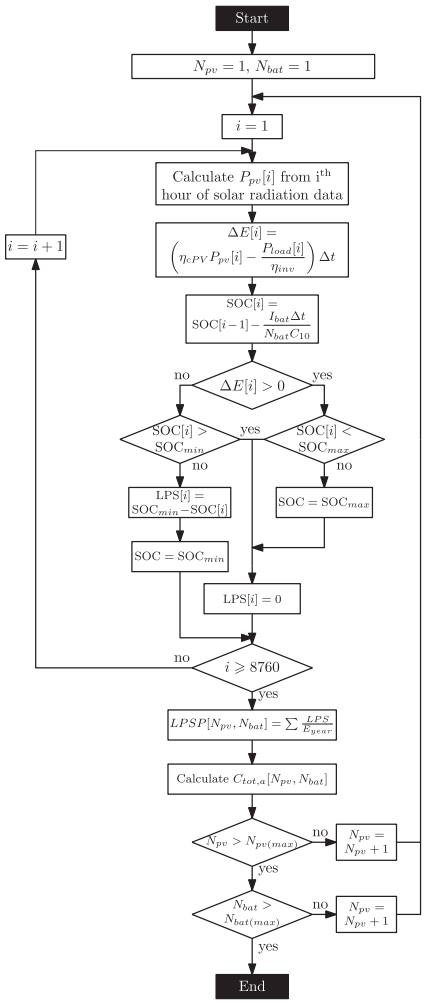


Fig. 7. Used algorithm for optimal sizing of the photovoltaic system.

Markov chain, generated from the MTM given by Fig. 6. Final result is given by Fig. 8.

The solid line represents the Pareto front of optimal sizing, obtained with the data measurements of solar radiation. The dotted lines highlight the boundary of the LPSP values, obtained after the simulation of 1000 Markov chains, each one having a duration of one year. The red points are the results of each stochastic simulation. On the boundaries, the equivalent time of loss of power supply during one year are also indicated. A focus is done on three different sizing, noted (1), (2) and (3), and detailed in Table 3. Fig. 9 gives the distribution function and the cumulative distribution function of the LPSP, where the dotted lines indicate the obtained values of the LPSP with the measurement data. For instance, the solution (1) shows a low-cost design with an LPSP of 1.9%. By applying the set of 1000 simulated scenarios on this sizing solution, LPSP lies between 0.31 and 4.7%. The upper limit can be interpreted as a safe value of LPSP, whereas it is very unlikely to go beyond it. This value is significantly greater than that obtained by a conventional sizing, which shows the advantage of this methodology. The solution (3) is

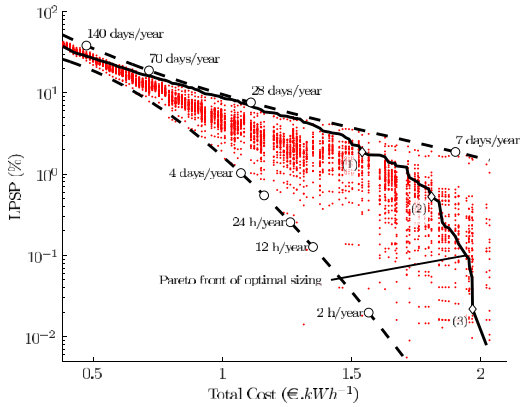


Fig. 8. Pareto optimum design obtained with measurements and test of the safety of each sizing with 1000 simulations of one year, based on Markov transition matrix.

interesting because it represents a design with very low LPSP (equal to 0.02%, or 2 h per year). The cumulative distribution function in Fig. 9 shows that 90% of the simulated years with the MTM gives a LPSP less than 0.28%, or 1 day per year.

In the same way, more specific indicators can also be used to describe a sizing result. As illustrated in Table 3, each solution can be analyzed through classical concepts of median, quartile, maximal and minimale value. For example, the solution (3) guarantees a LPSP value lower than 1.69% (1 week per year) and less than 0.15% (13 h per year) with a probability of 75%. Thus, each design can be characterized by a cost and a confidence interval for the LPSP. In this sense, the proposed methodology is safer and more reliable than a simple sizing obtained from a limited number of years of measurement.

Table 3
Results for the solutions (1), (2) and (3).

Parameter	Value		
Installation lifetime	25 years		
Max. Load power	310.0 W		
Avg. load power	112.0 W		
Annual load energy	981.1 kWh		
Solution	(1)	(2)	(3)
n_{bat}	38	47	70
Energy (kWh)	3.8	4.7	7.0
n_{pv}	81	93	82
Surface (m^2)	40.5	46.5	41.0
PV cap cost (€/year)	377.5	433.0	382.0
PV o&M cost (€/year)	74.0	85.0	74.5
Bat. cap cost(€/year)	106.7	132.0	195.8
Bat. rep cost(€/year)	335.5	415.8	619.3
Bat. o&M cost (€/year)	62.7	77.6	115.5
Converters cap cost (€/year)	253.0	285.1	255.7
Converters rep cost (€/year)	301.7	340.0	304.9
Total cost (€/year)	1511.2	1768.5	1947.7
Energy cost (€/kWh)	1.5403	1.80	1.99
LPSP (%)	1.86	0.53	0.0219
LPSP Markov analysis (%)			
Max.	4.692	2.256	1.688
Upper quartile (75%)	2.092	0.581	0.147
Median	1.667	0.354	0.011
Lower quartile (25%)	1.321	0.154	0.000
Min.	0.312	0.000	0.000

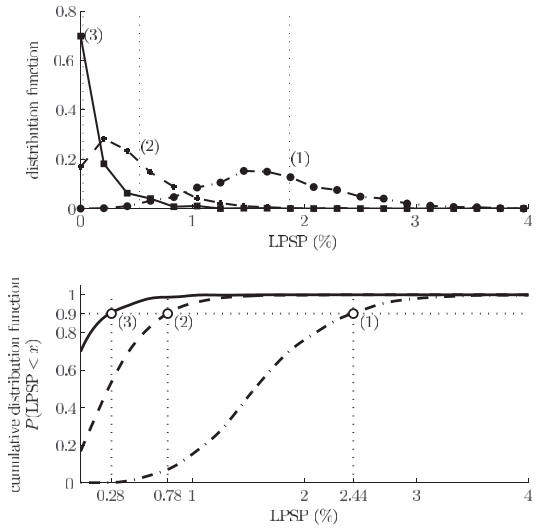


Fig. 9. Probability density of the LPSP, for 3 different sizing, each one tested with 1000 cloud cover simulations.

5. Conclusion

A safe sizing methodology of a photovoltaic system was introduced in this paper. It is based on stochastic modeling of cloud cover through Markov transition matrix of the clearness index. With this approach, the results of a techno-economic sizing can be verified statistically with the distribution function of the Loss of Power Supply Probability (LPSP) obtained on a large number of consistent cloud cover scenarios. This approach was applied to the optimized sizing of a photovoltaic system in remote area, based on measurements of the year 2011, in *Saint-Martin en Haut*, France. It has been shown that the LPSP of a given sizing is sensitive to the diversity of possible sunshine configurations on a year. By testing many scenarios, the real performances of a sizing are thus assured and safer. This work considers only photovoltaic panels with battery storage. However, it can be easily extended to more complex system architectures, including other renewable energies, auxiliaries sources and grid connection. In addition, this approach can be extended to the stochastic generation of consumption profiles, taking into account the diversity of possible consumers.

References

[1] Bouabdallah A, Bourguet S, Olivier J-C, Machmoum M. Optimal sizing of a stand-alone photovoltaic system. In: International conference on renewable energy research and applications, IEEE; 2013. p. 543–8.
[2] Li C-H, Zhu X-J, Cao G-Y, Sui S, Hu M-R. Dynamic modeling and sizing optimization of stand-alone photovoltaic power systems using hybrid energy storage technology. Renew Energy 2009;34:815–26.
[3] Turkay BE, Telli AY. Economic analysis of standalone and grid connected hybrid energy systems. Renew Energy 2011;36:1931–43.
[4] Wissem Z, Gueorgui K, Hédi K. Modeling and technical–economic optimization of an autonomous photovoltaic system. Energy 2012;37:263–72.
[5] Jallouli R, Krichen L. Sizing, techno-economic and generation management analysis of a stand alone photovoltaic power unit including storage devices. Energy 2012;40:196–209.
[6] Shaahid S, El-Amin I. Techno-economic evaluation of off-grid hybrid photovoltaic–diesel–battery power systems for rural electrification in Saudi Arabia—a way forward for sustainable development. Renew Sustain Energy Rev 2009;13:625–33.
[7] Shen W. Optimally sizing of solar array and battery in a standalone photovoltaic system in malaysia. Renew Energy 2009;34:348–52.

