

p.45	<i>HySPàC : la structure de recherche du CNRS sur l'hydrogène-énergie</i> Christophe COUTANCEAU ¹ , Fermin CUEVAS ² , Daniel HISSEL ³ , Christophe TURPIN ⁴ , Olivier JOUBERT ⁵ 1 IC2MP, Poitiers 2 Université Paris Est 3 Institut FEMTO-ST 4 LAPLACE 5 Institut des Matériaux Jean Rouxel (IMN), Université de Nantes	
p.48	<i>De l'hydrogène-énergie pour la mobilité lourde</i> Application au banc d'essais mobile ECCE et à la traction ferroviaire Daniel HISSEL*, Michel AMIET** * Univ. Bourgogne Franche-Comté, Institut FEMTO-ST ** DGA	
p.51	<i>La pile à combustible : une alternative aux systèmes d'énergie embarqués actuels, fiable et écologique</i>	SAFRAN
p.53	<i>Les piles à combustibles pour la mobilité terrestre</i> Joel DANROC	Deputy Manager CEA DRT
p.55	<i>La révolution dans les accumulateurs</i> M. MORCRETTE ^{1,2,3} ¹ LRCS CNRS UMR7314 ² RS2E CNRS ³ ALISTORE-ERI CNRS	
p.57	<i>STELLA – Système énergétique innovant pour la recharge des véhicules électriques</i> Manuela SECHILARIU, Fabrice LOCMONT, hongwei WU	UTC
p.59	<i>L'électronique de puissance clef du développement de l'Industrie du futur</i> Olivier COULON	DECISION Etudes & Conseil
p.61	<i>Amortissement actif d'un convertisseur à découpage DC/DC</i> Fabien ROCHER, Bruno CARVES-BIDEAUX	MBDA, Le Plessis Robinson
p.63	<i>Les MOSFET SiC dans les applications de puissance en 2018</i> Stéphane de La FOURNIERE	CIRTEM
p.66	<i>Bilan et perspectives des composants de puissance à grand gap</i> Dominique PLANSON, Hervé MOREL et Michel AMIET,	Laboratoire Ampère
p.68	<i>Le diamant : matériau pour l'électronique du futur</i> Jocelyn ACHARD ¹ , David EON ² , Karine ISOIRD ³ (1) LSPM, Université Paris 13 (2) Institut Néel, Grenoble (3) LAAS-CNRS, Toulouse	
p.70	<i>PRIMA (PRISes Magnétiques)</i> CONSORTIUM PRIMA (comité de pilotage) – GELIBERT Stéphane, COGNARD Lise	Saint-Egrève, France
p.72	<i>Les fluides magnétorhéologiques et leurs applications</i> G. BOSSIS	Institut de Physique de Nice
p.74	<i>La supraconductivité en 2018</i> Pascal TIXADOR* Univ.	G2ELab, I. Néel, F-38000 Grenoble, France
p.76	<i>Systèmes magnétiques supraconducteurs</i> Frédéric FOREST	SIGMAPHI Vannes, France
p.78	<i>Les aimants permanents : les ressources en « terres rares » et en Néodyme dans le monde</i> Jean-Paul YONNET	G2E Lab, Grenoble
p.80	<i>PLER – Production locale d'électricité renouvelable</i> Manuela SECHILARIU, Fabrice LOCMONT, hongwei WU	UTC

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

PRESENTATION : Michel AMIET

Président des Journées Jeunes Chercheurs en Génie Electrique

La Revue « 3 EI » présente un numéro spécial dédié à l'évolution du génie électrique. Ce numéro est composé de plus d'une trentaine d'articles couvrant toutes les disciplines des matériaux aux Systèmes.

