



HAL
open science

Optimisation, conception et modélisation des systèmes électrotechniques

Philippe Dessante

► **To cite this version:**

Philippe Dessante. Optimisation, conception et modélisation des systèmes électrotechniques. Physique des plasmas [physics.plasm-ph]. Université Paris Sud - Paris XI, 2012. tel-00718555

HAL Id: tel-00718555

<https://theses.hal.science/tel-00718555>

Submitted on 17 Jul 2012

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

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



Mémoire

Optimisation, conception et modélisation des systèmes électrotechniques

Présenté pour obtenir

**L'HABILITATION A DIRIGER DES RECHERCHES
DE L'UNIVERSITE PARIS-SUD 11**

par

Philippe Dessante

Soutenue le 22 juin 2012 devant la Commission d'examen :

M. EICHWALD Olivier, Professeur, Laboratoire Laplace

M HECQUET Michel, Professeur, Ecole Centrale de Lille

M MULTON Bernard, Professeur, ENS de Cachan

M. VANNIER Jean-Claude, Professeur, Département Énergie, Supélec

M. BERGER Gérard, directeur de recherche, LPGP, Université Paris Sud

M. ROGER Daniel, Professeur, LSEE - Université d'Artois - Béthune

Rapporteurs :

M. EICHWALD Olivier, Professeur, Laboratoire Laplace

M HECQUET Michel, Professeur, Ecole Centrale de Lille

M MULTON Bernard, Professeur, ENS de Cachan

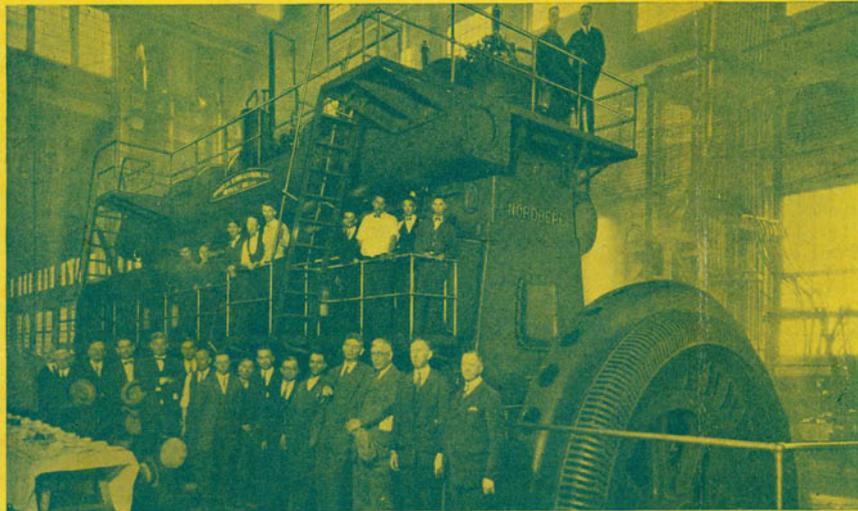
Travaux effectués au département Énergie de Supélec, à Gif-sur-Yvette

Optimisation, conception et modélisation des systèmes électrotechniques

Philippe Dessante

You can just as easily have Choice Electrical Jobs Like These

Our training is endorsed by even the United States Government



Unfortunately the demand for men with electrical training has grown faster than the number of schools who can train them. The big electrical firms depend upon School of Engineering of Milwaukee. Even the United States Government definitely requested that S. of E. students make the acceptance test on the gigantic generating unit for the Panama Canal, shown in the picture above. We need more men for these preferred jobs!

No wonder the U. S. Government calls for S. of E. men on the jobs that mean something. No wonder Commonwealth-Edison, Harnischfeger Corporation, Allis-Chalmers, General Electric try first to fill up their ranks with students from School of Engineering. If you were hiring men, wouldn't you naturally give the best jobs to those with the best training? To graduates who had studied under men like Prof. Ball, formerly associated with Dr. Steinmetz, the electrical wizard. Wouldn't you prefer men who had been out on important jobs like the Gov't Diesel engine test, described above, right while they were in school?

Think of Those Things for a moment and you will realize why School of Engineering leads the world in graduates out making good on the job today! No guess work about it. After a few months of S. of E. training you are a Graduated Electrician, Electrotechnician or Commercial Electrical Engineer. With a diploma that gets you the preferred job wherever men with electrical training are hired.

\$3200 and Up! with plenty of jobs to choose from awaits every S. of E. graduate after a few fascinating

months of our expert instruction. You make good from the first day on the job because you do the same things on the job that you do in school. Our graduates are successful because we know *how* as well as *what* to teach.

The Finest Electrical Talent is at your disposal every minute of S. of E. training. Famous engineering talent from Milwaukee and the whole middle-west mingle in the class rooms and laboratories to tell you what to do and how to do it to achieve quick success. Our staff is not excelled.

Our Students are Satisfied. We make no promises that are not fulfilled. S. of E. alumni will be found succeeding in every American city. For twenty years we have been equipping men from every walk of life, to make good in a big way. Whatever your previous experience or education you can make good and get a real job in Electricity without training.

You Can Earn Part of Your Expenses. Act now for immediate enrollment. Our employment department has a few choice part time jobs by

which you can earn part of your current expenses if you have initial expense money. Our tuition is low. Splendid board and room cheap. Daily broadcasting from the school station WSOE. School orchestra. Fraternities.

Act Now Before Classes Fill Up. Due to the highly specialized instruction given to S. of E. students and the enormous amount of personal attention to each man, our classes fill up rapidly now that enrollment is going on. S. of E. instruction is famous for its thoroughness—employers everywhere recommend it. We suggest immediate action to avoid disappointment.

Special Book Now FREE—Act! Our big 72-page book describing every phase of S. of E. training is now off the press. A copy will be rushed to you immediately on receipt of coupon. Send for this book today. It will be a big help in making up your mind. **CLIP COUPON NOW!**



S. of E. MEN go to Concerns Like These:

Allis Chalmers
General Electric
Commonwealth-Edison
Harnischfeger Corporation
Above—Photograph of Bethlehem shipbuilding cranes designed by S. of E. men at the plant of Harnischfeger Corporation the manufacturer.

SCHOOL of ENGINEERING of Milwaukee
Founded 1905. Dept. 16A 415-17 Marshall St., Milwaukee, Wis.

SCHOOL OF ENGINEERING OF MILWAUKEE
Dept. 16A 415-17 Marshall St., Milwaukee, Wis.
Without obligation we will give you, absolutely free, our new 72-page special book "Prospectus and How One Just Went to College"
Commercial Electrical Eng.
Elec. Eng. B. S. Deg. in 3 yrs.
Electronics
Junior Electrical Eng.
Industrial Electricity
Radio Sales, Service and Broadcasting
Armature Winding
Light, Heat, Power Wiring, Testing
Practical Electricity
Home Laboratory Service
Learn Intrested in your "Earn While You Learn" Plan
Name _____
Address _____
City _____ State _____
Telephone _____

FIGURE 1 – Amazing Stories août 1926

Première partie
Fiche synthétique

Chapitre 1

CV scientifique

1.1 État civil

Philippe Dessante

Né le 28 décembre 1971, 40 ans.

Célibataire, vie maritale, un enfant.

Professeur adjoint au département Énergie,
équipe d'accueil E3S EA4454, Supélec.

Mél : philippe.dessante@supelec.fr

Adresse : Département Énergie, Supélec
3 rue Joliot Curie
Plateau de Moulon
91192 Gif-sur-Yvette

1.2 Titres universitaires

- 2000 : Thèse de doctorat de l'Université de Versailles - Saint-Quentin-en-Yvelines ;
- 1996 : DEA de Modélisation mathématique, simulation et applications à la physique, Université de Versailles - Saint-Quentin-en-Yvelines ;
- 1995 : Maîtrise d'ingénierie mathématique, Université de Montpellier II ;
- 1995 : Licence de mathématiques, Université de Montpellier II ;
- 1993 : DEUG A, Université de Montpellier II.

1.3 Parcours professionnel

- 1996-2000 : thèse de Doctorat au laboratoire de physique des gaz et des plasmas ;
- depuis 2001 : professeur assistant puis professeur adjoint au département Énergie de Supélec (EA 4454).

1.4 Activités d'enseignement

Responsabilités d'enseignement :

- chargé du cours méthodes numériques et optimisation en deuxième année de Supélec (33h *eq.* TD) ;
- chargé de cours en troisième année de Supélec en optimisation et méthodes numériques (28h *eq.* TD) ;
- TD d'électrotechnique en première année de Supélec (6h *eq.* TD) ;
- TD de méthodes numériques et optimisation en deuxième année de Supélec (6h *eq.* TD) ;
- TP d'électrotechnique en première année de Supélec (50h *eq.* TD) ;
- encadrement de projets d'études d'élèves ingénieurs Supélec (50h *eq.* TD) ;
- cours en formation continue d'analyse numérique, d'optimisation, d'électrotechnique, et de physique des décharges (15 *eq.* TD) ;
- co-responsable du mastère spécialisé Ingénieur d'affaire pour les nouveaux marchés de l'électricité (IANME).

1.5 Activités liées à l'administration

- Membre du comité de pilotage du projet Énergie, Supélec.

1.6 Activités liées à la recherche

1.6.1 Prix

- "PLASMA PHYSICS INNOVATION PRIZE" décerné par la Société Européenne de Physique, "for breakthrough developments and applications of basic plasma physics tools to address environmental concerns" en collaboration avec Emmanuel Marode, Christophe Laux, Djamal Djermoune, Christian Deniset, Pierre Ségur, François Bastien, et Anne Bourdon.

1.6.2 Organisations de congrès scientifiques

Organisation de congrès scientifiques :

- Électrotechnique du futur (2003) : EF2003, Supélec 2003 ;
- Journées du club EEA, Supélec 2006 ;
- Journée d'économie expérimentale, Supélec 2007 ;
- sixième Conférence de la Société Française d'Électrostatique, SFE 2008.

1.6.3 Comités de lecture

Participation à des comités de lecture :

- revues d'articles pour la revue IET *Generation, Transmission and Distribution* ;
- revues d'articles pour le congrès *Power System Computation Conference* : PSCC 2005 ;
- revues d'articles pour la conférence de la société française d'électrostatique : SFE 2008 ;
- revues d'articles pour la revue IEEE TDEI *Electrostatics* ;
- revues d'articles pour la revue *Journal of Electrostatics*.

1.6.4 Participation à des jurys de thèse

- Examineur de la thèse d'Assia Djellali : *Optimisation technico - économique d'un réseau d'énergie électrique dans un environnement dérégulé*.
Jury : J. Robert, F. Bernot, A. Jaafari, M. Meunier, Ph. Dessante.
- Examineur de la thèse de Marcelo Saguan : *Analyse économique des architectures de marché électrique. Application au Market Design du temps réel*.
Jury : R. Belmans, C. von Hirschhausen, S. Saussier, Ph. Dessante, M. Massoni, J.-M. Glachant.
- Examineur de la thèse de Vincent Rious : *Le développement du réseau de transport dans un système électrique libéralisé, un problème de coordination avec la production*.
Jury : R. Green, J. Doucet, S. Saussier, Ph. Dessante, J.-M. Coulondre, É. Le Boulanger, J.-M. Glachant.
- Examineur de la thèse de Florent Maupas : *Analyse de l'impact économique de l'aléa éolien sur la gestion de l'équilibre d'un système électrique*.
Jury : J.-M. Glachant, J. Usaola, Ch. Weber, E. Neau, U. Stridbaeck, Ph. Dessante.

- Examineur de la thèse de Julien Capeillere : *Modélisations numériques bidimensionnelles du transport des particules et photons dans des gaz ionisés. Application au xénon sous excitation laser et à la propagation d'une décharge monofilamentaire à barrières diélectriques dans l'azote.*
Jury : O. Eichwald, J-F. Loiseau, J-M. Pouvesle, Ph. Dessante, M.C. Bordage, N. Sewraj.
- Examineur de la thèse d'Herman Bayem : *Apport des méthodes probabilistes pour l'insertion de la production éolienne dans les systèmes électriques* .
Jury : J. Usaola, V. Miranda, G. Kariniotakis, Françoise Lamnabhi, Ph. Dessante, J.-C. Vannier.
- Examineur de la thèse de Michelle Nsoumbi : *Étude des mécanismes d'inflammation d'un matériau isolant en présence d'un point chaud d'origine électrique.*
Jury : N. Ben Jemaa, S. Berthelot, S. Bourbigot, Ph. Dessante, D. Diallo, Z. Khatir, P. Lagonotte, Ph. Testé.

1.6.5 Partenariats industriels et projets de pôles de compétitivité

- Projet Comette, (2010-) Ph. Dessante, P. Vidal. Modélisations et calculs de performances pour la propulsion électrique automobile.
- Projet CSDL *Complex Systems Design Lab*, (2010-) Ph. Dessante, P. Vidal, G. Sandou. Réduction de modèles complexes et optimisation.
- Projet Preface, (2009-) Ph. Dessante, P. Vidal, B. Lorcet, M. Hennebel. Modélisation de type circuit du passage de la foudre dans les composants d'un avion.
- Leroy Somer (2009-) Ph. Dessante, P. Vidal, Jean-Claude Vannier. Optimisation de systèmes de motorisation.
- Projet Sefora, (2008-2010) Ph. Dessante, P. Vidal. Étude d'optimisation d'un actionneur pour application freinage. Optimisation d'une chaîne de motorisation (actionneur, réducteur, liaison hélicoïdale).
- Projet O2M, (2008-2010), Ph. Dessante, P. Lefranc, S. M'Rad. Étude sur le développement d'un modèle diffusif d'un bras d'onduleur d'un alternodémarreur.

- PSA (2007-2010) Ph. Dessante, E. Odic, Ph. Testé, R. Meyer, M. Nsoumbi. Étude des mécanismes d'inflammation d'un matériau isolant en présence d'un point chaud d'origine électrique. Mesures expérimentales d'échauffement sur des pistes électriques, modélisation et simulation des phénomènes.
- Virax (2007) Ph. Dessante, P. Vidal. Optimisation du système de motorisation pour un outil portable. Modélisation analytique du moteur, du réducteur épicycloïdal et de la batterie. Optimisation de la masse du système complet sous les contraintes de fonctionnement/performance.
- RTE (2006-2008) : Ph. Dessante, F. Maupas. Étude du mécanisme d'ajustement en présence de l'aléa éolien. Développement d'un modèle du mécanisme d'ajustement. Optimisation de l'ajustement en fonction du besoin et des moyens mis à disposition. Application de ce modèle en présence de l'aléa éolien.
- Sodielec (2006) : Ph. Dessante, M. Petit. Étude d'un algorithme d'estimation d'état sur un réseau de distribution. Mise au point théorique de l'algorithme. Calcul de *load flow*. Application de l'estimateur d'état au cas du *load flow* sur un réseau de distribution électrique.
- RTE (2006-2007) : Ph. Dessante, V. Rioux. Étude sur les investissements sur le réseau de transport dans un environnement de marché de l'électricité. Coordination production-transport. Modélisation des acteurs, optimisations des décisions d'investissement.
- Renault (2006-2009) : Ph. Dessante, M. Petit. Étude d'un réseau de bord électrique automobile, étude et conception d'un modèle d'alternateur. Établissement des paramètres du modèle par mesures expérimentales. Modélisation du réseau en régime transitoire.
- CRE (2005-2007) : Ph. Dessante, M. Sagan. Étude des architectures de marché de l'électricité. Modélisation analytique des différents designs de marché. Optimisation du choix des acteurs. Analyse économique des résultats.
- EDF (2005-2009) : Ph. Dessante, S. Plumel, M. Petit, H. Bayem. Étude sur l'opportunité d'utiliser des méthodes probabilistes pour les études d'intégration de l'éolien dans les réseaux électriques, et en particulier sur les études de raccordement. Étude bibliographique. Modèles probabilistes de vent et de production éolienne. Conséquences de l'insertion de l'éolien dans les réseaux.

- Basta (2005-2006) : Ph. Dessante, P. Vidal, M. Bensetti. Étude des performances et optimisation d'une génératrice embarquée. Simulations par éléments finis en trois dimensions. Calculs de couples. Vérifications et études des paramètres par des mesures expérimentales.
- Sodern (2004-2005) : Ph. Dessante, J-C. Vannier, B. Bonafos. Définition des caractéristiques d'un blindage magnétique à plusieurs étages. Analyse du comportement d'un blindage contre le champ magnétique terrestre. Mise au point d'une optimisation d'un système à trois niveaux d'écran en recherchant la masse minimale pour une application sur satellite. Simulation de l'influence mutuelle de deux blindages voisins.
- PSA (2003-2004) : Ph. Dessante, B. Lorcet. Étude de cosimulation d'un réseau de bord électrique automobile, simulation sous Simulink et Saber. Modélisation d'un réseau de bord, étude de cas critiques.

1.7 Encadrements

1.7.1 Thèses

- Marcelo Saguan : 50% *Analyse économique des architectures de marché électrique. Application au Market Design du temps réel*, thèse de l'Université Paris-Sud 11, soutenue le 28 avril 2007, partenariat Faculté Jean Monnet/CRE, directeur de thèse : Jean-Michel Glachant (50%). Actuellement en poste de consultant chez Microeconomix.
Jury : Ronnie Belmans, Christian von Hirschhausen, Stéphane Saussier, Philippe Dessante, Michel Massoni, Jean-Michel Glachant.
[50][47][46][45].
- Vincent Rious : 50% *Le développement du réseau de transport dans un système électrique libéralisé, un problème de coordination avec la production*, partenariat Faculté Jean Monnet/RTE, thèse de l'Université Paris-Sud, soutenue le 30 octobre 2007, directeur de thèse : Jean-Michel Glachant (50%). Actuellement en poste de consultant chez Microeconomix.
Jury : Richard Green, Joseph Doucet, Stéphane Saussier, Philippe Dessante, Jean-Marc Coulondre, Éric Le Boulanger, Jean-Michel Glachant.
[38][11][30][9] [31][29][22][32] [23][34][28][33][19] [24]
- Florent Maupas : 50% *Analyse de l'impact économique de l'aléa éolien sur la gestion de l'équilibre d'un système électrique*, partenariat Faculté Jean-Monnet/RTE, thèse de l'Université Paris-Sud, soutenue le 2 juillet 2008,

directeur de thèse : Jean-Michel Glachant (50%). Actuellement ingénieur chez RTE.

Jury : Jean-Michel Glachant, Julio Usaola, Christoph Weber, Emmanuel Neau, Ulrik Stridbaeck, Philippe Dessante. [40]

- Herman Bayem : 40% *Apport des méthodes probabilistes pour l'insertion de la production éolienne dans les systèmes électriques*, partenariat EDF, thèse de l'Université Paris-Sud soutenue le 23 novembre 2009, directeur de thèse : Jean-Claude Vannier (10%), co-encadrant : Marc Petit (50%). Actuellement ingénieur chez EDF.

Jury : Julio Usaola, Vladimiro Miranda, Georges Kariniotakis, Françoise Lamnabhi, Philippe Dessante, Jean-Claude Vannier. [44] [37] [36]

- Michelle Nsoumbi : 33% *Étude des mécanismes d'inflammation d'un matériau isolant en présence d'un point chaud d'origine électrique*, partenariat LGEP/PSA, thèse de l'Université Paris-Sud, soutenue le 28 septembre 2010, directeur de thèse : Philippe Testé (33%), co-encadrant : Emmanuel Odic (33%). Actuellement ingénieur chez PSA.

Jury : Noureddine Ben Jemaa, Sylvie Berthelot, Serge Bourbigot, Philippe Dessante, Demba Diallo, Zoubir Khatir, Patrick Lagonotte, Philippe Testé.

- Henri Borsenberger : 50% *Modélisation et optimisation robuste de systèmes complexes : application aux réseaux énergétiques*, thèse de l'Université Paris-Sud/Supélec, financée par la Fondation Supélec en cours, directeur de thèse : Philippe Dessante, co-encadrant : Guillaume Sandou (50%). [21] [59][8]

- Romaric Lanfried : 33% *Contribution à l'étude de la transition décharge lumineuse - arc électrique dans l'air et l'argon au voisinage de la pression atmosphérique*, thèse de l'Université Paris-Sud/Supélec soutenue en octobre 2011, financement Carnot, directeur de thèse : Emmanuel Odic (33%), co-encadrant : Philippe Testé (33%). [16]. Actuellement en poste d'ATER.

Jury : Francisco Alves, Laurent Chemartin, Jean-Marie Cormier, Alain Gleizes, Michael J. Kirkpatrick, Christophe Laux, Olivier Lesaint, Emmanuel Odic, Philippe Testé.

- Benjamin Dagusé : 50% *Optimisation de systèmes d'entraînement*, partenariat Leroy-Somer, thèse de l'Université Paris-Sud/Supélec, directeur de thèse : Jean-Claude Vannier (50%), soutenance prévue en octobre 2012. [18]

- Florent Saint : 30% *Étude de la réactivité de décharges électriques nanoseconde à la pression atmosphérique en milieu riche en hydrocarbures. Évaluation de l'efficacité énergétique de production d'hydrogène*, partenariat École Centrale de Paris, laboratoire EM2C, directeur de thèse : Christophe Laux (40%), co-encadrant Emmanuel Odic (30%), soutenance prévue en 2013.
- Khaled Almaksour : 33% *Étude de l'émission de courant noir par une surface soumise à un champ électrique intense et de ses mécanismes de transition à l'arc*, partenariat laboratoire LGEP, thèse de l'Université Paris-Sud/Supélec , directeur de thèse : Philippe Testé (33%), co-encadrant Emmanuel Odic (33%), soutenance prévue en 2013.
- Dany Prieto : 30% *Modélisation et optimisation des machines synchro-réductantes à aimants permanents et de leur électronique – Application aux véhicules électriques et aux compresseurs*, partenariat Leroy-Somer, thèse de l'Université Paris-Sud/Supélec , directeur de thèse : Jean-Claude Vannier (40%), co-encadrant Pierre Vidal (30%), soutenance prévue en 2014.
- Ivan Kravtsoff : 40% *Design et contrôle d'une nouvelle configuration de groupe électrogène associée à un dispositif de stockage d'énergie permettant de minimiser la consommation et l'empreinte environnementale*, partenariat Leroy-Somer, thèse de l'Université Paris-Sud/Supélec , directeur de thèse : Daniel Sandarnac (20%), co-encadrant Pierre Lefranc (40%), soutenance prévue en 2014.

Participation à l'encadrement des thèses de Miguel Lopez, Dario Morales, Xavier Jannot et Christophe Gutfrind.[12][41][27] [17]

1.7.2 Stagiaires post-doc

- Co-encadrement avec Claude Marchand et Jean-Claude Vannier de Mohamed Bensetti, stagiaire de post-doctorat pour une étude sur l'analyse et l'optimisation des performances d'une génératrice embarquée. [48]
- Co-encadrement avec Pierre Lefranc de Sabrina M'Rad, stagiaire de post-doctorat pour une étude sur le développement d'un modèle diffusif d'un bras d'onduleur d'un alterno-démarrreur. [26]

1.7.3 Stagiaires Master 2

- Jesus Periscal, *Mise en place du logiciel de base pour la simulation d'un marché électrique dans le cadre de l'économie expérimentale*, stage de fin

d'étude de master, 2005.

- Fabien Petit, *Économie expérimentale, outil pour l'étude de l'efficacité du market coupling*, stage de fin d'étude d'ingénieur Supélec, 2006. [39][33]
- Fabien Petit, *Efficacité des méthodes d'allocation implicite des capacités de transport du réseau électrique dans un réseau fortement maillé*, stage de master EGIR, 2007.
- Pablo de la Cruz Martinez, *Estimation d'état sur un réseau de distribution électrique*, stage de master, 2007.
- Ridga Ben Abdallah, *Simulation du déplacement des charges électriques au sein d'une décharge électrique à l'aide d'une méthode ELLAM*, stage de master, 2010.

1.8 Synthèse scientifique

Après ma thèse soutenue en octobre 2000 effectuée sur la modélisation d'une décharge électrique de type *streamer*, je suis entré au département Énergie de Supélec. J'y ai rejoint une équipe travaillant sur les machines électriques sous la direction de Monsieur Jean-Claude Vannier. Mes travaux portent sur la modélisation et l'optimisation des systèmes électrotechniques.

J'ai tout d'abord mis à profit mes connaissances sur la modélisation du champ électrique et de la propagation des décharges pour l'étude de la tenue en tension en régime nominal et en coup de foudre de bagues pour l'alimentation d'un pod. Cette étude a ensuite portée sur des calculs de températures effectués à l'aide de circuits électriques équivalents et par éléments finis.

Par la suite, l'objectif de mes recherches s'est axé sur deux points : la modélisation numérique et l'optimisation. J'ai donc développé des modèles physiques et numériques par éléments finis appliqués à la modélisation des machines électriques ou phénomènes électrotechniques. Ces modèles ont alimenté, par le biais de simplifications, des algorithmes d'optimisation pour la conception de machines. Le développement de ces algorithmes a ensuite été appliqué à l'optimisation technico-économique des grands réseaux de transport d'électricité. Dans les paragraphes suivants, je développerai une présentation succincte des travaux réalisés.

Avec la collaboration de Bernard Bonnafos, j'ai étudié les systèmes de blindage électromagnétiques en vue d'une utilisation dans une horloge atomique placée dans un satellite. Le fonctionnement correct de l'horloge nécessite d'avoir un champ magnétique le plus faible et le plus homogène possible sur l'axe de ces blindages. Le système étudié comportait trois blindages imbriqués. La géométrie du problème ne permettant pas l'utilisation de symétrie, le calcul du champ magnétique résultant sur l'axe de l'horloge a dû être mené grâce à l'utilisation d'un code de calcul par éléments finis en trois dimensions. L'atténuation du champ magnétique calculé n'étant pas assez importante, il a fallu introduire une compensation active[6][54]. Cette dernière était composée d'un certain nombre de bobinages cocylindriques avec le blindage passif. En fonction du champ résiduel sans compensation active (mesurée par un capteur), une optimisation sur le nombre de bobines et sur les densités de courant à appliquer dans celles-ci a été introduite. Ceci m'a permis d'estimer la meilleure distribution des courants dans les bobines afin de minimiser le champ magnétique extérieur sur l'axe de l'enceinte de l'horloge.

J'ai par la suite appliqué ces compétences acquises lors de cette étude à l'optimisation des systèmes de motorisation. Dans de nombreuses applications industrielles (spatiales, aéronautiques, automobiles, outillage portatif), il est nécessaire de minimiser la masse du système ou les pertes, tout en gardant les performances constantes. La première étape a consisté à modéliser analytiquement les éléments (moteur, générateur, batterie, convertisseur, réducteur de vitesse et transformateur de mouvement éventuel), à partir de simplifications des modèles numériques éléments finis, pour relier les performances et les dimensions. La seconde étape a consisté à mettre au point un algorithme d'optimisation relativement ouvert afin de prendre en compte différentes contraintes et différents objectifs en intégrant les modèles précédemment mis au point et validés. Ainsi, diverses études ont porté sur la minimisation de la masse ou le volume du système[52][51][49][48][43]. Une première optimisation multiobjectif (minimisation du volume et des pertes) a été menée sur une pompe à carburant pour un satellite[43].

Pour valider cette approche, une étude effectuée dans le contexte d'un projet de pôle de compétitivité a porté sur l'optimisation globale et multiobjectif d'un système de motorisation et d'entraînement pour une application aéronautique. Le système complexe composé d'éléments mécaniques et électriques (réducteur, transformateur de mouvement et moteur) a été modélisé par des fonctions simples permettant de développer des algorithmes d'optimisation performants. La double optimisation (simple et par front de Pareto) des pertes et de la longueur du système a bien montré l'importance de l'agrégation des composants

dans l'optimisation.

Ces travaux se poursuivent actuellement au travers de la thèse de Benjamin Dagusé portant sur l'optimisation globale d'un système de motorisation. Les recherches s'orientent d'une part vers la parallélisation des codes de calcul d'optimisation et d'autre part vers l'incorporation de modèles par éléments finis.

Ces compétences en optimisation m'ont permis de participer aux activités du groupe réseau du département Énergie de Supélec, dans le cadre de l'optimisation technico-économique des grands réseaux d'énergie. J'ai tout d'abord élaboré conjointement avec Sophie Plumel des algorithmes d'optimisation du plan de production pour la gestion des congestions au sein des marchés de l'électricité. Une première optimisation est réalisée sous la forme d'un équilibre de Nash-Cournot pour déterminer les prix et les quantités échangées sur le marché de l'électricité. Une deuxième optimisation est alors conduite pour s'assurer des contraintes physiques du réseau électrique. Ces contraintes rendent nécessaire la modélisation complète et non linéaire du réseau à l'aide d'un calcul de *load-flow*[14][12][57].

J'ai ensuite travaillé à l'élaboration des modèles de *designs* des marchés de l'électricité en partenariat avec Jean Michel Glachant du groupe Réseau Jean-Monnet de l'Université de Paris-Sud. Lors de cette étude, il a été développé un modèle analytique probabiliste du marché du temps réel. Ce modèle a permis l'étude plus approfondie de l'influence de la dynamique de la succession des marchés en environnement dérégulé. Une analyse économique a ensuite été menée avec Marcelo Sagan dans le cadre de la thèse qu'il a soutenue en avril 2007[50][47][46][45].

Le partenariat avec le groupe réseau Jean-Monnet m'a conduit à co-encadrer une thèse sur les problèmes d'investissements sur le réseau lorsque sa gestion est déconnectée de la production. Il s'agissait de faire une suite d'optimisations qui permettait d'obtenir une étude sur les possibilités d'investissement pour le gestionnaire du réseau de transport (GRT). En effet, le temps de fabrication d'une ligne de transport d'électricité est en général supérieur à celui de la construction d'une centrale qu'elle doit relier. Le but de ce travail conduit dans le cadre de la thèse de Vincent Rious a été d'étudier entre autres les signaux de coordination possibles qui peuvent aider le GRT à décider de ses investissements en collaboration avec les producteurs d'électricité[38].

Dans le même cadre de coopération, j'ai co-encadré la thèse de Florent Mau-pas sur l'impact de l'aléa éolien sur le mécanisme d'ajustement du réseau élec-

trique. La première étape a été la réalisation d'un modèle du mécanisme d'ajustement. Il s'agit d'une série d'optimisations de la gestion dynamique du parc de production pour conserver l'équilibre offre-demande tout au long de la journée. Cette gestion se fait en fonction des groupes de production disponibles et de leur contraintes physiques et en fonction de l'aléa de consommation. Après avoir validé ce modèle de gestion du mécanisme d'ajustement, nous avons étudié l'impact de l'aléa éolien sur celui-ci. L'analyse des résultats nous a permis de montrer les avantages et les inconvénients de l'incorporation de l'éolien dans les marchés et l'équilibrage de l'électricité.[40].

En parallèle de ce travail, la thèse de Herman Bayem a porté sur l'opportunité d'utiliser des méthodes probabilistes pour les études d'intégration de l'éolien et du photovoltaïque dans les réseaux électriques, et en particulier sur les études de raccordement. Il s'agit, à partir de modèles probabilistes ou des relevés de vents et d'ensoleillement réels, de remonter à une production électrique probabiliste. On obtient alors une probabilité de production pour une éolienne ou un panneau que l'on peut agréger – en tenant compte des corrélations entre chaque éolienne – pour obtenir celle d'une ferme ou d'une région. Avec ces données, nous pouvons déterminer l'impact (probabilité de congestions par exemple) de la production aléatoire sur le réseau électrique[44]. Cette étude a fait l'objet de deux applications sur des réseaux insulaires.[36]

Dans la continuité de ces travaux sur les aléas et les incertitudes, il est apparu nécessaire de développer des algorithmes d'optimisation robustes tenant compte de ces incertitudes sur les fonctions objectifs ou les contraintes. Un travail exploratoire a donc été mené lors de la thèse d'Henri Borsenberger en collaboration avec Guillaume Sandou du département Automatique de Supélec. La gestion d'un réseau de production, distribution ou stockage d'énergie est devenue un enjeu tant économique que technique, devant respecter des contraintes environnementales et législatives. Il est donc apparu nécessaire d'optimiser cette gestion afin de maximiser le profit de fonctionnement du réseau tout en respectant les contraintes imposées. Cette tâche s'est complexifiée du fait de la diversification des sources d'énergie qui peuvent coexister dans un même réseau (électricité, gaz, fioul, vapeur...). Par ailleurs, la modélisation de ce type de systèmes doit intégrer les incertitudes liées à la méconnaissance ou à la simplification du modèle (en vue de son optimisation) ou des incertitudes provenant de la nature prévisionnelle de la planification du fonctionnement du système (demande réelle des consommateurs, fluctuations économiques). La robustesse de cette gestion optimale est dès lors impérative, de sorte que les performances du système puissent être garanties en dépit des différentes sources d'incertitudes. Lors de ce travail

de thèse, trois types d'incertitudes ont été pris en compte : sur la demande des consommateurs, sur la capacité de production maximale, et sur les coûts de production. Différents algorithmes d'optimisation ont été élaborés, en s'appuyant sur les méthodes existantes dans le cas des méthodes déterministes (programmation dynamique et relaxation lagrangienne).

En parallèle de ces travaux sur l'optimisation des systèmes électrotechniques, j'ai continué, en partenariat avec Emmanuel Odic, à apporter ma connaissance sur la physique des plasmas et des modèles associés aux activités du département[55]. Nous avons ainsi développé des modèles de calcul et effectué des simulations de températures au sein de la colonne de plasma qui se forme après le passage de la décharge de type *streamer*, en vue de modéliser l'activité chimique[13][53].

En partenariat avec Philippe Testé du laboratoire LGEP nous avons mené une étude des défaillances sévères susceptibles de conduire à un amorçage de feu sur circuit imprimé lors de la thèse de Michèle Nsoumbi. Ce travail basé sur des mesures expérimentales et des simulations électrothermiques m'a permis de mettre à profit mon expérience en modélisation par éléments finis acquise lors de travaux sur la modélisation des machines électriques. Les expériences ont été conduites jusqu'à rupture d'une piste de circuit imprimé aboutissant ou non à un départ de feu. Le courant de fuite circulant dans le substrat s'est révélé être un paramètre pertinent pour évaluer la dégradation du circuit imprimé. Un modèle numérique électrothermique en trois dimensions développé sur cette structure a permis de décrire et de valider la dominance d'un processus thermique jusqu'à la rupture de la piste. Un enregistrement détaillé des paramètres électriques synchronisés à une cinématographie rapide au moment de la rupture a permis d'identifier un mécanisme impliquant un décollement de piste au niveau du défaut lié à un emballement de la température et du courant de fuite localisé. Ce mécanisme a été associé à la présence d'un canal chaud au travers du substrat conduisant à un échauffement important et localisé du matériau par effet Joule susceptible de conduire à l'inflammation, ainsi qu'un entretien de chauffage du substrat après rupture de la piste contribuant à entretenir et à propager le feu, notamment par émission de composés inflammables.

Cette collaboration, nous a amené à mettre en commun nos compétences, tant au niveau des domaines de recherche que des méthodes utilisées. En effet, le Laboratoire de Génie Electrique de Paris a développé une compétence dans le domaine des arcs électriques (expérience et modélisation) et le département Energie de Supélec a développé une compétence dans l'étude expérimentale et

par simulation de décharges électriques pré-disruptives dans plusieurs milieux gazeux. Les décharges étudiées par les deux groupes se situent dans les domaines différents, mais complémentaires, des plasmas thermiques et des plasmas froids (hors équilibre thermodynamique). L'étude de la transition d'une décharge lumineuse (forte tension, faible intensité du courant) en un arc électrique (faible tension, forte intensité du courant) présente un intérêt académique majeur tant du point de la physique des décharges (incluant l'arc électrique) que du point de vue de l'interaction plasma / surface. C'est pourquoi nous avons débuté une thèse sur ce sujet de la transition décharge *glow-arc*. Les phénomènes physiques qui régissent la physique de la décharge électrique sont sensiblement différents de ceux qui gouvernent la physique de l'arc électrique et jusqu'à présent les mécanismes conduisant à la transition ne sont pas bien connus. L'étude de la transition d'un mode à l'autre présente donc un intérêt scientifique particulier. Cette thèse, toujours en cours, nous a permis de décrire les phénomènes présents lors de la transition *glow-arc* grâce à des mesures électriques et visuelles à l'aide d'une caméra rapide. Cette description va par la suite nous permettre de réaliser un modèle physique des phénomènes qui devrait conduire à une simulation numérique de validation et d'interprétation.