[8] Abbes D, Martinez A, Champenois G. Life cycle cost, embodied energy and loss of power supply probability for the optimal design of hybrid power systems. Math Comput Simul 2014;98:46–62.
[9] Bakelli Y, Arab AH, Azoui B. Optimal sizing of photovoltaic pumping system with water tank storage using {LPSP} concept. Sol Energy 2011;85:288–94.
[10] Thevenard D, Pelland S. Estimating the uncertainty in long-term photovoltaic yield predictions. Sol Energy 2013;91:432–45.
[11] Voyant C, Darras C, Muselli M, Paoli C, Nivet M-L, Poggi P. Bayesian rules and stochastic models for high accuracy prediction of solar radiation. Appl Energy 2014;114:218–26.
[12] Morf H. The stochastic two-state cloud cover model stsccm. Sol Energy 2011;85:985–99.
[13] Zhang X. A statistical approach for sub-hourly solar radiation reconstruction. Renew Energy 2014;71:307–14.
[14] Ehnberg JS, Bollen MH. Simulation of global solar radiation based on cloud observations. Sol Energy 2005;78:157–62.
[15] Paoli C, Voyant C, Muselli M, Nivet M-L. Forecasting of preprocessed daily solar radiation time series using neural networks. Sol Energy 2010;84: 2146–60.
[16] Ngoko B, Sugihara H, Funaki T. Synthetic generation of high temporal resolution solar radiation data using markov models. Sol Energy 2014;103:160–70.
[17] Torres J, de Blas M, Torres L, García A, de Francisco A. Synthetic generation of standard sky types series using markov transition matrices. Renew Energy 2014;62:731–6.
[18] Poggi P, Notton G, Muselli M, Louche A. Stochastic study of hourly total solar radiation in corsica using a markov model. Int J Climatol 2000;20:1843–60.
[19] Bouabdallah A, Bourguet S, Olivier J, Machmoum M. Photovoltaic energy for the fixed and tracking system based on the modeling of solar radiation. In: 39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, IEEE; 2013. p. 1821–6.
[20] Orozco-Gutierrez M, Ramirez-Scarpetta J, Spagnuolo G, Ramos-Paja C. A method for simulating large PV arrays that include reverse biased cells. Appl Energy 2014;123:157–67.
[21] Orozco-Gutierrez M, Ramirez-Scarpetta J, Spagnuolo G, Ramos-Paja C. A technique for mismatched PV array simulation. Renew Energy 2013;55: 417–27.
[22] Djordjevic S, Parlevliet D, Jennings P. Detectable faults on recently installed solar modules in Western Australia. Renew Energy 2014;67:215–21. Renewable Energy for Sustainable Development and Decarbonisation.
[23] Achaibou N, Haddadi M, Malek A. Modeling of lead acid batteries in pv systems. Energy Procedia 2012;18:538–44.
[24] Manwell JF, McGowan JG. Lead acid battery storage model for hybrid energy systems. Sol Energy 1993;50:399–405.
[25] Gergaud O, Robin G, Multon B, Ben Ahmed H. Energy modeling of a lead-acid battery within hybrid wind/photovoltaic systems. In: 10th European conference on power electronics and applications; 2003.
[26] Thiaux Y, Seigneurbieux J, Multon B, Ahmed HB. Load profile impact on the gross energy requirement of stand-alone photovoltaic systems. Renew Energy 2010;35:602–13.
[27] Schmid J, Schmidt H. Inverters for photovoltaic systems. In: 5th Contractors Meeting Commission of the European Communities DG XVII; 1991. p. 22–4.
[28] Olivier J-C, Bernard N, . Trieste S, Bourguet S, Mendoza L. Techno-economic optimization of flywheel storage system in transportation. SGE 2014;2014.
[29] Olivier J-C, Wasselynck G, Trichet D, Auvity B, Josset C, Maindru P. Light-duty fuel-cell vehicle designed for energetic races: high efficiency power converter design. Eur J Electr Eng 2012;15:39–61.
[30] Diaf S, Notton G, Belhamel M, Haddadi M, Louche A. Design and techno-economical optimization for hybrid pv/wind system under various meteorological conditions. Appl Energy 2008;85:968–87.
[31] Koutroulis E, Kolokotsa D, Potirakis A, Kalaitzakis K. Methodology for optimal sizing of stand-alone photovoltaic/wind-generator systems using genetic algorithms. Sol energy 2006;80:1072–88.
[32] de Almeida A, Fonseca P, Bandeirinha R, Fernandes T, Araújo R, Urbano N, et al. Remodece: residential monitoring to decrease energy use and carbon emissions in Europe. Final report 2008:96.
[33] Yang H, Zhou W, Lu L, Fang Z. Optimal sizing method for stand-alone hybrid solar–wind system with {LPSP} technology by using genetic algorithm. Sol Energy 2008;82:354–67.
[34] Angelopoulos K. Integration of distributed generation in low voltage networks: power quality and economics. Glasgow (: University of Strathclyde in Glasgow Department of Mechanical Engineering; 2004.
[35] Duffie JA, Beckman WA. Solar engineering of thermal processes. John Wiley & Sons; 2013.
[36] Vengatesh RP, Rajan SE. Investigation of cloudless solar radiation with pv module employing matlab–simulink. Sol Energy 2011;85:1727–34.
[37] De Miguel A, Bilbao J, Aguiar R, Kambezidis H, Negro E. Diffuse solar irradiation model evaluation in the north mediterranean belt area. Sol Energy 2001;70:143–53.
[38] Mondol JD, Yohanis YG, Norton B. Solar radiation modelling for the simulation of photovoltaic systems. Renew Energy 2008;33:1109–20.
[39] Reindl D, Beckman W, Duffie J. Evaluation of hourly tilted surface radiation models. Sol Energy 1990;45:9–17.
[40] Loutzenhiser P, Manz H, Felsmann C, Strachan P, Frank T, Maxwell G. Empirical validation of models to compute solar irradiance on inclined surfaces for building energy simulation. Sol Energy 2007;81:254–67.
[41] Hocaoglu FO. Stochastic approach for daily solar radiation modeling. Sol Energy 2011;85:278–87.
[42] Muselli M, Poggi P, Notton G, Louche A. First order markov chain model for generating synthetic "typical days" series of global irradiation in order to design photovoltaic stand alone systems. Energy Convers Manag 2001;42: 675–87.
[43] Vindel J, Polo J. Markov processes and zipf's law in daily solar irradiation at earth's surface. J Atmos Solar-Terrestrial Phys 2014;107:42–7.
[44] Lumb F. The influence of cloud on hourly amounts of total solar radiation at the sea surface. Q J R Meteorological Soc 1964;90:43–56.
[45] Celik AN. Techno-economic analysis of autonomous pv-wind hybrid energy systems using different sizing methods. Energy Convers Manag 2003;44: 1951–68.
[46] Khatib T, Mohamed A, Sopian K, Mahmoud M. A new approach for optimal sizing of standalone photovoltaic systems. Int J Photoenergy 2012;2012.

C Article sur la méthodologie de dimensionnement sur cycles de systèmes multi-physiques et multi-échelles de temps

Journal of Energy Storage, Elsevier

A cycle-based and multirate approach for power system simulation application to the ageing estimation of a supercapacitor-based ferry

S. Hmam *, J.-C. Olivier, S. Bourguet, L. Loron

IREENA – Institut de Recherche en Énergie Électrique de Nantes-Atlantique (EA 4642), Université de Nantes, 37 Boulevard de l'Université, BP 406, 44602 Saint-Nazaire Cedex, France

ABSTRACT

This paper presents a general multi-rate method for the simulation of power systems with a wide range of time scales and with high mutual dependency between the fast and slow state variables. The original concept developed in this work relies on a cycle-based problem formulation, which consists in finding the repeating operation sequences of the system, at the different time scales. Next, a discrete form version of a conventional second order variable step solver is proposed and allows the extrapolation of the results beyond a large number of cycles, while maintaining and controlling a predetermined error tolerance on the state variables. This cycle-based formulation is applied to the ageing behaviour simulation of the energy storage unit of an all-electric ferry which only uses supercapacitors as energy storage. This problem needs the simulation of the electrical power operation of the boat, throughout its lifetime of 20 years. With this original cycle-based formulation, the computation effort can be reduced by several hundreds while maintaining low error tolerances.