Pour assurer sa position internationale et satisfaire aux besoins il est certain qu'il faut pouvoir disposer d'un potentiel humain couvrant tous les niveaux, du chercheur qui innove à l'ingénieur qui conçoit, dans tous les secteurs du génie électrique. Ce potentiel repose essentiellement sur l'intéressement de nos jeunes à cette discipline vivante mais complexe. Aussi pour ce numéro spécial « 3 EI » la parole a été donnée à des personnalités de quelques organismes : Inspection Générale de l'Education Nationale, CNRS, Universités, Ecoles d'ingénieurs, et à la Profession par le Groupement des Industriels de l'Equipement Electrique.

- **Samuel VIOLLIN**
- **Antoine de FLEURIEU**
- **Demba DIALLO**
- **François COSTA**
- **Jean-François ROUCHON**
- **Guy FRIEDRICH**

IGEN
GIMELEC
CNRS/GdR SEEDS
Université Paris- Est Créteil
ENSEEIH
UTC

La Revue 3EI

Comité de publication

Morgan ALMANZA
 Hamid BEN AHMED
 Arnaud BRUGIER
 Jacques COURAULT
 Jean FAUCHER
 Gilles FELD
 Jean Michel GAY
 Jean-Philippe ILARY
 Chérif LAROUCI
 Marie-Michèle LE BIHAN
 Franck LE GALL
 Denis LABROUSSE
 Pascal LOOS
 Marc PETIT
 Sylvain PIETRANICO
 Oviglio SALA
 Jean-François SERGENT
 Jean-Claude VANNIER

EDITORIAL LES FACES CACHEES DU GENIE ELECTRIQUE

Le vocable « Génie Electrique » est né de la Mission Interministérielle Génie Electrique initiée par le Ministre Hubert Curien, Ministre de la Recherche et de la Technologie, à laquelle participaient 4 autres Ministères et 120 experts. Monsieur Hubert CURRIEN, au travers d'une Lettre de Mission, a confié la Présidence de cette Mission à la Direction Générale de l'Armement (DGA).

C'est alors que le Génie Electrique est devenu un ensemble multidisciplinaire de connaissances et de techniques complémentaires où se sont associées l'électrotechnique, l'électronique de puissance et l'électrochimie, conduisant à la conception d'un SYSTEME. Cet aspect système a conduit la DGA à initier une théorie où la gestion d'un système doit prendre en compte les besoins, non plus en puissance, mais en énergie en distinguant les énergies : Permanente, Transitoire et Impulsionnelle, dite « Théorie des 3 E ». Il s'agit alors pour chacun de ces besoins d'y associer une source « ad hoc », répondant ainsi aux concepts innovants et applications nouvelles, civiles comme militaires.

Le génie électrique s'intègre pleinement aux axes d'actualité comme : Transition énergétique -Transports électriques et intelligents - Smart Grid - Energie de fusion - L'Homme « réparé et augmenté » - cobotique Ces aspects seront évoqués par des articles de ce numéro spécial « 3 EI ».

Dans ce cadre, le rôle de la DGA consiste à répondre aux besoins à moyen et long terme des Armées, notamment en s'assurant de la disponibilité des technologies nécessaires pour réaliser les futurs systèmes ; pour ce faire, elle soutient des travaux de R&D dans tous les domaines scientifiques et techniques dont celui du génie électrique, réalisés par des Centres de Recherche, des Laboratoires universitaires, industriels et étatiques et des industriels (PME, ETI, grands groupes), en cohérence avec les travaux réalisés par ailleurs au titre de la recherche civile et les innovations de l'industrie.

Les 34 articles qui suivent, rédigés par des Centres de recherche, des Laboratoires et des industriels, illustrent l'activité de la DGA dans chacun de ces grands secteurs : matériaux, électrotechnique, électronique de puissance, stockage de l'énergie électrique, électrochimie, systèmes, couvrant ainsi les besoins Air – Terre – Mer – Espace et Santé.

Mais, si le génie électrique est scientifiquement multidisciplinaire, c'est également un domaine qui intéresse de nombreux organismes civils et est traité par de nombreux acteurs du monde de la recherche. C'est ainsi que la DGA coopère étroitement avec les instances et organismes civils comme la DGE, la DGAC, l'ANR ; le CNRS, le CEA, les organismes représentant la profession dont le GIMELEC, l'IFSTTAR, l'ADEME et les pôles de compétitivité, mais aussi avec les organismes sous tutelle de la DGA dont l'ISL et l'ONERA.