Electrical Experts are in Big Demand!



L. L. COOKE
Chief Engineer



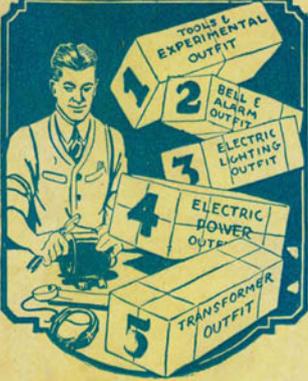
It's a shame for you to earn \$15 or \$20 or \$30 a week, when in the same six days as an Electrical Expert you could make \$70 to \$200—and do it easier—not work half so hard. Why then remain in the small-pay game, in a line of work that offers no chance, no big promotion, no big income? Fit yourself for a real job in the great electrical industry. I'll show you how.

Be an Electrical Expert Earn \$3,500 to \$10,000 a Year

Today even the ordinary Electrician—the “screw driver” kind—is making money—big money. But it's the trained man—the man who knows the whys and wherefores of Electricity—the Electrical Expert—who is picked out to “boss” the ordinary Electricians—to boss the big jobs—the jobs that pay \$3,500 to \$10,000 a year. Get in line for one of these “Big Jobs.” Start by enrolling now for my easily learned, quickly grasped, right-up-to-the-minute, Spare-Time Home-Study Course in Practical Electricity.

I Will Train You at Home for a Big Pay Job
L.L.C.

5 Big Fine Outfits to work with No Extra Charge



With me, you do practical work—at home. You start right in after your first few lessons to work at your profession in the regular way and make extra money in your spare time. For this you need tools, and I give them to you—5 big complete working outfits, with tools, measuring instruments, and a real electric motor—5 outfits in all.

**Age or Lack of Experience
No Drawback**

You don't have to be a College Man; you don't have to be a High School Graduate. As Chief Engineer of the Chicago Engineering Works, I know exactly the kind of training you need, and I will give you that training. My Course in Electricity is simple, thorough and complete and offers every man, regardless of age, education or previous experience, the chance to become, in a short time, an “Electrical Expert,” able to make from \$70 to \$200 a week.

Your Satisfaction Guaranteed

So sure am I that you can learn Electricity—so sure am I that after studying with me, you, too, can get into the “big money” class in electrical work, that I will guarantee under bond to return every single penny paid me in tuition, if, when you have finished my Course, you are not satisfied it is the best investment you ever made. And back of me in my guarantee, stands the Chicago Engineering Works, Inc., a two million dollar institution, thus assuring to every student enrolled, not only a wonderful training in Electricity, but an unsurpassed Student Service as well.

Free Book on Electricity

I want to send you my Electrical Book and Proof Lessons, both Free. These cost you nothing and you'll enjoy them. Make the start today for a bright future in Electricity. Send in Coupon—Now!

L. L. COOKE,
Chief Engineer
Chicago Engineering Works
2150 Lawrence Ave.
Dept. 16-A Chicago

Pay Raised 150%

“I was a dumbbell in electricity until I got in touch with you, Mr. Cooke, but now I have charge of a big plant including 600 motors and direct a force of 24 men—electricians, helpers, etc. My salary has gone up more than 150%.”
GEO. ILLINGWORTH,
63 Calumet Road,
Holyoke, Mass.

\$700 in 24 Days

“Thanks to your interesting course I made over \$700 in 24 days in Radio. Of course, this is a little above the average but I run from \$10 to \$40 clear profit every day, so you can see what your training has done for me.”
FRED G. McENABE,
7 W. 10th St., Atlanta, Ga.

\$20 a Day—for Schreck

“Use my name as a reference and depend on me as a booster. The biggest thing I ever did was answer your advertisement. I am averaging better than \$500 a month from my own business now. I used to make \$15 a week.”
A. SCHRECK,
Phoenix, Arizona

GET MY FREE BOOK!

VITAL FACTS

Get Started Now! Mail Coupon

Send me at once without obligation your big illustrated book and complete details of your Home Study Course in Electricity, including your outfit and employment service offers.

Name _____

Address _____

Occupation _____

The “Cooke” Trained Man is the “Big Pay” Man

FIGURE 1.1 – Amazing Stories août 1926

Deuxième partie

Synthèse des travaux de recherche

Chapitre 2

Introduction

L'électrotechnique est une science relativement ancienne, mais toujours d'actualité. Que ce soit le transport d'électricité, les machines électriques ou l'électrostatique, ce sont des domaines de recherche étudiés depuis longtemps, pourtant, on observe une augmentation de l'intérêt et de la demande sociétale pour la recherche en électrotechnique. La consommation d'électricité mondiale et en France croît de plusieurs pour-cent par an et les récents développement de la dérégulation du marché de l'électricité imposent une gestion des coûts et une optimisation des moyens de productions. Ces problématiques sont complétées par l'introduction de plus en plus massive des énergies renouvelables qui apportent de l'incertitude supplémentaire dans la résolution des optimisations technico-économiques.

Cette entrée des énergies renouvelables est due à une forte demande sociétale de réduction des émissions de gaz à effet de serre. De la même manière, le monde des transports assiste à une électrification accrue des organes allant jusqu'au remplacement des moteurs thermiques par des moteurs électriques. Des contraintes d'encombrement et de poids entraînent une recherche importante dans l'optimisation des systèmes de motorisation électriques. Grâce aux connaissances acquises dans l'optimisation des systèmes d'énergies nous avons développé des algorithmes et des méthodes d'optimisation adaptés aux systèmes de motorisation.

Ce document s'articule autour de trois parties principales. Dans la première, nous nous intéresserons à la problématique de l'optimisation et de la modélisation technico-économique des réseaux électriques. Nous y présenterons les collaborations avec le monde économique par le biais de co-encadrements de thèse avec le groupe réseau Jean-Monet. L'arrivée massive des énergies renouvelables nous a par la suite poussée à nous intéresser à l'incorporation des incertitudes dans les modèles et les optimisations.

Dans une deuxième partie, nous traiterons de l'optimisation des systèmes de

motorisation. Après une introduction de la problématique et la présentation de la méthodologie, nous présenterons deux exemples plus développés : une optimisation industrielle d'une gamme de moteurs électriques, où nous présenterons de nouvelles techniques pour réduire les coûts de fabrication et d'utilisation. L'optimisation de la chaîne de motorisation ne peut se réduire uniquement au traitement du moteur, c'est pourquoi notre approche d'optimisation système se base sur la prise en compte complète du système de motorisation : moteur, réducteur de vitesse, convertisseurs de mouvement et de puissance, source d'énergie... Pour cela, il faut s'assurer que les modèles pris pour chaque composant puissent être traités par l'optimisation. Nous présenterons donc une modélisation et une première optimisation d'un convertisseur de puissance en vue de son incorporation dans l'optimisation globale de la chaîne de motorisation.

Pour faire de l'optimisation, il faut pouvoir disposer de modèles de comportement, que ce soit pour les objectifs de la minimisation comme pour les contraintes. En effet optimiser c'est bien souvent se positionner en limite de fiabilité pour le système, il faut alors bien comprendre les mécanismes physiques et assurer sa robustesse. Ce point fera l'objet de la dernière partie. Dans un premier exemple nous traiterons de l'inflammation des cartes électroniques soumises à un stress important où nous présenterons des résultats expérimentaux couplés à une modélisation électrothermique des mécanismes conduisant à l'inflammation des circuits imprimés. Enfin et toujours en rapport avec la fiabilité nous exposerons dans la dernière partie de ce chapitre, les récents avancements des modèles en physique des décharges par le biais d'un travail sur la compréhension des mécanismes de transition entre la décharge *glow* lumineuse et l'arc électrique.

SPECIAL SUBSCRIPTION OFFER!



This Handsome VALET Auto-Strop Razor FREE with every five months' subscription to—

Science and Invention

The big Book of Scientific Events, News and Practical Developments from every corner of the world!

IN order to acquaint the readers of this book with SCIENCE and INVENTION, we are making, for a limited time, special reduced rates and are also giving FREE one complete VALET Auto-Strop Razor shown above.

For only \$1 (Regular Newstand price \$1.25) you can obtain this magazine for five months and also, one FREE Razor—

This shaving outfit consists of a highly-polished, nickel-plated, self-stropping Razor; one blade, leather strop especially prepared. The razor case is of metal, finished in maroon, crystalized effect. Lined throughout with velvet, harmonizing with the pleasing color scheme of the entire package.

The only razor in the world that sharpens its own blades.

A Treasure In Itself

Science and Invention thoroughly covers every important and interesting event of the scientific or inventive world that occurs from day to day. All of the latest developments in Electrics, Patents, Chemistry, Mechanics, Magic and Psychic Phenomena, Automotive Subjects, etc., etc., are written up and illustrated. This fascinating magazine also makes a big hit with the radio beginner. In every issue the sound practical fundamentals of radio are carefully and completely explained and simplified.

PIN A \$1 BILL, MONEY ORDER OR CHECK TO THIS COUPON



EXPERIMENTER PUBLISHING CO., Inc. A.S. 9
53 PARK PLACE, NEW YORK, N. Y.

Gentlemen, enclosed is \$1 for 5 months' subscription to SCIENCE and INVENTION. You are also to send me one complete razor as advertised FREE.

Name

Address

City, State

The coupon is for your convenience, clip it today and pin a \$1 bill, money order, or check to it. Fill out the Coupon with your complete name and address NOW.

Experimenter Publishing Co.

INC.

53 Park Place

New York, N. Y.

FIGURE 2.1 – Amazing Stories septembre 1926

Chapitre 3

Optimisation et modélisation technico-économique des réseaux électriques

3.1 Introduction

Depuis quelques dizaines d'années on assiste à une réforme importante de l'industrie électrique. L'introduction de la concurrence s'inscrit dans la lignée des mouvements de réformes des secteurs économiques relevant traditionnellement de monopoles. Le département Énergie a une tradition de recherche importante dans le secteur des réseaux électriques. Il nous a paru important de suivre ces réformes, de les comprendre et même de les devancer. L'introduction de l'économie, domaine étranger aux compétences axées techniques du département nous a conduit à nous associer au laboratoire GRJM de la faculté Jean-Monnet de Sceaux. Ce partenariat a donné lieu à de nombreuses collaborations où nous apportions nos compétences techniques du monde de l'énergie complétées par le savoir-faire économique du groupe de recherche Jean-Monnet. Plusieurs thèses ont été soutenues, toutes au sein du projet pluridisciplinaire Énergie de Supélec et co-encadrées par Jean-Michel Glachant professeur en science économique dans le groupe réseau Jean-Monnet de l'université Paris 11. J'ai moi-même participé à l'encadrement de trois d'entre elles, celles de Marcelo Saguan, Vincent Rious et Florent Maupas. Tout au cours de cette collaboration, il nous est apparu nécessaire de ne pas uniquement se focaliser sur les aspects techniques des réseaux électriques, mais de marier ceux-ci à la nouvelle approche économique qui modifie en profondeur les problèmes préexistants.

3.2 Designs de marchés

Nos travaux se sont tout d'abord orientés vers l'analyse, la description et la modélisation des formes que pouvait prendre le de marché de l'électricité au travers de la thèse de Marcelo Saguan. Cette recherche s'inscrit dans l'analyse économique des architectures de marché électrique. La construction d'une architecture de marché est une condition nécessaire pour la création d'un marché de gros d'électricité. Le manque de maîtrise rationnelle dans le choix des options optimales de design pousse ainsi à une recherche plus approfondie sur les différents designs, prenant en compte les spécificités du bien électricité. Cette recherche s'est appuyée sur un cadre d'analyse modulaire permettant de séparer les problèmes du *market design* en autant de modules distincts. L'analyse modulaire a montré le rôle clé du module du temps réel qui constitue le noyau central de toute architecture de marché électrique et où tous les échanges physiques entre acteurs de marché se réalisent. Grâce à des simulations numériques, nous avons montré que le design du module du temps réel n'est pas neutre vis-à-vis de la séquence des marchés d'énergie et de la dynamique concurrentielle. Les designs qui s'écartent du type « marché » et utilisent des systèmes de prix pénalisant les transactions du temps réel devraient être évités, dans la mesure du possible, car ils provoquent des distorsions, des inefficacités et peuvent créer des barrières à l'entrée. Parallèlement, la fermeture des marchés *forward*, déterminée par la position temporelle de la *gate closure*, devrait être le plus proche possible du temps réel afin de diminuer l'ampleur de ces distorsions. Ce cadre formalisé a permis ensuite d'évaluer les conséquences de l'intégration de modules du temps réel entre deux zones de contrôle. Les résultats des simulations numériques ont montré que l'intégration des modules du temps réel est fondamentale pour la création de marchés régionaux. De surcroît, l'intégration de ces modules doit être suivie d'une harmonisation adéquate des designs, afin que les effets de l'intégration proviennent des caractéristiques économiques des systèmes électriques intégrés et non des règles du design.

3.3 L'investissement dans les réseaux

Après avoir étudié les designs de marché, il nous a paru intéressant de nous intéresser aux problèmes soulevés par cette ouverture concurrentielle. Ce travail a été réalisé lors de la thèse de Vincent Rioux co-encadrée avec Jean-Michel Glachant du groupe réseau Jean-Monnet. Pour assurer un accès libre et non discriminatoire aux infrastructures essentielles (réseau électrique) la réforme a généralement nécessité une séparation verticale entre la production en concurrence et le réseau électrique en monopole naturel. La gestion de ce réseau a été délégée

guée au gestionnaire de réseau de transport (GRT). La séparation des activités de production et de transport a fait apparaître des problèmes de coordination, en particulier entre les investissements en production et en réseau. En effet les temps caractéristiques de construction d'une centrale électrique sont beaucoup plus courts que ceux de création de lignes de raccordement sur le réseau de transport. Cette problématique a fait l'objet de la thèse de Vincent Rious co-encadrée avec Jean-Michel Glachant du Groupe Réseau Jean Monnet.

Ce travail c'est donc articulé autour d'une analyse des mécanismes liés à la séparation des activités et des problématiques liées. Un des objectifs de cette thèse a été de montrer que l'investissement du réseau est le cœur de la coordination entre la production et le transport. La place centrale de l'investissement du réseau dans cette coordination s'explique alors par les différences de rythme temporel d'investissement entre le transport et la production. Étant donnée cette différence de dynamique temporelle, il faut faire connaître aux producteurs à l'avance les prévisions de développement du système électrique et les éventuels signaux de localisation. Enfin il nous est apparu nécessaire de montrer comment s'organise la coordination à long terme entre la production et le transport dans un système électrique libéralisé et du rôle proactif que doit y tenir le GRT pour coordonner de façon satisfaisante ces deux activités.

Pour réaliser ces objectifs, il a été nécessaire de construire un simulateur ainsi que des procédures d'optimisation permettant de définir les meilleures solutions pour une stratégie coordonnée d'investissement. La construction de ces outils a demandé un large panel de connaissances tant aussi bien sur le plan électrique des réseaux (calcul de la répartition de puissance par un *load-flow*), économique (signaux de localisation, investissement, incitations) que mathématiques (résolution de systèmes d'équations non linéaires, optimisation sous contraintes mono et multi-objectif).

3.4 Gestion de l'aléatoire et des incertitudes dans les réseaux d'énergie

3.4.1 Introduction

Ce travail sur la coordination entre l'investissement en réseau et en production nous a amené à nous pencher sur l'intégration de plus en plus importante et encouragée des moyens de production aléatoires que sont les fermes éoliennes et photovoltaïques, ces études ont fait l'objet de trois thèses. La première, celle de Florent Maupas, co-encadrée avec Jean-Michel Glachant du groupe réseau Jean-Monnet, portant sur l'impact de l'éolien sur les marchés de l'électricité. Cette thèse mixte en économie et gestion des réseaux à eu pour objet de rechercher

les impacts de l'intégration de l'éolien, notamment sur l'équilibre production-consommation à travers le mécanisme d'ajustement en temps réel.

La seconde, réalisée par Herman Bayem et co-encadrée avec Marc Petit et Jean-Claude Vannier du département Énergie de Supélec s'est intéressée à la gestion locale des fermes éoliennes et photovoltaïques à travers les conditions d'intégrations de celles-ci sur les réseaux de distribution. Nous avons recherché de nouveaux moyens de détermination des conditions de raccordement des moyens de production aléatoires. En effet actuellement, les études de raccordement se basent sur des cas déterministes où ne sont regardés que les cas critiques pour le réseau. En introduisant une détermination probabiliste des moyens de production et de la consommation, nous avons étudié comment modifier ces études de raccordement.

Cette approche probabiliste et la gestion de l'éolien nous a amené à nous questionner sur les techniques d'optimisation en présence d'incertitudes. Ainsi une troisième thèse sur ce sujet est en cours de réalisation. Henri Borsenberger s'est intéressé aux techniques d'optimisations robustes en présence d'incertitudes. Sa thèse co-encadrée avec Guillaume Sandou du département Automatique de Supélec, porte sur les modifications à apporter aux algorithmes d'optimisation déterministes pour les rendre performants dans les cas stochastiques. C'est thèse bien que traitant d'un sujet mathématique est appliquée à la problématique de la gestion d'un réseau d'énergie. Ce dernier pouvant être électrique ou de chaleur. Nous avons introduit les problématiques d'incertitudes sur les coûts de production, la quantité de production et enfin la demande.

3.4.2 Impact de la filière éolienne sur les marchés de l'électricité

Dans un premier temps, nous avons regardé l'impact de l'intégration éolienne à grande échelle sur l'équilibre de production-consommation et les marchés de l'électricité au cours de la thèse de Florent Maupas, co-encadrée avec Jean-Michel Glachant du groupe réseau Jean-Monet. Depuis les années 1990, la production d'électricité à partir d'éoliennes a été encouragée dans un certain nombre de pays par la mise en place de mécanismes de soutien. Ainsi, la filière éolienne s'est massivement développée et représente dans certains pays une part significative de la capacité totale de production électrique. Cette filière de production transforme l'énergie mécanique du vent en énergie électrique qui est ensuite injectée dans le réseau électrique. Les éoliennes exploitent ainsi une ressource locale abondante sans émettre de gaz à effet de serre. La filière éolienne apporte donc une réponse à des enjeux sociétaux de premier plan tels que la réduction des émissions de gaz à effet de serre ou la sécurisation de l'approvisionnement en électricité. Cependant, la production électrique des éoliennes hérite de certaines caractéristiques de sa ressource primaire : la puissance produite

par les éoliennes est variable, peu prévisible et non contrôlable. Ces caractéristiques distinguent la filière éolienne des filières de production dites « classiques » pour lesquelles la production est très largement contrôlable et prévisible. À cause de ces caractéristiques, l'intégration de la filière éolienne dans l'équilibre production-consommation soulève des enjeux économiques et techniques importants.

Ces enjeux de l'intégration de la production éolienne sont liés à une spécificité de la gestion du réseau électrique. À chaque instant, la production injectée dans le réseau doit être égale à la consommation soutirée du réseau. La production éolienne, par son caractère imprévisible, constitue ainsi un aléa pour les systèmes électriques. La gestion de cet aléa revêt non seulement un enjeu technique - car la sûreté du réseau en dépend - mais également un enjeu économique - car la gestion d'un aléa a un coût. Cependant, le défi technique posé par la production éolienne n'est pas d'une nature entièrement nouvelle. La problématique de gestion de l'équilibre du système n'est pas apparue lors de l'émergence de la filière éolienne. D'une part, sur un réseau, la consommation d'électricité change sans préavis et constitue donc un aléa pour l'équilibre production-consommation. D'autre part, les centrales des producteurs peuvent subir des indisponibilités fortuites qui remettent également en cause cet équilibre. Depuis la libéralisation du secteur électrique, la gestion de l'équilibre du réseau est organisée autour de deux étapes : les marchés de l'électricité et le module du temps réel.

Dans le cadre de cette intégration de plus en plus importante de l'éolien dans le mix énergétique de production, il est nécessaire de connaître l'impact de cet aléa éolien sur les marchés de l'électricité. Ceux-ci permettent d'atteindre un équilibre prévisionnel entre l'offre et la demande en électricité. Cependant cet équilibre prévisionnel entre l'offre et la demande ne garantit pas, en temps réel, l'équilibre physique entre la production et la consommation. C'est le module du temps réel qui garantit en temps réel l'équilibre physique des injections et des soutirages. Le défi technique imposé par le caractère imprévisible de la production éolienne est donc relevé par deux modules de réalisation de l'équilibre : d'une part les marchés de l'électricité, en particulier ceux organisés du jour pour le lendemain et en infrajournalier et, d'autre part, le module du temps réel durant lequel un opérateur du système coordonne les injections et les soutirages. L'enjeu économique de la gestion des systèmes électriques consiste à minimiser les coûts de fourniture de la consommation, tout en respectant les contraintes techniques et de sûreté du système. Dans une situation fictive d'information parfaite sur les conditions du temps réel, nous pouvons considérer que la programmation optimale des centrales électriques est idéale. Dans la situation réelle d'exploitation du système électrique, les centrales sont programmées dans une situation d'information imparfaite sur les conditions du temps

réel. La présence de l'aléa éolien renforce encore le caractère incertain du temps réel. Dès lors, le coût optimal de fourniture de la consommation s'éloigne de son idéal. L'enjeu économique de la gestion de l'aléa éolien se situe précisément au niveau de la différence entre les coûts de fourniture optimaux réel et idéal. L'enjeu économique de la gestion de l'aléa éolien est donc lié à l'efficacité de la programmation des centrales. Cette programmation résulte de deux types de décisions : celles prises sur les marchés de l'électricité dont la dimension physique est importante et celles prises sur le module du temps réel. Par conséquent, les étapes déterminantes pour l'enjeu économique de la gestion de l'aléa éolien sont le marché du jour pour le lendemain, les marchés intrajournaliers et le module du temps réel. C'est pourquoi l'objectif de ce travail est de définir une méthodologie d'analyse économique de l'enjeu économique de la gestion de l'aléa éolien et de l'appliquer au cas particulier du système électrique français. L'enjeu économique de la gestion de l'aléa éolien est fortement lié à la programmation des centrales électriques. Il faudra donc analyser comment la programmation des centrales est influencée par ce nouvel aléa. Une approche par simulation semble alors s'imposer.

Nous avons développé notre propre simulateur de la gestion de l'aléa éolien. Celui-ci se démarque des simulateurs existants sur plusieurs plans car il modélise l'ensemble des contraintes techniques des centrales électriques, la dualité des modules en intrajournalier, les aspects dynamiques de la programmation ainsi que la situation d'incertitude au moment de programmer les centrales. Les difficultés d'accès aux données sont partiellement résolues en exploitant les offres déposées en intrajournalier par les producteurs électriques français qui participent au module du temps réel. Ces offres donnent des informations importantes sur les conditions financières et techniques d'utilisation intrajournalière des centrales électriques. Cet outil de simulation modélise les deux modules de gestion de l'équilibre en intrajournalier que sont les marchés intrajournaliers et le module du temps réel en prenant en compte l'organisation de ces deux modules, de la situation d'information imparfaite pour la programmation des centrales électriques en intrajournalier ainsi que des contraintes techniques d'exploitation du système. L'utilisation du simulateur a mis en évidence une augmentation du coût de fourniture de la consommation pour gérer en intrajournalier un aléa sur l'équilibre production-consommation. Ce surcoût est défini comme le coût de gestion de l'aléa. L'analyse de ce coût a permis d'identifier le principal déterminant qui est la flexibilité limitée des centrales électriques. C'est à cause du manque de flexibilité des centrales que l'incertitude et la dualité des modules intrajournaliers provoquent des pertes d'efficacité. L'application du simulateur au cas du système électrique français actuel a montré l'enjeu économique de l'intégration d'une capacité éolienne de 3 à 12GW. Le coût de gestion de l'aléa éolien pour son responsable d'équilibre varie largement en

fonction des hypothèses retenues pour la liquidité des marchés intrajournaliers. Les travaux réalisés ont montré que les choix méthodologiques qui caractérisent le simulateur développé étaient justifiés. Le choix d'une représentation poussée de la flexibilité limitée des centrales a des conséquences importantes sur la complexité du simulateur et requiert l'utilisation de données privées des producteurs. Les travaux ont cependant montré que cette représentation est très importante puisque le coût de gestion de l'aléa éolien est très fortement influencé par la flexibilité limitée des centrales. De plus, les résultats montrent qu'il est nécessaire de rendre compte de la flexibilité limitée des centrales pour simuler les effets de la dualité des modules en intrajournalier et les effets des incertitudes en intrajournalier. Ce choix méthodologique est cependant moins fort si le simulateur est appliqué à un système où les centrales très flexibles abondent. Le choix méthodologique retenu permet de maîtriser les temps de calcul. Nous avons montré que sous certaines conditions, la représentation des centrales électriques par des agrégats de centrales permettait des gains de temps de calculs importants et n'altérait pas significativement la qualité des estimations numériques du coût de gestion d'un aléa.

3.4.3 Intégration des moyens de productions incertains

Un autre aspect de l'augmentation de la pénétration des énergies renouvelable est la problématique des conditions d'insertion des fermes éoliennes. Cette étude a été réalisée lors de la thèse d'Herman Bayem. Le contexte politique, économique et énergétique européen est actuellement favorable à une insertion importante d'énergie renouvelable (EnR) sur les réseaux électriques. L'accroissement de la production d'énergie renouvelable et la déréglementation des marchés de l'électricité font naître, dans le domaine de la gestion et de l'exploitation des réseaux, des problèmes scientifiques et techniques nouveaux. Ces problèmes sont induits par l'insertion de nouvelles sources d'énergie dans les systèmes électriques, non conçus à priori pour les accueillir. L'une des conséquences de cette arrivée massive de nouvelles énergies est la modification de la structure des réseaux qui passera d'une structure hiérarchique avec des moyens de production conventionnels de grande taille et centralisés à une structure horizontale avec de la production décentralisée (notamment renouvelable) dans les réseaux de distribution.

Le nouveau système électrique est constitué de moyens de production conventionnels (thermique, nucléaire, hydraulique), de moyens de production non conventionnels (micro turbines, cogénération, pile à combustible, géothermie, biomasse, petite hydraulique, éolien et photovoltaïque), des réseaux de transport et de distribution. En 2004 les énergies fossiles (pétrole, gaz) représentaient 65,8% de la production mondiale d'électricité et le nucléaire 15,8%. Les

moyens de production conventionnels (centrales thermiques et nucléaires) sont adaptés au fonctionnement des systèmes électrique puisque leur production est contrôlable mais ils utilisent les énergies qui présentent plusieurs inconvénients liés aux considérations environnementales : réserves limitées, émissions de gaz à effet de serre, traitement des déchets (notamment nucléaires). Ces considérations environnementales ont en partie dicté l'évolution des systèmes électriques vers une intégration massive des moyens de production non conventionnels et particulièrement de l'éolien et du photovoltaïque qui feront l'objet de ce travail. La part d'énergie renouvelable hors hydraulique dans la production mondiale est passée de 1,1% en 2000 (Papaefthymiou, 2006) à plus de 2% en 2004. La caractéristique fondamentale de la production renouvelable est sa dépendance aux conditions climatiques (le vent pour les fermes éoliennes et l'ensoleillement pour les fermes photovoltaïques). L'exploitant du système électrique a donc un pouvoir de contrôle limité sur la quantité d'électricité en sortie des unités de production d'énergie renouvelable. Plusieurs études montrent qu'un comportement fluctuant peut être caractérisé par des variables aléatoires traduisant les variations sur une période donnée. Il en est de même de la puissance produite par les fermes éoliennes et photovoltaïques. Plusieurs paramètres du système électrique ont également un comportement stochastique (disponibilité des moyens de production conventionnelle, des ouvrages de réseau, la demande...). Ainsi la puissance produite par les moyens conventionnels peut être modélisée par une variable aléatoire qui tient compte de la disponibilité des groupes de production. Il est donc légitime de penser qu'une modélisation probabiliste du système électrique serait adéquate pour caractériser son fonctionnement. Et, par conséquent, que l'analyse des systèmes électriques par les méthodes probabilistes serait particulièrement appropriée.

L'insertion d'une installation éolienne ou photovoltaïque sur un réseau électrique (de transport ou de distribution) peut entraîner des contraintes liées à différents aspects tels que : courants en régime permanent et congestion de réseaux, plan de tension, courants de court-circuit, plan de protection, comportement dynamique et contribution aux services de réglage de tension et fréquence, stabilité des fermes éoliennes, photovoltaïques et du réseau lors de défauts, qualité de la tension, etc. La réalisation d'études d'impact des énergies renouvelables sur les réseaux est donc nécessaire pour analyser ces contraintes, anticiper les problèmes liés au développement futur de ces énergies et rechercher des solutions appropriées. Ces études reposent en particulier sur la modélisation des unités de production d'électricité d'origine renouvelable. Les premières études d'insertion d'éolien ou de photovoltaïque dans les systèmes électriques ont été réalisées à l'aide de méthodes déterministes ; ceci principalement à cause de l'absence de modélisation probabiliste appropriée et de l'importance initialement réduite de ces unités de production dans le parc de production. Ces ana-

lyses déterministes s'appuient sur l'examen d'un nombre restreint de situations considérées a priori comme problématiques (« les pires cas ») pour lesquelles on vérifie la tenue du système électrique. On fait l'hypothèse implicite que les autres situations pouvant se produire sont moins contraignantes. L'approche probabiliste est une autre façon d'aborder le problème. Dans son principe, elle revient à considérer tous les cas possibles avec leur probabilité d'occurrence afin d'estimer le risque de ne pas respecter une contrainte du système. Les conséquences du non-respect de la contrainte seront bien sûr à mettre en regard de leur « gravité » ou sévérité pour le système. Le gestionnaire de réseau devra au préalable établir une politique de risque. L'approche probabiliste devrait ainsi permettre de « balayer » l'ensemble des configurations (ou cas) possibles en tenant compte des aléas liés à la production renouvelable, à la disponibilité des unités conventionnelles et des lignes, à la demande et donc de cerner plus finement les risques encourus avec le niveau de sévérité et la probabilité d'occurrence des situations contraignantes. L'objectif est alors de rechercher des solutions nouvelles techniquement et économiquement viables tout en garantissant la sécurité des personnes et des biens. Bien sûr, en plus d'une modélisation probabiliste du système électrique, l'utilisation de ce type d'approche requiert le développement d'une nouvelle méthodologie pour les études d'insertion et l'utilisation d'outils appropriés. D'autre part, l'implémentation des solutions nouvelles auxquelles elles pourraient conduire devra probablement s'appuyer sur des moyens évolués de conduite et de contrôle des fermes et des réseaux et pourrait nécessiter une évolution du cadre réglementaire et contractuel.

L'analyse des systèmes électriques dans ce contexte requiert la prise en compte des différents aléas induits par les nouveaux moyens de production et par les autres éléments du système. L'objectif principal de ce travail a été d'évaluer l'apport de l'application des méthodes probabilistes aux études d'impact de l'éolien et du photovoltaïque sur les systèmes électriques par rapport aux méthodes déterministes. La réalisation de ce travail est passée par trois étapes :

- modélisation probabiliste du système électrique : il s'agit ici de caractériser la variation de plusieurs paramètres du système par des variables aléatoires, de développer des méthodes de calcul des distributions de probabilité de ces variables aléatoires et d'analyser les corrélations éventuelles entre elles.
- développement de méthodes probabilistes pour les études de raccordement et d'intégration des énergies renouvelables dans les systèmes électriques : les études de raccordement concernent l'analyse de l'impact d'une ferme éolienne ou photovoltaïque raccordée au réseau de distribution ; les études d'intégration concernent l'analyse de l'impact d'un parc d'éolien et de photovoltaïque sur un système maillé.
- études de cas et comparaisons des méthodes probabilistes et déterministes.

Les énergies renouvelables (en particulier l'éolien et le photovoltaïque) ont des impacts sur le système qui peuvent être classés en deux catégories :

- les impacts locaux qui concernent la qualité de tension, le plan de protection et la capacité d'accueil du réseau,
- les impacts globaux qui concernent la gestion de la production à tous les horizons de temps et le comportement dynamique du système.

Les études d'impact des EnR ont pour principal objectif de vérifier que toutes les contraintes liées au fonctionnement normal des systèmes sont respectées. Du fait de leurs particularités, certaines des contraintes ont été aménagées pour les unités de production renouvelable. Elles sont par exemple exemptées de réglage primaire et secondaire de fréquence dans les réseaux français. Si le comportement stochastique de la puissance éolienne ou photovoltaïque est naturellement mis en évidence, elle n'est pas le seul paramètre du réseau à avoir un comportement aléatoire. Ainsi les paramètres suivants ont été modélisés comme des variables aléatoires et leur distribution de probabilité a été calculée : la puissance en sortie d'une centrale constituée de plusieurs unités de production conventionnelle. Le principal facteur induisant l'aléa est la disponibilité des unités, la disponibilité des lignes, la consommation dont la variation sur une année est modélisée par une gaussienne, les productions éolienne et photovoltaïque qui sont modélisées par des distributions de probabilité non paramétrées issues de la transformation des distributions de probabilité des sources primaires. Ces différentes distributions de probabilité et la structure de corrélation qui les lie forment le modèle probabiliste du système électrique. La gestion et l'exploitation d'un système électrique passe par la réalisation d'analyses d'adéquation, de sécurité statique et dynamique. Toutes ces analyses sont basées sur le calcul de la répartition de puissance. Ce calcul peut être résolu pour un point de fonctionnement par la méthode dite déterministe. Vu les différents aléas qui caractérisent le fonctionnement réel d'un système, il est très vite devenu nécessaire d'introduire les notions de probabilité dans les calculs de répartition et par conséquent dans les analyses des systèmes électriques. Il a été proposé une méthode probabiliste pour étudier l'impact des EnR dans un système électrique. La principale caractéristique de cette méthode est qu'elle tient compte des aléas liés aux variations des différents paramètres du réseau sur la période d'étude. Ces aléas sont pris en compte par le biais des distributions de probabilité préalablement calculées. Cette méthode est applicable aux trois types d'analyse (adéquation, sécurité statique, sécurité dynamique). L'application de la méthode probabiliste aux études d'impact des EnR sur la sécurité statique montre qu'elle permet de mieux simuler le fonctionnement du système sur une longue période. L'étude probabiliste permet de relativiser l'impact des EnR sur un système électrique donné. En effet l'impact est défini en termes de risque de défaillance sur une longue période et non en termes de défaillance sur des points de fonctionnement dits « pire cas

» comme c'est le cas pour les études déterministe. De plus l'étude d'un grand nombre de points de fonctionnement permet d'effectuer une analyse plus détaillée de l'impact des EnR. Les points de fonctionnement défaillants ont ainsi pu être analysés et caractérisés, les distributions de probabilité des tensions aux nœuds, des transits, de la réserve du système ont été déterminées et analysées. La méthode probabiliste a été appliquée à l'étude de raccordement d'une ferme éolienne à un réseau de distribution. L'analyse du transit dans la ligne en amont du point de raccordement montre que celui-ci est inversé et que les congestions sont rares. Comparée à celle obtenue par la méthode déterministe, la capacité de la ferme raccordable obtenue par la méthode probabiliste est plus grande moyennant un risque d'écrêtement de la production. Pour un risque d'écrêtement raisonnable, cette possible augmentation de la capacité raccordable de la ferme comparée à la capacité raccordable obtenue en déterministe, permet d'accroître le productible annuel. Pour le cas d'étude d'un système insulaire, l'intégration de 70 MW d'EnR (soit un taux de pénétration de 22,2%) ne modifie presque pas la réserve et augmente globalement les tensions aux nœuds de raccordement. Les transits sont inversés dans les lignes voisines des nœuds de raccordement. De même le taux de pénétration maximal en puissance obtenu par la méthode probabiliste est plus élevé que celui obtenu par la méthode déterministe.

3.4.4 Modélisation et optimisation robuste de systèmes complexes : application aux réseaux énergétiques

L'intégration éolienne et photovoltaïque apporte des problématiques de plus en plus complexes, tant du point de vue physique et industriel, que du point de vue mathématique où, comme nous l'avons vu, les probabilités et les incertitudes prennent une part importante dans les techniques d'optimisation et de résolution. C'est pourquoi il nous est apparu nécessaire de continuer dans cette voie de recherche en développement des techniques d'optimisation robuste des systèmes incertains. Cette étude a fait l'objet de la thèse d'Henri Borsenberger co-encadrée avec Guillaume Sandou du département Automatique de Supélec.