1. Introduction

More and more power conversion and storage applications rely on complex and heterogeneous architectures. These multi-physical systems also depend on a large number of parameters that must be optimized making the simulation of such complex systems a major challenge [1–4]. Mathematical modelling of power conversion and storage systems leads to a set of differential equations which describe different phenomena from different natures. Today, many multi-physics simulation platforms are available and allow to readily combine different physical domains [5,6]. They are most of time based on acausal modelling approach, founded on the same principle as the Bond-Graph and using physical connections [7]. It facilitates the construction of large and complex systems by making physical models as flexible and reusable as possible [8]. But even if the modelling is largely simplified by these new tools, it still remains to efficiently simulate such a complex system, which solution requires the simulation of non-linear differential equations and mainly leads to the computation of stiff systems. These stiff systems are described by different ranges of time scales related to the physical domains taken into account. For instance, stiffness can appear when modelling an energy storage device by coupling the thermal and the electrical models with multiple chemical reaction processes. Once again, to solve efficiently these systems, there are different tools and approaches to improve the performance or stability of numerical solvers. Well adapted method for this kind of problem is the multirate methods [9,10]. The basic principle of this method is to split the system into sub-systems allowing to define local solvers, adapted to the constraints and dynamics of each physical layer of the model [11,12]. The coupling between the different models is generally obtained by approximating the slowly varying solution components [9,13]. However, these methods become ineffective for systems in which the fast response is sustained for a large portion of the simulation interval. A good example that illustrates this kind of problem is the simulation of a power converter, controlled with a pulse width modulation (PWM) [14,15]. It is found that even for a very simple system (i.e. stiffness and in *steady state*), its simulation is only possible by adapting the sampling time at a much lower value than the switching period. Then, even with an efficient variable step solver, it is only possible to limit the number of evaluations per period, but never to go beyond it. In fact, what is considered as a steady state in such a power converter are the *average values* for the current and voltage plus an high frequency ripple due to the PWM controller. The method proposed in [16], which is the most used today, permits to avoid this problem by working with average values. The idea is to replace the power stage by two switched models. In the framework of the piecewise linear

* Corresponding author.
E-mail address: sadok.hmam@univ-nantes.fr (S. Hmam).

systems, it is possible to deduce a single equivalent linear circuit which is then only set by the value of the duty cycle and switching frequency [15,16]. This approach can be seen as an homogenization method, where only the system state variation per period is considered.

It turns out that this problem can be easily extended to applications working with operation cycles. For instance, the design of the powertrain for public transport applications is commonly based on a representative driving cycle. For these applications, the results obtained for one cycle are extrapolated on the lifetime of the vehicle by considering a given driving schedule per day, week or year [17,18]. For the sizing of hybrid power systems with renewable energies (especially solar and wind), the simulation is generally done for one year, through the extrapolation of few days per week or per month [19,20]. This raises the question of the selection of the simulation horizons, which appear in many works arbitrarily chosen.

It therefore seems appropriate to look for a general formalism for the simulation of cycle-based multi-physics systems. This paper attempts to address this problem through an original concept of multi-layer cycle formulation. Indeed, the objective is to propose a method which consist in finding the different repeating sequences at the different time scales, from a limited number of elementary problems. These problems can be easily implemented in the classical multi-physics simulation platforms. The next step is to adapt the conventional variable step solvers to discrete problems, permitting the extrapolation of the results beyond the cycle, while maintaining and controlling a predetermined error tolerance on the state variables. Error estimate can be performed thanks to the embedded methods, which are based on the comparison of two different methods with different orders.

This cycle-based formulation is applied to the ageing behaviour simulation of the energy storage unit of an all-electric ferry which only uses supercapacitors as energy storage [21,22]. The simulation should be performed for 20 years of operation with a known power profile. To compute the lifetime of this storage unit, electrical and thermal models are coupled with an ageing model. This multi-physics system is represented by a set of ordinary differential equations and algebraic differential equations containing different time constants associated to each model. It is implemented in Matlab/Simscape, which is an acausal modelling tool, permitting to solve such a multi-domain problem. The proposed multi-rate and cycle-based methodology is then applied to this system and permits to reduce the computation time by hundreds while controlling the error estimate of the state vector.

The paper is organized as follows. In Section 2, the general problem formulation is presented. It is based on a reformulation of a continuous but cyclic problem, into a recursive discrete system. The formulation is then extended to the multi-layer concept, permitting to describe a cycle as a function of other subcycles, at different time scales. A second order modified one-step embedded method is then proposed to solve this new discrete problem with variable time step. Section 3 is focused on the application of the method to the supercapacitor-based ferry previously described, with a two-layers cycle description. Numerical results for several imposed tolerances are presented and then compared and discussed. Section 4 is the conclusion.

2. Problem formulation

2.1. Cycle-based formulation and homogenization

The multilayered formulation proposed in this paper is based on an initial homogenization step which is presented in this section. This method assumes that the problem to be addressed can be decomposed into a finite number of elementary cycles, named *cycle-based formulation*. So, we consider a series of k subproblems, each one defined by a nonautonomous ordinary differential equation (ODE) such as:

$$\dot{x} = f_i(x, t),\ i \in [1; k] \tag{1}$$

Each elementary problem $f_i(x, t)$ is simulated on a time lap T_i, corresponding to an elementary cycle simulation. The simulation of each cycle permits to pass from an initial state x_n to the next state x_{n+1}, such as (see Fig. 1):

$$x_{n+1} = x_n + \int_{t_n}^{t_n+T_i} f_i(x, t)\,\mathrm{d}t \tag{2}$$

The proposed method consider that the evolution of the state vector $x(t)$ can be substituted by its average rate of change at the scale of an elementary cycle of length T_i. This averaging method is well known in power converter modelling [14,16,23,24] where the electrical state variables are replaced by their mean value, at the scale of the switching frequency.

Here, this approach is generalized to any kind of cycle. The average state vector derivative at the scale of T_i is given by the next equation:

$$F_i(x_n, t_n) = \frac{1}{T_i}\int_{t_n}^{t_n+T_i} f_i(x, t)\,\mathrm{d}t \tag{3}$$

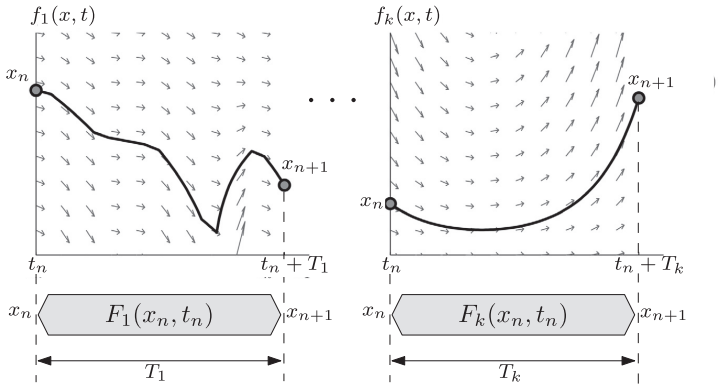


Fig. 1. Illustration of the decomposition of a continuous problem into k-nonautonomous ordinary differential equations.

In this way, the system is solved for an operating cycle T_i and then only state vector variations $F_n(x_n, t_n)$ over a time interval $[t_n, t_n + T_i]$ are evaluated. It is equivalent to the average rate of change, or simply the slope between the endpoints of the interval.

Using the formulation (3) in Eq. (2), the problem can be written in the form of the following recursive scheme:

$$x_{n+1} = x_n + T_i\, F_i(x_n, t_n) \tag{4}$$

where x_n describes the state vector at the beginning of each cycle. Because the initial problem is time continuous, and in the case of a succession of several identical cycles F_i, it is assumed that the average rate of change estimated at the scale of a cycle T_i for a given state vector x_n could be close from one cycle to the following cycles. Then, the state vector for the next cycles can be approximated with a variable step discretization method and using extrapolation concept. In order to illustrate this point, let us consider the problem of m successive cycles F_i, starting from the initial condition x_n. The aim is to evaluate the state vector variations over a time interval $[t_n;t_{n+m}]$. If all the cycles are evaluated, the final state vector x_{n+m} is given by:

$$x_{n+m} = x_n + T_i \sum_{j=0}^{m-1} F_i(x_{n+j}, t_{n+j}) \tag{5}$$

In order to speed-up the simulation, the idea is to approximate the right term of Eq. (5) by an approximation function Φ_i which can be likened to a conventional numerical integration scheme [25,26], given by the next equation:

$$x_{n+m} = x_n + h\,\Phi_i(x_n, t_n; h), \text{ with } h = m\,T_i \tag{6}$$

with $m \in \mathbb{N}^*$, the number of consecutive cycles F_i. The function Φ depends on the discretization method and of the chosen step size h. It is noteworthy that the extrapolation step size h must be a multiple of the operating cycle T_i. For large step h this may lead to a large discretization error. It is the reason why the numerical solver algorithm, which permits the extrapolation and the error estimate, is important in the efficiency of the proposed method. It will be developed in a next section.

Fig. 2 gives an example of cycle homogenization, in the case of m-subsequent cycles of length T_0. The averaging function F_0 is calculated with respect to Eq. (3) and is then called m times for the computation of the complete problem (from x_0 to x_m). For a faster computation, extrapolation function Φ_i can be used to estimate the total change of the state vector from only a few evaluations of F_0.