Ces Centres de recherche, Instituts, Laboratoires et industriels doivent contribuer à faire face désormais à un environnement international nouveau, devenu très concurrentiel et diversifié. La place de la France sur l'échiquier reste néanmoins parmi les 5 premières nations, position qu'il est indispensable de maintenir : notre industrie française présente une balance commerciale positive et chaque année, les laboratoires universitaires accueillent un grand nombre de jeunes étrangers des 5 continents, intéressés par la formation que proposent ces laboratoires. La DGA contribue à cette formation, par le soutien de plus d'une dizaine de thèses en génie électrique et, après avoir initié, il y a 27 ans, les Journées Jeunes Chercheurs en Génie Electrique (JCGE), continue à présider cette manifestation internationale, de même qu'elle préside le congrès DECIELEC qui traite des avancées remarquables en génie électrique en France. Le GIMELEC, organisateur des manifestations internationales « ELEC », lui a confié la responsabilité de « l'Espace Innovation » à Villepinte (800 m2).

Ce numéro décrit, au travers d'une trentaine d'articles, la participation de la DGA au développement d'une discipline prioritaire pour notre industrie. La DGA tient à remercier les auteurs de ces articles mais aussi le Comité de rédaction de la revue « 3 EI » de lui avoir accordée un numéro spécial pour pouvoir s'exprimer sur ses activités, tout en conservant l'esprit de la revue d'informer les jeunes au travers de leurs enseignants. Ce tour d'horizon sur le génie électrique du futur ne se veut ni exhaustif ni, contrairement aux numéros habituels de cette Revue, d'un niveau scientifique élevé mais revendique plutôt un rôle d'information sous forme didactique.

- **ICA-R Michel AMIET Expert génie électrique DGA Ingénierie de Projets**
- **IC Jean-Marie ARMATA DGA Techniques Navales**
- **IC Nicolas ECHE DGA Techniques Aéronautiques**
- **IEF Laurent GILLETDGA Ingénierie des Projets/Architecture des Systèmes Terrestres**

L'enseignement du génie électrique dans les établissements d'enseignement secondaire **Samuel VIOLLIN IGEN, doyen du groupe STI**

En France, l'enseignement du génie électrique dans les lycées et plus précisément celui qui touche à l'électrotechnique, se déploie pour l'essentiel dans la voie technologique et professionnelle. Cet enseignement comme spécialité en vue d'une insertion professionnelle s'adresse aux élèves du baccalauréat professionnel MELEC (Métiers de l'Électricité et de ses Environnements connectés) et à ceux du BTS Électrotechnique. Ces formations visent à développer des compétences qui permettront aux sortants d'être employés dans le secteur du génie électrique et, bien au-delà, dans pratiquement tous les secteurs de l'industrie dès lors que les outils de production mobilisent de l'énergie électrique.

Dans la voie technologique, les élèves préparant un baccalauréat STI2D (Sciences et Techniques Industrielles et du Développement Durable) reçoivent un enseignement de génie électrique dans le tronc commun de la première et de la terminale, qui est approfondi par les élèves qui choisissent la spécialité Énergie et Environnement.

Enfin, dans les enseignements de l'option SI (Sciences de l'ingénieur) du baccalauréat S de la série générale des lycées et dans les enseignements de SI en CPGE, des contenus liés à l'énergie électrique sont abordés. Toutefois, il ne s'agit pas d'étudier les systèmes du génie électrique, mais d'avoir une approche globale en sciences de l'ingénieur qui s'intéresse aux lois et aux phénomènes. On ne peut donc pas évoquer ici une formation aux règles de l'art du génie électrique, elle se fera plus tard au cycle terminal des études d'ingénieur.

La formation en baccalauréat MELEC.