La gestion optimale à court terme (de quelques heures à quelques jours) des réseaux d'énergie apparaît comme un enjeu industriel et sociétal majeur. En effet, d'un point de vue purement technique, l'émergence de nouvelles technologies (installations aux rendements élevés, moyens de prédiction accrus par exemple), combinée à la croissance de la puissance de calcul permet d'améliorer la gestion des installations de production. D'un point de vue économique, l'ouverture des marchés de l'énergie induit un contexte fortement concurrentiel qui oblige les producteurs à optimiser la gestion de leur parc de production. Enfin, d'un point de vue environnemental, il s'agit de réduire les émissions de

polluants. Une telle réduction peut être facilitée par une gestion optimale et raisonnée de la production.

La gestion d'un réseau de production, distribution ou stockage d'énergie est devenue un enjeu tant économique que technique, devant respecter des contraintes environnementales et législatives. Il apparaît donc la nécessité d'optimiser cette gestion afin de maximiser le profit de fonctionnement du réseau tout en respectant les contraintes imposées. Cette tâche s'est complexifiée du fait de la diversification des sources d'énergie, qui peuvent coexister dans un même réseau (électricité, gaz, fioul, vapeur...). Par ailleurs, la modélisation de ce type de système doit intégrer les incertitudes liées à la méconnaissance ou à la simplification du modèle (en vue de son optimisation) ou des incertitudes provenant de la nature prévisionnelle de la planification du fonctionnement du système (demande réelle des consommateurs, fluctuations économiques...). La robustesse de cette gestion optimale est dès lors impérative, de sorte que les performances du système puissent être garanties en dépit des différentes sources d'incertitude.

Il existe à l'heure actuelle relativement peu de travaux concernant la modélisation et optimisation de réseaux multi-énergétiques, du fait de l'émergence de ce type de problématique. Ainsi, ce sujet suscite un grand intérêt de la part des industriels, confrontés à la complexité et interconnexion, de plus en plus accrues, de leurs systèmes. Des travaux sur ce sujet ont été menés par le département Automatique lors de la thèse de Guillaume Sandou portant sur la modélisation et optimisation d'un réseau d'énergie thermique. Les résultats scientifiques obtenus à l'issue de cette thèse sont encourageants et ont permis de discerner les verrous existants et donc de mieux cibler les travaux de recherche. En effet, il en est ressorti la nécessité de prendre en compte les incertitudes présentes dans le système, notamment dans la détermination de la commande optimale du réseau. De ce fait, un enjeu scientifique consiste en la détermination d'une commande optimale robuste vis-à-vis des incertitudes.

Dans ce cadre, cette étude a visé à la mise au point de stratégies de gestion optimale d'un réseau d'énergie. La détermination de cette commande optimale doit, dans la mesure du possible, utiliser des procédures systématiques et génériques, facilitant ainsi la transposition de la méthodologie développée à divers types de réseau. Cette commande devra également être robuste vis-à-vis des incertitudes. En outre, un enjeu majeur est de mettre au point des algorithmes numériques de résolution qui soient rapides, fiables et robustes.

Poursuivant les travaux initiés dans le cadre du projet Énergie de Supélec sur l'optimisation des réseaux dans un contexte déterministe, le but de cette thèse a été de rechercher des méthodologies assurant un pilotage robuste du réseau et ce malgré plusieurs types d'incertitudes.

L'approche déterministe des problèmes d'optimisation sur des systèmes in-

certaines donne des résultats imparfaits. Les optimums obtenus souffrent de deux défauts :

- des résultats présentant des risques. Les algorithmes d'optimisation poussent généralement le système en limite de fonctionnement. Les paramètres du système faisant varier le point de fonctionnement du système et/ou ses contraintes, il est possible que la solution initialement faisable dans le cas déterministe se retrouve être infaisable. On corrige généralement ce défaut en imposant une marge arbitraire au système qui se traduit généralement par une moins bonne performance de la solution. La solution ainsi obtenue devient donc sous-optimale.
- des résultats sous-optimaux. Lorsque les paramètres varient, de manière générale le lieu de l'optimum varie aussi. Les paramètres incertains n'ont pratiquement aucune chance d'être égaux à leurs estimations. Par conséquent le lieu de l'optimum obtenu a priori par la résolution du problème déterministe n'est pas celui de l'optimum réel que l'on ne peut obtenir qu'*a posteriori* après observation des paramètres.

L'optimisation de systèmes incertains est communément appelé optimisation stochastique ou optimisation robuste. Il est étonnant de constater à quel point les deux termes *optimisation* et *robuste* peuvent être antagonistes. En effet, l'optimisation du fonctionnement d'un système conduit généralement à se placer en limite de contraintes, alors que la robustesse cherche au contraire à s'en éloigner en prenant des marges de sécurité. Les premiers développements en matière d'optimisation stochastique datent des années 60. Les algorithmes et la théorie ont connu un essor récent ces 20 dernières années particulièrement dans les problèmes en chimie et en économie ([AP98], [BN02], [BN99], [Sah04]). Les méthodes développées dans ce domaine font souvent appel à des propriétés inhérentes à leurs applications ce qui les rend parfois délicates à appliquer aux problèmes d'énergie.

La première difficulté rencontrée dans des problèmes d'optimisation stochastique par rapport cas déterministes est la complexification de problèmes déjà complexes. En effet, dans la plupart des problèmes posés chaque incertitude ajoute une dimension de complexité au système, ce qui a des répercussions inévitables sur le temps de calcul.

La deuxième difficulté est un problème théorique. En général, un optimum stochastique est l'optimum qui minimise l'espérance du critère, ou son écart type. Dans les problèmes de planification pour les réseaux d'énergie en particulier, on s'intéresse généralement à l'espérance des coûts de production. Cependant le calcul de cette espérance n'est pas aisé. Les systèmes ne sont pas linéaires et le temps de calcul pour évaluer la fonction critère est une barrière pour le calcul de l'espérance sur le domaine d'incertitude. Par ailleurs, l'objectif étant d'optimiser une suite de décisions échelonnées dans le temps, ces déci-

sions peuvent être amenées à être modifiées selon les réajustements des prévisions. Ces réajustements utilisent les nouvelles données acquises au cours du temps : nouvelle données météo, écart de la consommation par rapport aux prévisions... L'intégration du réajustement dans des problèmes d'optimisation robuste fait appel à la notion de recours, qui est un thème central en optimisation stochastique. Les travaux dans ce domaine font appels à des méthodes de programmation dynamique stochastique ([PCW00][GR]) et des méthodes *multi-stage stochastic programming* [DR97].

Nous avons étudié les incertitudes suivantes, motivées par des problèmes industriels réels :

- incertitude sur la demande des consommateurs. Ce type d'incertitude est présent sur la quasi-totalité des réseaux d'énergie, car la demande de consommation ne peut être que prédite. La contrainte d'équilibre consommation / production est une contrainte forte des réseaux électriques pour en assurer le bon fonctionnement et la stabilité.
- incertitude sur la capacité de production maximale. Ce type d'incertitude est présent lors de l'utilisation d'énergies renouvelables telles que l'énergie photovoltaïque ou l'éolien dans les réseaux électriques, ou encore dans les réseaux de chaleur avec l'utilisation d'incinérateurs de déchets.
- incertitude sur les coûts de production. Ce type d'incertitude est présent sur presque toutes les installations, car les caractéristiques de production sont souvent identifiées à partir de points de mesure. Un cas particulier qui pourra avoir son importance dans l'avenir est celui des usines de cogénération. En effet, si le prix de revente devient indexé sur le prix du marché de l'électricité, alors de telles installations rentreront exactement dans ce cadre.

Les méthodes développées pour prendre en compte ces incertitudes apparaissent comme des extensions de la méthode choisie pour la résolution du problème déterministe, à savoir l'utilisation de la programmation dynamique et de la relaxation lagrangienne. Ceci est un point fort de nos travaux car les schémas classiques d'optimisation utilisés dans le cas déterministe restent utilisables.

3.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons traité de la modélisation et de l'optimisation technico économique des réseaux électriques de transport ou de distribution. Nous avons dans un premier temps étudié les effets de la dérégulation et de la séparation des entreprises de réseau de de production. Puis, au vu de l'insertion de plus en plus importante des énergie renouvelables photovoltaïques et éoliennes, nous avons cherché à comprendre les incidences induites par cette augmenta-

tion. Nous nous sommes intéressés aux études de raccordement des moyens de productions aléatoire, puis nous avons cherché à développer de nouvelles techniques d'optimisation qui prennent en compte ces incertitudes. En parallèle à ces travaux, nous avons appliqué les algorithmes d'optimisation développés au cas des machines électriques et plus particulièrement des systèmes de motorisation. Ce développement fait l'objet du chapitre suivant.

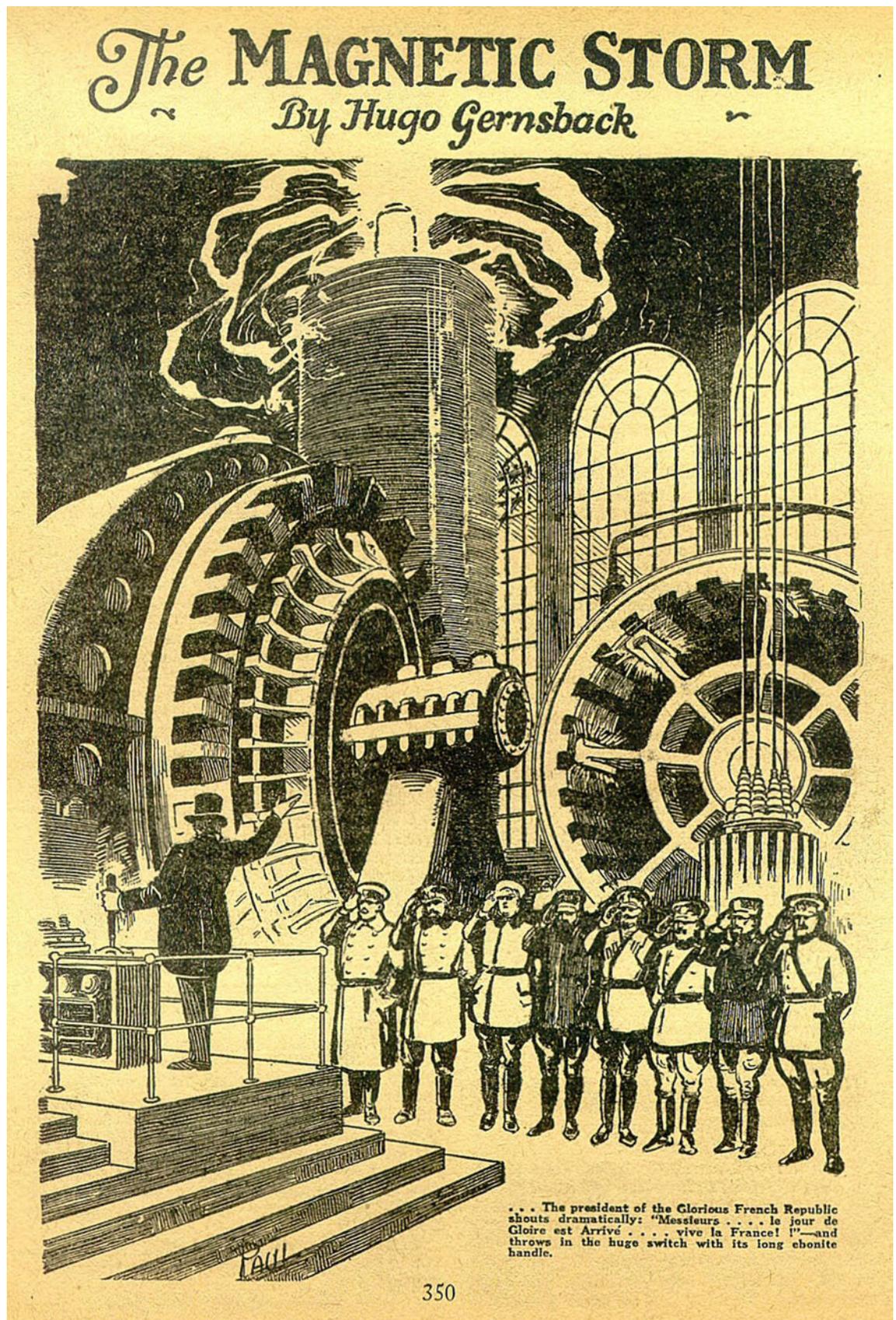


FIGURE 3.1 – Amazing Stories juillet 1926

Chapitre 4

Optimisation et modélisation des machines électriques

4.1 Principes de l'optimisation des systèmes électrotechniques

Dans beaucoup d'applications industrielles la question de la masse d'un système de motorisation est cruciale. On peut citer par exemple la conception des satellites ou des avions, mais c'est une réalité dans l'ensemble des industries aéronautique et spatiale. Dans de tels systèmes une diminution de la masse ou du volume induit une baisse de la consommation de carburant c'est à dire une diminution du coût d'exploitation et une hausse des prix de vente des appareils. L'industrie automobile est confronté à la même problématique, avec en complément la question du volume nécessaire à l'incorporation dans le véhicule et du coût.

La recherche d'une minimisation des pertes –ou du coût énergétique– est bien sur une autre approche de l'optimisation d'un système de motorisation. Cet optimum est en général en contradiction avec le précédent, ce qui nous amène à nous intéresser à des optimisations multiobjectifs en introduisant des fronts de Pareto.

Nous avons choisi de nous intéresser à l'optimisation et à la modélisation des systèmes au département énergie. Un système est un ensemble fonctionnel de composants réunis au sein d'une même application. Par exemple pour un système de motorisation, l'ensemble de la chaîne de traction est représentée sur la figure 4.1 : moteur électrique, réducteur de vitesse, convertisseur de mouvement, source d'énergie, convertisseurs électriques. . .

La prise en compte de l'ensemble des composants de la chaîne de traction est primordiale comme le montre la figure 4.2 où une optimisation système est

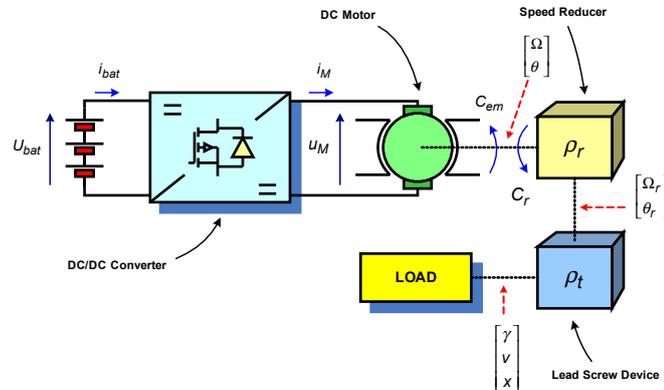


FIGURE 4.1 – Représentation schématique d'une chaîne de traction électrique

réalisée. Nous avons en fonction de contraintes spécifiques à une application, effectué une optimisation de la masse d'un ensemble réducteur de vitesse et moteur. Sur la figure sont tracés les masses totales et de chaque composant en fonction d'une contrainte variable sur le rapport de transformation maximal du réducteur de vitesse. C'est à dire que chaque point de ces courbes est une optimisation qui arrive en butte sur cette contrainte variable. En permettant un rapport de réduction maximal plus important, l'optimisation réduit le volume de la machine, mais augmente celui du réducteur. Il s'en suit une réduction globale de la masse. La masse totale du système (en vert) est donnée par la somme des masses du réducteur et du moteur. Si l'on augmente (relâche) la contrainte sur le rapport de transformation, on diminue la masse totale du système : la masse du moteur (en rouge) diminue tandis que celle du réducteur (en bleu) augmente. Optimiser seulement sur un point de fonctionnement la masse du moteur n'est pas recommandé dans ce cas, il faut prendre en compte l'ensemble des composants du système. À noter dans cet exemple le point optimal minimum de la masse totale du système : à partir d'une contrainte sur le rapport de réduction au-delà de $9,5 \cdot 10^4$, l'augmentation de la masse du réducteur n'est plus compensée par la diminution de la masse du moteur.

Composer des optimisations systèmes implique de réaliser des modèles multiphysiques prenant en compte tous les aspects des composants : électrique, mécanique, thermique... Ces modèles se doivent d'être relativement simples, ou tout du moins d'être rapidement calculables pour être implémentés dans les codes d'optimisation.

Dans la suite de cet exposé, nous allons présenter deux exemples d'optimi-

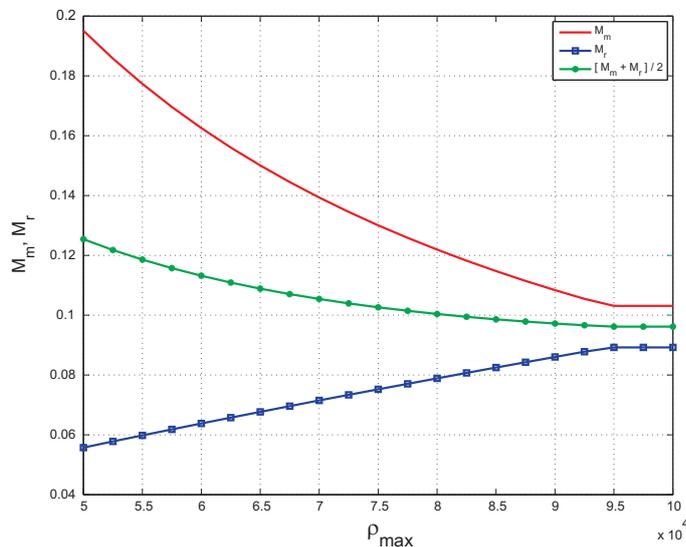


FIGURE 4.2 – Variation des masses optimales du système en fonction de la contrainte sur le rapport de transformation

sation. Le premier réalisé lors de la thèse de Xavier Jannot, présente une forme originale de problème d'optimisation : la réduction des coûts de fabrication d'une gamme d'alternateurs. Il s'agit encore une fois d'optimisation système, bien que celui-ci n'est pas cette fois ci composé d'éléments physiques, mais plutôt de types d'alternateurs dans une même gamme.

Par la suite, nous présenterons une première réalisation d'optimisation d'un convertisseur de puissance. Cette optimisation multi-objective servira de base pour une conception future complète du système de motorisation : batterie, convertisseur d'énergie, réducteur de vitesse, convertisseur de mouvement, moteur.

4.2 Optimisation des coûts de fabrication et du rendement d'une gamme de machine

Avec la récente augmentation du prix des matières premières les constructeurs de machines électriques cherchent à améliorer leurs dimensionnement afin de réduire la quantité de matériaux actifs utilisés ainsi que les coûts de fabrication. Cette diminution du poids et de la quantité de matière utilisée influence directement le rendement énergétique de la machine. Cette augmentation des

pertes est en contradiction avec les nouvelles réglementations européennes qui recommandent au contraire une augmentation des rendements. Les constructeurs sont donc confrontés à un choix qui peut être représenté par une optimisation sous contraintes : réduire le coût en matière des machines en respectant des contraintes de rendement.

Une autre problématique introduite lors de cette étude vient du fait que les constructeurs tendent à harmoniser et à mutualiser les conceptions au sein d'une même gamme. Pour un même type de machine (ici un alternateur), une partie de la conception est gardé le même pour toute une gamme de puissance. Dans l'application proposée par la suite, certaines caractéristiques comme le rayon de la machine, le nombre de paires de pôles sont gardées constants pour une même gamme de puissance, la différence se faisant sur la longueur de tôle utile.

Plusieurs stratégies d'optimisation ont été proposées, la première qui pourra servir de référence est d'optimiser chaque machine de la gamme séparément. La seconde dite classique est celle utilisée habituellement dans le monde industriel. Elle consiste à optimiser la machine de plus forte puissance puis la décliner en passant à des modèles de plus basse puissance. Cette déclinaison se faisant en optimisant les paramètres pouvant varier pour chaque machine de la gamme.

Une nouvelle approche que nous avons proposée et qui apporte des gains supplémentaires en terme de réduction des coûts de fabrication est d'optimiser globalement la gamme en tenant compte de la répartition des productions suivant les puissances.

Pour réaliser ces optimisations, il est nécessaire d'avoir un modèle physique des composants, cette modélisation sera développée dans le prochain paragraphe. Nous présenterons par la suite les résultats des optimisations de gamme en mono-objectif puis en multi-objectif en prenant en compte les rendements.

4.2.1 Modélisation de la machine

Le type de machine étudiée ici est une génératrice synchrone à pôle saillant. Afin de réaliser l'optimisation, nous avons besoin d'un modèle global et phénoménologique de la machine. La géométrie type est présentée sur la figure 4.3. Les dents du stator sont de section constante (exceptée dans les pieds et les fond d'encoches). Le bobinage du rotor est ordonné et le nombre de paires de pôles est fixé à 2.

Un modèle électromagnétique tenant compte de la saturation a été développé, et permet de déterminer à partir de données géométriques, les densités de flux magnétiques, la force électromotrice et les courants dans les bobinages. Les résultats de ce modèle servent ensuite de point d'entrée à une modélisation des pertes. Les pertes joules, les pertes fers ainsi que les pertes mécaniques sont évaluées à partir d'un premier point de température. Les valeurs de ces pertes

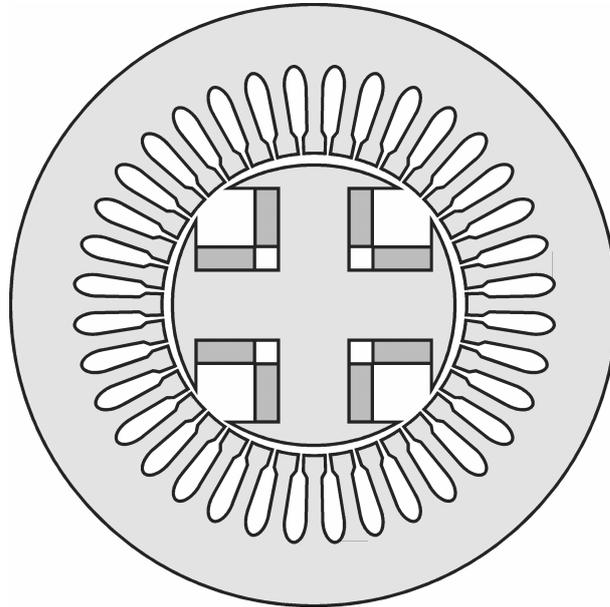


FIGURE 4.3 – Géométrie de la machine étudiée

dépendant grandement de la température, celle-ci est ensuite recalculée puis par itérations successives (méthode du point fixe), les pertes et la température sont réajustées suivant l'organigramme de la figure 4.4.

Un modèle complet de la machine et des interactions entre composants est donné dans le chapitre d'ouvrage [1].

4.2.2 Optimisation d'une gamme d'alternateurs

L'approche de conception optimale nous permet de trouver le meilleur système tout en respectant les spécifications aussi appelées contraintes. L'optimisation d'une gamme de machines électriques basées sur le modèle présenté dans le paragraphe précédent est complexe, il y a en effet des variables mixtes (entières et réelles), la fonction objectif est non linéaire et surtout non dérivable analytiquement. C'est pourquoi le choix de l'algorithme d'optimisation s'est porté sur une méthode d'algorithme génétique et d'évolution différentielle. Ce choix est renforcé par la nécessité par la suite de réaliser des optimisations multi-objectifs traitées à l'aide de l'algorithme NGA2 [KAST02].

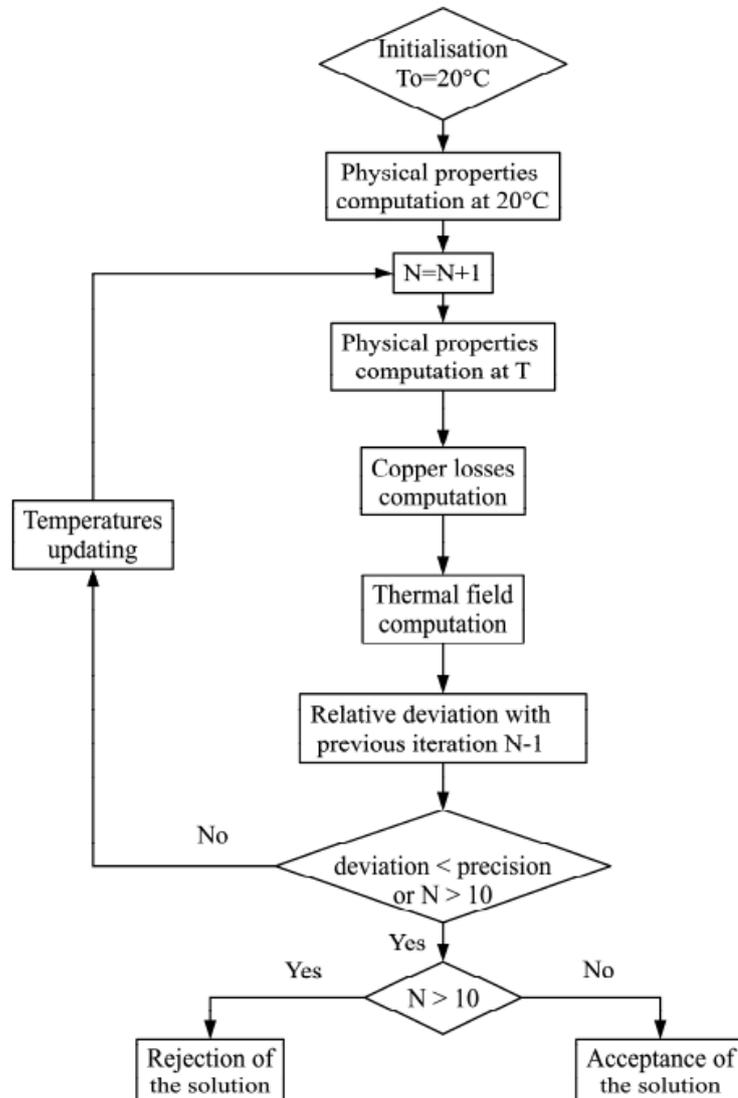


FIGURE 4.4 – Organigramme de calcul du couplage électrique–thermique

Optimisation mono-objectif

Plusieurs optimisations ont été réalisées afin de minimiser différentes fonctions objectifs. Une gamme de trois machines a été considérée couvrant des puissances variant de 125kVA à 180kVA. La fonction objectif dans chacune des optimisations réalisées dans ce paragraphe est représentative du coût des matières

utilisées lors de la fabrication :

$$WRSG_{cost} = \sum weight.material_{cost} \quad (4.1)$$

Les contraintes peuvent être séparées en deux types. Les premières portent directement sur les variables d'entrées du problème, aussi appelé paramètres de l'optimisation. Ce sont les bornes de recherche et sont figurées dans le tableau 4.1.

WRSG's parameters	Initial design	Range
Outer stator diameter [mm]	390	[390,420]
Inner stator diameter [mm]	270.5	[255,290]
Slot diameter [mm]	317.5	[300,360]
Tooth width [mm]	10.2	[5,24]
Rotor pole width [mm]	86.5	[70,100]
Rotor pole opening factor	0.7045	[0.6,0.8]
Machine length [mm]	410	[210,420]
Conductor number	6	[5,12]
Relative cost	1	

TABLE 4.1 – Paramètre de la machine à optimiser et leurs bornes

Le second type de contraintes porte sur des grandeurs calculées par la modélisation. Les températures du stator et du rotor ne doivent pas augmenter au-dessus de 125K. Les rendements doivent être supérieurs à une certaine valeur dépendant de la puissance de la machine considérée. Ces contraintes sont indiquées dans le tableau 4.2.

Quantity	Constraint
Stator temperature rise	< 125K
Rotor temperature rise	< 125K
125kVA WRSG efficiency η	> 91.6%
165kVA WRSG efficiency η	> 91.7%
180kVA WRSG efficiency η	> 91.7%

TABLE 4.2 – Contraintes de l'optimisation sur les valeurs de sortie

Une première approche est d'optimiser le coût de chaque machine prise séparément. Cela conduit à la réalisation de trois calculs dont le résultat nous donnera le coût minimum de fabrication d'une machine si celle-ci était la seule à être

produite. D'un point de vue industriel cette approche n'est pas réalisable car elle conduit à trois sections de rotor différentes. Cela oblige le constructeur à développer des chaînes de production différentes pour chaque machine et ne permet aucune mutualisation des processus de fabrication. Les résultats des optimisations pour ces trois machines de puissance différente sont présentés dans le tableau 4.3. D'après ces résultats, les machines 165kVA et 180kVA optimisées sont en limite de contrainte pour les températures de rotor et de stator ainsi que sur le diamètre extérieur du stator. Pour la machine 125kVA, la butée en contrainte se fait cette fois-ci sur la température du rotor et sur le rendement. Ces résultats sont en accord avec l'expérience de conception de machines : les machines les plus volumineuses sont en général limitées par la hausse de température, alors que les machines plus petites sont connues pour avoir des rendements moins performants.

variables	125 kVA	165 kVA	180 kVA
Outer stator diameter [mm]	393.7	420	420
Inner stator diameter [mm]	255.2	276.9	278.9
Slot diameter [mm]	311	326.1	331.5
Tooth width [mm]	11.1	12.9	12.4
Rotor pole width [mm]	89	100	96.9
Rotor pole opening factor	0.748	0.7415	0.7415
Machine length [mm]	285.2	331.7	349.9
Conductor number	8	6	6
Stator temperature rise [K]	83.0	125	125
Rotor temperature rise [K]	124.8	125	125
Efficiency [%]	91.60	91.79	92.34
Relative cost	0.7129	0.8693	0.9589

TABLE 4.3 – Paramètres des machines suite aux optimisations individuelles

Approche classique de l'optimisation d'une gamme

Les résultats précédents, bien que garantissant pour chaque puissance de machine la meilleure solution, ne peuvent être utilisés dans les étapes de production industrielle. Les solutions proposées imposeraient de modifier la chaîne de montage et de production lors du changement de type de machine ce qui induirait des coûts de production bien plus importants que le gain fait sur chaque machine. Pour la réduction de ces coûts une contrainte forte est d'imposer une section identique pour les trois machines de puissance différente. C'est à dire que les

trois machines ne seront différentes que par le nombre de conducteurs dans les encoches et leur longueur. L'approche classique, présentée ici pour des raisons de comparaison, se base sur l'optimisation de la machine la plus contraignante (la plus puissante en générale) puis le nombre de conducteurs et la longueur des autres machines sont optimisés en imposant la même section. En se basant sur les résultats précédents pour la machine 180kVA et en optimisant le nombre de conducteur et la longueur des machines 165kVA et 125kVA, on obtient les résultats du tableau 4.4.

variables	125 kVA	165 kVA	180 kVA
Outer stator diameter [mm]	420	420	420
Inner stator diameter [mm]	278.9	278.9	278.9
Slot diameter [mm]	331.5	331.5	331.5
Tooth width [mm]	12.4	12.4	12.4
Rotor pole width [mm]	96.9	96.9	96.9
Rotor pole opening factor	0.7415	0.7415	0.7415
Machine length [mm]	261.8	349	349.9
Conductor number	8	6	6
Stator temperature rise [K]	87.1	97.8	125
Rotor temperature rise [K]	90.3	106.9	125
Efficiency [%]	91.61	92.53	92.34
Relative cost	0.7526	0.9568	0.9589

TABLE 4.4 – Paramètres des machines après optimisation classique de la gamme : optimisation de la machine de plus forte puissance, puis déclinaison pour les machines de plus faible puissance

Cette optimisation nous donne des résultats moins optimaux que celles mono-objectif réalisées pour chaque machine prise séparément, mais permet une mutualisation des processus de fabrication entraînant une diminution des coûts. Les coûts relatifs sont à comparer à la conception initiale des machines dans le tableau 4.1.

Une autre possibilité serait de prendre comme optimisation initiale celle d'une machine de plus faible puissance, puis augmenter la longueur jusqu'à trouver celle correspondant aux puissances 165kVA et 180kVA. L'algorithme d'optimisation nous montre que cela n'est pas faisable, car dans ce cas aucune solution optimale n'est trouvée. En effet l'augmentation de la longueur de la machine est plus grande que la limite haute fixée dans les contraintes. Cela confirme bien l'approche faite par les constructeurs qui permet en plus de garder la gamme de machine dans un volume donné. Mais fixer la section à partir de la machine

la plus puissante n'est pas la meilleure optimisation lorsque l'on considère la gamme entière comme nous allons le voir dans la section suivante.

Optimisation simultanée d'une gamme de machine

Une nouvelle approche que nous avons proposée est d'optimiser l'ensemble des paramètres des trois types de machines considérées. Il s'agit donc de réaliser une seule optimisation prenant en compte l'ensemble des paramètres. La fonction objectif globale devient :

$$range_{cost} = \sum_{i=1}^3 \alpha_i \cdot WRSG_{cost,i} \quad (4.2)$$

La pondération α_i correspond à la répartition des ventes à l'intérieur de la gamme.

	125 kVA	165 kVA	180 kVA
Cas I	8/10	1/10	1/10
Cas II	1/10	8/10	1/10
Cas III	1/10	1/10	8/10

TABLE 4.5 – Pondérations des ventes pour les trois scénarios envisagés

Le nombre de variables d'optimisation est augmenté, puisqu'il comprend maintenant trois longueurs de machine et trois nombres de conducteurs par encoche (une pour chaque puissance). Les autres paramètres restent inchangés (voir le tableau 4.1). Cela nous conduit à réaliser une optimisation sur douze paramètres sous les contraintes du tableau 4.2. Nous avons étudié trois cas correspondants aux différentes pondérations du tableau 4.5 sur les volumes de vente des machines au sein la gamme. Les résultats de ces trois optimisation sont reportés dans les tableaux 4.6,4.7 et 4.8.

Dans les trois cas présentés, le gain relatif en terme de coût de production est reporté sur la dernière ligne du tableau. Pour les trois répartitions de vente, nous obtenons grâce à cette nouvelle approche, une baisse des coûts de fabrication. Le gain étant le plus important lorsque les volumes de vente sont en faveur des machines de petite puissance. La troisième configuration apporte un gain relativement faible (mais non négligeable pour le constructeur), car elle favorise la machine de forte puissance, ce qui est déjà le cas pour la technique d'optimisation classique. Nous pouvons aussi observer une répartition des contraintes atteignant les bornes fixées suivant les distributions, les puissances plus faibles que celle favorisée étant en butée sur le rendement minimum, alors que les puissances plus grandes le sont sur la température.

	125 kVA	165 kVA	180 kVA
Outer stator diameter [mm]		412	
Inner stator diameter [mm]		267.6	
Slot diameter [mm]		324.1	
Tooth width [mm]		12.1	
Rotor pole width [mm]		94.7	
Rotor pole opening factor		0.7472	
Machine length [mm]	266.2	360.7	394.8
Conductor number	8	6	6
Stator temperature rise [K]	82.3	93.3	125
Rotor temperature rise [K]	110.4	124.9	124.9
Efficiency [%]	91.60	92.53	92.40
Relative cost	0.726	0.9372	1.0135
Relative average cost per machine		0.7759	
Saving compared to classical approach		- 2.24 %	

TABLE 4.6 – Paramètres optimaux des trois types de machine dans le cas du scénario I

	125 kVA	165 kVA	180 kVA
Outer stator diameter [mm]		420	
Inner stator diameter [mm]		276.9	
Slot diameter [mm]		332.6	
Tooth width [mm]		12.3	
Rotor pole width [mm]		95.1	
Rotor pole opening factor		0.7472	
Machine length [mm]	266.1	306.6	355
Conductor number	8	7	6
Stator temperature rise [K]	78.6	125	111.7
Rotor temperature rise [K]	89.5	125	125
Efficiency [%]	91.89	92.00	92.59
Relative cost	0.7753	0.8712	0.9857
Relative average cost per machine		0.8731	
Saving compared to classical approach		- 6.78 %	

TABLE 4.7 – Paramètres optimaux des trois types de machine dans le cas du scénario II

	125 kVA	165 kVA	180 kVA
Outer stator diameter [mm]		420	
Inner stator diameter [mm]		277.6	
Slot diameter [mm]		330.6	
Tooth width [mm]		12.4	
Rotor pole width [mm]		96.8	
Rotor pole opening factor		0.7427	
Machine length [mm]	261.3	348	352.1
Conductor number	8	6	6
Stator temperature rise [K]	86.7	97.3	125
Rotor temperature rise [K]	92.5	110.1	125
Efficiency [%]	91.60	92.51	92.35
Relative cost	0.7478	0.95	0.9596
Relative average cost per machine		0.9381	
Saving compared to classical approach		- 0.07 %	

TABLE 4.8 – Paramètres optimaux des trois types de machine dans le cas du scénario III

4.2.3 Optimisation multi-objectif du coût et du rendement

Nous avons par la suite travaillé sur une optimisation multi-objectif basée sur le même modèle et les mêmes contraintes. Nous optimisons conjointement, le rendement et le coût de fabrication. La première partie de cette section se plaçait du côté constructeur de machine, ou seul le coût de fabrication était important ; ici on se place côté consommateur ou utilisateur de la machine. Celui-ci doit faire un choix entre le coût d'achat (lié au coût de fabrication) et le rendement à long terme de la machine. Un exemple de calcul d'optimisation multi-objectif est représenté sur la figure 4.5, où le front de Pareto pour la machine 125kVA est tracé en trait plein. Cette optimisation est réalisée à l'aide d'un algorithme évolutionnaire couplé à un mode de résolution de type NGS2 [KAST02] et est basée sur le scénario 1 de la section précédente. Nous avons aussi reporté les caractéristiques rendement-coût pour les autres machines de la gamme pour chaque point du front de Pareto.