2.2. Multi-layer problem formulation

Now that the initial formulation of the continuous problem by a discrete cycle-based formulation is presented, we can approach the concept of multi-layer modelling. This tool could be very convenient when a system may be subjected to many kind of solicitations which can require to take into account complex cycles profiles, with very different time scales. Examples of such applications are numerous, especially for public transport application [21,27], which could have a typical short-time drive cycle, e.g. between two bus stations. This cycle can next be repeated many times a day, with idle phases. Finally, it can be considered that cycle variations may also appear depending on the day of the week or year.

The proposed multi-layer formulation is based on the definition of a cycle through a limited number of sub-sequences, themselves defined by sub-cycles. An example is given in Fig. 3, which illustrates the annual profile of an imaginary city bus. This profile is built from only two scenarios (operating and at rest) that are concatenated to form the complete annual sequence.

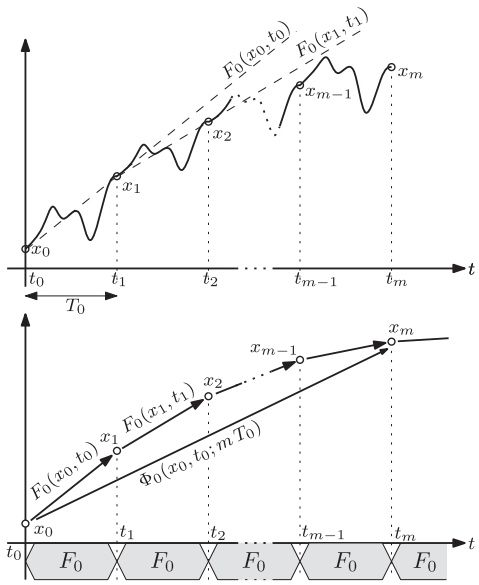


Fig. 2. Example of homogenization process of m successive cycles F_0 of length T_0. The extrapolation function Φ is used to overcome a costly calculation time of all the m-subsequent cycles.

On the basis of this example, we propose to adopt the following notation to define a cycle $c \in \{op, ar\}$ at a level $k \in \{h, d, w\}$, and composed of a total of m sub-cycles $i \in \{op, ar\}$:

$$F_c^k(x_n^k, t_n^k) = \frac{1}{T_c^k} \sum_{j=0}^{m-1} T_i^{k-1}\, F_i^{k-1}(x_{n+j}^{k-1}, t_{n+j}^{k-1}) \tag{7}$$

In other words, a cycle with a level k is obtained from a set of different cycles of level $k-1$. Then, by extending the formalism given in Eq. (4) and starting from an initial state x_n^k, the state vector x_{n+1}^k at the end of the cycle is given by:

$$x_{n+1}^k = x_n^k + T_c^k F_c^k(x_n^k, t_n^k) \tag{8}$$

The application of this notation to the example illustrated in Fig. 3, permits to easily define an operating day F_{op}^d on the base of 4 hours-cycles F_{op}^h and F_{ar}^h, such as:

$$T_{op}^d F_{op}^d(x_n^d, t_n^d) = T_{ar}^h \sum_{j=0,1} F_{ar}^h(x_{n+j}^h, t_{n+j}^h) + T_{op}^h \sum_{j=2,3,4} F_{op}^h(x_{n+j}^h, t_{n+j}^h) + T_{ar}^h F_{ar}^h(x_{n+5}^h, t_{n+5}^h) \tag{9}$$

where cycles from n to $n+5$ are solved recursively. Both problems F_{op}^h and F_{ar}^h are then computed with respect to Eq. (3), such as:

$$F_{op}^h(x_n^h, t_n^h) = \frac{1}{T_{op}^h} \int_{t_n^h}^{t_n^h + T_{op}^h} f_{op}(x, t)\, \mathrm{d}t \tag{10}$$

$$F_{ar}^h(x_n^h, t_n^h) = \frac{1}{T_{ar}^h} \int_{t_n^h}^{t_n^h + T_{ar}^h} f_{ar}(x, t)\, \mathrm{d}t \tag{11}$$

In this example, Eq. (9) permits to strictly compute the state vector variation over one *operating day*. In order to speed up the solving of this cycle, it is possible to use an approximate formulation, based on extrapolations concept. For instance, Eq. (9) needs the calculation of 6 successive cycles of 4 h. This calculation can be reduced by replacing the *sums* functions by

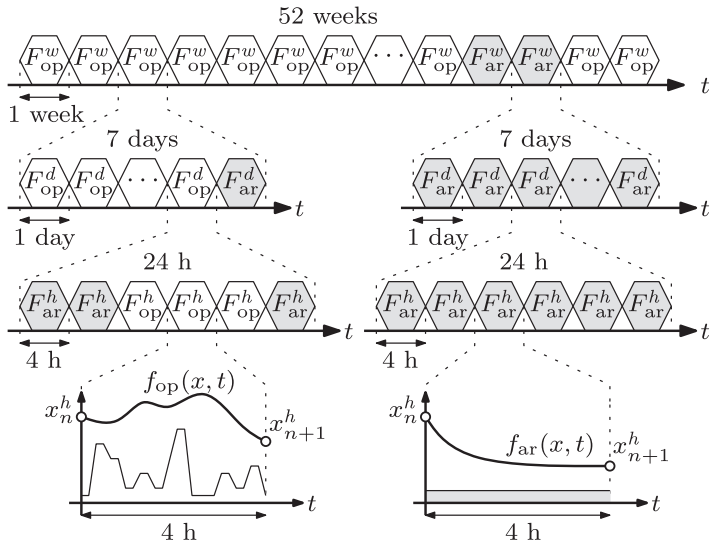


Fig. 3. Example of a city bus cycle, for one year of exploitation. *Operating* week F^w_{op} is composed of 6 *operating* days F^d_{op} and one *at rest* day F^d_{ar}. *At rest* week F^w_{ar} is made of 7 *at rest* days. Finally, one year is composed of 50 *operating* weeks and 2 *at rest* weeks.

approximations defined in Eq. (6). The computation of an operating day can then be replaced by the next expression:

$$T^d_{\text{op}} F^d_{\text{op}}(x^d_n, t^d_n) \simeq 2\, T^h_{\text{ar}} \Phi^h_{\text{ar}}(x^h_n, t^h_n; 2\, T^h_{\text{ar}}) + 3\, T^h_{\text{op}} \Phi^h_{\text{op}}(x^h_{n+2}, t^h_{n+2}; 3\, T^h_{\text{op}}) + T^h_{\text{ar}} \Phi^h_{\text{ar}}(x^h_{n+5}, t^h_{n+5}; T^h_{\text{op}}) \tag{12}$$

It is quite obvious that the combination of this cycle-based formulation with such extrapolation methods is especially interesting for a high number of successive cycles. To evaluate the potential gain of this formulation, it is possible to consider the extreme case. It is obtained from only one evaluation per approximation function. That is to say a minimum of 3 evaluations for example given in Eq. (12), that is to say potentially a halving of computing time. Moreover, with this multi-layer formulation, the total gain is accumulated by passing from one layer to another. For instance, one week can be calculated from one *operating* day (3 evaluations) and one *idle* day (only one evaluation), making a total of 4 evaluations. The computation of one week can pass from 42 problem evaluations (7 days of 6 cycles) to only 4 evaluations in the best case. Following the same logic, the computation of 1 year, can be obtained from 1 *operating* week (4 evaluations) and 1 *idle* week (1 evaluation), that is to say only 5 problem evaluations (to be compared to the 2184 evaluations for a full problem computation). This analysis only allows to estimate the potential of this multi-layer formulation. In reality, the extrapolation functions are not so effective. They require mostly several evaluations to be effective and accurate, and also to produce an estimation of the local truncation error. Such an extrapolation function is proposed in the following section.

2.3. Modified embedded extrapolation method

The problem here is to reduce the computation time by evaluating a minimum number of cycles. In order to solve ordinary differential equations, a classical approach is to use variable step integration schemes, such as Runge-Kutta methods [28–30]. With such method, the objective is to find a good approximation of the state vector evolution, from one time step to another. For a continuous problem, it can take all possible values and the integration scheme can be based on the problem evaluation at any fractional value of this time step. For instance, the second order Ralston's method needs the evaluation of the function at 0 and 2/3 of the time step (noted h). The classical 4th-order Runge-Kutta method needs evaluations at 0, h/2 and h. Moreover, an estimate of the truncation error must have been computed to adapt the stepsize. The uses of embedded methods are well suited to such problem, without adding additional evaluation. This is done by using two methods of different orders (generally of order p and $p-1$), but using the same evaluation nodes. In the multi-layer formulation proposed in this paper, this kind of integration scheme can be used to help evaluating the evolution of the state vector over many successive cycles. However, it must be adapted because the problem to solve is not an ordinary differential equation but a difference equation, obtained by the *integration* of the lower layers. The most straightforward adaptation from the continuous to discrete scheme is obtained by the second order method Heun-Euler. Indeed, this method only needs 2 evaluations, at nodes 0 and h for the continuous form. To find a numerical solution of an initial value problem $f_i(x_n, t_n)$, for a time step h, the original integration scheme is as follow [31,32]:

$$k_1 = f_i(x_n, t_n) \tag{13}$$

$$k_2 = f_i(x_n + h\, k_1, t_n + h) \tag{14}$$

$$x_{n+1} = x_n + \frac{h}{2}(k_1 + k_2) \tag{15}$$

$$x_{n+1} = x_n + h\, k_1 \tag{16}$$

$$\varepsilon_{n+1} = \frac{h}{2}(k_2 - k_1) \tag{17}$$

Fig. 4 gives a discretized version of the previous algorithm.