Cette formation présente 16 000 candidats à l'examen du baccalauréat professionnel, avec un taux de réussite de l'ordre de 77 %¹. La formation est organisée selon cinq grands domaines d'activité : préparation des opérations de réalisation, réalisation, mise en service, maintenance, communication. Ces activités se déploient dans cinq grands secteurs industriels qui sont les réseaux (production, stockage, connexion des réseaux, transport, distribution, gestion de l'énergie électrique), les infrastructures (aménagement routiers, urbains, des transports, réseaux de communications, ...), les bâtiments résidentiels, tertiaires, industriels (domotique, VDI, automatismes, équipements techniques, ...), l'industrie (distribution et gestion de l'énergie liées au procédé, équipements industriels, industries connectées et cyber-sécurisées), les quartiers, les zones d'activité, les éco-quartiers connectés et enfin les systèmes énergétiques autonomes et embarqués. À la sortie de la formation du bac pro MELEC, environ 25 % d'entre eux poursuivent en BTS Electrotechnique. Les élèves qui choisissent une intégration professionnelle au niveau 4 sont en situation d'emplois durables pour 36,1% d'entre eux sept mois après la sortie du lycée suivi en modalités scolaire.

La formation en STI2D

Cette formation accueille environ 72 400 élèves au cycle terminal du lycée dont environ 15 000 en spécialité énergie et environnement (EE). Le taux de réussite au baccalauréat technologique est d'environ 90 %. Tous les élèves de STI2D reçoivent un enseignement de génie électrique en première et en terminale dans l'enseignement technologique transversal. Celui-ci analyse les systèmes, s'intéresse à la typologie des solutions constructives de l'énergie (système énergétique mono-source, système énergétique multi-source et hybride). Cet enseignement aborde l'étude des convertisseurs d'énergie, des transformateurs électriques, des moteurs électriques et des modulateurs, des solutions d'éclairages, des solutions de stockage. L'enseignement de spécialité a pour objectif de développer une culture des solutions technologiques de transport, de distribution et de conversion d'énergie. Cet enseignement approfondit une démarche de conception des systèmes, qui trouve son aboutissement en classe terminale avec le projet de spécialité. Les élèves de STI2D option EE poursuivent leurs études vers l'enseignement supérieur, en CPGE TSI, à l'université et pour environ 30 % d'entre eux en BTS électrotechnique.

La formation en BTS électrotechnique

Environ 5 000 candidats présentent l'examen du BTS dans la spécialité électrotechnique. Le taux de réussite à l'examen est de 86% pour les candidats bacheliers de la voie générale ou technologique, il est de 66% pour les élèves issues de la voie professionnelle². Les enseignements comportent des sciences physiques qui sont des sciences appliquées à l'électrotechnique. Dans l'enseignement de spécialité, les solutions constructives et leur dimensionnement sont étudiées pour les applications de conversion, de production, de transport et de distribution de l'énergie électrique. L'étude des systèmes s'applique également aux infrastructures, à l'habitat, aux bâtiments industriels et tertiaires. Les équipements sont largement communicants. Un enseignement d'organisation de chantier installe des compétences de pré-encadrement. Les étudiants qui choisissent une intégration professionnelle au niveau 3 sont en situation d'emplois durables pour 55,8% d'entre eux sept mois après la sortie du lycée suivi en modalités scolaire. Ces étudiants trouvent de l'emploi dans de très nombreux secteurs d'activités que sont les équipements et le contrôle industriel, la production et la transformation de l'énergie, les automatismes et la gestion technique du bâtiment, les automatismes de production industrielle, la distribution de l'énergie électrique, les installations électriques des secteurs tertiaires, les équipements publics, le froid industriel, l'agroalimentaire et la grande distribution, les services techniques, les transports (véhicules et infrastructures). Les étudiants de BTS peuvent poursuivre leurs études vers les licences, les licences professionnelles ou en CPGE ATS (Adaptation Technicien Supérieur), ou vers les écoles d'ingénieurs à partir d'un recrutement sur dossier.