Le premier objectif est de minimiser le coût de fabrication de la gamme de machine dans le cadre d'une répartition donnée. Le second objectif est le rendement de la machine 125kVA (et uniquement celui-ci). On peut tracer un front de pareto de cette double optimisation : en trait plein sur la figure 4.5. D'autre part, pour chaque point de ce front de pareto, on obtient un jeu de paramètre pour l'ensemble des machines de la gamme, on peut donc en déduire un coût et

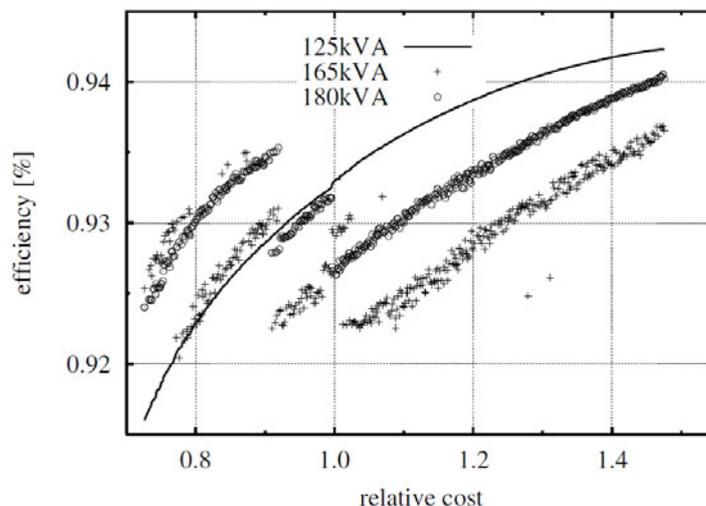


FIGURE 4.5 – Front de Pareto, coût en fonction du rendement pour la machine de 125kVA. Les rendements des autres machines de la gamme sont reportés sur la figure.

un rendement. On trouve alors les nuages de points : indiqué par des o pour les machines à 180kVA et des + pour les machines 165kVA. Ces points ne forment pas une courbe, mais sont répartis en plusieurs paquets. On observe une coupure vers 1.0 en coût et .93 en rendement.

La figure 4.5 peut être une aide précieuse pour aider au choix des caractéristiques d'une gamme de machine. En effet, on s'aperçoit qu'il vaut mieux pénaliser un peu le rendement (au-dessous de 0.93) de la machine 125kVA ou son coût (au-dessous de 1) ; les rendements des autres machines de la gamme s'en trouvant largement améliorés. D'autres recherches sur ce sujet sont en cours et ont donné lieu à une publication actuellement en cours d'examen.

4.3 Prototypage virtuel en électronique de puissance

4.3.1 Introduction

Après avoir étudié et appliqué ces techniques d'optimisation au cas des chaînes de traction, il nous est apparu nécessaire de nous intéresser à un autre composant des systèmes électrotechniques, les convertisseurs de puissance. En effet avant leur intégration complète dans le processus d'optimisation système, il est nécessaire d'avoir des modèles simples et des applications testées. C'est pour-

quoi nous avons travaillé avec Pierre Lefranc et Xavier Jannot sur l'optimisation et le prototypage virtuel d'un convertisseur de puissance dc-dc de type hacheur abaisseur. Cette étude a fait l'objet d'un article accepté dans le journal IET Power Electronics. Ce type de convertisseur est largement utilisé, que ce soit dans les applications domestiques, automobiles ou aéronautiques. Les contraintes électriques, thermiques, mécaniques, d'encombrement, et de coût imposées par les constructeurs requièrent une approche de dimensionnement par optimisation multiphysique qui doit prendre en compte les divers impacts de l'environnement sur le convertisseur, mais aussi ceux induits par le convertisseur lui-même. Diverses approches ont déjà été proposées dans la littérature, ainsi des techniques d'optimisation ont été développées pour le prototypage d'un convertisseur hacheur multi-phase [HAD05], mais aussi pour un abaisseur (buck) DC-DC pour une application automobile [TD03] et pour des convertisseurs DC-DC faible tension [XTF97]. D'autres auteurs se sont focalisés sur des techniques de prototypage virtuel en plusieurs étapes : ceci permet aux concepteurs de commencer à donner des premiers éléments de réponse sur la définition du convertisseur. On parle alors de pre-dimensionnement. Dans un second temps, le concepteur affine ses choix, les modélisations, les optimisations afin de définir de plus en plus précisément le système [KCPC09]. Le pré-dimensionnement est très important dans le cas d'applications industrielles avec une forte contrainte sur le coût (automobiles par exemple). Le but de ce travail a été de proposer une technique de prototypage virtuel à l'aide d'une optimisation bi-objectif dans le contexte d'une application industrielle. Pour cet exemple, les données des composants du convertisseur (MOSFETS, diodes et échangeurs de chaleur...) sont issus directement des données techniques des constructeurs. Nous nous sommes intéressés en guise d'application et d'exemple au prototypage d'un hacheur abaisseur (24V-12V) d'une puissance d'un kW sans filtre d'entrée. Les variations de la tension d'entrée et de la puissance de sortie ont été prises en compte dans la formulation des contraintes : la tension d'entrée v_i varie entre 20V et 30V, et la puissance de sortie entre 100W et 1kW.

La méthodologie de prototypage virtuel appliquée ici au convertisseur abaisseur peut être appliquée aux autres convertisseurs continu-continu en adaptant les contraintes. Comme précédemment, un modèle simple (permettant l'optimisation) a du être développé, et il sera présenté dans la prochaine section où il servira de point d'entrée des méthodes d'optimisations dont les résultats seront exposés dans la section 4.3.3.

4.3.2 Modélisation du hacheur abaisseur

Les convertisseurs de type hacheur sont très souvent utilisés dans des applications industrielles et grand public (alimentation de carte CPU par exemple).

Nom de variable	Définition
K	MOSFET
D	diode
L	inductor
C	capacitor
R	load resistor
v_i	input voltage
v_o	output voltage
P	output power, $P = v_o^2/R$
d	duty cycle
T	switching period
F	switching frequency
Δi_L	inductor current ripple
i_{Lm}	minimum inductor current value
i_{LM}	maximum inductor current value
Δv_o	output voltage ripple

TABLE 4.9 – Notations utilisées pour le convertisseur abaisseur

On trouvera un schéma de principe du hacheur étudié sur la figure 4.6. Le système est constitué de composants classiques : un MOSFET K , une diode D , une inductance L et un condensateur C . Les formes d'ondes (sans pertes, c'est à dire en utilisant des composants parfaits) sont présentées sur la figure 4.7, où i_{Lm} et i_{LM} sont définis respectivement par les valeurs minimale et maximale du courant d'inductance. La figure 4.8 montre les ondulations de la tension de sortie Δv_o . On utilisera par la suite les notations du tableau 4.9.

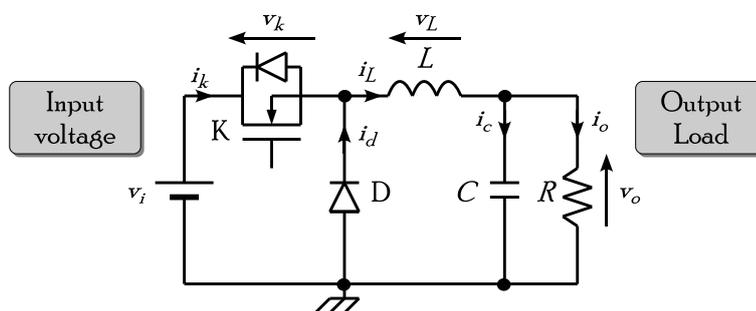


FIGURE 4.6 – Schéma électrique de principe du hacheur

Plusieurs hypothèses ont été prises en compte pour l'élaboration du mo-

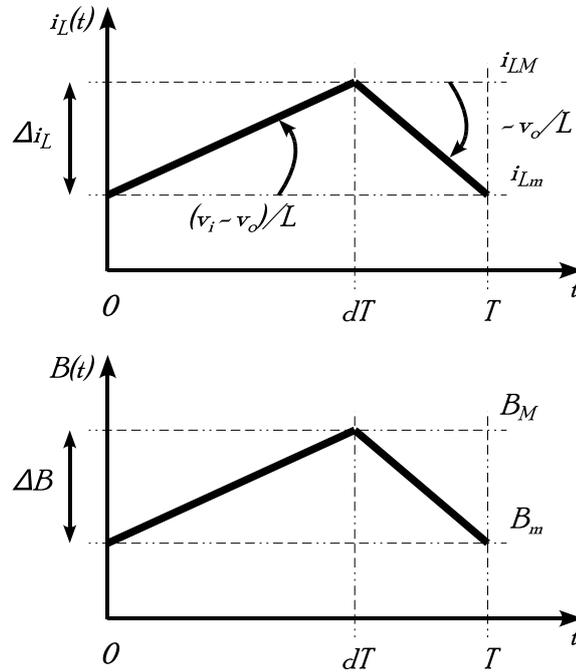


FIGURE 4.7 – Forme d'onde du courant dans l'inductance et le MOSFET

dèle du convertisseur. Elles nous permettent, sans nous éloigner de la réalité, de simplifier les modèles utilisés et de les incorporer ainsi dans une approche d'optimisation multi-critère et multi-physique. On considérera donc les hypothèses suivantes :

- la tension d'entrée v_i est constante,
- les ondulations de tension Δv_o sont négligeables par rapport à la valeur moyenne de v_o ,
- la valeur de la résistance de la bobine est négligeable,
- le courant i_L évolue linéairement,
- les temps de montée et de descente dans le MOSFET sont négligeables face au temps de conduction,
- il n'y a pas de saturation dans le matériau magnétique de l'inductance L .

À partir de ces hypothèses, nous avons élaboré un modèle fonctionnel du convertisseur dont les équations de base sont :

$$d = \frac{v_o}{v_i} \quad (4.3)$$

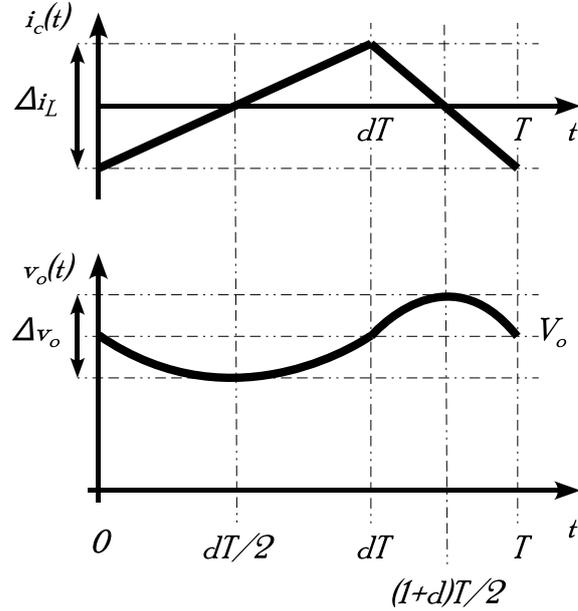


FIGURE 4.8 – Ondulations de la tension et du courant de sortie

$$i_{LM} = \frac{P}{dv_i} + \frac{v_i(1-d)d}{2LF} \quad (4.4)$$

$$i_{lm} = \frac{P}{dv_i} - \frac{v_i(1-d)d}{2LF} \quad (4.5)$$

$$\Delta v_o = \frac{v_i d(1-d)}{8LCF^2} \quad (4.6)$$

Ces équations servent de point de départ à la modélisation des pertes dans les composants du convertisseur. Nous avons considéré les pertes par conduction et par commutation dans l'interrupteur MOSFET et par conduction seulement dans la diode. Pour le MOSFET, l'évaluation des pertes par conduction se fait en fonction des tensions d'entrée et de sortie, de la puissance de sortie, de la période de fonctionnement, de l'inductance, mais aussi de l'évaluation de la température de jonction entre le composant et le boîtier T_{jK} . Finalement une relation pour les pertes par conduction dans le MOSFET est donné par une équation du type :

$$P_{Kcond} = f_1(v_i, v_o, P, T, L, T_{jK}). \quad (4.7)$$

De la même manière, les pertes par commutation sont fonction des tensions, de la puissance, de l'inductance et de la période de fonctionnement :

$$P_{Ksw} = f_2(v_i, v_o, P, L, T). \quad (4.8)$$

Les pertes totales dans le MOSFET sont données par la somme des pertes par conduction et commutation :

$$P_K = P_{Kcond} + P_{Ksw} = f_1(v_i, v_o, P, T, L, T_{jK}) + f_2(v_i, v_o, P, L, T). \quad (4.9)$$

Les pertes dans la diode sont des pertes par conduction, et sont évaluées à partir d'une modélisation des données constructeurs en fonction de la tension à ses bornes, du courant, de sa température de jonction (T_{jd1}), de la période de découpage et du rapport cyclique d .

$$P_{d1cond} = P_{d2cond} = f_3(T, d, i_d, v_d, T_{jd1}). \quad (4.10)$$

L'inductance est le troisième composant à être modélisé. Il s'agit, à partir du modèle fonctionnel et des pertes (dans le fer $P_{iron,vol} \times vol_{core}$ et le cuivre P_{copper}), de caractériser son volume et l'élévation de température au sein de l'inductance. On obtient ainsi des équations analytiques permettant de calculer les différents paramètres de cette dernière.

Enfin le dissipateur de puissance est un élément passif qui doit être dimensionné. Il est représenté par une résistance thermique évaluée en fonction de sa géométrie. Un modèle analytique a été développé pour tenir compte de la longueur du dissipateur dans la valeur de la résistance thermique globale. Pour cela, les données constructeur sont utilisées pour réaliser une approximation du type :

$$R_{th}(L_{hs}) = a + b.e^{-c.L_{hs}} \quad (4.11)$$

Une modèle électrothermique a été mis au point en tenant compte des températures de jonction et des résistances thermiques entre les composants et le boîtier puis entre le boîtier et le dissipateur. Ce modèle est représenté sur la figure 4.9.

4.3.3 Définition de l'optimisation et prototypage virtuel du hacheur

Pour réaliser une optimisation, il faut définir les objectifs ainsi que les contraintes. Comme dans de nombreuses applications électrotechniques, la tendance actuelle est à la réduction des volumes et des pertes. Nous définirons deux

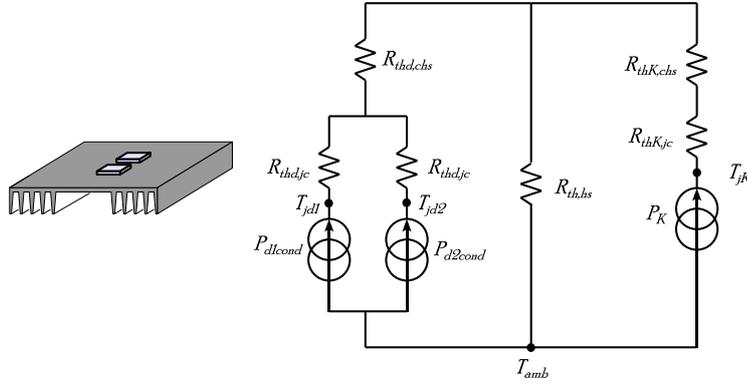


FIGURE 4.9 – Modèle électro-thermique

objectifs, qui – nous le verrons dans les résultats – sont contradictoires ou en opposition. Il s’agit pour le premier de proposer un dimensionnement le plus petit possible (optimisation du volume du convertisseur) et pour le second d’optimiser le rendement (diminuer les pertes).

Le rendement η est défini classiquement par le rapport entre la puissance de sortie et la somme de celle-ci et des pertes :

$$\eta = \frac{P}{P + P_K + P_{dcond} + P_{iron,vol} + P_{core} + P_{copper}} \quad (4.12)$$

Il dépend fortement du point de fonctionnement comme constaté sur la figure 4.10 qui montre la variation de celui-ci en fonction de la puissance et de la tension d’entrée. Les spécifications techniques imposent en général un rendement minimum qui est défini par :

$$F_1 = \min_{v_i, P} \eta \quad (4.13)$$

Nous reprenons ici, cette définition pour le premier objectif de notre optimisation. Le volume total du convertisseur est notre deuxième objectif, il est défini par le volume du plus petit parallélépipède entourant le dissipateur (figure 4.11). En négligeant le volume du circuit imprimé, le volume total est défini par :

$$F_2 = \max(L_{hs}, L_L) \cdot \max(E_{hs}, E_L) \cdot (H_{hs} + H_L) \quad (4.14)$$

Les huit variables d’optimisation sont données dans le tableau 4.10, ainsi que leur domaine de variation respectifs.

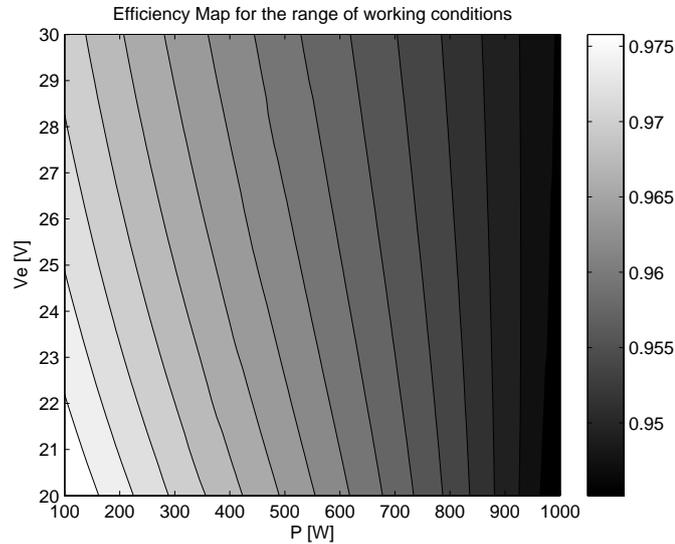


FIGURE 4.10 – Valeurs du rendement dans le plan puissance–tension de sortie

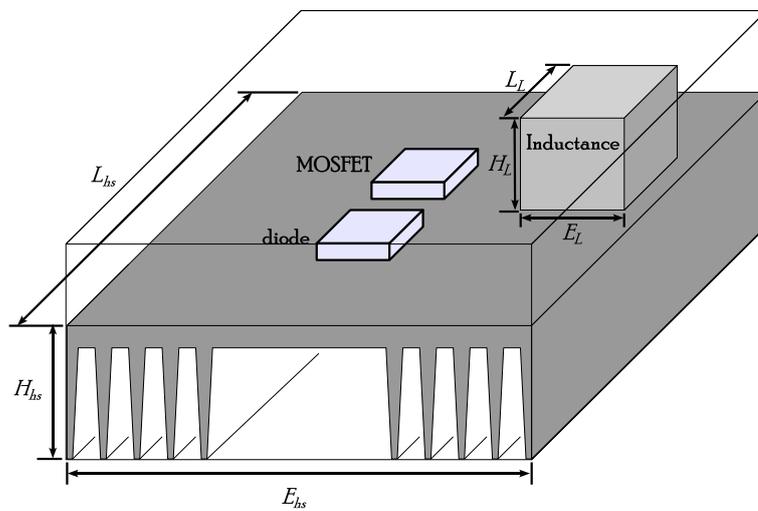


FIGURE 4.11 – Définition de la géométrie du dissipateur

Ces variables définissent une optimisation à valeurs mixtes entières et réelles. Les variables discrètes ne peuvent prendre qu'un nombre limité de valeurs dans le domaine autorisé, ainsi le nombre de tours de la bobine de l'inductance est un entier entre 1 et 200, tandis que les valeurs de la capacité du condensateur ne peuvent prendre que des valeurs normalisées ($\{1, 1.5, 2.2, 3.3,$

Optimisation variable	min value	max value
F [kHz] : switching frequency	10	20
C [F] : capacitor value	10^{-6}	10^{-1}
e [mm] : air gap	0	3,3
A [cm ²] : winding square area	0	100
S [m ²] : square cross section of the feritte core	10^{-6}	36×10^{-4}
s [m ²] : cross section of the elementary wire	10^{-7}	16×10^{-6}
n : wiring turn number of the inductor	1	200
L_{hs} [mm] : heatsink length	50	200

TABLE 4.10 – Définitions et domaine de variation des paramètres de l'optimisation

4.7, 6.8} multipliées par des puissances de dix.

Imposer des contraintes, permet de s'assurer que les solutions du problème sont réalistes et réalisables. Dans cette application, nous avons tenu compte des limites physiques, des conditions d'utilisation et des contraintes géométriques. Ces contraintes sont exposées dans la liste suivante.

CCM Le hacheur étant destiné à être utilisé sous condition de conduction continue (CCM), la valeur minimale du courant dans l'inductance doit être positive :

$$i_{Lm} > 0 \quad (4.15)$$

Ondulation de la tension de sortie Les spécifications des applications imposent en général une valeur minimale des ondulations de la tension de sortie. Ici nous imposons le taux d'ondulation $k_{vo} = 0,05$:

$$\Delta v_o < k_{vo} v_o \quad (4.16)$$

Densité de courant Afin d'éviter des températures trop importantes dans le cuivre, une densité de courant maximale de 10 A.mm^{-2} est imposée.

Température de jonction des semi-conducteurs Les températures de jonction des diodes et du MOSFET ne doivent pas excéder 130°C afin d'assurer un fonctionnement normal.

Induction magnétique dans le noyau de l'inductance La densité de flux magnétique B_M dans le noyau de fer de l'inductance est bornée à $0,3\text{T}$ pour s'as-

Quantité	Contrainte
CCM condition	$i_{Lm} > 0$
Output voltage ripple	$\Delta v_o < k_{vo} v_o$
Current density	$J < 10 \text{ A.mm}^{-2}$
Junction temperatures	$(T_{jK}, T_{jD} < 130^\circ\text{C}$
Induction magnétique dans la ferrite	$B_M < 0,3T$
Geometric constraint	$n.s < k_f.A$
Inductor temperature	$T_{core} < 80^\circ\text{C}$

TABLE 4.11 – Contraintes de l’optimisation du convertisseur abaisseur

surer que l’inductance ne soit jamais saturée pour un matériau ferrite de type 3F3.

Géométrie de l’inductance La géométrie de l’inductance est caractérisée par cinq variables (e l’entrefer entre la bobine et le noyau de ferrite, A l’aire carrée de la section de bobinage, S la section du noyau, s la section d’un fil de la bobine, et n le nombre de tours dans la bobine). Ces variables sont indépendantes, mais on doit s’assurer de la faisabilité de l’inductance en imposant que le bobinage s’insère dans la fenêtre A du noyau :

$$n.s < k_f.A \quad (4.17)$$

où k_f est pris ici égal à 0,75.

Température de l’inductance Pour assurer une stabilisation de la température au sein de l’inductance, celle-ci est limitée à 80°C . En effet en dessous de cette valeur critique les pertes diminuent alors qu’elles augmentent pour des températures supérieures (caractéristique du matériaux 3F3 du noyau magnétique).

Ces contraintes sont résumées dans les tableau 4.11.

4.3.4 Résultats de l’optimisation

Choix de la technique d’optimisation L’optimisation d’un hacheur abaisseur est une tâche complexe, elle implique des variables entières et réelles. De plus le cas présenté ici est celui d’une optimisation multi-objectif, c’est pourquoi nous nous sommes orienté vers un algorithme évolutionnaire couplé à une procédure du type *Multiobjective Optimisation Evolutionary Approches* (MOEA) et plus particulièrement de l’algorithme SGA2 [EKL] [KAST02].

Résultats La figure 4.12 montre le résultat du front de Pareto reliant les objectifs de volume en abscisse et de rendement en ordonnée. Le rendement varie entre 92,6% et 94,6% (convertisseur avec le moins de perte). Le volume est lui compris entre une valeur minimale de $1,4 \times 10^6 \text{mm}^3$ et un encombrement maximal de $7,6 \times 10^6 \text{mm}^3$. Rappelons que les réalisations faisables sont toutes situées en dessous de cette courbe. Pour démontrer la robustesse de l'optimisation, l'algorithme a été appliqué plusieurs fois. Nous obtenons les courbes de la figure 4.13 qui se superposent.

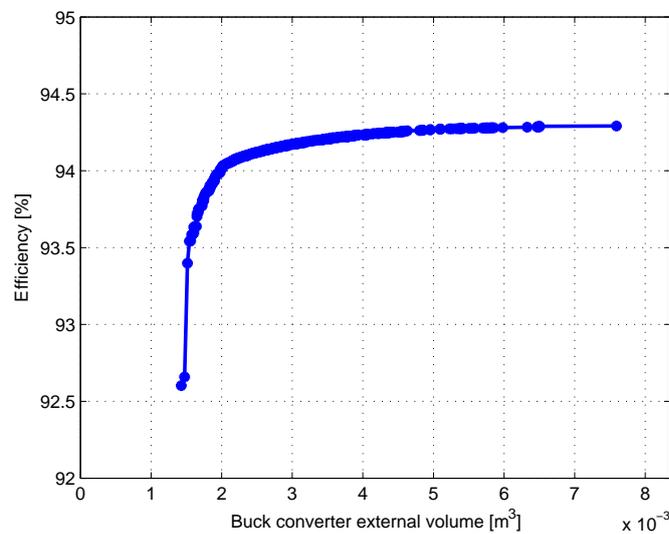


FIGURE 4.12 – Front de Pareto pour l'optimisation multi-objectif volume-rendement

Ce front de Pareto nous permet dans un premier temps de qualifier les configurations possibles et d'aider au choix pour le constructeur. Sa forme très incurvée nous indique qu'un choix logique serait de situer les paramètres autour du point d'abscisse $2 \times 10^6 \text{mm}^3$. Mais le front de Pareto n'est pas le seul outil disponible, il est aussi intéressant d'observer les variations des autres paramètres ou contraintes de l'optimisation le long de cette courbe. Ces observations permettent aussi de prendre en compte des contraintes non exprimées ici car difficiles à quantifier, telle que le coût (automobile) ou la fiabilité (aéronautique).

Influence du volume extérieur et du rendement Ces deux résultats se lisent directement sur le front de Pareto. Si le volume est le paramètre le plus important le choix sera fait sur la partie gauche du front ; si c'est le rendement

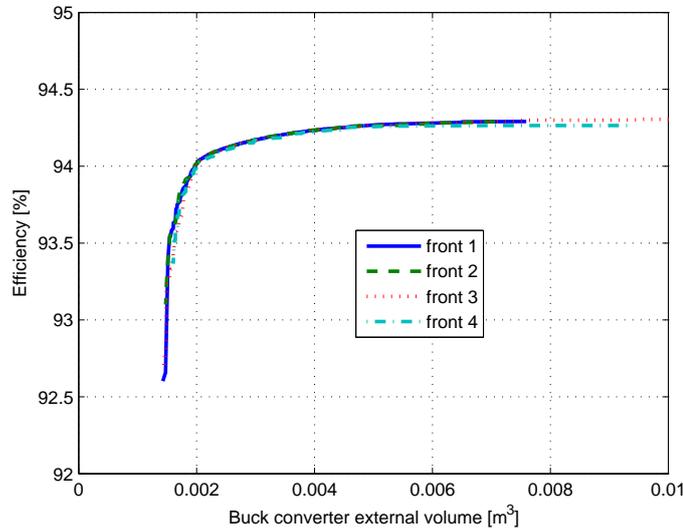


FIGURE 4.13 – Calculs successifs du front de Pareto

on choisira plutôt sur la droite. Bien sûr, il faut tenir compte de la forte courbure du front et ne pas trop pénaliser le deuxième paramètre.

Influence des températures de jonction Sur la figure 4.14, les températures de jonction de la diode et du MOSFET sont confrontées au front de Pareto. D'un point de vue industriel, on sait que des températures supérieures à 100°C pénalisent de manière importante la durée de vie des composants [EF97]. La lecture de cette figure permet donc de compléter le choix sans avoir à modifier les contraintes de l'optimisation en y incluant une température de jonction maximale plus basse.

Influence de la fréquence de commutation La fréquence de commutation et le volume extérieur du système sont étroitement liés comme le montre la figure 4.15. Cette liaison se fait par le volume de l'inductance. Cette interaction est principalement due au volume de l'inductance.

De la même manière, on peut représenter les variations de longueur du dissipateur, des paramètres de l'inductance et du condensateur. Comme vu pour les autres variables et résultats de l'optimisation ces variations et tendances peuvent elles aussi aider à la décision pour le concepteur en faisant apparaître des contraintes non spécifiées dans un premier niveau de cahier des charges.

Cet exemple démontre que le front de Pareto seul ne peut pas donner un résultat optimal. Bien souvent toutes les contraintes ne peuvent être modéli-

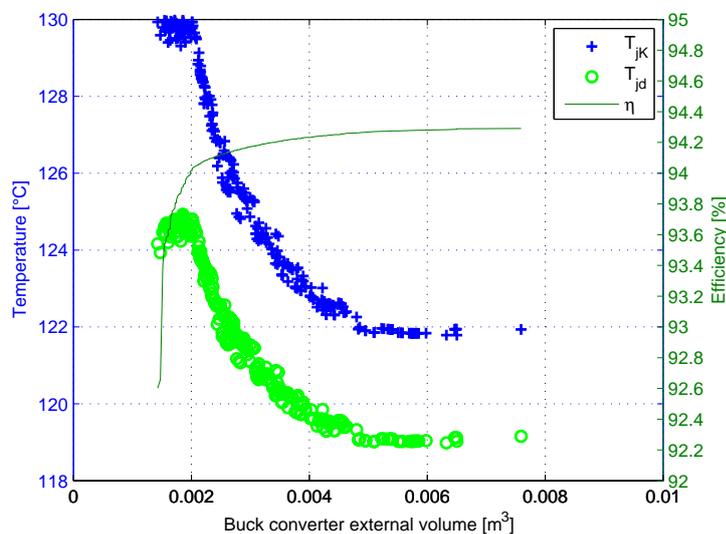


FIGURE 4.14 – Températures de jonction des diode et du MOSFET le long du front de Pareto

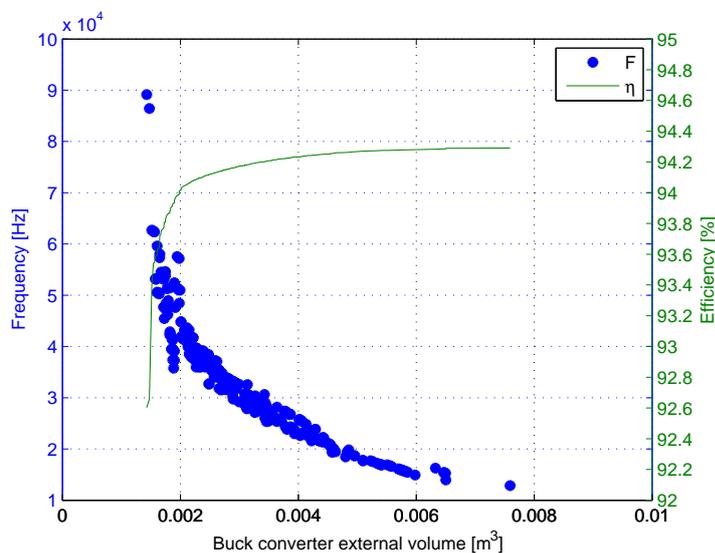


FIGURE 4.15 – Fréquence de commutation le long du front de Pareto

sées (ou leur prise en compte conduirait à des calculs lourds). Il faut une analyse supplémentaire sur tous les paramètres et résultats pour aider à la décision,

apportant ainsi un éclairage important sur la faisabilité du système. Ceci nous montre que l'optimisation n'est pas seulement un problème mathématique de formulation du problème puis de résolution par des algorithmes adaptés. Par cet exemple, nous montrons que l'analyse *a posteriori* des résultats d'optimisation doit rester très critique. Pour cela il est nécessaire de continuer à produire des modèles comportementaux, fonctionnels et de compréhension. Cet aspect sera l'objet du prochain chapitre de cet exposé.

4.4 Conclusion

Le thème principal de ce chapitre a été de présenter notre recherche sur l'optimisation des machines électriques. Après avoir introduit la problématique, où nous avons montré l'importance de l'optimisation système, nous avons présenté deux exemples de l'optimisation des éléments des chaînes de motorisation électrique. Dans le premier, nous avons introduit une nouvelle technique d'optimisation d'une gamme de machines suivant leur puissance. Cette nouvelle approche permet des gains relativement importants face aux volumes pouvant être concernés par les fabricants. Nous avons aussi traité au cours de cet exemple d'une double optimisation sur les coûts de fabrication et les rendements. Le front de Pareto construit, permet de choisir entre l'investissement ou les coûts de fabrication mais aussi entre les coûts d'utilisation.

Enfin, sur un deuxième exemple, nous avons introduit l'optimisation d'un convertisseur de puissance, et ce dans le but de prendre en compte cet aspect dans l'optimisation globale des systèmes.

Dans le prochain chapitre, nous nous intéresserons à la modélisation et à la compréhension des phénomènes physiques, en prenant comme fil conducteur la fiabilité des systèmes liée aux contraintes des optimisations.

Electrical Experts are in Big Demand!

-L.L. Cooke!

I Will Train You at Home to fill a Big-Pay Job!



Look What These Cooke Trained Men Are Earning

Makes \$700 in 24 Days in Radio

"Thanks to your interesting Course I made over \$700 in 24 days in Radio. Of course, this is a little above the average but I run from \$10 to \$40 clear profit every day, so you can see what your training has done for me."

FRED G. McNABB, 848 Spring St., Atlanta, Georgia

\$70 to \$80 a week for Jacquot

"Now I am specializing in Auto Electricity and battery work and make from \$70 to \$80 a week and am just getting started. I don't believe there is another school in the world like yours. Your lessons are a real joy to study."

ROBERT JACQUOT, 2005 W. Colorado Ave., Colorado Springs, Colo.

\$20 a Day for Schreck

"I use my name as a reference and depend on me as a booster. The biggest thing I ever did was answer your advertisement. I am averaging better than \$50 a month from my own business now. I used to make \$18.00 a week."

A. SCHRECK, Phoenix, Arizona

Plant Engineer—Pay raised 150%

"I was a dumbbell in electricity until I got in touch with you Mr. Cooke, but now I have charge of a big plant including 600 motors and direct a force of 34 men—electricians, helpers, etc. My salary has gone up more than 150%."

GEORGE ILLINGWORTH, 63 Calumet Road, Holyoke, Mass.

Be an Electrical Expert Earn \$3,500 to \$10,000 a Year

Today even the ordinary Electrician—the "screw driver" kind—is making money—big money. But it's the trained man—the man who knows the whys and wherefores of Electricity—the Electrical Expert—who is picked out to "boss" the ordinary Electricians—to boss the Big Jobs—the jobs that pay \$3,500 to \$10,000 a Year. Get in line for one of these "Big Jobs." Start by enrolling now for my easily learned, quickly grasped, right-up-to-the-minute, Spare-Time Home-Study Course in Practical Electricity.

Age or Lack of Experience No Drawback

You don't have to be a College Man; you don't have to be a High School Graduate. As Chief Engineer of the Chicago Engineering Works, I know exactly the kind of training you need, and I will give you that training. My Course in Electricity is simple, thorough and complete and offers every man, regardless of age, education, or previous experience, the chance to become, in a very short time, an "Electrical Expert," able to make from \$70 to \$300 a week.

Get Started Now—Mail Coupon

I want to send you my Electrical Book and Proof Lessons, both Free. These cost you nothing and you'll enjoy them. Make the start today for a bright future in Electricity. Send in Coupon—NOW.