In this discrete form, for an extrapolation of m successive cycles F^k_i and starting from a time t^k_n, the same idea is used. Taking into account the cycle length T^k_i, which is used to compute the state vector variation, an extrapolation between $n+1$ and $n+m-1$ is

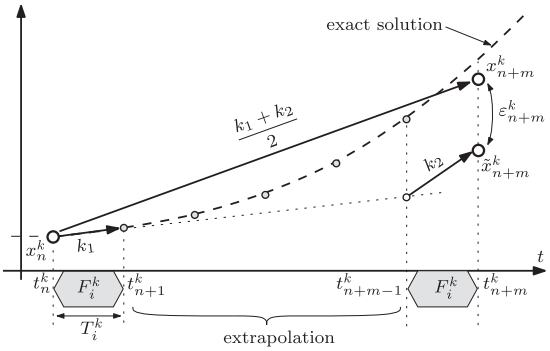


Fig. 4. Illustration of the Heun-Euler embedded method, adapted to this multi-layer formulation.

obtained considering the following equations:

$$k_1 = F_i^k(x_n^k, t_n^k) \tag{18}$$

$$k_2 = F_i^k\left(x_n^k + (m-1)\,T_i^k\,k_1, t_n^k + (m-1)\,T_i^k\right) \tag{19}$$

$$x_{n+m}^k = x_n^k + m\,T_i^k\,\frac{1}{2}(k_1 + k_2) \tag{20}$$

$$x_{n+m}^k = x_n^k + T_i^k((m-1)k_1 + k_2) \tag{21}$$

$$\varepsilon_{n+m}^k = x_{n+m}^k - x_{n+m}^k = T_i^k\,\frac{m-2}{2}(k_2 - k_1) \tag{22}$$

It is interesting to note that $m = 2$ is the minimum time step value, which corresponds to the computation of two successives cycles (then without extrapolation). In this case the error estimate is null. Moreover, for large values of m, i.e. when the cycle time T_i^k becomes very small compared with the extrapolation time, the equation set (18)–(22) tends to the classical formulation given in Eqs. (13)–(17). Thanks to this embedded formulation of the discrete time solver, the adjustment of the step size h can be controlled through the estimate of the error ε_{n+m}^k given in Eq. (22). In the continuous form of the solver, a very classical automatic step size control is obtained with the following equation [25,28,33,34]:

$$h \leftarrow 0.9\,h\left(\frac{\text{Tol}}{|\varepsilon_{n+m}^k|}\right)^{1/(p+1)} \tag{23}$$

where Tol is the required absolute tolerance, ε_{n+m}^k is the local error per step and p is the order of the scheme. Because the estimation of the local error is not exact, a *safety* factor of 0.9 is introduced. The adaptation of this rule to the discrete time scheme proposed in this paper, the step size h is replaced by the extrapolation length $(m-2)$. This is done by the two next steps:

$$m^* \leftarrow \max\left(2\,;\,0.9\,m^*\left(\frac{\text{Tol}}{|\varepsilon_{n+m}^k|}\right)^{1/(p+1)}\right) \tag{24}$$

$$m = [m^*] \tag{25}$$

where $[m^*]$ denotes the integer part of m^*. This two-step formulation permits to avoid rounding errors, especially for low values of the step size. In the limiting case $m = 2$, Eq. (22) gives a null error and then an infinite value for the next step size m. It is the reason why it is proposed to replace Eq. (22) by:

$$\varepsilon_{n+m}^k = T_i^k\,\frac{1}{2}(k_1 - k_2) \tag{26}$$

which corresponds to the case $m = 3$, giving the minimum non-null error estimate.

3. Application

3.1. System description

In this section, it is proposed to apply the multi-layer simulation to the full-electric ship *Ar Vag Tredan*, operating since September 2013 and crossing the harbour of Lorient, France. The ferry uses only supercapacitors to store the electric power. The power cycle for one round-trip is illustrated in Fig. 5. It makes 35 trips daily and therefore, it recharges 35 times per day its supercapacitors at the dock (noted R). The charging station is designed for a constant power charging strategy. The duration of this recharge is 5 min.

At the end of charging, the ship departs consuming a corresponding power at a speed of 5 knots to go out of the channel (2). Then, it navigates at 8 knots in the area (1) and finishes this trip at 5 knots to get to the dock (A). Once arrived, it stays 5 minutes at (A) to embarks/disembarks passengers and it consumes energy to stay close to the pontoon and to supply its auxiliaries. When the stopover is finished, the ship goes back towards the charging station using the same sequencing power. In [21], the techno-economic optimization of the ship is proposed. The lifetime the solution is of 20 years and the simulation is based on electrical, thermal and ageing models for the supercapacitor. A full computation of the problem requires a

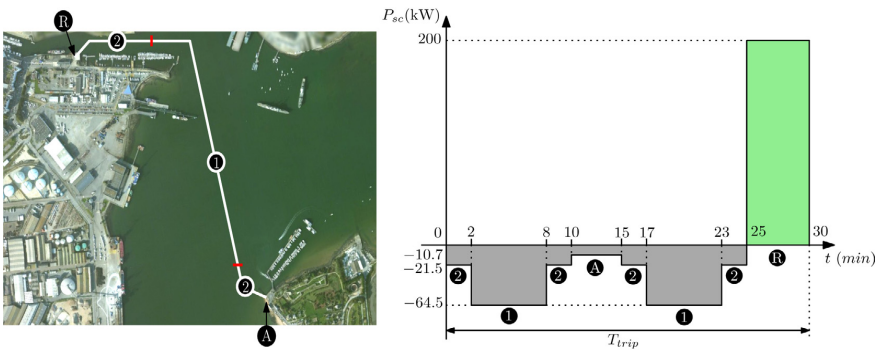


Fig. 5. Ship travel and power cycle specifications for the plug-in ferry *Ar Vag Tredan*.

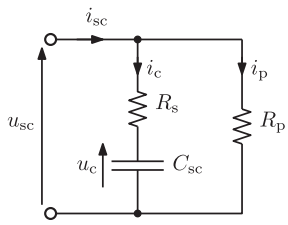


Fig. 6. Equivalent electrical model of the supercapacitor storage unit.

simulation of all the trips of the ship throughout its lifetime. To reduce the computation time, it has been chosen to simulate one trip per year, and considering a steady state temperature of the supercapacitors. This assumption permits to reduce the simulation time, but can cause significant error in the final result. In this work, it is proposed a generic formulation of this problem, allowing to propose an effective extrapolation method with an estimation of the error. The following section outlines the modelling of the supercapacitors and the cycle-based formulation of the usage of the ship.

3.2. Modelling of the supercapacitor

Supercapacitors is the key part of the powertrain, because it alone accounts for 20% of the total ship cost [21]. It is the reason why the estimation of the ageing of these components is essential. In order to achieve this goal, three kinds of models are coupled:

- An electrical model to provide the voltage and current profiles, which permits to compute the losses and efficiency of the storage unit;
- A thermal model in order to estimate the temperature rise inside the modules;
- An ageing model which calculates the degradation of the capacitance and the equivalent serial resistance.

The equivalent electrical model corresponding to the supercapacitor storage unit is given in Fig. 6.