¹ Source Banque Centrale de pilotage - inscrits au bac pro MELEC session 2017

² Source Banque Centrale de pilotage - inscrits au BTS électrotechnique session 2017

Les métiers du génie électrique sont en pleine transformation

Antoine de FLEURIEU Délégué Général du GIMELEC

En tant qu'organisation professionnelle, le Gimélec bénéficie d'un poste d'observation privilégié pour embrasser l'ensemble des offres et innovations apportées par ses adhérents sur tous les marchés qu'ils adressent et, dans le même temps, percevoir les évolutions et grandes tendances de fonds qui traversent la société. Les 200 entreprises adhérentes du Gimélec sont des acteurs implantés dans le monde entier qui contribuent positivement à la balance commerciale française. Elles emploient 67 000 personnes en France et ont réalisé un chiffre d'affaires consolidé de 42 milliards € en 2017.

L'ensemble des « murs » qui pouvaient exister entre les électrotechnologies et le numérique sont tombés et le pilotage intelligent des systèmes devient ainsi le nouveau paradigme de toutes les solutions au service de l'efficacité énergétique comme de l'efficacité industrielle. Le mot « solution » recouvre désormais un ensemble physique, logique et virtuel complet et cohérent pour répondre à toutes les nouvelles attentes vis-à-vis de l'énergie électrique, de sa production à sa consommation en passant par sa distribution et son stockage.

Les nouvelles possibilités ainsi offertes sont immenses. Il convient cependant pour les exploiter de positionner l'humain, et ses compétences renouvelées, au cœur de cet ensemble, à tous les niveaux et dans toutes ses activités. La question de savoir « Qui est responsable de quoi lorsque l'alliance du numérique et de l'électrique débouche sur une multiplication rapide des équipements autonomes ? » doit ainsi pouvoir trouver sa réponse.

Le triptyque recherche-innovation-formation dans le génie électrique

François COSTA

Professeur à l'université Paris Est Créteil

Responsable du pôle CSEE au laboratoire SATIE UMR 8029

On pourrait penser que la recherche en génie électrique a atteint une asymptote au vu des progrès considérables des dernières décennies dans le traitement de l'énergie électrique toujours plus souple, efficace et en progression continue dans les domaines des transports, de l'industrie, des bâtiments ou des applications grand-public. Or il n'en est rien car nous sommes confrontés à des défis sociétaux et environnementaux de plus en plus complexes. Ils imposent d'innover dans les transformations énergétiques à moindres impacts en intégrant mieux les comportements et les attentes de l'utilisateur : électromobilité, sources d'énergies renouvelables variables, bâtiments à énergie positive, autoconsommation, santé, etc.. sont des évolutions dans lesquelles nous sommes déjà engagés. Ainsi, la gestion intelligente de l'énergie électrique via les smart-grids, l'éco-conception des équipements et des services, les couplages électromobilité-information, l'usage de matériaux actifs ou « intelligents », l'émergence de nouveaux matériaux comme les semi-conducteurs à grand gap (SiC, GaN) en substitution au silicium constituent des changements de paradigmes que la recherche en génie électrique intègre parfaitement. Par ailleurs, l'usage des techniques numériques est sans cesse plus prégnant tant pour la modélisation/conception/optimisation que pour le contrôle (la gestion de l'énergie électrique fait appel à toujours plus d'intelligence).

Les grands laboratoires de génie électrique nationaux ont ainsi fait évoluer leurs thèmes de recherche et leur organisation dans ces directions, souvent en couplant des compétences autrefois séparées dans un contexte où nos partenaires socio-économiques ont également beaucoup évolué, passant de producteurs de composants/équipements à celui d'assembleurs vendant plus de service dans un environnement globalisé. Il résulte de ces évolutions que la formation d'un chercheur en génie électrique doit être fondée sur des connaissances initiales solides en physique et en technologie mais aussi en sciences du numérique, en cultivant d'importantes capacités d'adaptation, de veille et d'autoformation afin d'être partie prenante des ruptures technologiques en cours et à venir.