L. L. COOKE, Chief Engineer Chicago Engineering Works
2150 Lawrence Ave., Dept. 16A Chicago

No Extra Charge for Electrical Working Outfit

With me, you do practical work—at home. You start right in after your first few lessons to work at your profession in the regular way and make extra money in your spare time. For this you need tools, and I give them to you—5 big complete working outfits, with tools, measuring instruments, and a real electric motor—5 outfits in all.

Your Satisfaction Guaranteed

So sure am I that you can learn Electricity—so sure am I that after studying with me, you, too, can get into the "big money" class in electrical work, that I will guarantee under bond to return every single penny paid me in tuition, if, when you have finished my Course, you are not satisfied it was the best investment you ever made. And back of me in my guarantee, stands the Chicago Engineering Works, Inc., a two-million dollar institution, that assuring to every student enrolled, not only a wonderful training in Electricity, but an unsurpassed Student Service as well.

The Vital Facts



MAIL COUPON FOR MY FREE BOOK

Name.....

Address.....

Occupation.....

5 big outfits given to you—no extra charge!



The "Cooke" Trained Man is the "Big Pay" Man

Chapitre 5

Modélisation des phénomènes physiques

5.1 Introduction

Optimiser c'est se placer en limite de fiabilité. Sur les exemples précédents, les résultats des optimisations ont bien montré l'importance des contraintes dans l'énoncé du problème. Que ce soit sur l'optimisation d'une gamme ou d'un convertisseur de puissance, les contraintes en température, en rendement ou en fonctionnement bornent les problèmes posés. Il est donc impératif de comprendre et de poser des contraintes réalistes et compatibles avec les applications industrielles. De plus pour optimiser, il nous faut comprendre et développer des modèles permettant de simuler les points de fonctionnement des systèmes. Ces modèles bien que nécessairement simples pour pouvoir être inclus dans la procédure d'optimisation doivent s'appuyer sur des modélisations complexes qui seront réduites par la suite. Pour ces deux raisons, il nous est apparu nécessaire de poursuivre dans l'élaboration et la compréhension de modèles physiques des composants.

C'est ce que nous avons réalisé par le biais de collaborations avec Philippe Testé du Laboratoire de Génie Électrique de Paris (LGEP), Emmanuel Odic et Mike Kirkpatrick du département Énergie de Supélec. Cette collaboration à donné lieu à plusieurs thèses, dont deux que nous allons présenter plus en détail. Dans la première, nous nous sommes intéressés à l'étude des mécanismes pouvant donner lieu à l'inflammation d'une carte de circuit imprimé.

5.2 Étude des mécanismes d'inflammation d'un matériau isolant en présence d'un point chaud d'origine électrique

La multiplication des calculateurs au sein des véhicules terrestres ou aériens a entraîné une hausse de la puissance embarquée et de la densité de composants dans les circuits, augmentant ainsi la probabilité d'incidents d'origine électrique et électronique ; ceux-ci pouvant occasionner des défaillances du point de vue de la fiabilité du circuit mais aussi une dégradation sévère du système électrique et électronique, et conduire à la mise à feu de celui-ci. Petit à petit, l'architecture électrique et électronique s'est complexifiée au point d'envisager des architectures multiplexées dans le but de réduire la quantité de câbles électriques. Au cours de leur fonctionnement, les systèmes électriques embarqués sont soumis à de fortes contraintes environnementales : mécaniques (vibrations), climatiques/chimiques (variations de températures, présence d'eau, de poussières, de polluants divers...). Aussi, ils doivent subir un certain nombre de validations en vue de garantir leur robustesse et leur durabilité. Ces validations s'appuient sur des normes d'essais qui sont régulièrement mises à jour en fonction de l'évolution des technologies et du retour d'expérience, particulièrement des constructeurs automobiles. Parmi les paramètres à prendre en considération lors de la validation figurent les phénomènes d'échauffement, au niveau notamment de la carte électronique et plus précisément du circuit imprimé. L'échauffement d'un circuit imprimé peut effectivement conduire à différentes conséquences dont des dysfonctionnements, des pannes, voire, dans le pire des cas, une inflammation de la carte. Lors de sa thèse s'inscrivant dans le cadre d'une action de prévention et de maîtrise des risques, mademoiselle Michèle Nsoumbi s'est intéressée à l'étude l'échauffement d'un circuit imprimé dans le but d'en appréhender les modes d'apparition et d'en évaluer les conséquences, et de mettre en place, à terme, des dispositifs ou règles de conception préventifs. Ainsi l'objectif de ce travail est de contribuer à l'identification et à la compréhension des mécanismes physiques à l'origine d'un échauffement et qui conduisent à l'inflammation d'un circuit imprimé. Si ce sujet paraît, au premier abord, simple et compréhensible par tous, il s'avère qu'il n'a que peu ou pas été étudié et qu'il met en œuvre de nombreux phénomènes physiques. La complexité réside dans l'amalgame de ces phénomènes – électriques, thermiques, chimiques – et dans la difficulté de les isoler pour comprendre leurs enchaînement et interactions. Dans cette optique, la présente étude a considéré qu'une carte électronique se composait principalement de deux éléments à savoir un substrat (matériau composite isolant) et des pistes conductrices de cuivre confronté à diverses situations d'échauffement.

L'approche choisie pour ce travail repose sur l'hypothèse qu'un point chaud

d'origine électrique, résultant d'une défaillance sur un composant et/ou une piste, est susceptible d'amorcer une inflammation. Une première étape a consisté à caractériser les matériaux étudiés d'un point de vue électrique, et dans une certaine mesure, d'un point de vue chimique. Ainsi, afin de prédire l'évolution du caractère isolant du substrat en présence d'un point chaud, des mesures de résistivité électrique en volume ont été menées sur trois circuits imprimés de dénomination FR-4. Les essais ont montré que celle-ci décroissait fortement avec la température, en présentant des disparités de comportement selon la provenance des échantillons. Les différences de comportement observées entre les trois matériaux ont pu être attribuées, d'une part aux propriétés électriques des constituants de la matrice époxy, et d'autre part, au caractère anisotrope du substrat notamment dû au tissage des fibres de verre. Pour une grande majorité des matériaux, il s'est avéré que plus la fraction volumique de fibres était faible, plus rapide était la décroissance de la résistivité électrique avec la température. Les mesures de caractérisation chimique, menées à haute température (300°C), ont notamment permis de déceler la présence d'hydrogène et d'acétylène. Ces espèces chimiques, extrêmement inflammables, seraient susceptibles de jouer un rôle dans l'initiation et/ou la propagation d'une inflammation.

La seconde étape a consisté à étudier la dégradation d'un circuit imprimé simple tel que représenté schématiquement sur la figure 5.1 et en photo après inflammation sur la figure 5.2.

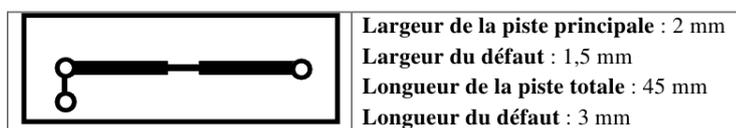


FIGURE 5.1 – Schéma du circuit imprimé étudié



FIGURE 5.2 – Photo recto (a) et verso (b) du circuit imprimé étudié après inflammation

Contrairement aux défaillances de fiabilité, couramment observées, liées à des défauts apparaissant sur de longues durées (plusieurs centaines ou milliers

d'heures) et pouvant mettre en jeu des phénomènes d'électro-migration, nous nous sommes intéressés à des défauts liés à des surintensités conduisant « rapidement » à des températures de piste et de substrat élevées. La défaillance a été expérimentalement modélisée par :

- un défaut géométrique contrôlé de la piste,
- une surcharge en courant, elle aussi contrôlée, conduisant ainsi à un chauffage progressif du circuit.

Un suivi temporel des grandeurs électriques a été réalisé. On peut voir sur la figure 5.3, l'évolution du courant d'alimentation (entre les deux extrémités de la piste) et des courants de fuite (entre la piste et la contre-électrode au verso, c'est à dire un courant traversant le matériau du circuit) en fonction du temps et de la température du substrat pour deux épaisseurs (0,4mm et 1,6mm).

De plus, au cours de l'expérience, des cartographies thermiques de la surface du circuit imprimé (substrat et piste) ou de l'épaisseur de la plaque au niveau du défaut ont été réalisées à l'aide d'une caméra thermique. La figure 5.4 illustre un résultat de cartographie thermique ainsi que les profils de températures le long de la piste.

Enfin, une caméra rapide a permis d'observer la rupture de la piste et, le cas échéant, les départs de feu ainsi que leurs propagations sur la carte (voir figure 5.5 pour un exemple.)

Une étude préliminaire du comportement d'un circuit imprimé face à un échauffement caractérisé a permis d'identifier divers paramètres et conditions opératoires favorables à l'inflammation du circuit imprimé. Parmi eux, on peut citer :

- la dynamique d'augmentation de l'intensité du courant dans la piste,
- l'épaisseur des cartes,
- la nature des cartes,
- la présence d'un conducteur polarisé à proximité de la piste,
- la géométrie de la piste.

La suite de cette étude a porté sur les phénomènes électriques aggravant rapidement la dégradation du circuit imprimé. Les courants de fuite circulant dans le substrat entre deux conducteurs polarisés ont ainsi été étudiés. Dans cet objectif, une carte double face a été utilisée, comportant sur le recto, une piste avec un rétrécissement en son centre, modélisant par un point chaud la défaillance d'un composant électronique sur une carte et sur le verso, une contre-électrode polarisée. Parmi les différentes configurations d'électrodes testées, seule celle nommée « contre- électrode étendue » a fait l'objet d'une étude approfondie en raison de sa correspondance avec les cartes électroniques usuelles. Dans cette configuration, deux types de matériaux et trois épaisseurs de carte ont été utilisés. En alimentant la piste avec une intensité de courant progressive, pouvant atteindre jusqu'à quatre fois l'intensité nominale (figure 5.3), trois comportements

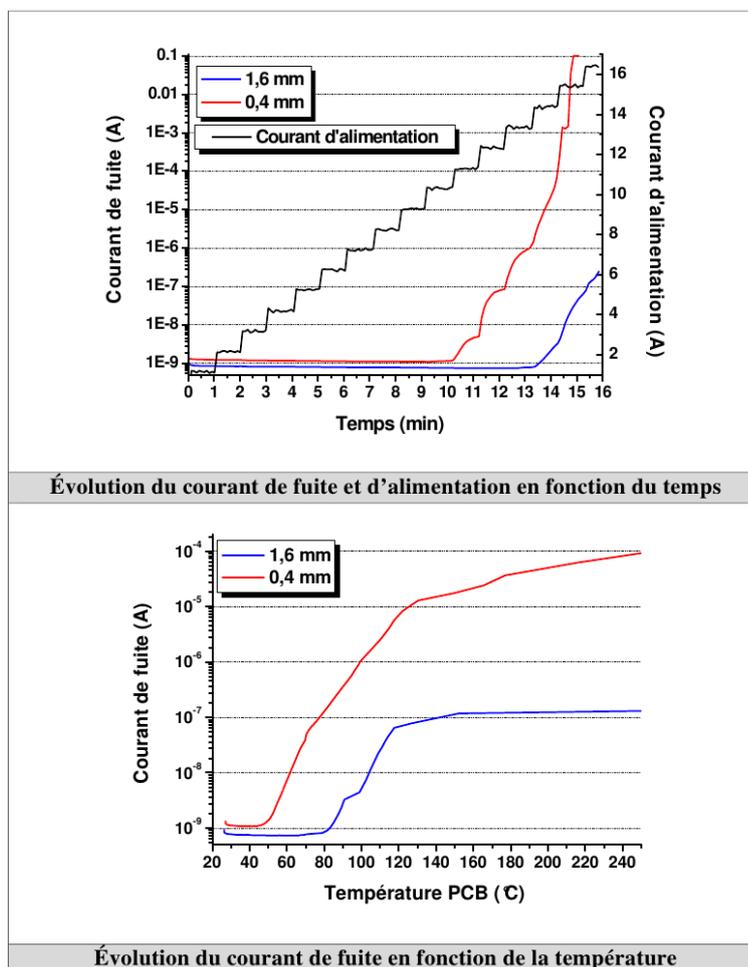


FIGURE 5.3 – Évolution du courant d'alimentation et du courant de fuite en fonction du temps (haut) et de la température du PCB (bas)

ont principalement été observés à l'issue des essais et ont conduit à définir différents types de rupture de piste à savoir :

- la simple coupure de piste ;
- la coupure de piste accompagnée d'une inflammation visible (quelques secondes) ;
- la coupure de piste accompagnée d'une inflammation visible et entretenue (durée supérieure à 10 secondes).

Le courant de fuite, circulant au travers d'un substrat entre les deux pistes polarisées, a été identifié comme paramètre indicateur de l'état de détérioration du matériau. En effet, au cours d'un échauffement croissant, trois phases se dis-

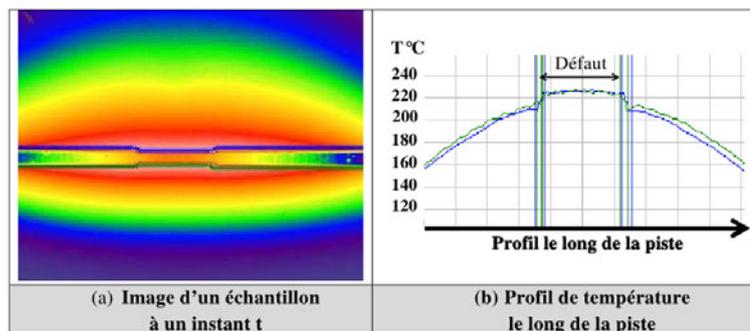


FIGURE 5.4 – Cartographie de température et profils le long de la piste

tinguent principalement :

- une première phase durant laquelle l'intensité du courant de fuite est faible ($< 10 \mu A$) ;
- une deuxième phase, dite de conduction, au cours de laquelle on observe une augmentation significative du courant de fuite ($< 1 \text{ mA}$) ;
- et une dernière phase d'emballement à l'issue de laquelle interviennent la coupure et l'inflammation de la carte.

Les résultats expérimentaux enrichis par les cartographies thermiques de surface et les mesures de résistivité électrique en fonction de la température ont été confrontés aux résultats d'une simulation numérique par éléments finis réalisée à l'aide du logiciel COMSOL.

La Figure 5.6 illustre la géométrie du modèle considéré pour les simulations. Cette géométrie se compose de 3 volumes :

- au premier plan, la piste est définie par trois sections (2mm, 1,5mm et 2mm) et par son épaisseur ($33 \mu m$) ;
- au second plan, le substrat d'une épaisseur de 0,4mm, d'une longueur de 60mm et d'une largeur de 25mm, sur lequel repose la piste ;
- le plan de masse ($33 \mu m$ d'épaisseur), situé au verso et occupant la même surface que le substrat, qui n'est pas visible sur ce schéma en raison de sa faible épaisseur par rapport au substrat.

Une étude temporelle couplant les phénomènes électriques et thermiques a été menée, un exemple de calcul est représenté sur la figure 5.7. L'évolution de la cartographie de température simulée montre l'échauffement localisé au niveau du défaut de la piste, mais aussi la relativement bonne répartition de la température le long de la piste.

En complément on trouvera sur la figure 5.8 une comparaison des températures expérimentales et simulées le long d'un profil transversal à la piste au niveau du défaut qui montre une cohérence des résultats. Cette bonne adéquation

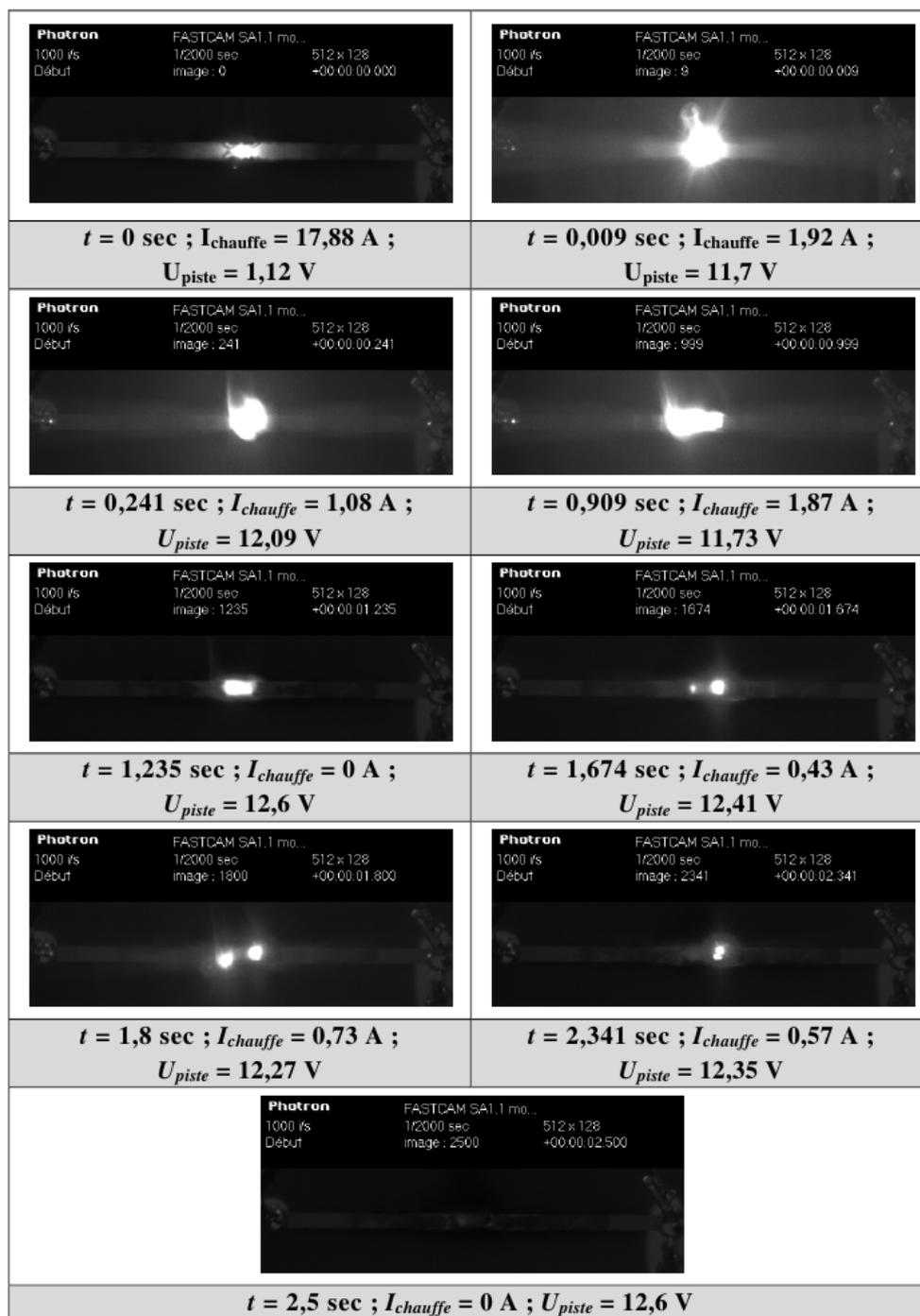


FIGURE 5.5 – Images enregistrées par la caméra rapide au cours de l'inflammation d'un circuit imprimé de 0,8mm

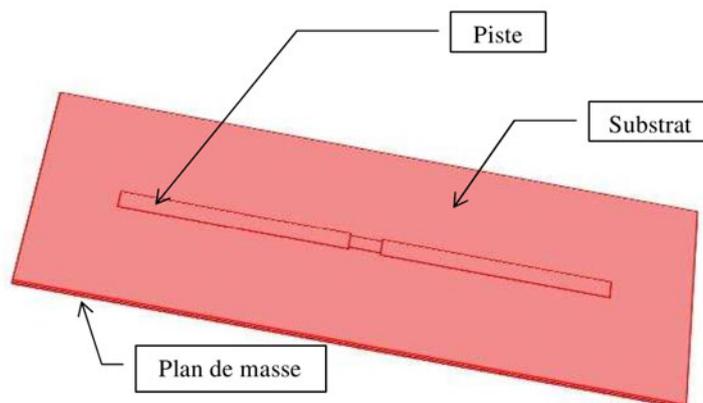
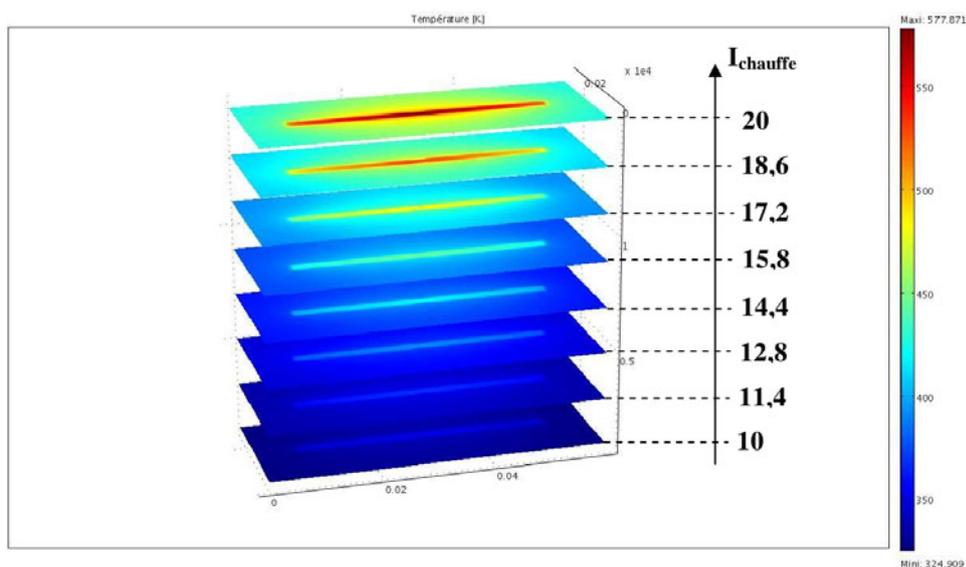


FIGURE 5.6 – Géométrie utilisée pour le modèle numérique

FIGURE 5.7 – Distribution de la température au cours du temps dans un substrat $z = 0,2$ mm pour une intensité de courant de chauffe comprise entre 10A et 20A et un coefficient d'échange thermique égal à $8W.m^{-2}.K^{-1}$

tion entre modèle numérique et expérimental n'est par contre pas respectée sur un temps plus long comme le montre la figure 5.9. Ceci met en évidence l'existence de phénomènes non pris en compte dans la simulation numérique et qui

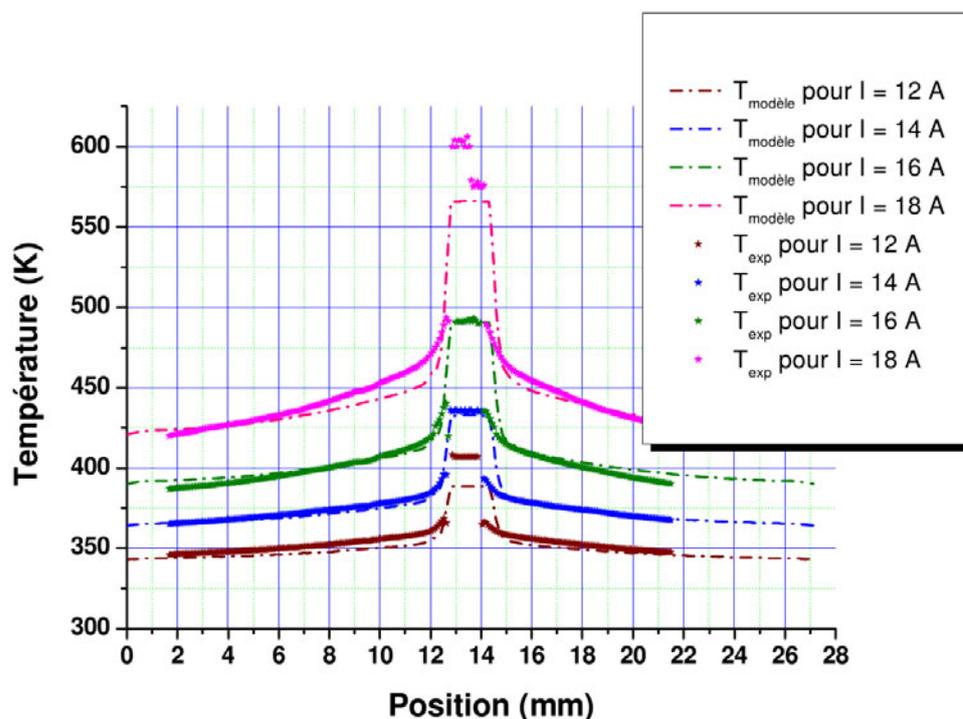


FIGURE 5.8 – Comparaison entre les profils de température expérimentaux et ceux calculés numériquement transversalement au défaut, pour une valeur de h égale à $8\text{W/m}^2/\text{K}$

conduisent à l'élévation de température au sein du matériau.

Cette confrontation a permis de valider un modèle physique basé sur le caractère thermique de la dégradation. La deuxième phase a ainsi pu être interprétée par une chute de la résistivité électrique dans le volume du matériau due à l'augmentation de température (phénomène non pris en compte dans le modèle contrairement à la dépendance de la résistivité du cuivre en fonction de la température). L'emballement juste avant la rupture de la piste semble lié à l'existence d'un défaut très localisé permettant le passage d'un courant de densité élevée susceptible de créer les conditions propices à l'apparition d'une inflammation. De plus, à l'issue de l'emballement et après rupture de la piste, la persistance du courant de fuite entre l'extrémité de la piste à potentiel nul et la contre-électrode étendue (polarisée) apparaît comme un facteur aggravant permettant l'entretien et la propagation de l'inflammation, d'une part en maintenant une zone chaude en surface du circuit, et d'autre part, en contribuant à l'émission de composés organiques volatils et inflammables susceptibles d'entretenir et de propager le

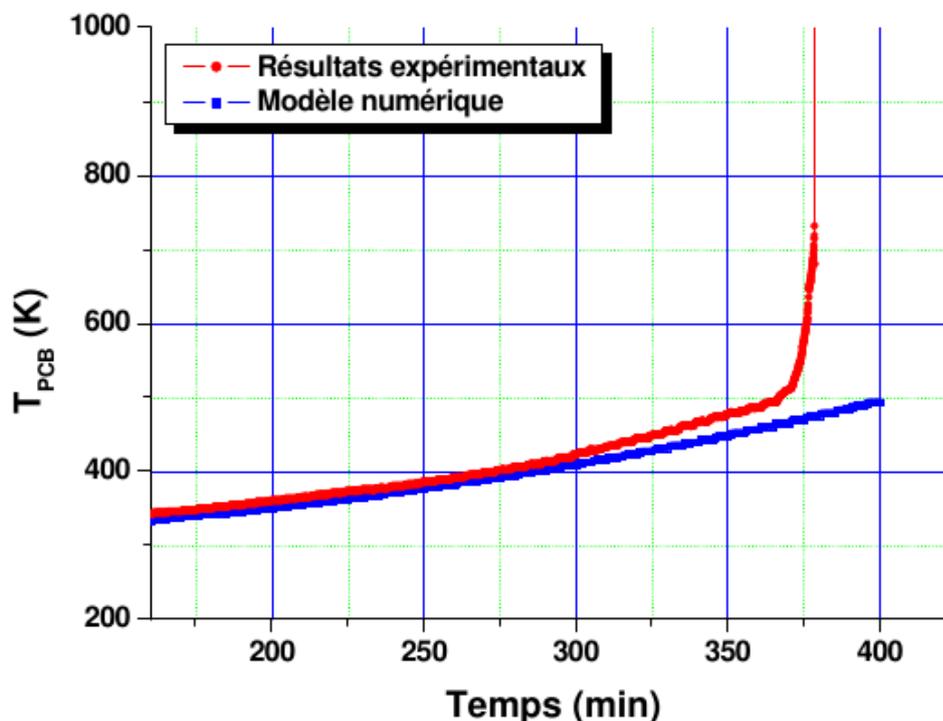


FIGURE 5.9 – Courbes d'évolution en fonction du temps de chauffe de la température à la surface d'un substrat pour un courant de chauffe initial égal à 4 A - Comparaison entre les résultats expérimentaux et le modèle numérique

feu.

Le modèle numérique nous a aussi permis d'avoir accès à une cartographie de la répartition du courant de fuite au sein du matériaux sur la figure 5.10. On note que la densité de courant est concentrée autour du défaut, ce qui corrobore les hypothèses faites lors de ce travail.

Le courant de fuite est donc apparu non seulement comme un indicateur de l'état du circuit imprimé, mais aussi comme un facteur aggravant d'une part, en facilitant le départ de feu et d'autre part, en contribuant à son entretien et à sa propagation sur le circuit imprimé.

À l'aide des cartographies thermiques, une estimation de la surface échauffée, à travers laquelle le courant de fuite était susceptible de circuler, a montré que la contribution de celui-ci à l'échauffement global de la carte était négligeable au cours de cette phase. La modélisation numérique en 3-D de l'échauffement d'un circuit imprimé double face, d'une épaisseur de 0,4mm, a permis de calculer la distribution de la tension et de la température à l'intérieur de celui-ci.

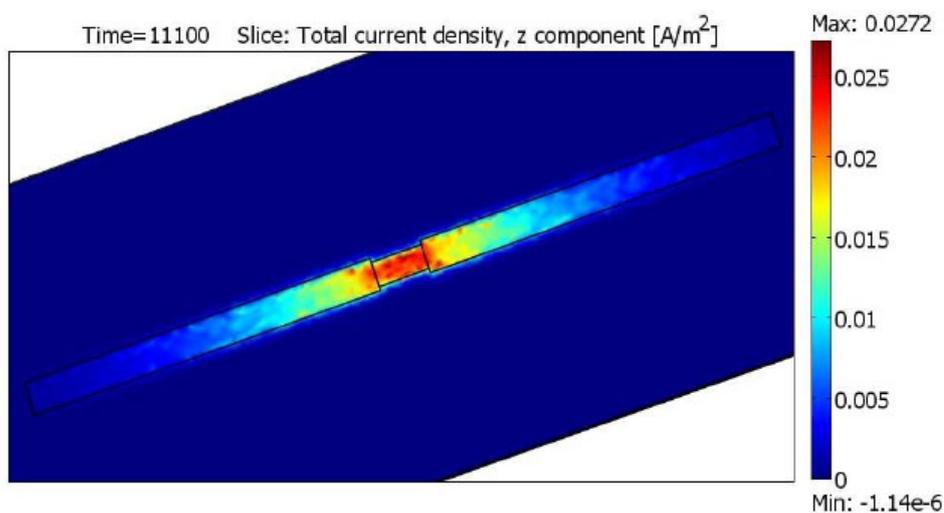


FIGURE 5.10 – Modèle d'une distribution de la densité de courant selon l'axe z à un instant t dans un substrat

Une bonne corrélation a été obtenue entre les résultats expérimentaux et ceux issus du modèle numérique. La transition menant à la dernière phase, attribuée au décollement de la piste du substrat, a également pu être modélisée. Au cours de cette phase, un emballement de la température est visualisé, aussi bien à la surface de la carte que dans le volume, où des points chauds apparaissent. À ce moment-là, l'intensité du courant de fuite, très élevée, est représentative de l'état de dégradation du substrat. Dans ces conditions, l'enregistrement du courant de fuite peut être considéré comme un paramètre indicateur de l'état de détérioration du matériau. Dans le cas de cartes double face, la persistance du courant de fuite apparaît comme un facteur aggravant permettant l'entretien de l'inflammation sur la carte.

The MAN WHO SAVED the EARTH

By Austin Hall



Not a sound; the whole works a complicated mass covering a hundred acres, driving with a silence that was magic. Not a whirl nor friction. Like a living composite body pulsing and breathing the strange and mysterious force that had been evolved from Huyck's theory of kinetics. The four great steel conduits running from the globes down the side of the mountain. In the center, at a point midway between the globes, a massive steel needle hung on a pivot and pointed directly at the sun.

FIGURE 5.11 – Amazing Stories avril 1926

5.3 Physique des décharges électriques

5.3.1 Description et modélisation des phénomènes physiques des décharges électriques dans les plasmas froids

Introduction

Nous avons étudié dans la section précédente les inflammations dues à des surintensités et des courants de fuite au sein du matériau. Dans la présente section, nous allons aborder un sujet plus physique, mais tout aussi important dans l'élaboration des composants de systèmes à optimiser. En effet l'optimisation qui conduit à réduire les masses ou les volumes, réduit aussi les distances entre les éléments conducteurs. La réduction de cette distance augmente ainsi les champs électriques et les probabilités de présence de décharge partielle ou pire d'arc électrique. Ces derniers peuvent être destructeurs pour les conducteurs et conduire à un vieillissement prématuré des composants. C'est pourquoi dans le cadre des problématiques de fiabilité des systèmes étudiées au département Énergie de Supélec, nous nous sommes intéressés aux conditions et aux mécanismes de passage d'un arc entre deux électrodes.

Le terme de claquage, souvent utilisé en français comme synonyme d'arc électrique, exprime le passage d'un courant important dans un milieu initialement non-conducteur. L'arc électrique est caractérisé par un fort courant et une faible tension aux électrodes, il est précédé d'une phase de pré-ionisation de l'espace interélectrode. Celle-ci peut prendre plusieurs formes, soit une décharge de type filamentaire aussi appelée *streamer* ou diffuse de type *glow*, en fonction des conditions de pression, de température, de champ électrique...

Dans le cadre des études des décharges filamentaire prédisruptives, nous avons continué les travaux de modélisation numérique des *streamers*; en travaillant d'une part sur la partie mathématique et algorithmique des schémas numériques de résolution, mais aussi sur les résultats physiques donnés par les codes de calculs.

Physique des décharges prédisruptives

L'air est un composant naturel de notre environnement, c'est pourquoi de nombreuses études ont été réalisées sur les plasmas dans l'air à pression atmosphérique ainsi que sur leurs applications. L'étude générale et synthétique présentée ici, porte sur la description phénoménologique et la modélisation numérique des états possibles des décharges dans l'air ainsi que des applications possibles. Elle servira de plus d'introduction à l'étude de la section suivante sur l'étude des mécanismes de transition glow-arc dans l'argon à faible pression.

La conduction électrique dans un gaz est un phénomène hautement dépendant de la pression de celui-ci. La raison principale est la modification du libre parcours moyen des électrons avec la pression. À 10^{-1} Torr le libre parcours moyen d'un électron est de l'ordre de 30 cm, soit de l'ordre de grandeur d'une distance interélectrode typiquement étudiée en laboratoire. À 10 bar, il se réduit à $4\mu\text{m}$, soit inférieur à une distance interélectrode typique. L'apparence visuelle et l'espace occupé par une décharge électrique entre deux électrodes est de ce fait largement dépendante de la pression. À faible pression, une décharge électrique va apparaître comme étant étendue spatialement, on parle alors de décharge diffuse ou *glow*. A contrario, à haute pression, les décharges sont des phénomènes locaux confinés spatialement. Pour toutes les gammes de pression, un autre paramètre primordial est l'énergie gagnée entre deux collisions qui déterminera le type de ces dernières et le comportement macroscopique de la décharge. L'énergie gagnée par les électrons est au premier ordre égal au produit du champ électrique –qui induit le déplacement électronique– par le libre parcours moyen. C'est pourquoi il est habituel de caractériser les décharges par le rapport $\frac{E}{N}$ du champ électrique E par la densité N des espèces lourdes ($\frac{1}{N}$ étant proportionnel au libre parcours moyen). Ce rapport étant appelé champ réduit.

À première vue, une règle de similarité peut s'appliquer ici : les phénomènes à basse pression peuvent être retrouvés pour toute autre pression tant que le champ réduit et la température restent constants. Mais cette règle de similarité, ne prend pas en compte des effets locaux de chauffage du gaz par le courant de décharge. L'élévation de température qui en découle est de plus en plus concentré au centre de la décharge pour des pressions élevées car la conduction thermique est de moins en moins efficace. C'est pourquoi pour des pressions de plusieurs atmosphères, une décharge d'arc électrique transitoire ou continue apparaît dès l'application d'une tension seuil. L'arc électrique est caractérisé par une température de plasma élevée (de l'ordre de 10^3 à 10^4 K et par un équilibre entre les températures des ions et des électrons (état dénommé LTE ou équilibre thermodynamique local).