The storage unit is made of branches of N_s serial modules, and N_p branches are connected in parallel. Each supercapacitor module has a serial resistance r_s which represents the losses during the energy transfer, a capacitance c_{sc} which represents the stored energy and a parallel resistance r_p which represents the balancing losses. The equivalent serial resistance R_s, balancing resistance R_p and capacitance C_{sc} are then given by:

$$R_s = r_s \frac{N_s}{N_p}; \quad R_p = r_p \frac{N_s}{N_p}; \quad C_{sc} = c_{sc} \frac{N_p}{N_s} \tag{27}$$

The differential equation governing the state of charge u_c of the storage device is given by:

$$i_{sc} = C_{sc} \frac{d\,u_c}{dt} + \frac{u_{sc}}{R_p}; \quad u_{sc} = R_s C_{sc} \frac{d\,u_c}{dt} + u_c \tag{28}$$

In this study, the charge and discharge of the supercapacitors are defined through a power profile. So, it is assumed that the value imposed across the storage device is the power $P_{sc} = i_{sc}\,u_{sc}$. From the next Eq. (28), it is found the following differential algebraic equation (DAE):

$$P_{sc} = \left(R_s + \frac{R_s^2}{R_p}\right) C_{sc}^2 \left(\frac{d\,u_c}{dt}\right)^2 + \left(1 + 2\frac{R_s}{R_p}\right) C_{sc}\,u_c \frac{d\,u_c}{dt} + \frac{u_c^2}{R_p} \tag{29}$$

The power losses in the equivalent elements (R_s and R_p) of the storage unit be calculated by knowing the current i_c and the voltage u_{sc}:

$$P_{losses} = R_s\,i_c^2 + \frac{u_{sc}^2}{R_p} \tag{30}$$

Electrical losses lead to a self-heating effect inside the storage unit. The increase of the temperature has a major influence on the ageing of supercapacitors [35]. This is why a thermal model is developed in order to estimate the temperature T_{sc} inside the module. This model is given by:

$$\frac{dT_{sc}}{dt} = \frac{1}{C_{th}} \left(P_{losses} - \frac{T_{sc} - T_a}{R_{th}}\right) \tag{31}$$

with R_{th} the thermal resistance and C_{th} the thermal capacity of each module given by the manufacturer, T_{sc} the temperature inside the module and T_a the ambient temperature.

The ageing model that is adopted is based on the parameters from calendar ageing tests. In [21], a comparison of a large set of data permits to extract a typical normalized degradation profile for the capacitance. A single common ageing profile appears regardless of the voltage and the temperature with a linear decrease after 20% of the lifetime (see Fig. 7). The asymptote passes by 90% of the nominal capacitance and is governed by an Arrhenius law, given in [21,40]:

$$\frac{dC_{sc}}{dt} = -k_{c0}\,(0.9\,C_0)\,2^{\frac{u_c - U_0}{\Delta U}}\,2^{\frac{T_{sc} - T_0}{\Delta T}} \tag{32}$$

$$\frac{dR_s}{dt} = k_{r0}\,R_0\,2^{\frac{u_c - U_0}{\Delta U}}\,2^{\frac{T_{sc} - T_0}{\Delta T}} \tag{33}$$

with C_0 and R_0 respectively the capacitor and serial transfert resistor values given by the manufacturer, T_0, U_0, ΔU, ΔT, k_{c0} and k_{r0} the parameters of the Arrhenius law, obtained empirically from datas in the literature [21].

The previous equations describing the powertrain of the ferry are implemented in Matlab/Simscape. The power cycle specifications are modelled using Stateflow in the Simulink environment based on state machines and flow charts. For more details on this implementation, the reader may refer to the work [21].

3.3. Cycle-based modelling of the application

The application of the cycle-based formulation to this problem is given in Fig. 8.

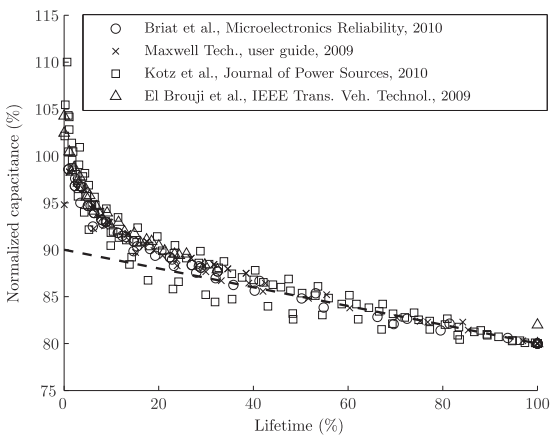


Fig. 7. Capacitance evolution after a lifetime normalization (in %), from [21,36–39].

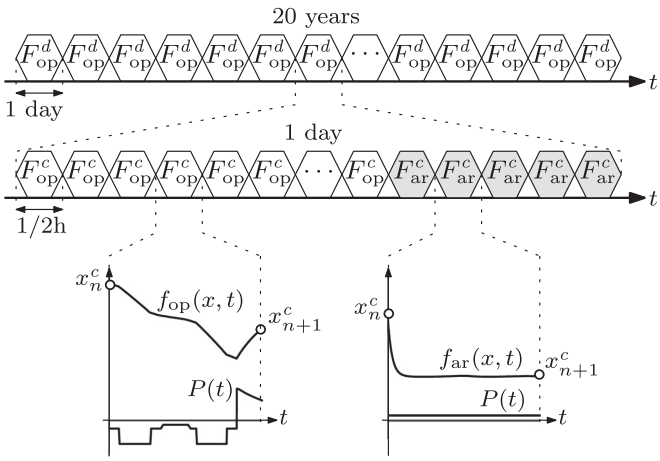


Fig. 8. Cycle-based formulation of the usage of the ferry *Ar Vag Tredan*, for 20 years of exploitation.

The simulation of the lifetime of the ferry is made of *operating* days F_{op}^d simulated on 20 years. Each day is composed of 35 *operating* cycles of half and hour, and 13 *idle* cycles (with the same length, for more convenience). The state vector x is composed of the four next state variables:

$$x = (u_{sc}, T_{sc}, C_{sc}, R_s)^T \tag{34}$$

and the initial values of the state vector $x(0)$ is given by:

$$x(0) = (N_s\, u_{sc\,n},\ T_{amb},\ 0.9\, C_0,\ R_0)^T \tag{35}$$

with $u_{sc\,n}$ the rated voltage of a supercapacitor module, N_s the number of modules in series, T_{amb} the ambiant temperature, C_0 the initial capacitance given by the manufacturer and R_0 the initial equivalent serial resistance, also given by the manufacturer. The value of all these parameters is given in Table 2.

3.4. Simulation results

In order to illustrate the results obtained with the proposed methodology, it is proposed to analyze each layer, starting with the lowest. Fig. 9 gives the simulation result for one round-trip of the ferry, at the beginning of the life of the ferry, for a stabilized thermal cycle (the final temperature is equal to the initial value). This simulation is done with Simscape by using the variable step solver `ode15s` based on a variable order numerical differentiation formulas. The tolerance for the error estimate of the solver is fixed to 10^{-5}. The end of the cycle is obtained once the voltage u_{sc} has returned to its initial value, i.e. 585V in this application. The electrical losses in the supercapacitors are computed and used to calculate the thermal cycle and the ageing of the electrical parameters (capacitance C_{sc} and the equivalent serial resistance R_s).

The simulation of a round trip permits to build a sequence of first-layer cycles F_{op}^c. The sequence of *at rest* cycles F_{ar}^c is obtained considered a null power profile, with a self discharge of the supercapacitors. The simulation of a day from a sequence of *operating* days F_{op}^c and *at rest* days F_{ar}^c is illustrated in Fig. 10a. The full computation of the 48 cycles is compared to results obtained with the discretized Heun-Euler embedded solver, for a maximum tolerance of 10^{-1}. With this tolerance, only 13 *operating cycles* on the 35 are evaluated and 9 *at rest* cycles on the 13, with a maximum of 1 rejection step due to an excessive extrapolation error