Ainsi, la recherche en génie électrique mène à l'innovation via le transfert aux entreprises des connaissances produites dans les laboratoires ; elle s'appuie sur une formation supérieure en constante évolution, elle-même nourrie par la recherche. Ainsi, les scientifiques du génie électrique entretiennent un cercle vertueux où recherche, formation et innovation interagissent et s'enrichissent.

Professeur Jean-François ROUCHON Directeur Toulouse INPT / ENSEEIHT

Engagée depuis 2015 dans une réforme d'envergure visant à restructurer l'école autour de trois pôles (Numérique, Electronique Energie électrique & Automatique, Mécanique des Fluides, Energétique et Environnement), l'objectif de l'N7 est de former des élèves en capacité de relever les deux défis majeurs que constituent la révolution numérique et la transition énergétique, positionnant ainsi clairement l'INP-ENSEEIHT comme l'école du numérique, de l'énergie et de l'environnement.

Dans ce contexte, le domaine de l'EEEE dispensé à l'N7 adossé à des laboratoires de renommée internationale, le LAPLACE et le LAAS, a fortement évolué depuis plusieurs décennies se nourrissant de l'incontournable apport du numérique, des soft skills, des innovations technologiques issues des retombées de nos recherches et des besoins identifiés par nos industriels partenaires de secteurs comme le transport, les systèmes embarqués, l'aéronautique et le spatiale, mais aussi de l'énergie... Ainsi, la formation couvre un large spectre allant des circuits intégrés à la problématique du transport de l'énergie électrique, en passant par les systèmes communicants électromagnétiques, le traitement du signal et des images, l'électronique de puissance, la mécatronique, les nouvelles énergies et leur hybridation, répondant ainsi aux besoins de l'embarqués comme du stationnaire, des systèmes intégrés comme des composants de puissance...des formations, donc, à caractère fortement pluridisciplinaires garantissant l'agilité à laquelle devront répondre nos futurs diplômés.

Guy Friedrich
Professeur des Universités
Directeur du Laboratoire Electromécanique de Compiègne (LEC)

L'université de technologie de Compiègne (UTC) a été créée il y a maintenant plus de 40 ans avec la volonté d'associer les mondes de « l'université » et des « grandes écoles » dans le but de former des ingénieurs et des docteurs autour de la « technologie ».

Le terme Génie Electrique actuel est sensiblement apparu à la même époque. Il est lié à une évolution des technologies numériques au niveau « simulation » et « contrôle » (éléments finis et microprocesseurs) et également à l'apparition des composants électroniques en commutation. Ces technologies ont bouleversé l'enseignement, ouvert de nouveaux champs de recherches et élargi considérablement les domaines d'applications du microWatt au gigaWatt.

L'UTC a contribué à cette révolution en créant, dès son origine, une équipe de recherches et une filière de formation d'ingénieurs. L'ingénieur en Génie Electrique est devenu un systémier aux larges compétences technologiques s'appuyant obligatoirement sur une solide formation scientifique dans les domaines de l'EEA.

Les enjeux sociétaux liés à l'apparition de production d'énergie décentralisée et aux transports plus propres constituent aujourd'hui les principaux domaines sur lesquels l'établissement a choisi de former des ingénieurs et des docteurs technologues nécessaires à maintenir le niveau de compétitivité nationale dans une concurrence devenue mondiale.

L'UTC a fait le choix d'intégrer la formation de Génie électrique au sein d'une formation en ingénierie mécanique formant ainsi des ingénieurs dotés d'une double compétence leur permettant d'aborder des projets variés associant mécanique et électricité tant au niveau système que composants. L'électrification croissante des véhicules (voitures, avions,...) a ouvert de nouveaux gisements d'emplois et perspectives de carrières. Nos étudiants ne s'y trompent pas : l'effectifs des étudiants de cette filière de formation a doublé au cours des cinq dernières années.