À pression atmosphérique les études précédentes ont montrées que l'arc électrique était toujours précédé d'une phase d'ionisation –aussi appelé décharge prédisruptive– préparant le passage de celui-ci. Durant cette phase d'ionisation qui peut prendre plusieurs formes, la température des électrons est plus importante que celle des ions ou des atomes/molécules du gaz. Le plasma ainsi obtenu est dit dans un état NTP (*non thermal plasma*). L'avantage des NTP est la grande réactivité chimique induite par la forte température des électrons face à celle des neutres ou des ions. Les collisions électroniques avec les particules lourdes sont fréquentes et produisent des espèces réactives (collisions inélastiques). De nombreuses applications environnementales sont basées sur la grande réactivité chimique de ces plasmas NTP, on peut citer sans être ex-

haustif le traitement de l'eau, la production d'ozone, la stérilisation ou décontamination, la dépollution et l'amélioration de la combustion. Néanmoins l'utilisation de ces décharges impose un moyen de contrôler leur tendance naturelle à passer à l'arc électrique, il est alors nécessaire de bien comprendre les mécanismes physiques liés au développement de cette phase d'ionisation. Dans un premier temps, nous ferons une description des différentes structures que peuvent prendre ces phases d'ionisation, puis nous présenterons les modèles utilisés ainsi que les résultats de simulations.

Développement spatial et structure de la phase d'ionisation

On peut classer les phases de préionisation avant le passage à l'arc d'un espace interélectrode en deux types de développement spatial. Le premier est un mode diffus avec une apparence quasi uniforme. On se réfère à cette extension spatiale comme étant une décharge glow, diffuse ou corona. Un exemple d'une telle décharge est présentée sur la photographie de la figure 5.16 où une décharge glow est obtenue dans l'argon à faible pression.

Le second type est une décharge filamentaire, fortement non-uniforme dans l'espace et présentant un aspect transitoire et des branchements importants. Ces décharges sont appelées en général *streamers*, dards ou filamenteuses et sont généralement obtenues à haute pression dans les gaz électronégatifs comme l'air et particulièrement avec des électrodes à fort rayon de courbure. Ce paragraphe traitera plus particulièrement de ce type de décharge, la section 5.3.2 s'intéressera plus particulièrement à la transition entre un glow et un arc électrique dans l'argon à faible pression.

Au dessous de la tension seuil de claquage Dans une configuration d'électrodes uniformes de type plan-plan, tant que la tension appliquée reste en dessous de la tension seuil de claquage (passage à l'arc), la théorie classique de Townsend basée sur une suite d'avalanches électroniques suffit à expliquer les phénomènes. Les avalanches électroniques successives sont induites par des électrons secondaires issus de la première avalanche (par exemple par effet d'arrachement d'électrons à la cathode par des ions). On parle d'une décharge auto-entretenu car le courant reste continu indéfiniment.

Dans une configuration non uniforme, par exemple une pointe faisant face à un plan, la région d'ionisation appelée glow est située proche de l'électrode à faible rayon de courbure où le champ électrique est le plus intense. Une telle configuration est donnée sur la région A de la figure 5.12 pour un système pointe positive-plan dans l'air.

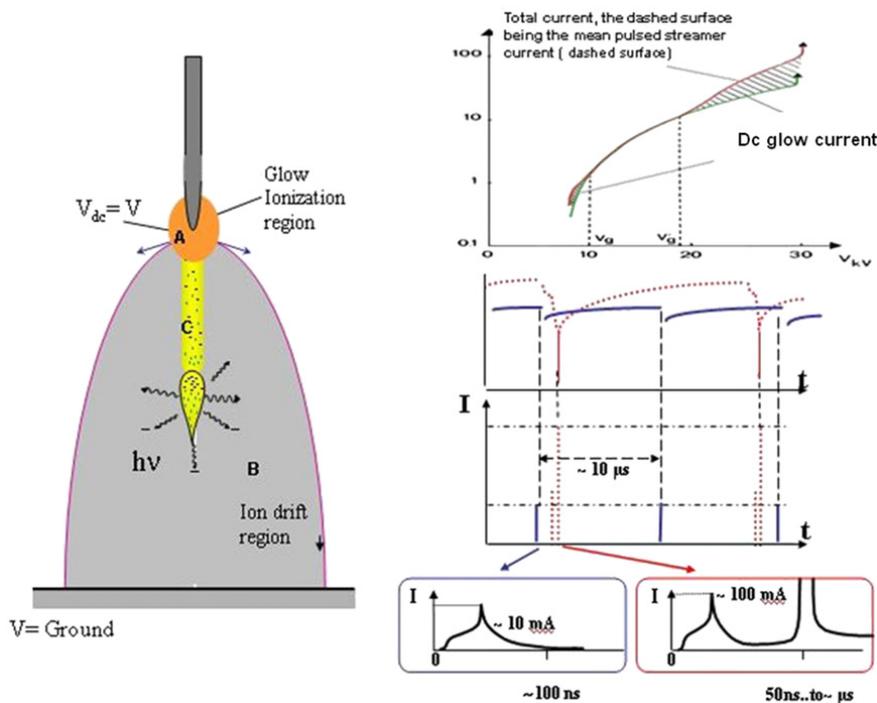


FIGURE 5.12 – Description d'une décharge pointe-plan

Au dessus de la tension seuil de claquage Si la tension entre les électrodes dépasse la tension seuil de claquage, la morphologie de la décharge change radicalement et ceci pour les deux configurations d'électrodes mentionnées (uniformes et non-uniformes). Dans le cas d'une géométrie plane, on remarque deux phénomènes propagatifs filamenteux partant de l'espace interélectrodes et se dirigeant chacune vers une électrode. Ces phénomènes sont associés à des ondes d'ionisation appelés *streamer*, il est largement admis celles-ci sont dues à la modification du champ électrique causée par la charge d'espace laissée par les avalanches précédentes (ions relativement moins mobiles que les électrons). L'onde d'ionisation dirigée vers l'anode appelée en anglais *anode directed streamer* avance dans le sens de dérive des électrons dans le champ électrique, mais celle dirigée vers la cathode (*cathode directed streamer* ou *streamer positif*) avance à une vitesse comparable à celle des électrons dans un sens opposé à celle imposée par le champ électrique. Il est donc nécessaire d'avoir un mécanisme créant des électrons en amont du streamer (entre celui-ci et la cathode) pour provoquer de nouvelles avalanches. Des théories basées sur la diffusion arrière des électrons ont été proposées, mais nécessitent des températures électroniques largement

supérieures à celle rencontrées dans la décharge. Il est maintenant communément admis que cet électron secondaire est créé par un phénomène de photoionisation à partir d'un photon émis à partir des avalanches précédentes.

Dans le cas d'un système non-uniforme pointe positive - plan, un seul streamer se déplace depuis la pointe positive vers le plan. Sur la figure 5.12, le filament positif (C) émerge de la zone dite de glow (A) et parcourt l'espace interélectrode. Sur cette figure, a été aussi représenté l'évolution du courant pour des tensions de l'ordre de la tension seuil de claquage (courbes en bleu continues). Dans ce cas, le streamer est un phénomène répétitif et en fonction des conditions expérimentales, on peut obtenir une répétition sporadique et spontanée ou une répétition contrôlée pouvant aller jusqu'à des fréquences de plusieurs dizaines de kiloHerz. Dans le cas d'un streamer répétitif, on observe une évolution du courant présentant une augmentation et un pic au moment où le streamer atteint la cathode, puis une décroissance lente jusqu'à répétition de l'onde d'ionisation suivante.

Si la tension est supérieure à la tension de claquage (courbe en rouge et en pointillés), il va se former après le passage du streamer un arc électrique. Dans ce cas le premier pic est suivi d'un second beaucoup plus intense. L'échelle de temps entre les deux phénomènes est de l'ordre de 50ns à quelques dizaines de μ s. C'est durant ce temps caractéristique que le plasma laissé par le passage du streamer est dans un état NTP.

Distribution de la densité d'énergie jE

Les mécanismes aux sein des NTP sont largement caractérisés par la distribution de la densité d'énergie $j.E$, produit de la densité de courant par le champ électrique. Cette densité d'énergie peut être décomposée en trois parties liées respectivement aux ions positifs, aux ions négatifs et aux électrons. Cette dernière part étant prépondérante. Cette énergie va se dissiper sous plusieurs formes : chauffage du gaz et des électrodes (principalement pour les ions), mais surtout sous forme de collisions inélastiques qui participeront à terme elles aussi au chauffage du gaz. Cet échauffement global est primordial pour expliquer la formation de l'arc électrique. À cause de cet élévation de température, le canal de décharge subit une expansion, la densité N décroît et le champ réduit E/N (équivalent à l'énergie moyenne des électrons) augmente. De plus les processus chimiques sont aussi influencés au travers de la loi d'Arrhenius. Il est donc nécessaire d'évaluer finement la distribution des électrons et des espèces chargées au sein du canal conducteur. La densité des électrons dépend fortement du rayon de ce celui-ci, en effet plus la décharge sera contrainte dans un espace réduit, plus la densité des électrons sera importante ainsi que le densité de courant. Par conséquent, plus le rayon sera faible, plus l'élévation de température et de

pression sera importante.

Pour répondre à ces questions et établir une cartographie des distributions des espèces en présence dans la décharge, une modélisation fine du plasma et des mécanismes de propagation du streamer est nécessaire. C'est pourquoi nous nous sommes intéressés à la simulation en deux dimensions d'une décharge pointe positive plan. Notre travail est concentré sur l'analyse des résultats de codes de calculs déjà existant et sur l'amélioration des algorithmes numériques mis en place notamment par des travaux exploratoires sur des méthodes mêlants des éléments finis et méthode des caractéristiques (ELLAM).

Modélisation de l'onde d'ionisation streamer dans l'air

Le modèle utilisé dans cette étude se base sur un jeu d'équations fluides hydrodynamiques. Pour chaque espèce, une équation de convection-diffusion en coordonnées cylindriques est écrite en se basant sur le modèle de l'équation 5.1 :

$$\frac{\partial n}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(n w_x - D_x \frac{\partial n}{\partial x} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \left(n w_r - D_r \frac{\partial n}{\partial r} \right) \right] = S \quad (5.1)$$

où, pour chaque espèce considérée : n est la densité, w_x et w_r les vitesses de conduction axiale et radiale, D_x et D_r les coefficients de diffusion axiale et radiale. S est un terme source de création et destruction. Il prend en compte pour les électrons et les ions positifs de l'ionisation (via le premier coefficient de Townsend) ; et de la photoionisation et pour les électrons et les ions négatifs de l'attachement. Ce modèle sert de base à de nombreux travaux sur la simulation d'un streamer, en général c'est sur la modélisation de la photoionisation que ceux-ci diffèrent. Ici une approche s'appuyant sur une équation intégrale du type de l'équation 5.2a été choisi. Cette équation est simplifiée par l'hypothèse d'Eddington se basant sur la supposition que le rayonnement est faiblement anisotrope proche de son lieu d'émission (ici la tête du streamer).

$$S_{ph} = c \int_0^\infty \mu_\nu^{ph} \int_\Omega \Psi_{nu} \left(\vec{r}, \vec{\Omega}, t \right) d\Omega d\nu \quad (5.2)$$

On définit $\vec{\Omega}$ comme la direction d'un photon à la position \vec{r} au temps t , c est la célérité de la lumière, μ_ν^{ph} est le coefficient de photoionisation dépendant de la fréquence du photon considéré. $\Psi_{nu} \left(\vec{r}, \vec{\Omega}, t \right)$ est la distribution de la densité de photons à la fréquence ν .

Ce système d'équation est fermé par la connaissance du champ électrique \vec{E} donné par la résolution de l'équation de Poisson :

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_0} \quad (5.3)$$

où ρ est la densité nette de charge.

Ce modèle complet est résolu par l'application d'une méthode de pas fractionnés qui nous permet de traiter les équations différemment suivant leur type : différences finies pour la diffusion et caractéristiques pour la convection. L'aspect évolutif et propagatif du streamer impose la création d'un maillage mobile suivant le déplacement de la décharge dans l'espace et le temps. Les travaux actuels sur ce modèle portent sur l'application de méthodes de résolution mixtes par éléments finis et caractéristiques.

Comparaison des résultats de simulation avec les expériences

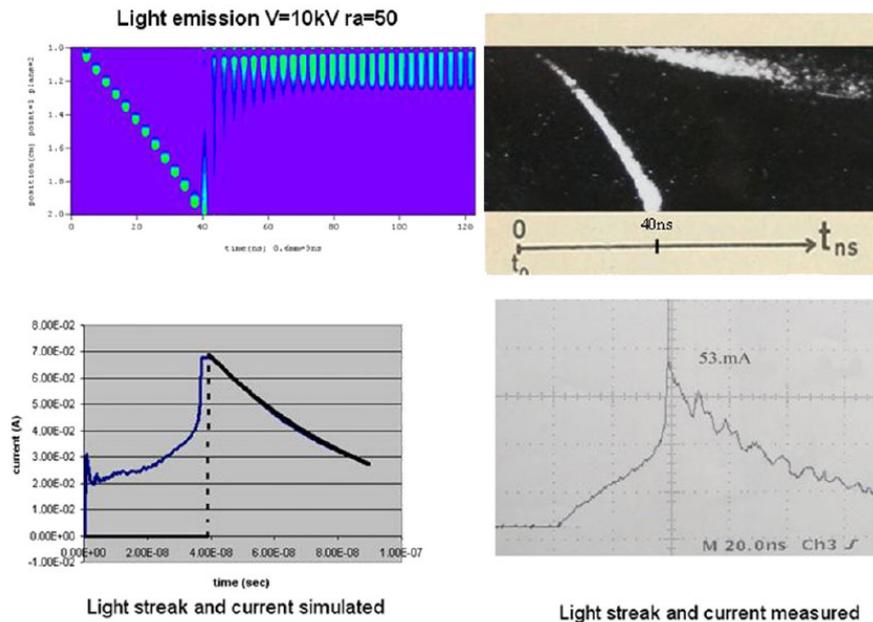


FIGURE 5.13 – Comparaison du courant de décharge et de l'émission lumineuse à la caméra streak, simulation à gauche et expériences à droite

La figure 5.13 montre les résultats de la simulation en comparaison avec ceux issus de l'expérience. Sur la partie haute de la figure, à droite est reportée

une photographie streak d'une décharge. Chaque image représente à un instant donné (toutes les 3 nanosecondes) l'émission lumineuse de la décharge et le rayon total est de $600 \mu\text{m}$. Sur la même figure, à droite en haut pour les mêmes instants est reporté les résultats de la simulation pour l'émission photonique. Les résultats de la simulation sont en bon accord avec les résultats expérimentaux, notamment sur le temps de propagation du streamer (40 ns) pour la jonction à la cathode et donc sur la vitesse de l'onde d'ionisation. De plus, après l'établissement du canal conducteur, une zone lumineuse à la cathode apparaît dans les deux cas appelé un streamer secondaire ou *secondary streamer* en anglais.

Sur la même figure, est reporté à gauche le courant de décharge simulé, comparé à droite avec celui issu de l'expérience. Si la forme générale semble la même, on peut remarquer quelques différences. Le premier pic de courant simulé, n'apparaît pas sur le courant expérimental. En effet dans le cas expérimental, la mesure est réalisée sur un streamer s'établissant dans un milieu préionisé par le passage précédent d'un autre streamer. Dans le cas de la simulation, ce premier pic de courant est représentatif de l'établissement de la zone de glow autour de la pointe et des premières avalanches électronique dans un milieu non ionisé.

Considérations sur le rayon du streamer

Nous l'avons précisé précédemment, le rayon du canal conducteur formé par le passage de l'onde d'ionisation est très importante pour l'aspect d'expansion hydrodynamique et le possible passage à l'arc électrique après la phase de préionisation du gaz. Il est donc nécessaire d'avoir une bonne estimation de la valeur de ce rayon. Expérimentalement les mesures, s'étalent suivant les techniques utilisées, sur une vaste plage entre $10 \mu\text{m}$ et $170 \mu\text{m}$. Les résultats de la simulation donnent pour leur part un rayon de l'ordre de $100 \mu\text{m}$, c'est à dire dans la fourchette haute de l'estimation expérimentale. Pour réduire ce rayon simulé, nous nous sommes intéressés aux valeurs des coefficients de la photoionisation et des mécanismes pris en compte. L'ajout de l'émission induite dans le calcul du terme de photoionisation n'a pas permis à lui seul la réduction de la valeur du rayon de décharge simulé. Par contre, nous nous sommes aperçu que le rayon variait en fonction du coefficient d'absorption des photons émis par la tête de streamer. Pour de faibles valeurs de ce coefficient d'absorption, le rayon obtenu par simulation est proche de $50 \mu\text{m}$. Ceci montre la nécessité d'avoir des données précises des coefficients et des mécanismes pris en compte.

De plus, le modèle basé ici sur des équations fluides à une tendance intrinsèque à créer des densités dont la somme est inférieure à une particule. Si cela n'est pas pénalisant lors de la phase de propagation du streamer, cela doit poser des problèmes lors de la formation de la zone de glow et de l'établissement de la charge d'espace au démarrage du streamer à la pointe. En effet, à ce moment très

peu d'électrons sont présent dans le gaz (un seul au départ du streamer), et la simulation crée des fractions d'électrons dans les zones de plus fort champ électrique, c'est à dire sur la surface de la pointe. On assiste alors à un étalement de la distribution de la densité des électrons autour de la pointe, étalement spatial qui sera projeté dans l'espace interélectrode lors de la propagation et sera donc une des causes de la valeur du rayon. De plus ce phénomène purement numérique et simulateur peut aussi expliquer le premier pic de courant relativement important dans la simulation.

Dernièrement, des mesures expérimentales ont déterminé un rayon du cœur de la décharge d'environ $10\mu\text{m}$, montrant l'écart avec les modélisations. Des questions se posent naturellement sur la détermination expérimentale et la définition du rayon de décharge. En effet, faut-il se baser sur des mesures lumineuses par spectroscopie ou plutôt sur des mesures de la distribution de la densité des électrons. Néanmoins un faible rayon de décharge supporte l'hypothèse que la transformation de celle-ci en un arc électrique est principalement due à une expansion hydrodynamique et une augmentation du champ réduit $\frac{E}{N}$.

Extensions du modèle électrique 2D

La modélisation 2D présentée ici traite du développement du streamer en coordonnées cylindriques axiales et radiales. Il ne tient pas encore compte des phénomènes d'expansion hydrodynamique ultérieurs au passage de la décharge au sein de l'espace interélectrode. Cette extension est prévue dans un cadre plus vaste de réalisation d'un logiciel de simulation comportant une phase de simulation du passage de la décharge dans un gaz qui se couplerait à des codes de simulation d'expansion hydrodynamique et de cinétique chimique.

Néanmoins un code de calcul une dimension radial a été déjà mis au point à partir des résultats du modèle 2D présenté ici. Sa réalisation s'appuie sur un découplage de l'équation de convection-diffusion en trois équations de conservation (masse, quantité de mouvement et énergie). Ce modèle est relié à partir des données de température et de pression à une simulation de la dynamique chimique des réactions.

Un autre aspect des décharges prédisruptives ou NTP sur lequel nous avons travaillé est l'étude des mécanismes de transition des décharges non filamenteuses ou *glow* à faible pression dans l'argon et fera l'objet du paragraphe suivant.

5.3.2 Étude des mécanismes de transitions glow-arc dans l'argon à faible pression

L'étude de la transition d'une décharge luminescente ou glow (forte tension, faible intensité du courant) en un arc électrique (faible tension, forte intensité

du courant) présente un intérêt académique majeur tant du point de la physique des décharges (incluant l'arc électrique) que du point de vue de l'interaction plasma/surface. En effet les phénomènes physiques qui régissent la physique de la décharge électrique sont sensiblement différents de ceux qui gouvernent la physique de l'arc électrique et jusqu'à présent les mécanismes conduisant à la transition ne sont pas bien connus. L'étude de la transition d'un mode à l'autre présente donc un intérêt scientifique particulier.

L'étude de la transition glow vers arc et arc vers glow est un sujet largement étudié depuis plus de 40 ans, suivant des approches à la fois expérimentales et de simulations. Ces études sont encouragées par de nombreuses applications industrielles comme le traitement de surface ou la prévention du passage à l'arc pour les décharges dans le CO_2 (lasers CO_2). L'étude des décharges glow est très ancienne et de nombreux travaux ont été réalisés dans différents gaz (air à pression atmosphérique, azote, oxygène, air et argon). Plus précisément des recherches importantes ont été faites sur les transitions glow-arc dans des gammes de pression allant de quelques Torr à la pression atmosphérique dans des gaz rares. L'étude que nous présentons ici, et qui est l'objet de la thèse de Romarick Landfried co-encadrée avec Emmanuel Odic, Mike Kirkpatrick (Supélec département Énergie) et Philippe Testé du Laboratoire de Génie Électrique de Paris, s'intéresse aux transitions dans l'argon à faible pression (jusqu'à 100mbar).

Avant de réaliser une étude par simulation numérique, il est toujours nécessaire de comprendre les mécanismes mis en jeu dans le processus physique, ainsi que de caractériser les paramètres d'une telle simulation. C'est pourquoi la première partie de cette étude a porté sur un travail exploratoire. Après avoir présenté rapidement le dispositif expérimental, nous aborderons les résultats et les hypothèses que nous en avons déduites sur les mécanismes de transition. Ces hypothèses serviront dans un futur proche à alimenter un modèle numérique de la décharge.

Dispositif expérimental

La cellule de décharge est constituée de deux électrodes cylindriques coaxiales en tungstène. Elles sont placées à l'intérieur d'une enceinte hermétique (figure 5.14) en acier inox emplie d'argon à une pression de 100mbar. La distance interélectrode est variable et peut être ajustée entre 5mm et 45mm. L'alimentation électrique –dont le schéma est représenté sur la figure 5.15– mise en jeu dans le dispositif de transition est décomposée en deux parties.

D'une part une composante continue permettant de générer une décharge glow de type luminescente telle que celle photographiée en pause longue sur la figure 5.16. Le courant de décharge est maintenu constant via l'ajustement de la tension par une capacité de $10\mu F$ qui se décharge à travers une résistance

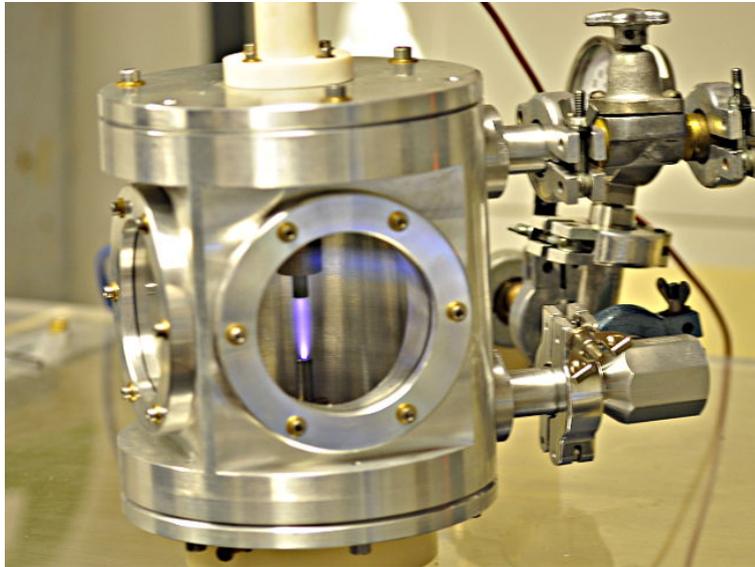


FIGURE 5.14 – Photographie de l'enceinte de décharge

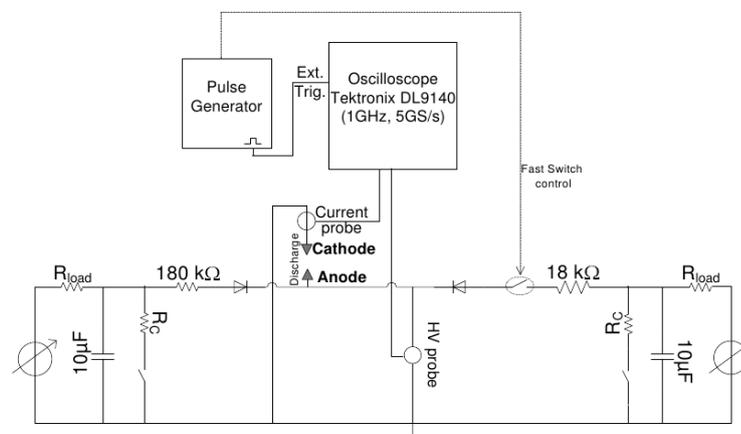


FIGURE 5.15 – Schéma électrique de l'alimentation utilisée

de $180\text{k}\Omega$. La deuxième partie permet de superposer au courant de décharge un échelon de courant d'une amplitude variable dans l'espace interélectrode. Cet échelon permet de faire transiter la décharge lumineuse glow vers un arc photographié en pause longue sur la figure 5.17. L'amplitude de ce pulse de forme rectangulaire peut être ajustée jusqu'à 400mA pour une durée de 2ms grâce à la décharge d'une capacité de $10\mu\text{F}$ à travers une résistance de $18\text{k}\Omega$

reliée à l'anode par un interrupteur rapide. Dans ces conditions la seconde partie de l'alimentation (à droite sur la figure 5.15) agit comme une source de courant. Lorsque l'interrupteur est fermé, le courant résultant est fixé par la tension du condensateur et la valeur de la résistance ($18k\Omega$).

En plus de mesures électriques (courant et tension de décharge), une caméra rapide est couplée au dispositif et permet de réaliser des observations visuelles de la transition.

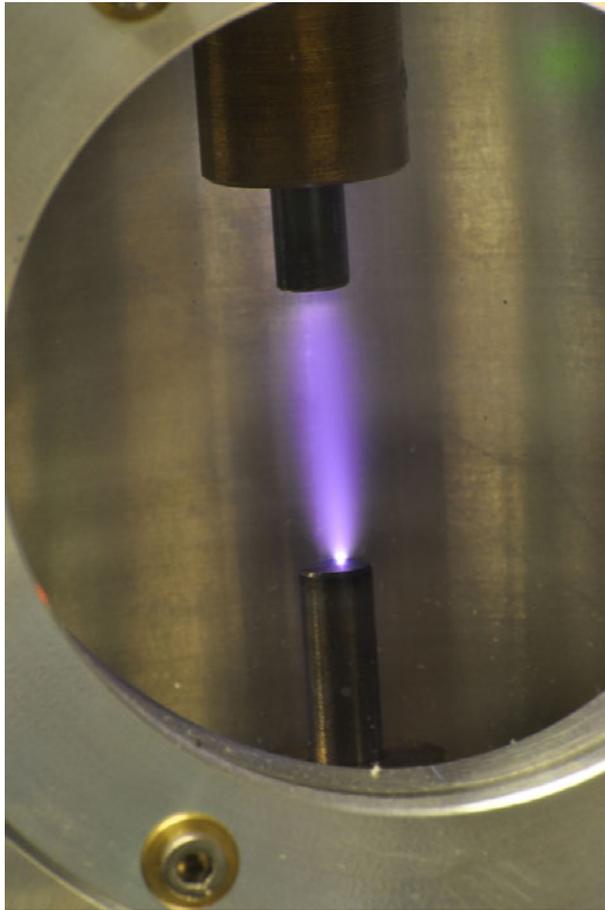


FIGURE 5.16 – Photographie en pause longue d'une décharge lumineuse glow

Transitions irréversibles

Illustrons tout d'abord le cas simple d'une transition irréversible, ce qui nous permettra de poser quelques définitions phénoménologiques de la décharge glow lumineuse et de l'arc. Lorsque la première partie de l'alimentation est



FIGURE 5.17 – Photographie en pause longue d'une transition glow-arc

utilisée, le dispositif expérimental permet l'établissement d'une décharge de type glow caractérisée par une tension élevée (370V sur la partie (a) de la figure 5.18) et un courant faible (10mA). Visuellement à l'aide d'un appareil photo classique et une pause longue, nous voyons une décharge diffuse (figure 5.16) qui remplit l'espace interélectrode. L'image (a) prise à la caméra rapide ne permet pas de voir la partie diffuse à cause du temps de pause court ($16\mu\text{s}$), mais nous montre une autre caractéristique de la décharge glow, son étalement à la cathode.

Au temps $1500\mu\text{s}$, la seconde partie de l'alimentation est connectée via le switch et un échelon de courant est appliqué aux bornes de la décharge. L'amplitude de ce courant, de l'ordre de 400mA sur une durée de 2ms, est suffisante pour provoquer une transition à l'arc de la décharge. L'arc est caractérisé électriquement par une chute de la tension (ici de 370V à 49V sur la partie (b) de la figure 5.18), et une élévation du courant de décharge (passage de 10mA à

380mA). Le gaz devient largement conducteur et la puissance consommée dans la décharge passe de 3,7W à 18,6W. Visuellement l'arc est une constriction de la décharge diffuse en un filament visible sur la photographie de la figure 5.17. La pause longue utilisée ici avec un appareil photographique classique, nous montre la superposition de la décharge glow et de l'arc. Sur l'image (b) de la figure 5.18 prise à l'aide de la caméra rapide, le filament est bien visible ainsi que le rétrécissement du pied cathodique en un spot très lumineux.

Après les 2ms de pulse la déconnexion de la seconde partie de l'alimentation permet la transition inverse de l'arc vers une décharge luminescente qui induit une hausse de la tension aux bornes des électrodes et une diminution du courant de décharge.

Nous avons caractérisé ce phénomène déjà largement observé de transition irréversible par opposition aux phénomènes que nous allons décrire dans le prochain paragraphe.

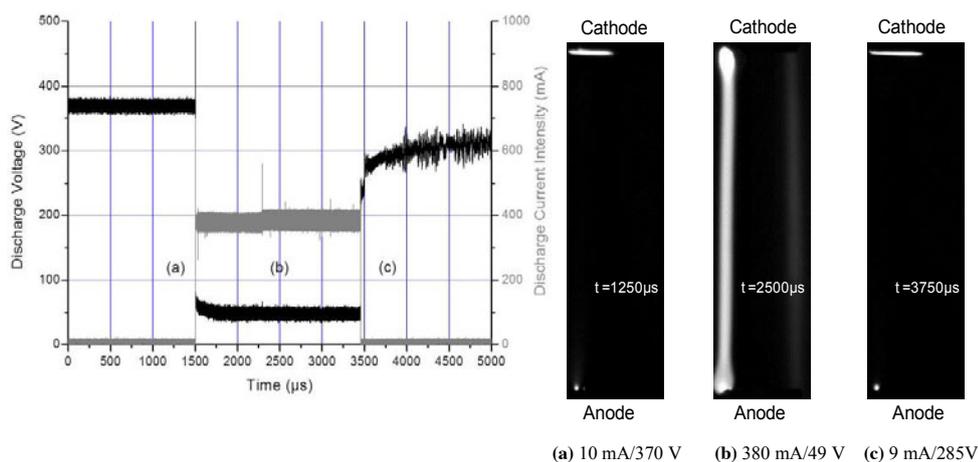


FIGURE 5.18 – Oscillogramme du courant et de la tension et photographies des phases de la transition.

Transitions spontanées

Les transitions irréversibles présentées dans la section précédente ne sont possibles qu'à partir d'un échelon de courant, lié à la connexion de la seconde partie de l'alimentation, relativement élevé (dépendant comme nous le verrons par la suite des conditions géométriques et de pression). Pour des amplitudes de courant plus faibles (par exemple 280mA pour l'argon à 100mbar pour un espace interélectrode de 25mm), il se produit une suite de transitions glow-arc et

arc-glow tout au long de l'application (2ms) de l'échelon de courant. Ces transitions sont appelées spontanées car elles ne se produisent pas forcément au début de l'échelon, mais comme le montre l'oscillogramme de la figure 5.19 peuvent apparaître en grand nombre pendant l'application de l'échelon de courant.

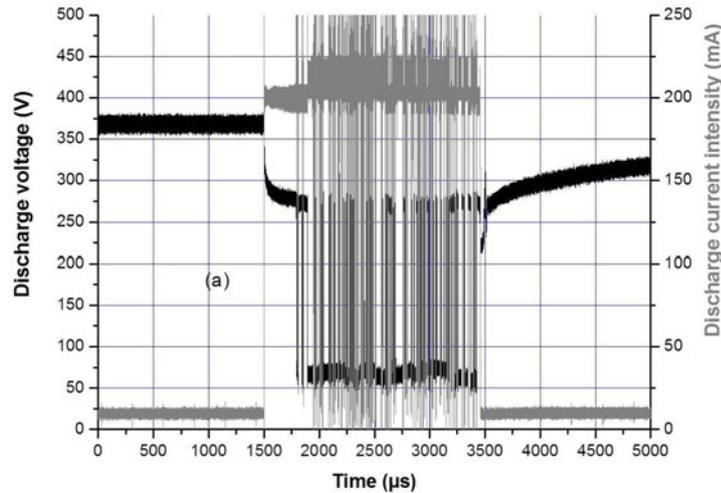


FIGURE 5.19 – Oscillogramme du courant et de la tension pour un échelon de 280mA, apparition de transitions spontanées

La figure 5.20 est un zoom de cet oscillogramme autour des temps $1700\mu s$ et $2000\mu s$ avec les photographies à la caméra rapide (temps de pause de $16,6\mu s$) des phases associées. La partie (a) correspond au temps avant l'échelon de courant, la décharge est en phase glow (faible courant et forte tension). L'application de l'échelon de courant modifie la morphologie de la décharge lumineuse, mais sans transition à l'arc, l'aspect visuel, photographie (b), est plus filamentaire, mais le pied cathodique reste étendu (électrode du haut sur la photographie). Au niveau de l'oscillogramme, on observe une légère baisse de la tension et une forte hausse du courant (environ 200mA dans ce cas). La transition complète à l'arc se réalise (partie (c) de la figure 5.20) lorsqu'il y a une forte chute de la tension et une constriction importante du pied cathodique en un spot lumineux. Il faut noter que lors de cette transition, l'aspect général de la colonne positive de décharge reste inchangé. Un autre fait important lors de ces transitions est la variation de la puissance consommée dans la décharge, de 56W en mode luminescent à moins de 15W pour l'arc. Enfin précisons que ces transitions spontanées ne sont pas affectées par le circuit extérieur d'alimentation qui reste inchangé pendant les 2ms de temps d'application de l'échelon et sont caractérisés par une chute de la tension (200V) qui semble associée aux changements

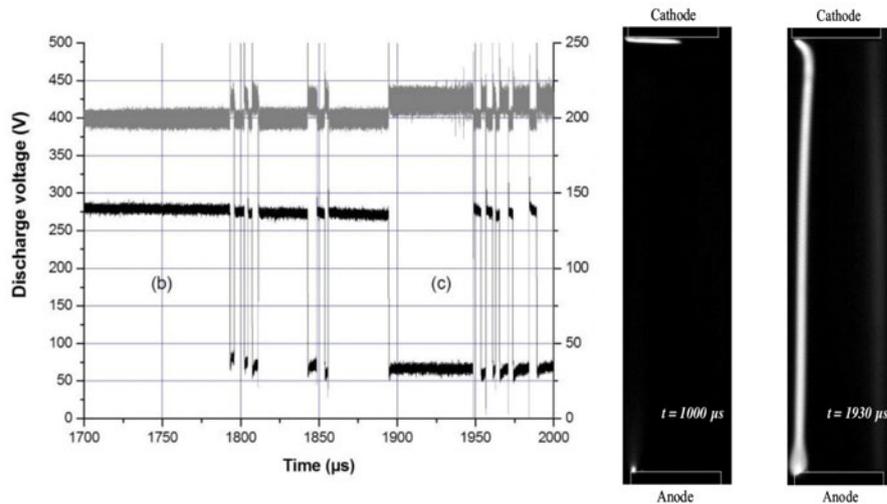


FIGURE 5.20 – Zoom de l’oscillogramme du courant et de la tension pour un échelon de 280mA, apparition de transitions spontanées et photographies caméra rapide de la décharge

morphologiques du pied cathodique.

Pour mieux comprendre les mécanismes entrant en jeu dans ces transitions, nous avons focalisé la suite de ce travail sur deux points, une étude statique des caractéristiques de chaque mode de décharge (arc, glow, glow-arc) en fonction des paramètres géométriques, de pression et d’amplitude de l’échelon de courant. La seconde partie traitera des mécanismes dynamiques de la transition elle-même.