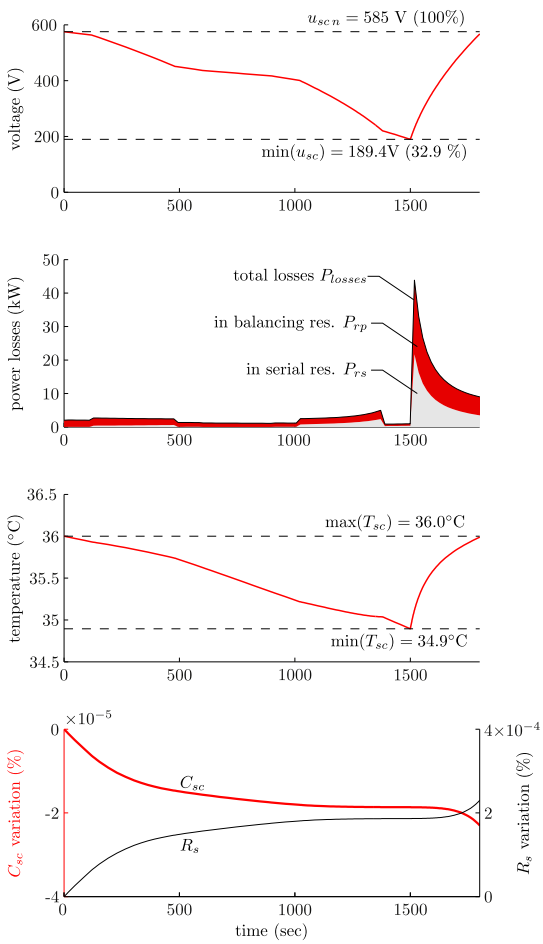
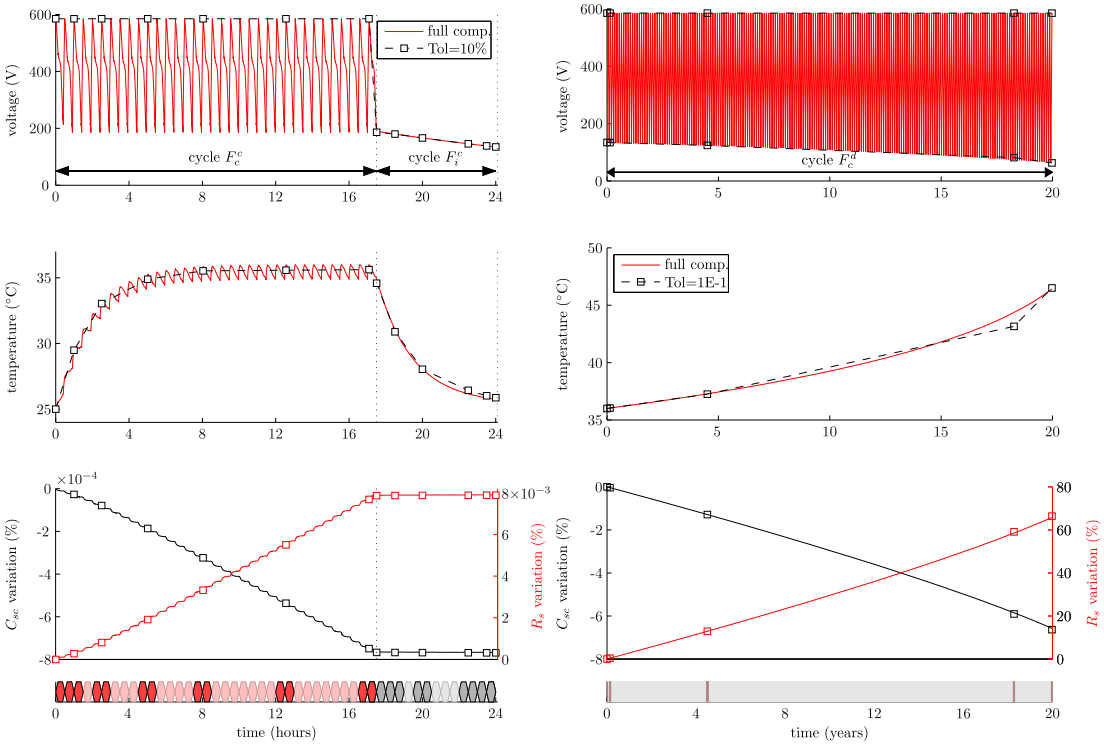


Fig. 9. Simulation result of one round-trip of the ferry, at the beginning of life.



(a) one day, at the beginning of life

(b) for 20 years.

Fig. 10. Simulation results of the two-layers formulation for the exploitation profile of the ferry. The figures also show the sequences that are evaluated and those that are extrapolated.

(depending on the initial state vector). The speed-up factor for this first layer is 2.2. The simulation of the sequence of first-layer cycles permits to build a second-layer cycle F_{op}^d, corresponding to the *operating* day of Fig. 8. The sequence of cycles F_{op}^d is then used to simulate the system behaviour on its entire lifetime of 20 years. Results are given in Fig. 10b, for the full computation of the 7300 days and the approximated values, also obtained with the Heun-Euler solver for a maximum tolerance of 10^{-1}. For this second layer, only 8 on the 7300 days are evaluated to perform a computation on the 20 years. The speed-up factor for this layer is 912, which gives a potential speed-up factor for both layer of about 2000, i.e. without any rejection of time step. For this ferry application, it is clear that the proposed formulation provides a substantial computation gain. This is especially true on the second layer (simulation of day cycles) due to the smooth variations of the temperature and ageing during the lifetime.

An important point that remains to discuss is the selection of tolerances for the different layers. Indeed, for this application, three tolerance values for the solvers can be set. Because the round-trip simulation is done by classical solvers of initial value problems (see results obtained in Fig. 9), it is assumed that the tolerance is small enough to be neglected at the first layer (which permits to build a day from round-trip cycles). It is the reason why a tolerance of 10^{-5} is considered. To compare the accuracy of the method for a set of tolerances on both layers, only the error on the capacitance is considered. Indeed, for this kind of sizing problem, the main objective is to conserve a good estimation of the supercapacitor ageing, and especially at the end of the operating period (20 years in this application). Table 1 summarizes the obtained results with tolerances for each layer ranging from 10^{-1} to 10^{-4}. Each results is detailed giving:

- The total number of cycle evaluations F_{op}^c and F_{ar}^c,
- the number of rejected cycles for a simulation of 20 years (due to an excessive extrapolation error),
- the final relative error (in %) on the capacitance value C_{sc}.

Moreover, nondominated solutions in the table are highlighted, i.e. the solutions which give the best balance between the number of evaluations and the final accuracy. It is possible to see that the maximum error on the capacity obtained for tolerance on both layers of 10^{-1} is only 0.0838%. This very low error is due to the high accuracy on the voltage and temperature cycles, which are the two useful parameters for the ageing of the supercapacitors. Regarding the choice of tolerances on each layer, it does not seem to be a clear rule in the presented case. In fact, the sizing of the energy storage device of this ship presented in this study leads to a continuous degradation of the electrical parameters of the supercapacitors. This justifies the low error values of the final capacitance comparing to the full computation (presented in Table 1). Consequently, the final values of the capacitance obtained by the multirate method are not very sensitive to the selected step sizes. So, the effect of varying tolerances on each layer can appear using another sizing of supercapacitor and with a different environmental conditions which impacts the rate of ageing variation. Finally, the proposed solver is only a second order, which does not make a suitable and efficient solver for problems with high accuracy. For stringent error problems, methods of higher order

Table 1
Results considering different tolerances on each layer, organized as: *total number of evaluations* (rejected evaluations) and error on the final value of the capacitance C_{sc}.

1st-layer (trips) \ 2nd-layer (days) Tol.	10^{-1}	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}
10^{-1}	**188**(6) 0.0838%	**336**(14) 0.0343%	**736**(38) 0.0175%	**1936**(110) 0.0143%
10^{-2}	**274**(32) 0.0777%	**482**(56) 0.0289%	**1036**(120) 0.0112%	**2684**(312) 0.0085%
10^{-3}	**440**(120) 0.0759%	**788**(228) 0.0271%	**1700**(500) 0.0097%	**4338**(1298) 0.0069%
10^{-4}	**450**(96) 0.0758%	**786**(168) 0.0271%	**1684**(364) 0.0096%	**4264**(920) 0.0068%

(and even with implicit formulation). In returns, it is obvious than the speed up-factor could greatly decrease, making the proposed formulation less interesting, especially for optimization purpose.

4. Conclusion

Cycle-based formulation of initial value dynamical problems is presented in this paper. It has been proposed to answer the problem of the simulation of large timescale and multi-physics applications, especially when it is possible to split the problem in a sequence of few elementary initial value problems. By also offering a multi-layer formulation, it becomes possible to successively build cycles at different time scales, and thus to take into account all periodicities in the operation of a system. Next, a suitable extrapolation tools is proposed in this work. It is based on a second order embedded solver, named Heun-Euler solver, which has been modified to be compatible with the discrete cycle-based formulation developed in this work. Finally, this method is applied to the simulation of a full-electric ferry, using only supercapacitors as energy storage device. With this original approach, it becomes possible to simulate the electrical, thermal and ageing behaviour of the system, from the scale of the cycle (few seconds), until its total operating lifetime (20 years). Without significant loss of accuracy, a speed up factor of about 2000 in the simulation time is obtained. To conclude, the main contribution of this work is to propose an efficient and generic simulation tool, well adapted to the design of complex and multi-physics systems, whose the operating profile can be reduced to a sequence of cycles, at different time scales.

Table 2
List of used parameters.

Electrical model		
Number of modules in series	N_s	9
Number of branches in parallel	N_p	11
Module balancing resistance	r_p	200 Ω
Capacitance	C_0	380 F
Resistance	R_0	35 mΩ
Module rated voltage	$u_{sc\,n}$	65 V
Thermal model		
Module thermal resistance	R_{th}	0.35 °C W^{-1}
Module thermal capacitance	C_{th}	19 kJ °C^{-1}
Ambient temperature	T_a	25 °C
Ageing model model		
Capacitance nominal degradation rate	k_{c0}	−1%/year
Resistance nominal degradation rate	k_{r0}	+10%/year
Nominal temperature	T_0	25 °C
Nominal cell voltage	U_0	2.5 V
Voltage variation for a lifetime halved	ΔV	0.2 V
Temperature variation for a lifetime halved	ΔT	10 °C
Global datas		
DC-bus voltage		600 V
Trip duration of the ferry	T_{trip}	30 min

Future work will focus, on the one hand, on integrating more accurate multi-physics models for better estimation of the ageing of the supercapacitors and, on the other hand, taking into account the switching frequency of the power converter by implementing an implicit extrapolation method using the proposed multi-layer approach.

References

[1] G. Wang, M. Ciobotaru, V.G. Agelidis, Optimal capacity design for hybrid energy storage system supporting dispatch of large-scale photovoltaic power plant, J. Energy Storage 3 (2015) 25–35.
[2] A. Maleki, F. Pourfayaz, Sizing of stand-alone photovoltaic/wind/diesel system with battery and fuel cell storage devices by harmony search algorithm, J. Energy Storage 2 (2015) 30–42.
[3] D. Lauinger, P. Caliandro, J.V. herle, D. Kuhn, A linear programming approach to the optimization of residential energy systems, J. Energy Storage 7 (2016) 24–37.
[4] R.E. Crosbie, J.J. Zenor, R. Bednar, D. Word, N.G. Hingorani, Multi-rate simulation techniques for electric ship design, in: 2007 IEEE Electric Ship Technologies Symposium, 2007, 384–389, http://dx.doi.org/10.1109/ESTS.2007.372114.
[5] B. Zupančič, A. Sodja, Computer-aided physical multi-domain modelling: some experiences from education and industrial applications, Simul. Model. Pract. Theory 33 (2013) 45–67, http://dx.doi.org/10.1016/j.simpat.2012.03.009.
[6] A.M. Dizqah, K. Busawon, P. Fritzson, U. Upon Tyne, Acausal modeling and simulation of the standalone solar power systems as hybrid DAEs, in: Proc. 53rd Int. Conf. Scandinavian Simul. Soc, 2012.
[7] S. Furic, Hybrid acausal modeling using modelica: presentation of modelica, in: Journées "Outils", INSA Lyon, 2007.
[8] P. Fritzson, V. Engelson, Modelica – a unified object-oriented language for system modeling and simulation, in: ECOOP'98-Object-Oriented Programming, 1998, 67–90.
[9] M. Crow, J. Chen, The multirate simulation of facts devices in power system dynamics, IEEE Trans. Power Syst. 11 (1) (1996) 376–382, http://dx.doi.org/10.1109/59.486121.
[10] A. Perquin, T. Henneron, S. Brisset, S. Clenet, Multirate coupling of controlled rectifier and non-linear finite element model based on Waveform Relaxation Method, IEEE Trans. Magn. (2016) 9464.
[11] T.J. Hassell, W.W. Weaver, A.M. Oliveira, Using Matlab's Simscape modeling environment as a simulation tool in power electronics and electrical machines courses, in: 2013 IEEE Frontiers in Education Conference (FIE), 2013, 477–483.
[12] B. Heinzl, C. Dorn, A.-A. Dimitriou, Object-oriented modelling of machine tools for energy efficiency analysis in production, in: 7th Vienna International Conference on Mathematical Modelling (MATHMOD 2012), 2012, 1300–1303, http://dx.doi.org/10.3182/20120215-3-AT-3016.00231.
[13] K. Petar, H.K. Khalil, J. O'reilly, Singular Perturbation Methods in Control: Analysis and Design, vol. 25, SIAM, 1999.
[14] D. Maksimović, A.M. Stanković, V.J. Thottuvelil, G.C. Verghese, Modeling and simulation of power electronic converters, Proc. IEEE 89 (6) (2001) 898–912.
[15] J.C. Olivier, J.C. Le Claire, L. Loron, A nonlinear phenomenon on self-oscillating current controllers: the indirect synchronization, IEEE Trans. Ind. Electron. 57 (3) (2010) 1106–1111.
[16] R. Middlebrook, S. Cuk, A general unified approach to modelling switching-converter power stages, in: Power Electronics Specialists Conference, 1976 IEEE, 1976, 18–34.
[17] X. Hu, L. Johannesson, N. Murgovski, B. Egardt, Longevity-conscious dimensioning and power management of the hybrid energy storage system in a fuel cell hybrid electric bus, Appl. Energy 137 (2015) 913–924.
[18] V. Marano, S. Onori, Y. Guezennec, G. Rizzoni, N. Madella, Lithium-ion batteries life estimation for plug-in hybrid electric vehicles, in: in: Vehicle Power and Propulsion Conference, 2009, VPPC'09, IEEE, 2009, 536–543.
[19] A. Chauhan, R. Saini, A review on integrated renewable energy system based power generation for stand-alone applications: configurations, storage options, sizing methodologies and control, Renew. Sustain. Energy Rev. 38 (2014) 99–120.
[20] A. Bouabdallah, J.C. Olivier, S. Bourguet, M. Machmoum, E. Schaeffer, Safe sizing methodology applied to a standalone photovoltaic system, Renew. Energy 80 (2015) 266–274.
[21] S. Trieste, S. Hmam, J.C. Olivier, S. Bourguet, L. Loron, Techno-economic optimization of a supercapacitor-based energy storage unit chain: application on the first quick charge plug-in ferry, Appl. Energy (2015), http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.04.054.
[22] S. Hmam, J.C. Olivier, S. Bourguet, L. Loron, A multirate simulation method for large timescale systems applied for lifetime simulations, in: Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), IEEE, 2015, 1–6.
[23] C.K. Tse, M.D. Bernardo, Complex behavior in switching power converters, Proc. IEEE 90 (5) (2002) 768–781.
[24] S. Banerjee, G.C. Verghese, Nonlinear phenomena in power electronics: bifurcations, chaos, control, and applications.
[25] C.W. Gear, L.R. Petzold, ODE methods for the solution of differential/algebraic systems, SIAM J. Num. Anal. 21 (4) (1984) 716–728.
[26] J. Stoer, R. Bulirsch, Introduction to numerical analysis, in: Texts in Applied Mathematics 12, 3rd ed., Springer-Verlag, New York, 2002.

[27] L. Pelkmans, D. De Keukeleere, H. Bruneel, G. Lenaers, Influence of vehicle test cycle characteristics on fuel consumption and emissions of city buses, SAE Trans. 110 (4) (2001) 1388–1398.
[28] R. Holsapple, R. Iyer, D. Doman, Variable step-size selection methods for implicit integration schemes for ODES, Int. J. Num. Anal. Model. 4 (2) (2007) 210–240, http://dx.doi.org/10.1109/ACC.2006.1657179.
[29] M. Herty, L. Pareschi, S. Steffensen, Implicit-explicit runge-kutta schemes for numerical discretization of optimal control problems, SIAM J. Num. Anal. 51 (4) (2013) 1875–1899.
[30] Z.A. Anastassi, A. Kosti, A 6 (4) optimized embedded runge-kutta-nyström pair for the numerical solution of periodic problems, J. Comput. Appl. Math. 275 (2015) 311–320.
[31] J. Dormand, P. Prince, A family of embedded runge-kutta formulae, J. Comput. Appl. Math. 6 (1) (1980) 19–26, http://dx.doi.org/10.1016/0771-050X(80)90013-3.
[32] E. Fehlberg, Low-order classical Runge-Kutta formulas with stepsize control and their application to some heat transfer problems.
[33] E. Hairer, G. Wanner, Solving Ordinary Differential Equations II-Stiff and Differential-Algebraic Problems, Springer-Verlag, 1991.
[34] J. Sanchez-Gasca, R. D'Aquila, W. Price, J. Paserba, Variable time step, implicit integration for extended-term power system dynamic simulation, in: Conference Proceedings, Power Industry Computer Application Conference, 1995, IEEE, 1995, pp. 183–189.
[35] P. Kreczanik, P. Venet, A. Hijazi, G. Clerc, Study of supercapacitor aging and lifetime estimation according to voltage, temperature, and RMS current, IEEE Trans. Ind. Electron. 61 (9) (2014) 4895–4902, http://dx.doi.org/10.1109/TIE.2013.2293695.
[36] Maxwell Technologies, Product Guide – Maxwell Technologies BOOSTCAP Ultracapacitors, 2009.
[37] R. Kötz, P. Ruch, D. Cericola, Aging and failure mode of electrochemical double layer capacitors during accelerated constant load tests, J. Power Sources 195 (3) (2010) 923–928.
[38] O. Briat, J.-M. Vinassa, N. Bertrand, H. El Brouji, J.Y. Deletage, E. Woirgard, Contribution of calendar ageing modes in the performances degradation of supercapacitors during power cycling, Microelectron. Reliab. 50 (9) (2010) 1796–1803.
[39] E.H. El Brouji, O. Briat, J.M. Vinassa, N. Bertrand, E. Woirgard, Impact of calendar life and cycling ageing on supercapacitor performance, IEEE Trans. Veh. Technol. 58 (8) (2009) 3917–3929.
[40] D.B. Murray, J.G. Hayes, Cycle testing of supercapacitors for long-life robust applications, IEEE Trans. Power Electron. 30 (5) (2015) 2505–2516.