Étude paramétrique des conditions stables

Dans un premier temps, nous nous sommes intéressés au régime de glow uniquement. En faisant varier le courant de décharge, nous avons observé les changements morphologiques de la décharge grâce aux images caméra rapide, mais aussi la valeur de la tension aux bornes des électrodes. La distance inter-électrode est gardée constante à 25mm et la pression est de 100mbar. Ces observations sont reportées sur la figure 5.21 avec la caractéristique courant-tension, mise en relation avec les photographies de la décharge. Notons tout d’abord qu’à cause des temps de pause et de l’ouverture de l’objectif, la décharge lumineuse n’apparaît pas sur le cliché, mais est bien visible à l’œil nu. Notons aussi la présence de stries déjà rencontrées dans la littérature pour ces situations. Ces points ne représentent pas une expérience en continu, mais une série d’expériences réa-

lisées avec des échelons de courant différents. Si on observe maintenant le pied cathodique (en haut sur l'image), on s'aperçoit que malgré l'aspect filamentaire prononcé et ce même pour les plus fortes valeurs de courant, celui-ci reste largement étalé sur l'ensemble de l'électrode et n'est pas modifié par l'augmentation du courant. La tension diminue légèrement avec l'augmentation du courant, suivant en ce sens la taille du filament qui tend à rejoindre les deux électrodes pour un courant de 50mA. Le point important ici est la coexistence des deux modes de décharges glow et filament sans passage proprement dit à l'arc.

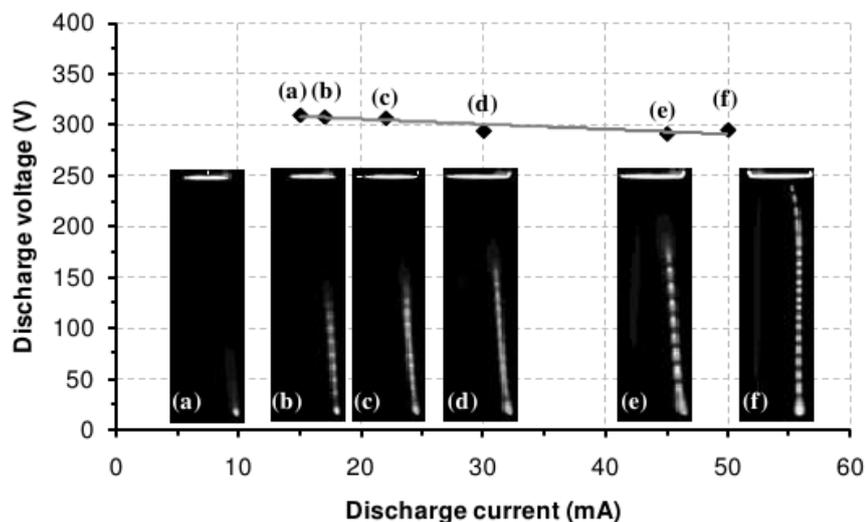


FIGURE 5.21 – Caractéristique courant-tension associée à des images caméra rapide d'une décharge glow

Par la suite en gardant la même distance interélectrode (25mm) et la même pression (100mbar), nous avons augmenté l'amplitude de l'échelon de courant entre 5mA et 400mA. Pour chaque expérience, nous avons relevé des tensions stables dont les valeurs moyennées sur la période de stabilité sont reportées sur la figure 5.22. Ainsi pour des courants entre 5mA et 50mA nous retrouvons uniquement des décharges de type glow lumineuse. Une seconde zone (II) est présente entre les valeurs de courant 50mA et environ 280mA où des transitions spontanées et réversibles sont observées pour chaque expérience. Enfin une troisième zone (III) a été déterminée pour des valeurs de courant supérieures à 280mA pour lesquelles seules des transitions irréversibles vers l'arc sont présentes.

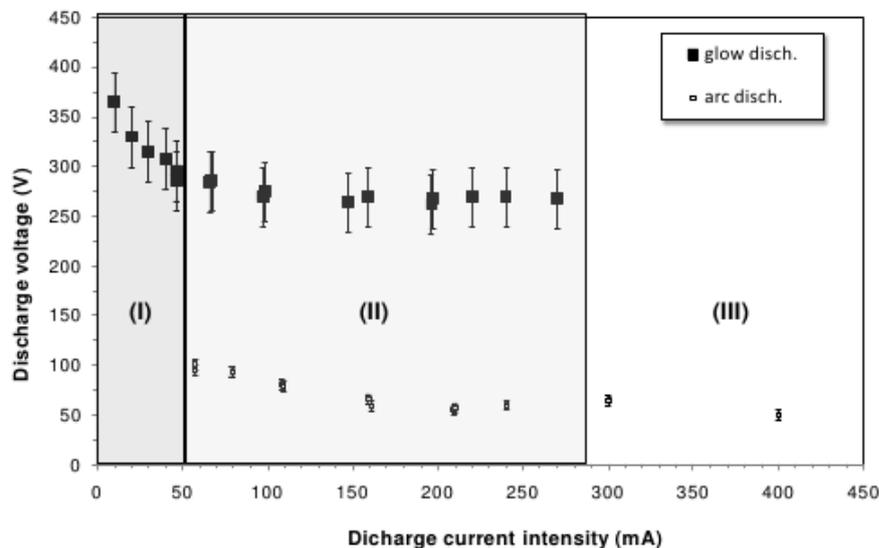


FIGURE 5.22 – Caractéristique courant-tension pour une distance interélectrode de 25mm

Étude dynamique de la transition

Nous nous sommes ensuite intéressés à l'étude dynamique de la transition en elle-même. Tout d'abord nous avons cherché à caractériser électriquement et morphologiquement les changements ayant lieu à partir de l'application de l'échelon de courant par le circuit extérieur. Les mesures électriques –pour une distance interélectrode de 25mm, une pression de 100mbar et un échelon de 25mA– sont reportées sur l'oscillogramme de la figure 5.23, avec en correspondance des intervalles notés sur le haut de cette figure, les images issues de la caméra rapide (temps de pause pour chaque image de $16,6\mu s$) sur la figure 5.24. Dans un premier temps, durant environ $25\mu s$, on remarque une hausse de la tension ainsi que l'établissement du courant à la valeur fixée par l'alimentation. Par la suite la tension et le courant se stabilisent sur un plateau. Visuellement, le filament semble se propager depuis l'anode vers la cathode pour former un état stationnaire avec jonction ou non des deux électrodes en fonction de l'amplitude de l'échelon de courant. Un temps de quelques dizaines de μs est nécessaire pour l'établissement d'un filament au sein de la colonne positive.

Nous avons ensuite effectué une étude paramétrique sur la distance interélectrode et relevé les temps de transition glow-arc pour trois échelons de courant (100mA, 150mA et 250mA). Comme nous pouvons le voir sur les résultats agrégés sur la figure 5.25, les temps de transitions augmentent linéairement en

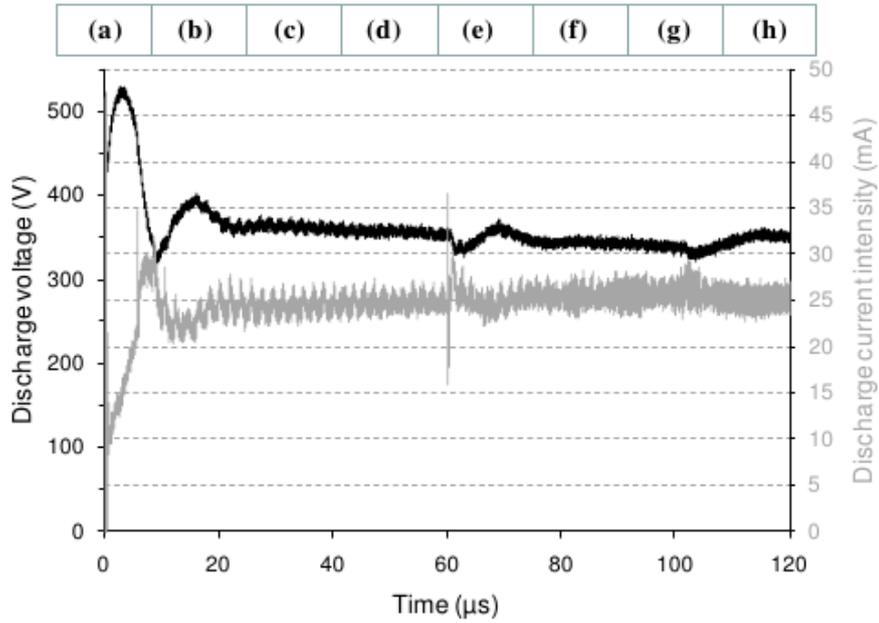


FIGURE 5.23 – Courant et tension de décharge lors de la transition (extension de la colonne filamentaire)

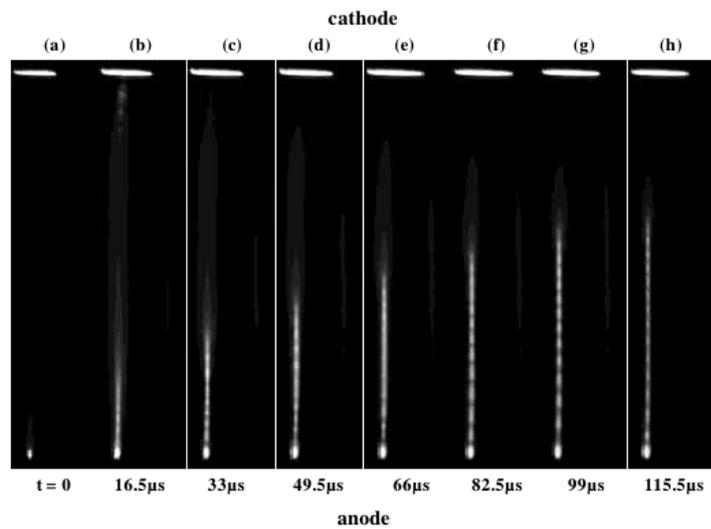


FIGURE 5.24 – Images de la caméra rapide en rapport avec les intervalles de la figure 5.23 lors d'une transition

fonction de la distance, et ce quel que soit l'amplitude de l'échelon de courant. En extrapolant ces courbes vers une distance fictive interélectrode nulle, les trois courbes tendent vers une valeur commune proche de 50ns. Ce temps est peut être caractéristique des phénomènes se produisant aux électrodes (typiquement un changement d'émission électronique à la cathode). La dépendance linéaire entre le temps de transition et la distance interélectrode d'une part et le courant de décharge d'autre part semble suggérer un mécanisme propagatif dépendant de la distance et du degré d'ionisation de la colonne. Ce phénomène propagatif a une vitesse constante seulement fonction du courant de décharge. Finalement un temps de propagation de l'ordre de quelques centaines de nanosecondes semble être caractéristique dans les conditions de nos expériences.

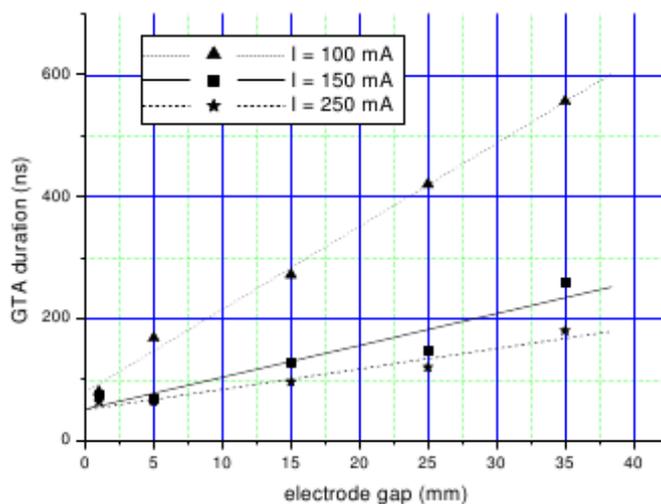


FIGURE 5.25 – Durée de la transition en fonction de la distance interélectrode

Finalement se pose la question de savoir quel est l'ordre temporel des mécanismes de transition glow-arc. Est-ce que les phénomènes à la cathode (constriction du pied cathodique) prennent place avant les modifications de la colonne positive ou est-ce que le filament doit être totalement propagé pour que la transition au pied cathodique ait lieu ? Pour répondre partiellement à cette question, un exemple significatif illustré sur la figure 5.26 a été trouvé. L'amplitude de l'échelon de courant est de 80mA pour une distance interélectrode de 25mm et une pression de 100mbar. Dans ces conditions, on peut observer qu'un temps plus long est nécessaire pour établir un état similaire à ceux des figures 5.19 et 5.20. Les transitions spontanées liées à une baisse significative de la tension n'apparaissent qu'à partir de 2000 μ s. Les images prises à la caméra rapide sur la figure 5.26 montrent que différentes structures existent avant ce temps : la dé-

charge peut être partiellement filamenteuse avec un pied cathodique sous forme de spot sur les photographies (a) et (c), mais aussi partiellement filamenteuse avec un pied cathodique diffus. Les modifications du pied cathodique sont donc possibles même si la décharge n'a pas atteint un aspect complètement filamenteuse. En effet sur les images le pied cathodique oscille entre un spot et un mode diffus durant le temps de propagation du filament au sein de l'espace interélectrode. En conclusion nous pouvons avancer l'hypothèse que le développement filamenteuse complet n'est pas une condition nécessaire pour l'établissement d'un spot cathodique, mais aussi que celui-ci n'est pas une condition suffisante pour mener à une transition complète à l'arc. L'arc électrique nécessite donc une nouvelle définition structurelle : la colonne de décharge doit être totalement filamenteuse et le pied cathodique doit être sous la forme d'un spot (constriction du pied cathodique).

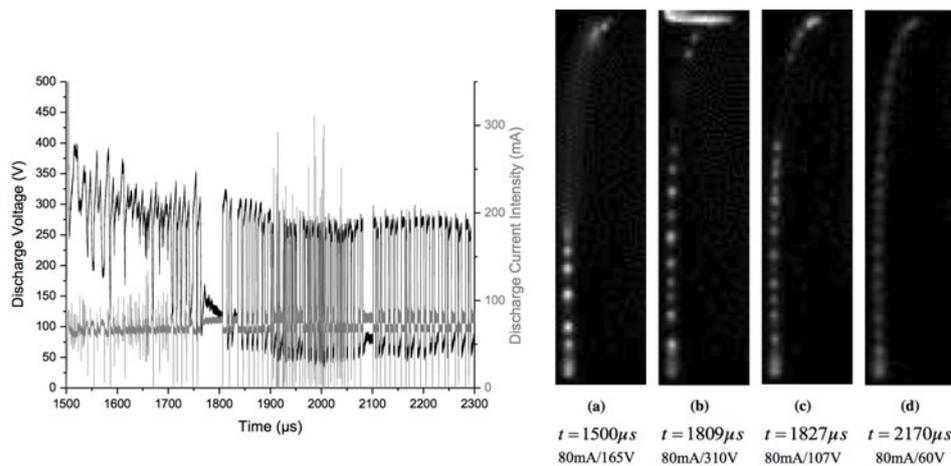


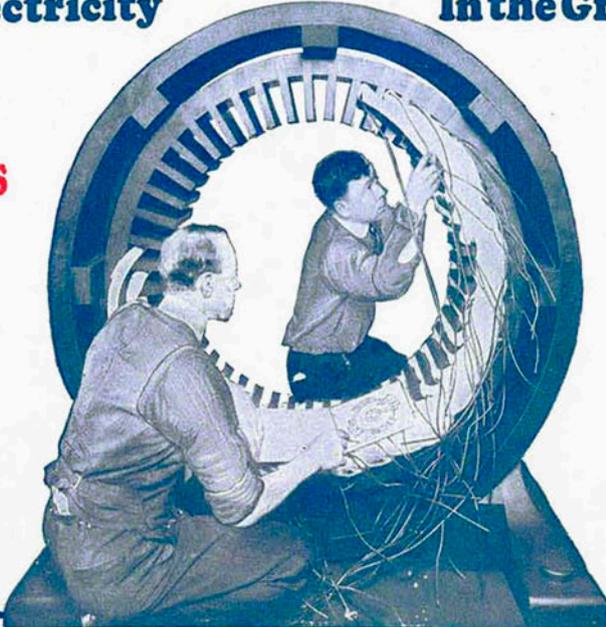
FIGURE 5.26 – Tension et courant de décharge pour une série de transitions glow-arc et arc-glow spontanées et réversibles

Pour être totalement complet ce modèle comportemental exposé ici devra être étendu à un modèle comprenant et expliquant en détail les mécanismes internes qui conduisent ces transitions.

FREE RAILROAD FARE

Learn Electricity **In the Great Shops of**

**In 12
Weeks
—
Earn
\$60
to
\$200 a
Week**



COYNE

IMPORTANT NOTE: COYNE does not teach by correspondence but by practical, personal training in the great COYNE Shops

MAKE this the most profitable and enjoyable season of your life. Come to Chicago, on beautiful Lake Michigan, the greatest Spring and Summer Resort City in the country and the Greatest Electrical Center in the World. Twelve weeks from now you can be an *Electrical Expert* no matter what you are doing today. I stake my reputation and

that of the great Million Dollar Institution I head, with its 28 years of honest successful methods. I have started thousands of men, young and old, on the road to real success and happiness. I can do the same for you. I'll pay your Railroad Fare from any place in the United States. Clip Coupon NOW for Full Particulars, and for my Big, New, Free Book. Don't miss this opportunity.

Learn in Chicago, the Electrical Center of the World Master Electricity right in the Electrical Center of the World. You see everything Electrical here. Along with my Shop Training you visit the big organizations and power plants—you see the greatest electrical plants in the world.

Complete Electrical Training in 12 Weeks

Get my Free Book. See how I train you for the Big Jobs in Electricity by actual work on the largest outlay of Electrical Machinery in any school in the country. Everything from Doorbells to Power Plants. Everything to make you an Electrical Expert, ready to step right into a position paying from \$60 to \$200 a week.

perience you have had, or what kind of work you are doing now, I'll make you an Electrical Expert through the Coyne LEARN-BY-DOING METHOD! I've done it for thousands. I will do it for you. Send for my Big Free Book. See how great is the demand for Coyne Trained Electrical Experts.

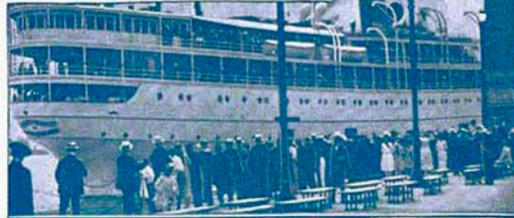
part of your expenses and assists you to a good job on graduation. This great organization will always be behind you.

Great Summer Resort City Chicago, on beautiful Lake Michigan, is the Nation's Spring and Summer Playground. Free Bathing Beaches. Beautiful Parks, Excursion Boats and the great Municipal Pier, Zoos, Ball Parks. The daylight saving plan makes it possible for you to enjoy all this, and still have plenty of time for your electrical education.

You Don't Need Education or Experience It makes no difference how little Education, Mathematics or Ex-

Earn While You Learn My Employment Department helps you get a job to earn a good

Hear Coyne on the Air—
WGES—250 Meters
Hear the Coyne Radio Station on the air each night. Always an interesting program. Listen to the famous COYNE student orchestra and other talented students.



SPECIAL OFFER
I Pay Your Railroad Fare

Radio and Auto Courses Included FREE!

I'll pay your Railroad fare to Chicago from any place in the U. S. if you act quick. And right now I am including absolutely free of extra charge my complete Radio Course and Auto, Truck and Tractor Electricity.

Clip Coupon Now!

Send Coupon NOW for my Big New FREE Electrical Book

Right now I am making the greatest offer ever made by a Practical Training Institution. Even if you are not planning on coming right now don't delay a single minute. Send coupon right away for full details. No obligation at all. Remember Coyne is a School with an established reputation. Endorsed by Electrical Industry. Backed by over a Quarter of a Century of Success. You owe it to yourself to investigate. Act NOW!

SUCCESS COUPON

H. C. LEWIS, President,
COYNE ELECTRICAL SCHOOL
1300-10 W. Harrison Street
Dept. 1304 Chicago, Illinois

Dear H.C.—I sure want one of those big handsome 12x15 books, with 151 actual photographs printed in two colors. Send it quick. I'll be looking for it on the next mail. I want the facts without placing me under any obligation. Be sure and tell me all about the *Free Railroad Fare* and *Two Free Courses*.

Name.....
Address.....

H. C. LEWIS President
COYNE FOUNDED 1899
ELECTRICAL SCHOOL
Dept. 1304 1300-10 W. Harrison St., CHICAGO, ILL.

Not a Correspondence Course; All Practical, Personal Training!

FIGURE 5.27 – Amazing Stories avril 1926

Chapitre 6

Conclusion générale et perspectives scientifiques

6.1 Conclusion

Ce mémoire en vue de l'obtention de l'habilitation à diriger les recherches à fait l'objet d'un découpage en 3 parties. La première sur la modélisation et l'optimisation des grands réseaux électriques, la deuxième sur l'optimisation systèmes des machines électriques et la dernière sur la modélisation des phénomènes physiques. Ces trois approches de l'électrotechnique, à première vue différentes, sont associées par la volonté de réaliser des optimisations et modélisations globales des systèmes. Pour cela, il faut développer des algorithmes performants, tant du point de vue des résultats que de la rapidité de calcul. Cela passe par une phase de développement sur des cas simples et des exemples concrets déjà résolus. Pour bien poser les problèmes d'optimisation, il faut de plus avoir une connaissance approfondie des phénomènes physiques. C'est pourquoi nous avons notamment continué à travailler sur les mécanismes de claquage dans les gaz isolants, ceci en vue de bien comprendre les contraintes posés lors des optimisations.

6.2 Perspectives scientifiques

Mes travaux de recherche, tels que déjà présentés, ont portés sur le développement de modèles et d'algorithmes d'optimisation appliqués à plusieurs domaines d'étude. À court et moyen termes, mes perspectives de recherche se structurent autour de deux principaux axes de travail : l'optimisation dans le domaine de l'énergie, en particulier des systèmes d'entraînement, et la modélisation par simulations numériques appliquée à la physique des plasmas.

L'objet du présent document est de présenter l'intérêt porté pour ces thématiques, de développer les orientations de recherche envisagées dans le cadre de thèses en cours et programmées, et de mentionner les collaborations mises en place, ainsi que les moyens qui seront déployés.

6.2.1 Optimisation des systèmes d'énergie

Le durcissement progressif du contexte réglementaire relatif aux émissions de gaz à effet de serre et les attentes croissantes de la société pour le développement d'innovations propres, conduisent les industriels à s'orienter vers l'utilisation de moteurs électriques. Au-delà de la motivation environnementale, ces technologies sont également utilisées en raison de leurs performances économiques. Les moteurs électriques investissent les différents compartiments des industries aéronautique, spatiale, navale et automobile, et les besoins de recherche, notamment d'optimisation, s'accroissent fortement.

Ainsi, les avionneurs tendent à remplacer la plupart des actionneurs hydrauliques par des chaînes de motorisations électriques, la conception navale cherche à remplacer les modes de propulsion thermiques par des groupes hybrides (puissance thermique et propulsion électrique). Ces deux derniers concepts sont souvent reconnus dans les termes avions ou bateaux tout (plus) électriques. Les constructeurs automobiles et leurs fournisseurs ont dans un premier temps cherché à remplacer ou créer des fonctions où l'électrification des organes tient une place centrale. Depuis quelques années compte tenu de la nécessité de réduire la consommation et les rejets de polluants atmosphériques, les moteurs électriques prennent leur place dans la propulsion du véhicule. La question de la masse ou du volume est critique dans l'aéronautique, alors que le coût de fabrication est un élément clef dans l'automobile.

Compte tenu de ce contexte, divers axes de recherches sont proposés. La prise en compte de nouveaux modèles physiques comportementaux plus performants et plus précis va nécessiter une amélioration des algorithmes d'optimisation qui devront être eux aussi plus précis et surtout plus rapides. En effet, la prise en compte de la mécanique (transformateurs et réducteurs) et de l'électronique de puissance est encore réalisée de manière trop simple. Pour la partie mécanique, il va nous falloir faire des rapprochements avec des spécialistes de la conception mécanique pour réaliser des modèles plus complexes des transformateurs de mouvement. La modélisation de l'électronique de puissance en vue de son incorporation dans l'optimisation devrait elle se faire rapidement en collaboration avec Pierre Lefranc du département Énergie de Supélec.

La complexification des modèles va nécessiter de travailler sur les algorithmes d'optimisation afin de les rendre plus performants. De ce point de vue, la première amélioration à apporter est de bénéficier de l'augmentation du nombre

de cœurs de calcul au sein des ordinateurs modernes ainsi que du calcul sur architectures parallèles. Un tel *cluster* de machines est déjà en place à Supélec, nous projetons donc de paralléliser les codes déjà existants sur cette architecture. Les algorithmes stochastiques du type algorithme génétique forment un très bon exemple au vu de leur caractère massivement parallèle. Des premiers essais d'accélération de calcul seront réalisés très prochainement lors de la thèse de Benjamin Dagusé.

Une seconde piste de recherche est de s'orienter vers des optimisations où la fonction objectif n'est plus sous forme analytique (ou simple), mais représentée comme le résultat de calculs par éléments finis (calcul du couple d'une machine par exemple). De telles optimisations ne peuvent être menées à l'aide des algorithmes classiques, il est donc nécessaire d'inventer de nouvelles approches. Une piste possible est l'utilisation de méthodes où le nombre d'évaluations de la fonction coût est minimisé pour rendre l'optimisation dans un temps de calcul raisonnable. Ces méthodes font appel à des techniques d'approximation de la fonction coût, cette approximation étant raffinée au fur et à mesure des itérations uniquement aux endroits de l'optimum probable. Ces développements feront l'objet d'une collaboration avec le département Signaux et Systèmes Électroniques et la chaire de Systèmes analogiques complexes à Supélec.

Ces nouvelles méthodes d'optimisation, après validation sur les systèmes d'entraînement électriques, seront appliquées à l'électronique de puissance, en particulier à la problématique du placement routage de composants sur une carte électronique. En effet, le placement de composants a un effet direct sur les couplages inductifs et sur l'échauffement du dispositif. Il est donc nécessaire par le biais de simulations et d'optimisations de trouver le placement des composants minimisant les fuites et l'échauffement. L'analyse thermique et électromagnétique ne peut être faite de manière précise que par éléments-finis, ce qui correspond bien au thème de recherche présenté. La problématique ici sera renforcée par le grand nombre de degrés de libertés présents sur le système.

6.2.2 Modélisation des processus plasmas

La physique des plasmas et plus précisément des décharges électriques est relativement bien connue, mais sa modélisation fine par le biais de simulations numériques est encore une question non totalement résolue. En effet, le couplage de la dynamique des décharges avec le circuit électrique, et de la dynamique des gaz avec la cinétique chimique des réactions restent encore des enjeux scientifiques majeurs. C'est pourquoi dans le cadre d'un dépôt de projet ANR, nous nous proposons d'étudier ces couplages au sein d'une collaboration entre plusieurs laboratoires. Ce projet vise à la réalisation d'un logiciel de simulation comportant une phase de simulation du passage de la décharge dans un gaz qui

se couplerait à des codes de simulation d'expansion hydrodynamique et de cinétique chimique. Toutes ces modélisations seront alimentées par des données expérimentales réalisées pour ce projet. Le contexte de cette étude s'inscrit dans un cadre environnemental de la réduction des composés polluants dans des gaz. Ma participation à ce projet portera sur la modélisation de la phase de décharge. La multiplication de la puissance des calculateurs rend possible la simulation en trois dimensions de la décharge, ainsi que l'utilisation de codes de calculs par éléments finis ou par des méthodes mixtes du type ELLAM (*Euler Lagrange Local Adjoint Methods*). Ces algorithmes couplent des méthodes de résolution par éléments finis avec des méthodes des caractéristiques, permettant ainsi d'utiliser des géométries complexes tout en gardant les avantages des méthodes des caractéristiques pour la modélisation des équations fluides de conservation. En complément, il sera nécessaire de paralléliser ces codes de calcul.

Une deuxième collaboration vient de débiter avec le laboratoire EM2C de l'École Centrale de Paris par le biais du co-encadrement d'une thèse portant sur l'étude de l'efficacité des plasmas froids pour la production d'hydrogène. L'utilisation de l'hydrogène comme vecteur d'énergie prend une importance croissante en raison de la nécessité du stockage d'énergie pour l'application aux transports et l'utilisation de sources d'énergie renouvelables. La production efficace d'hydrogène devient donc un enjeu majeur. Plusieurs techniques et procédés de production existent aujourd'hui, mais la recherche de technologies alternatives plus efficaces d'un point de vue énergétique demeure très active. Ainsi les plasmas froids à pression atmosphérique pourraient constituer une technologie prometteuse. En parallèle avec une approche expérimentale qui permettra de mieux décrire les phénomènes mis en jeu dans les réacteurs à plasma, un modèle thermique et physique décrivant les mécanismes d'interactions entre la décharge et les hydrocarbures légers sera développé et validé face à ces expériences. Cette double approche de modélisation et d'expérimentation permettra ensuite d'optimiser l'efficacité énergétique de la production d'hydrogène.

Enfin, une thèse sur l'étude du courant noir par une surface soumise à un champ électrique intense et des mécanismes de transition à l'arc vient de débiter, en partenariat avec Philippe Testé du Laboratoire de Génie Électrique de Paris et Emmanuel Odic du département Énergie de Supélec. Dans divers dispositifs mettant en œuvre des champs électriques élevés et des pressions réduites tels que les accélérateurs de particules (accélérateur de neutres pour ITER par exemple), il apparaît parfois des courants non prévus. Ces courants sont appelés *courants noirs* et sont susceptibles de fortement dégrader les performances du dispositif. Divers phénomènes peuvent contribuer à l'émission de ces courants. L'objectif de l'étude expérimentale sera d'une part d'identifier les paramètres dominants conduisant à l'établissement du courant noir dont on proposera un modèle physique, et d'autre part d'élaborer des solutions permettant de réduire

ce phénomène. Dans un second temps les conditions de passage à l'arc seront étudiées par le biais d'une modélisation qui permettra de proposer un scénario expliquant la transition brutale de l'émission électronique à l'arc électrique.

6.2.3 Conclusions

Ces perspectives de recherche s'inscrivent dans le cadre vaste de l'optimisation et la modélisation des systèmes d'énergie. Deux domaines sont présentés, le premier traite de l'optimisation des systèmes de conversion de l'énergie (entraînement électrique et électronique de puissance) et le second de la physique des plasmas. La complexification de ces modèles passe bien sûr par une phase d'analyse physique de compréhension des phénomènes. Une caractéristique commune à ces deux axes de recherche est la nécessaire augmentation des coûts de calculs liés à la complexification des modèles en cours de développement. Pour remédier à cette difficulté, diverses pistes sont envisagées : algorithmes innovants et parallélisation des codes de calcul.

Get the Book

That Doubled Stephens' Pay in 7 Months—Boosted Everett from \$125 a Month to \$550, and has helped THOUSANDS of others

Sent Free ~ Mail Coupon!

Here is an *unusual* book—different from any you have ever read. It tells how men make more money, and make it more quickly than any other way.

Thousands of men have sent for it and found it the shortest route to a better job at bigger pay. Maybe it will help you, like it helped Stephens, Everett and Lamb. But don't miss this opportunity to find out. The coupon in the corner will bring it to you at once—by special delivery mail—so you can decide right away, for yourself, just what this book can do for you.



Doubles His Pay in 7 Months
"Mr. Cooke, I was a common laborer at \$24 a week when I enrolled with you. In seven months your training doubled my pay to over \$50 a week, and it is going up all the time. Your book, 'The Secrets of Success in Electricity,' started me on the right road."
W. H. Stephens, Electrical Contractor,
Fort Edward, N. Y.

Thousands of men have sent for it and found it the shortest route to a better job at bigger pay. Maybe it will help you, like it helped Stephens, Everett and Lamb. But don't miss this opportunity to find out. The coupon in the corner will bring it to you at once—by special delivery mail—so you can decide right away, for yourself, just what this book can do for you.



Coal Miner Becomes Electrical Expert
"I was loading coal at \$5 a day when your book came to my attention. It changed my whole future. Now I earn more than \$550 a month counting my spare time profits. Here is a picture of the new Studebaker Special Six I just bought with my electrical earnings."
Carl Everett, L. Box, 5-18, Danville, Ill.

Thousands of men have sent for it and found it the shortest route to a better job at bigger pay. Maybe it will help you, like it helped Stephens, Everett and Lamb. But don't miss this opportunity to find out. The coupon in the corner will bring it to you at once—by special delivery mail—so you can decide right away, for yourself, just what this book can do for you.

The Key to the World's Fastest Growing Profession

"The Secrets of Success in Electricity," by Chief Engineer Cooke, tells you in simple language, all about the wonderful new opportunities in Electricity and all about its opportunities for you.

Men of all ages, with or without electrical experience, are urged to send for this book. Don't lose this chance to learn what others have done in Electricity, the greatest and fastest growing field in the world. 150 pictures—nearly 100 stories of success and how it was achieved—dozens of different electrical jobs and positions fully described—you get all these in Chief Engineer Cooke's big book. Clip coupon for your free copy.

Thousands of men have sent for it and found it the shortest route to a better job at bigger pay. Maybe it will help you, like it helped Stephens, Everett and Lamb. But don't miss this opportunity to find out. The coupon in the corner will bring it to you at once—by special delivery mail—so you can decide right away, for yourself, just what this book can do for you.

Pay Tripled Since Enrolling

"Since starting your course, my pay has gone up to over three times what it was before. You have lived up to every promise you made to me, and done much more besides. I can never thank you enough for all you have done for me."
R. A. Lamb,
2101 W. Baltimore St.,
Baltimore, Md.

L. L. Cooke, Chief Engineer
L. L. Cooke School of Electricity
Owned and Operated by
Chicago Engineering Works
INCORPORATED
2150 Lawrence Ave.
Chicago



MAIL THIS NOW!

Chief Engineer Cooke,
Chicago Engineering Works, Inc.,
Dept. 159
2150 Lawrence Ave., Chicago

Please send me at once your free book, "The Secrets of Success in Electricity" and full particulars of your method of training men for responsible electrical positions. This request does not obligate me in any way and no salesman or agent is to call.

Name.....
Address.....
City.....State.....

FIGURE 6.1 – Amazing Stories décembre 1926

Troisième partie
Bibliographie

Chapitre 7

Production scientifique

7.1 Tableau récapitulatif

- Revues avec comité de lecture : 8 ;
- actes de conférences éditées et conférences invitées : 6 ;
- congrès avec actes : 44 ;
- communications : 2 ;
- articles acceptés en cours de publication : 1 ;
- articles soumis en cours de relecture : 2.

7.2 Actes de conférences éditées, conférences invitées et chapitres de livres

- [1] XAVIER JANNOT, PHILIPPE DESSANTE, PIERRE VIDAL ET JEAN-CLAUDE VANNIER, *Optimization of wound rotor synchronous generators based on genetic algorithm*, in Computational Methods for the Innovative Design of Electrical Devices., vol. 327 de Studies in Computational Intelligence, Springer Verlag, 2010, p. 87–113.
- [2] E. MARODE, D. DJERMOUNE, P. DESSANTE, C. DENISET, P. SÉGUR, F. BASTIEN, A. BOURDON ET C. LAUX, *Physics and applications of atmospheric non-thermal air plasma with reference to environment*, in 36th EPS Conference on Plasma Physics, Sofia, Bulgaria, 2009, 17 pages.
- [3] A. GOLDMAN, M. GOLDMAN, E. ODIC ET P. DESSANTE, *Partial discharges inception and ageing effects in a gas insulated HV equipment*, in Proc. Gaseous dielectrics 2008, Cardiff Royaume-Uni, 2008, p. 49 – 56.
- [4] N. BELLEGARDE, P. DESSANTE, P. VIDAL ET J.-C. VANNIER, *Optimisation of a drive system and its epicyclic gear set*, in Intelligent Computer Techniques

in Applied Electromagnetics, vol. 119, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2008, p. 241–248.

- [5] P. DESSANTE, J. VANNIER ET C. RIPOLL, *Optimization of a linear brushless DC motor drive*, in Recent Developments of Electrical Drives, Springer Netherlands, Dordrecht, 2006, p. 127–136.
- [6] P. DESSANTE, J. VANNIER ET B. BONAFOS, *Active shielding optimisation*, in Computer Engineering in Applied Electromagnetism, Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg, 2005, p. 35–40.

7.3 Revues internationales avec comité de lecture

- [7] P. LEFRANC, X. JANNOT ET P. DESSANTE, *Virtual prototyping and pre-sizing methodology for buck DC-DC converters using genetic algorithms*, Power Electronics, IET, 5 (2012), p. 41–52.
- [8] G. SANDOU, H. BORSENBERGER ET P. DESSANTE, *Unit commitment with production cost uncertainty : A recourse programming method*, Journal of Energy and Power Engineering, 5 (2011), p. 164–172.
- [9] V. RIOUS, J.-M. GLACHANT, Y. PEREZ ET P. DESSANTE, *L'insuffisance des signaux de localisation pour la coordination entre la production et le transport d'électricité dans les systèmes électriques libéralisés*, Revue Économique, 60 (2009), p. 819–829.
- [10] E. MARODE, D. DJERMOUNE, P. DESSANTE, C. DENISET, P. SÉGUR, F. BASTIEN, A. BOURDON ET C. LAUX, *Physics and applications of atmospheric non-thermal air plasma with reference to environment*, Plasma Physics and Controlled Fusion (IF 2,4), 51 (2009), p. 124002, 15 pages.
- [11] V. RIOUS, J.-M. GLACHANT, Y. PEREZ ET P. DESSANTE, *The diversity of design of TSOs*, Energy Policy (IF 2,4), 36 (2008), p. 3323–3332.
- [12] J. MENDOZA, R. LOPEZ, D. MORALES, E. LOPEZ, P. DESSANTE ET R. MORAGA, *Minimal loss reconfiguration using genetic algorithms with restricted population and addressed operators : Real application*, IEEE Transactions on power systems (1,94), 21 (2006), p. 948–954.
- [13] E. ODIC, M. DHAINAUT, A. GOLDMAN, M. GOLDMAN ET P. DESSANTE, *Study in space and time of the gas temperature variations in dielectric barrier discharge reactors*, Journal of Advanced Oxidation Technologies (IF 0,79), 8 (2005), p. 133–141.
- [14] S. DELADREUE, P. DESSANTE, F. BROUAYE ET P. BASTARD, *Using cluster analysis in power system planning under uncertainty*, Engineering Intelligent Systems for Electrical Engineering and Communications (IF 0,2), 11 (2003), p. 187–92.

7.3.1 Conférences internationales avec comité de lecture

- [15] P. MOLINIÉ, R. HANNA, T. PAULMIER, B. DIRASSEN, P. DESSANTE, M. BELHAJ, D. PAYAN ET N. BALCON, *Polyimide and FEP charging behavior under multienergetic Electron-Beam irradiation : Experiments and a simple model*, in 14th International Symposium on Electrets ISE14, Montpellier, France, 2011, 7 pages.
- [16] R. LANDFRIED, R. ANDLAUER, P. DESSANTE, M. KIRCKPATRICK, T. LEBLANC, E. ODIC ET P. TESTÉ, *Investigation of a glow discharge structure in 100 mbar argon*, in 30th International Conference on Phenomena in Ionized Gases ICPIG, Belfast, Northern Ireland, UK, sept. 2011, 3 pages.
- [17] C. GUTFRIND, J. VANNIER, P. VIDAL ET P. DESSANTE, *Analytical study of an optimized limited motion actuator used in engine combustive flow regulation*, in XV International Symposium on Electromagnetic Fields in Mechatronics, Electrical and Electronic Engineering ISEF2011, Funchal, Portugal, sept. 2011, 9 pages.
- [18] B. DAGUSÉ, P. DESSANTE, P. VIDAL, J. VANNIER, J. SAINT-MICHEL ET J. THOMAS, *Optimization and comparison of optimal saliency permanent magnet synchronous machines for electric vehicle application*, in XV International Symposium on Electromagnetic Fields in Mechatronics, Electrical and Electronic Engineering ISEF2011, Funchal, Portugal, sept. 2011, 8 pages.
- [19] V. RIOUS, J. GLACHANT ET P. DESSANTE, *Transmission network investment as an anticipation problem*, in DIME Workshop "The changing Governance of Network Industries", Naples, Italie, avril 2010, 32 pages.
- [20] M. PETIT ET P. DESSANTE, *Modeling and experimental set-up of an automotive electrical network for transient studies*, in International Conference on Electrical Machines, ICEM2010, Rome, Italy, sept. 2010, 6 pages.
- [21] H. BORSENBERGER, P. DESSANTE ET G. SANDOU, *Unit commitment with production cost uncertainty, a recourse programming method*, in IFAC Conference on Control Methodologies and Technology for Energy Efficiency, Vilamoura, Portugal, mars 2010, 5 pages.
- [22] V. RIOUS, J. GLACHANT, Y. PEREZ ET P. DESSANTE, *The role of transmission investment in the coordination between generation and transmission in the liberalized power systems*, in 32nd IAEE International Conference, San Francisco, California, USA, juin 2009, 9 pages.
- [23] V. RIOUS ET P. DESSANTE, *Real gains from flow-based methods for allocating power transmission capacity in europe*, in 6th International Conference on the European Energy Market, Leuven Belgique, avril 2009, 6 pages.

- [24] V. RIOUS, J. GLACHANT, Y. PEREZ ET P. DESSANTE, *The role of transmission investment in the coordination between generation and transmission in the liberalized power systems*, in 13th Annual Conference of The International Society for New Institutional Economic, Berkeley, USA, juin 2009, 9 pages.
- [25] M. PETIT, P. DESSANTE ET E. LAURAIN, *Modélisation et simulation en régime dynamique d'un réseau de bord automobile*, in Électrotechnique du Futur, EF'2009, Compiègne France, sept. 2009, 8 pages.
- [26] S. M'RAD, P. LEFRANC, P. DESSANTE, P. CHIOZZI, G. BLONDEL, M. FAKES ET P. MASSON, *A compact transient electrothermal model for integrated power systems : Automotive application*, in IECON'09 Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Porto : Portugal, nov. 2009, p. 3755 – 3760.
- [27] X. JANNOT, K. GAUDEFROY, N. VINEL, P. VIDAL ET P. DESSANTE, *Optimal design of a wound rotor synchronous generator using genetic algorithm*, in ISEF 2009 - XIV International Symposium on Electromagnetic Fields in Mechatronics, Electrical and Electronic Engineering, Arras, France, sept. 2009, 6 pages.
- [28] V. RIOUS, J. USAOLA, M. SAGUAN, J. GLACHANT ET P. DESSANTE, *Assessing available transfer capacity on a realistic european network : Impact of assumptions on wind power generation*, in Proceedings of the Conference : "Building Networks for a Brighter Future" 1st International scientific conference, Rotterdam Pays-Bas, 2008, 6 pages.
- [29] V. RIOUS, Y. PEREZ ET P. DESSANTE, *The efficiency of short run and long run locational signals to coordinate generation location with lumpy transmission investments*, in Proceedings of the 31st IAEE International Conference. Bridging Energy Supply and Demand : Logistics, Competition and Environment, Istanbul Turquie, juin 2008, 21 pages.
- [30] V. RIOUS, J. GLACHANT, Y. PEREZ ET P. DESSANTE, *The role of transmission investment in the coordination between generation and transmission in the liberalized power systems*, in 7th Conference on Applied Infrastructure Research, Berlin Germany, oct. 2008, 9 pages.
- [31] V. RIOUS, J. M. GLACHANT, Y. PEREZ ET P. DESSANTE, *Le rôle de l'investissement réseaux dans la coordination entre la production et le transport d'électricité dans les systèmes électriques libéralisés*, in 57ème Congrès Annuel de l'Association Française de Sciences Economiques (AFSE), Paris, France, sept. 2008, 10 pages.
- [32] V. RIOUS, J. GLACHANT, Y. PEREZ ET P. DESSANTE, *Anticipation for efficient electricity transmission network investments*, in Infrastructure Systems and

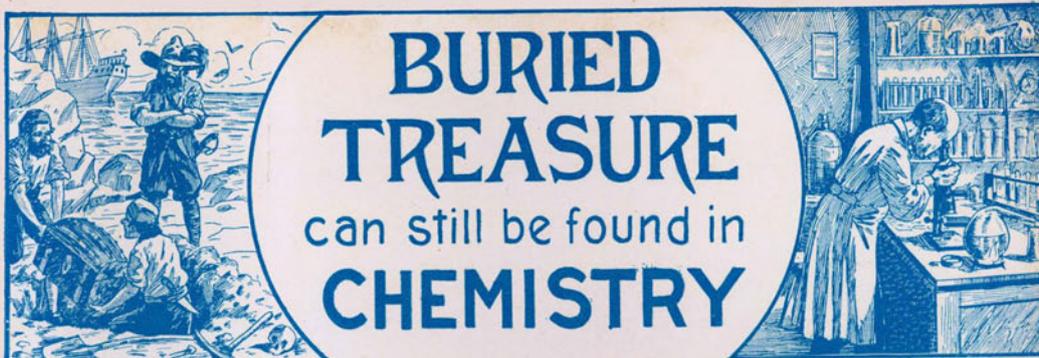
- Services : Building Networks for a Brighter Future (INFRA), 2008 First International Conference on, Rotterdam Pays-Bas, 2008, 6 pages.
- [33] V. RIOUS, Y. PHULPIN, F. PETIT, P. DESSANTE ET M. SAGUAN, *A contribution in experimental economics to classify market power behaviors in an oligopolistic power market*, in 5th International Conference on the European Electricity Market, Lisbon, PORTUGAL, mai 2008, IEEE, p. 271–276.
- [34] V. RIOUS, Y. PEREZ ET P. DESSANTE, *Is combination of nodal pricing and average participation tariff the best solution to coordinate the location of power plants with lumpy transmission investments ?*, in Proceedings of The Economics of Energy Market, Toulouse France, juin 2008, 23 pages.
- [35] W. FRELIN, M. PETIT, J. VANNIER, L. BERTHET ET P. DESSANTE, *Evaluation of thermal heating in LV-cable in presence of harmonics, using FEM methods*, in International Conference on Electrical Machines, ICEM2008, Villamoura Portugal, 2008, 6 pages.
- [36] H. BAYEM, M. PETIT, P. DESSANTE, F. DUFOURD ET R. BELHOMME, *Wind integration study for an island network using a probabilistic tool*, in Proceedings of European Wind Energy European Wind Energy Conference & Exhibition, EWEC, Bruxelles Belgique, 2008, 8 pages.
- [37] H. BAYEM, Y. PHULPIN, P. DESSANTE ET J. BECT, *Probabilistic computation of a wind farm generation based on wind turbine dynamic modeling*, in 10th International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems, PMAPS, Rincon, PR, mai 2008, IEEE, p. 517–522.
- [38] V. RIOUS ET P. DESSANTE, *A limited place for competition to develop the power transmission network*, in 9th IAEE European Energy Conference : Energy Markets and Sustainability in a Larger Europe, Florence, Italie, juin 2007, 19 pages.
- [39] F. PETIT, Y. PHULPIN, P. DESSANTE ET J. GLACHANT, *A contribution of experimental economics toward characterization of the use of market power in oligopolistic markets*, in 9th IAEE European Energy Conference : Energy Markets and Sustainability in a Larger Europe, Florence, Italie, juin 2007, 12 pages.
- [40] F. MAUPAS, P. DESSANTE ET J. GLACHANT, *Definition and controllability of wind power integration cost*, in 9th IAEE European Energy Conference : Energy Markets and Sustainability in a Larger Europe, Florence, Italie, juin 2007, 15 pages.
- [41] M. LOPEZ, P. DESSANTE, D. MORALES, J. VANNIER ET D. SADARNAC, *Optimisation of a small non controlled wind energy conversion system for Stand-Alone applications*, in International Conference on Renewable Energies and Power Quality, ICREPQ, Seville Espagne, mars 2007, 5 pages.

- [42] N. BELLEGARDE, J. VANNIER, P. VIDAL ET P. DESSANTE, *Multi objective optimisation of an electromagnetic valve actuator*, in Sensors and Actuators for Advanced Powertrain Application, SENSACT2007, Gif sur Yvette, France, oct. 2007, 6 pages.
- [43] N. BELLEGARDE, P. DESSANTE, P. VIDAL ET J. VANNIER, *Optimisation of a drive system and its epicyclic gear set*, in International Simposium on Electromagnetic Field, ISEF2007, Prague, République Tchèque, sept. 2007, 6 pages.
- [44] H. BAYEM, M. PETIT, P. DESSANTE, F. DUFOUR ET R. BELHOMME, *Probabilistic characterisation of wind farms for grid connection studies*, in European Wind Energy Conference & Exhibition, EWEC, Milan, Italie, mai 2007, 8 pages.
- [45] M. SAGUAN, J. GLACHANT ET P. DESSANTE, *Assessing economic consequences of the european electricity market design choices : The case of balancing mechanism*, in 29th IAEE (International Association for Energy Economics) International Conference, Berlin Germany, 2006, 20 pages.
- [46] M. SAGUAN, N. KESERIC, P. DESSANTE ET J. GLACHANT, *Market power in power markets : Game theory vs. agent-based approach*, in IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition Latin America, Caracas, VENEZUELA, août 2006, p. 1081–1086.
- [47] M. SAGUAN, J. GLACHANT ET P. DESSANTE, *Risk management and optimal hedging in electricity forward markets coupled with a balancing mechanism*, in 2006 International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems, Stockholm, SWEDEN, juin 2006, IEEE, p. 917–922.
- [48] M. BENSETTI, P. DESSANTE, P. VIDAL ET J. VANNIER, *Study and optimisation of an electrical generator with original structure*, in XVII International Conference on Electrical Machines, ICEM, Chania, Crete, Greece, 2006, 5 pages.
- [49] P. DESSANTE, J. VANNIER ET P. VIDAL, *Optimisation of a linear brushless dc moteur drive and the associated power supply*, in Fifth Symposium on the all-electric ship, AES2005, Versailles, France, oct. 2005, 5 pages.
- [50] M. SAGUAN, S. PLUMEL, P. DESSANTE, J. GLACHANT ET P. BASTARD, *Genetic algorithm associated to game theory in congestion management*, in 2004 International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems, PMAPS 2004, Ames, IA, USA, 2004, p. 415–20.
- [51] P. DESSANTE, J. VANNIER ET C. RIPOLL, *Optimisation of a linear brushless DC motor drive*, in 16th International Conference on Electrical Machines, ICEM 2004, Cracow, Poland, sept. 2004, Institute of Mechatronics and Information Systems, 5 pages.
- [52] J. VANNIER, P. VIDAL ET P. DESSANTE, *Optimisation d'un ensemble convertisseur, actionneur électrique et pompe pour un système d'alimentation en*

- carburant*, in *Électrotechnique du Futur*, EF'2003, Supélec, Gif-sur-Yvette, France, 2003, 7 pages.
- [53] M. DHAINAUT, E. ODIC, P. BUIN, P. HERZOG, M. GOLDMAN, A. GOLDMAN, P. DESSANTE ET C. KARIMI, *From acoustic waves to the gas temperature in a point-to-plane dielectric barrier discharge in air at atmospheric pressure*, in 16th International Symposium on Plasma Chemistry, ISPC, Taormina, Italy, 2003, 6 pages.
- [54] P. DESSANTE, J. VANNIER ET B. BONAFOS, *Active shielding optimisation*, in 11th International Symposium on Electromagnetic Fields in Electrical Engineering, ISEF 2003, Maribor, Slovénie, sept. 2003, p. 631–636.
- [55] P. DESSANTE ET E. MARODE, *Modélisation d'une décharge électrique de type streamer en géométrie pointe-plan*, in *Électrotechnique du Futur*, EF'2003, Supélec, Gif-sur-Yvette, France, 2003, 6 pages.
- [56] B. BONAFOS, P. DESSANTE, J. VANNIER, P. LOGNONNE, J. KARCZEWSKI ET N. STIEBIG, *Analysis and parameter identification of a PM linear actuator for space application*, in International Symposium on Applied Electromagnetics and Mechanism, ISEM 2003, Versailles, France, 2003, p. 252–253.
- [57] S. DELADREUE, P. DESSANTE, F. BROUAYE ET P. BASTARD, *Using cluster analysis in power system planning under uncertainty*, in International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems, PMAPS 2002, Naples, Italie, sept. 2002, p. 479–483.
- [58] E. MARODE, P. DESSANTE, N. DESCHAMPS ET C. DENISET, *Diagnostics and modeling of high pressure streamer induced discharges*, in Spring Meeting on Diagnostics of Non-Equilibrium High Pressure Plasmas, Bad Honnef, Germany, 2001, Univ. Essen, p. 39–48.

7.4 Communications

- [59] H. BORSENBERGER, P. DESSANTE ET G. SANDOU, *Optimisation de la production dans un réseau d'énergie soumis à des incertitudes sur le coût de production*, in Recherche Opérationnelle et d'Aide à la Décision, ROADEF 2010, Toulouse, France, fév. 2010, 2 pages.
- [60] J. VANNIER, P. VIDAL, P. DESSANTE ET F. DUGUÉ, *Ensemble convertisseur actionneur électrique et pompe pour un système d'alimentation en carburant d'un satellite*, in Journées 2004 du club EEA, Cergy-Pontoise, France, mars 2004.



BURIED TREASURE can still be found in CHEMISTRY

Good Chemists Command High Salaries

and you can make yourself independent for life by unearthing one of chemistry's yet undiscovered secrets.



T. O'CONOR SLOANE
A.B., A.M., LL.D., Ph.D.
Noted Instructor, Lecturer and Author. Formerly Treasurer American Chemical Society and a practical chemist with many well known achievements to his credit. Not only has Dr. Sloane taught chemistry for years but he was for many years, engaged in commercial chemistry work.

Do you remember how the tales of pirate gold used to fire your imagination and make you want to sail the uncharted seas in search of treasure and adventure? And then you would regret that such things were no longer done. But that is a mistake. They *are* done—today and everyday—not on desert islands, but in the chemical laboratories throughout your own country. Quietly, systematically, the chemist works. His work is difficult, but more adventurous than the blood-curdling deeds of the Spanish Main. Instead of meeting an early and violent death on some forgotten shore, he gathers wealth and honor through his invaluable contributions to humanity. Alfred Nobel, the Swedish chemist who invented dynamite, made so many millions that the income alone from his bequests provides five \$40,000 prizes every year for the advancement of science and peace. C. M. Hall, the chemist who discovered how to manufacture aluminum made millions through this discovery. F. G. Cottrell, who devised a valuable process for recovering the waste from flue gases, James Gayley, who showed how to save enormous losses in steel manufacture, L. H. Bakeland, who invented Bakelite—these are only a few of the men to whom fortunes have come through their chemical achievements.

What Some of Our Students Say of This Course:

I have not written since I received the big set. I can still say that it far exceeded my anticipations. Since I have been studying with your school I have been appointed chemist for the Scranton Coal Co. testing all the coal and ash by proximate analysis. The lessons are helping me wonderfully, and the interesting way in which they are written makes me wait patiently for each lesson.—MORLAIS COUZENS.

I wish to express my appreciation of your prompt reply to my letter and to the recommendation to the General Electric Co. I intend to start the student engineering course at the works. This is somewhat along electrical lines, but the fact that I had a recommendation from a reliable school no doubt had considerable influence in helping me to secure the job.—H. VAN BENTHUYSEN.

So far I've been more than pleased with your course and am still doing nicely. I hope to be your honor graduate this year.—J. M. NORRIS, JR.

I find your course excellent and your instruction, truthfully, the clearest and best assembled I have ever taken, and yours is the fifth one I've studied.—JAMES J. KELLY.

From the time I was having Chemistry it has never been thus explained to me as it is now. I am recommending you highly to my friends, and urging them to become members of such an organization.—CHARLES BENJAMIN.

I shall always recommend your school to my friends and let them know how simple your lessons are.—C. J. AMDAHL.

I am more than pleased. You dig right in from the start. I am going to get somewhere with this course. I am so glad that I found you.—A. CAMEKON.

I use your lessons constantly as I find it more thorough than most text books I can secure.—W.M. H. TIBBS.

Thanking you for your lessons, which I find not only clear and concise, but wonderfully interesting. I am—ROBT. H. TRAYLOR.

I received employment in the Consolidated Gas Co. I appreciate very much the good service of the school when a recommendation was asked for.—JOS. DECKER.



Experimental Equipment Furnished to Every Student

We give to every student without additional charge this chemical equipment, including forty-nine pieces of laboratory apparatus and supplies, and forty different chemicals and reagents. These comprise the apparatus and chemicals used for the experimental work of the course. The fitted heavy wooden box serves not only as a case for the outfit but also as a useful laboratory accessory for performing countless experiments.

CHEMICAL INSTITUTE OF NEW YORK, Inc.

HOME EXTENSION DIVISION 9

66-A—WEST BROADWAY NEW YORK CITY

Now Is the Time to Study Chemistry

Not only are there boundless opportunities for amassing wealth in Chemistry, but the profession affords congenial employment at good salaries to hundreds of thousands who merely follow out its present applications. These applications are innumerable, touching intimately every business and every product in the world. The work of the chemist can hardly be called work at all. It is the keenest and most enjoyable kind of pleasure. The days in a chemical laboratory are filled with thrilling and delightful experimentation, with the alluring prospect of a discovery that may spell Fortune always at hand to spur your enthusiasm.

You Can Learn at Home

To qualify for this remarkable calling requires elaborate specialized training. Formerly it was necessary to attend a university for several years to acquire that training, but thanks to our highly perfected and thorough system of instruction, you can now stay at home, keep your position, and let us educate you in Chemistry during your spare time. Even with only common schooling you can take our course and equip yourself for immediate practical work in a chemical laboratory. Dr. Sloane gives every one of his students the same careful, personal supervision that made him celebrated throughout his long career as a college professor. Your instruction from the very beginning is made interesting and practical, and we supply you with apparatus and chemicals for performing the fascinating analyses and experimental work that plays such a large part in our method of teaching, and you are awarded the Institute's official diploma after you have satisfactorily completed the course.

Easy Monthly Payments

You don't have to have even the small price of the course to start. You can pay for it in small monthly amounts—so small that you won't feel them. The cost of our course is very low, and includes everything, even the chemistry outfit—there are no extras to buy with our course. Our plan of monthly payments places a chemical education within the reach of everyone. Write us and let us explain our plan in full—give us the opportunity of showing you how you can qualify for a highly trained technical position without even giving up your present employment.

Special 30 Day Offer

Besides furnishing the student with his Experimental Equipment, we are making an additional special offer for a short while only. You owe it to yourself to find out about it. Write today for full information and free book "Opportunities for Chemists." Send the coupon right now while it is fresh in your mind. Or just write your name and address on a postal and mail it to us. But whatever you do, act today before this offer is withdrawn.

DON'T WAIT—MAIL COUPON NOW!

CHEMICAL INSTITUTE OF NEW YORK Home Extension Division 9 66-A—West Broadway New York City

NAME

ADDRESS

CITY

STATE

A.S. Sept., '26

FIGURE 7.1 – Amazing Stories septembre 1926

Chapitre 8

Références bibliographiques

- [AP98] Joaquin Acevedo and Efstratios N. Pistikopoulos. Stochastic optimization based algorithms for process synthesis under uncertainty. *Computers & Chemical Engineering*, 22(4-5) :647–671, 1998.
- [BN99] A. Ben-Tal and A. Nemirovski. Robust solutions of uncertain linear programs. *Operations Research Letters*, 25(1) :1–13, August 1999.
- [BN02] Aharon Ben-Tal and Arkadi Nemirovski. Robust optimization ? methodology and applications. *Mathematical Programming*, 92 :453–480, May 2002.
- [DR97] Darinka Dentcheva and Werner Römisch. Optimal power generation under uncertainty via stochastic programming. In : *Stochastic Programming Methods and Technical Applications (K. Marti And P. Kall Eds.)*, *Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems*, 458 :22–56, 1997.
- [EF97] E.A.Amerasekera and F.N.Najm. *Failure Mechanisms in Semiconductor Devices, 2nd Edition*. WILEY, ISBN : 978-0-471-95482-8, 1997.
- [EKL] E.Zitzler, K.Deb, and L.Thiele. Comparison of multiobjective evolutionary algorithms : Empirical results. In *Evolutionary Computation 8, EC2000*.
- [GR] Nicole Gröwe-Kuska and Werner Römisch. Stochastic unit commitment in Hydro-Thermal power production planning.
- [HAD05] H.N.Nagaraja, A.Patra, and D.Kastha. Design optimization of coupled inductor multiphase synchronous buck converter. In *IEEE International Conference on Industrial Technology, ICIT'05*, Hong Kong, 14-17 December 2005. DOI : 10.1109/ICIT.2005.1600735.
- [KAST02] K.Deb, A.Pratap, S.Agrawal, and T.Meyarivan. A fast elitist non-dominated sorting genetic algorithm for multi-objective optimiza-

- tion : Nsga-ii. *IEEE Trans. on Evolutionary Computation*, 6(2) :182–197, April 2002.
- [KCPC09] K.Ejjabraoui, C.Larouci, P.Lefranc, and C.Marchand. A new pre-sizing approach of dc-dc converters, application to a boost converter for the automotive domain. In *35th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, IECON'09*, Porto, Portugal, November 2009.
- [PCW00] A.B. Philpott, M. Craddock, and H. Waterer. Hydro-electric unit commitment subject to uncertain demand. *European Journal of Operational Research*, 125(2) :410–424, September 2000.
- [Sah04] Nikolaos V Sahinidis. Optimization under uncertainty : State-of-the-art and opportunities. *COMPUTERS AND CHEMICAL ENGINEERING*, 28 :971–983, 2004.
- [TD03] T.C.Neugebauer and D.J.Perreault. Computer-aided optimization of dc-dc converters for automotive applications. *IEEE Trans. on Power Electronics*, 18(3), May 2003.
- [XTF97] X.Zhou, T.G.Wang, and F.C.Lee. Optimizing design for low voltage dc-dc converters. In *IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, APEC'97*, Vancouver, Canada, 23-27 February 1997. DOI : 10.1109/APEC.1997.575633.

Table des matières

I	Fiche synthétique	3
1	CV scientifique	5
1.1	État civil	5
1.2	Titres universitaires	5
1.3	Parcours professionnel	6
1.4	Activités d'enseignement	6
1.5	Activités liées à l'administration	6
1.6	Activités liées à la recherche	6
1.6.1	Prix	6
1.6.2	Organisations de congrès scientifiques	7
1.6.3	Comités de lecture	7
1.6.4	Participation à des jurys de thèse	7
1.6.5	Partenariats industriels et projets de pôles de compétitivité	8
1.7	Encadrements	10
1.7.1	Thèses	10
1.7.2	Stagiaires post-doc	12
1.7.3	Stagiaires Master 2	12
1.8	Synthèse scientifique	13
II	Synthèse des travaux de recherche	21
2	Introduction	23
3	Optimisation et modélisation technico-économique des réseaux électriques	27
3.1	Introduction	27
3.2	Designs de marchés	28
3.3	L'investissement dans les réseaux	28
3.4	Gestion de l'aléatoire et des incertitudes dans les réseaux d'énergie	29
3.4.1	Introduction	29

3.4.2	Impact de la filière éolienne sur les marchés de l'électricité	30
3.4.3	Intégration des moyens de productions incertains	33
3.4.4	Modélisation et optimisation robuste de systèmes complexes : application aux réseaux énergétiques	37
3.5	Conclusion	40
4	Optimisation et modélisation des machines électriques	43
4.1	Principes de l'optimisation des systèmes électrotechniques . . .	43
4.2	Optimisation des coûts de fabrication et du rendement d'une gamme de machine	45
4.2.1	Modélisation de la machine	46
4.2.2	Optimisation d'une gamme d'alternateurs	47
4.2.3	Optimisation multi-objectif du coût et du rendement . .	54
4.3	Prototypage virtuel en électronique de puissance	55
4.3.1	Introduction	55
4.3.2	Modélisation du hacheur abaisseur	56
4.3.3	Définition de l'optimisation et prototypage virtuel du hacheur	60
4.3.4	Résultats de l'optimisation	64
4.4	Conclusion	68
5	Modélisation des phénomènes physiques	71
5.1	Introduction	71
5.2	Étude des mécanismes d'inflammation d'un matériau isolant en présence d'un point chaud d'origine électrique	72
5.3	Physique des décharges électriques	83
5.3.1	Description et modélisation des phénomènes physiques des décharges électriques dans les plasmas froids	83
5.3.2	Étude des mécanismes de transitions glow-arc dans l'argon à faible pression	91
6	Conclusion générale et perspectives scientifiques	105
6.1	Conclusion	105
6.2	Perspectives scientifiques	105
6.2.1	Optimisation des systèmes d'énergie	106
6.2.2	Modélisation des processus plasmas	107
6.2.3	Conclusions	109

III	Bibliographie	111
7	Production scientifique	113
7.1	Tableau récapitulatif	113
7.2	Actes de conférences édités, conférences invitées et chapitres de livres	113
7.3	Revue internationale avec comité de lecture	114
7.3.1	Conférences internationales avec comité de lecture . . .	115
7.4	Communications	119
8	Références bibliographiques	121

Liste des tableaux

4.1	Paramètre de la machine à optimiser et leurs bornes	49
4.2	Contraintes de l'optimisation sur les valeurs de sortie	49
4.3	Paramètres des machines suite aux optimisations individuelles .	50
4.4	Paramètres des machines après optimisation classique de la gamme : optimisation de la machine de plus forte puissance, puis déclinaison pour les machines de plus faible puissance	51
4.5	Pondérations des ventes pour les trois scénarios envisagés . . .	52
4.6	Paramètres optimaux des trois types de machine dans le cas du scénario I	53
4.7	Paramètres optimaux des trois types de machine dans le cas du scénario II	53
4.8	Paramètres optimaux des trois types de machine dans le cas du scénario III	54
4.9	Notations utilisées pour le convertisseur abaisseur	57
4.10	Définitions et domaine de variation des paramètres de l'opti- misation	63
4.11	Contraintes de l'optimisation du convertisseur abaisseur	64

Table des figures

1	Amazing Stories août 1926	2
1.1	Amazing Stories août 1926	19
2.1	Amazing Stories septembre 1926	25
3.1	Amazing Stories juillet 1926	42
4.1	Représentation schématique d'une chaîne de traction électrique	44
4.2	Variation des masses optimales du système en fonction de la contrainte sur le rapport de transformation	45
4.3	Géométrie de la machine étudiée	47
4.4	Organigramme de calcul du couplage électrique-thermique . . .	48
4.5	Front de Pareto, coût en fonction du rendement pour la machine de 125kVA. Les rendements des autres machines de la gamme sont reportés sur la figure.	55
4.6	Schéma électrique de principe du hacheur	57
4.7	Forme d'onde du courant dans l'inductance et le MOSFET	58
4.8	Ondulations de la tension et du courant de sortie	59
4.9	Modèle électro-thermique	61
4.10	Valeurs du rendement dans le plan puissance-tension de sortie .	62
4.11	Définition de la géométrie du dissipateur	62
4.12	Front de Pareto pour l'optimisation multi-objectif volume- rendement	65
4.13	Calculs successifs du front de Pareto	66
4.14	Températures de jonction des diode et du MOSFET le long du front de Pareto	67
4.15	Fréquence de commutation le long du front de Pareto	67
4.16	Amazing Stories juin 1926	69
5.1	Schéma du circuit imprimé étudié	73
5.2	Photo recto (a) et verso (b) du circuit imprimé étudié après in- flammation	73

5.3	Évolution du courant d'alimentation et du courant de fuite en fonction du temps (haut) et de la température du PCB (bas) . . .	75
5.4	Cartographie de température et profils le long de la piste	76
5.5	Images enregistrées par la caméra rapide au cours de l'inflammation d'un circuit imprimé de 0,8mm	77
5.6	Géométrie utilisée pour le modèle numérique	78
5.7	Distribution de la température au cours du temps dans un substrat $z = 0,2$ mm pour une intensité de courant de chauffe comprise entre 10A et 20A et un coefficient d'échange thermique égal à $8W.m^{-2}.K^{-1}$	78
5.8	Comparaison entre les profils de température expérimentaux et ceux calculés numériquement transversalement au défaut, pour une valeur de h égale à $8W/m^2/K$	79
5.9	Courbes d'évolution en fonction du temps de chauffe de la température à la surface d'un substrat pour un courant de chauffe initial égal à 4 A - Comparaison entre les résultats expérimentaux et le modèle numérique	80
5.10	Modèle d'une distribution de la densité de courant selon l'axe z à un instant t dans un substrat	81
5.11	Amazing Stories avril 1926	82
5.12	Description d'une décharge pointe-plan	86
5.13	Comparaison du courant de décharge et de l'émission lumineuse à la caméra streak, simulation à gauche et expériences à droite .	89
5.14	Photographie de l'enceinte de décharge	93
5.15	Schéma électrique de l'alimentation utilisée	93
5.16	Photographie en pause longue d'une décharge luminescente glow	94
5.17	Photographie en pause longue d'une transition glow-arc	95
5.18	Oscillogramme du courant et de la tension et photographies des phases de la transition.	96
5.19	Oscillogramme du courant et de la tension pour un échelon de 280mA, apparition de transitions spontanées	97
5.20	Zoom de l'oscillogramme du courant et de la tension pour un échelon de 280mA, apparition de transitions spontanées et photographies caméra rapide de la décharge	98
5.21	Caractéristique courant-tension associée à des images caméra rapide d'une décharge glow	99
5.22	Caractéristique courant-tension pour une distance interélectrode de 25mm	100
5.23	Courant et tension de décharge lors de la transition (extension de la colonne filamentaire	101

5.24	Images de la caméra rapide en rapport avec les intervalles de la figure 5.23 lors d'une transition	101
5.25	Durée de la transition en fonction de la distance interélectrode .	102
5.26	Tension et courant de décharge pour une série de transitions glow-arc et arc-glow spontanées et réversibles	103
5.27	Amazing Stories avril 1926	104
6.1	Amazing Stories décembre 1926	110
7.1	Amazing Stories septembre 1926	120
8.1	Amazing Stories août 1926	132



\$1⁰⁰

To
PRACTICAL MEN
and
ELECTRICAL
STUDENTS

You can use this marvelous little book for solving your problems in any phase of electricity including Motor Starters and Starting Boxes, Overload and Underload Release Boxes, Reversible Types, Elevator Controllers, Tank Controllers, Starters for Printing Press Motors, Automatic Controllers, Variable Field Type, Controllers for Mine Locomotive, Street Car Controllers, Connections for Reversing Switches, Motor and Dynamo Rules, Rules for Speed Regulation, Connections for Induction Motors and Starters, Delta and Star Connections, Connections for Auto Transformers, and Transformers for Lightning and Power Purposes.

If you are interested in calculation you can find plenty of it in the various work on Simple Electrical Mathematics, Electrical Units, Electrical Connections, Calculation of Unknown Resistances, Calculation of Current in Branches of Parallel Circuits, Calculation of Weight of Wire, Wire Gauge Rules, Ohm's Law, Watt's Law, Information regarding Wire used for Electrical Purposes, Wire Calculations, Wiring Calculations, Illumination Calculations, Shunt Instruments and Calculation of Resistance of Shunts, Power Calculations, Efficiency Calculations, Measuring of Unknown Resistances, Dynamo and Dynamo Troubles, Motors and Motor Troubles, Calculation of Size of Pulleys, Current Calculations in finding Impedance, Reactance, Inductance, Frequency, Speed of Alternators and Motors, Conductance, Susceptance, Admittance, Angle of Lag and Power Factor, and Formulas for use with Line Transformers.

ARE YOU INTERESTED
IN ELECTRICITY?

If you are, this is your opportunity to get a book which is as authentic as it is complete! For every problem that *has* puzzled you and *is* puzzling you, you will find the solution in clear, definite language in the BLUE BOOK. Its informative contents come from the pen of Yorke Burgess, founder and head of the famous electrical school bearing his name. It is a pocket-size note book, especially adapted for the practical man and those who are taking up the study of electricity. You can have this note book with you at all times and you can read and study it in your leisure moments.

With all mailing charges postpaid, we will send you this excellent book for one dollar (\$1.00). Just mail us your order, enclosing a dollar bill, a check, or a money order with your request for a copy. Knowing its value thoroughly, we are convinced that you will like the book, but after five days we will be glad to refund your dollar if you should care to return the book. Just drop us a line.

THE McCLURE PUBLISHING CO.
Dept. L.W. 720 Cass Street, Chicago, Ill.

FIGURE 8.1 – Amazing Stories août 1926