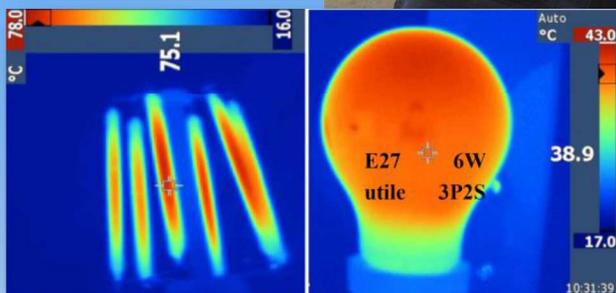
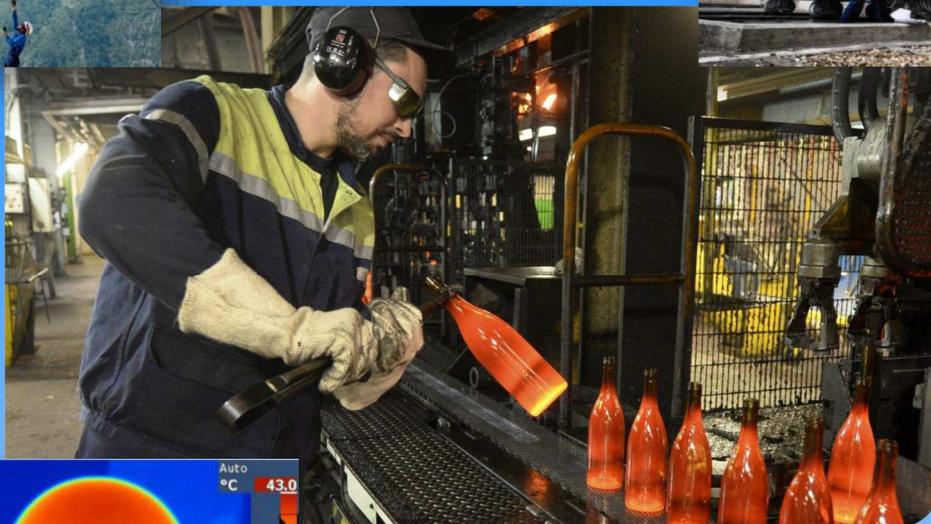


La Revue SEE



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



Maintenance des équipements et installations

Publication trimestrielle du Cercle Thématique 13.01 de la SEE

ENSEIGNER L'ÉLECTROTECHNIQUE ET L'ÉLECTRONIQUE INDUSTRIELLE



Société de l'Électricité, de l'Électronique et des Technologies de l'Information et de la Communication



LaRevue 3EI
publication trimestrielle
de la SEE

SOCIÉTÉ de l'ELECTRICITE, de l'ELECTRONIQUE et des TECHNOLOGIES de l'INFORMATION et de la COMMUNICATION.

17, rue de l'Amiral Hamelin, PARIS 75783 CEDEX 16
Tél : 01 56 90 37 09
site web : www.see.asso.fr

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

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

<p>La Revue 3EI, Édition SEE, 17 rue de l'Amiral Hamelin 75783 PARIS Cedex 16</p> <p>Directeur de la publication François GERIN Président de la SEE</p> <p>Rédacteur en Chef Franck LE GALL</p> <p>Adresser les propositions d'article à : revue3ei@gmail.com ou sur le site https://www.see.asso.fr/3ei_rubrique "soumettre un article"</p> <p>Communication Mr Jacques HORVILLEUR communication@see.asso.fr 01 56 90 37 09</p> <p>Promotion et Abonnements (4 numéros par an) Janvier, Avril, Juillet, Octobre 2017. Aurélië COURTOISIER Tél : 01 56 90 37 17 abo@see.asso.fr</p> <p>tarifs TTC : (revue papier + num)</p> <p>Individuel : France et UE 42 € Pays hors UE 53 €</p> <p>Institutionnel : France et UE 60 € Pays hors UE 75 €</p> <p>Au numéro : France et UE 12 €</p> <p>Impression : JOUVE 53100 Mayenne 11 bd de Sébastopol - 75027 Paris Cédex 1 - Tel : 01 44 76 54 40 Couv. : O.P. : All. – TFR : 0 – C. : PEFC Corp. : O.P. : Esp. – TFR : 0 – C. : PEFC</p> <p>Dépôt Légal : Juillet 2017 Commission Paritaire 1217 G 78028 ISSN 1252-770X</p>	<p style="text-align: right;">Sommaire du n° 90</p> <p style="text-align: center;">Thème : Maintenance des équipements et installations</p> <p>p. 2 <i>Éditorial,</i></p> <p>p. 3 <i>Surveiller, réparer, entretenir : la maintenance en action</i> P. MAS, P. BORTOLI RESEAU DE TRANSPORT D'ÉLECTRICITE (RTE)</p> <p>p. 8 <i>Stratégie de maintenance : externalisation de la gestion du stock de matériel.</i> A. SIVERT, L. DOS SANTOS, F. BETIN Institut Universitaire de Technologie de l'Aisne GEII, 02880 SOISSONS</p> <p>p. 14 <i>Recommandations techniques pour les maintenances préventive et corrective ainsi que pour la modernisation d'une installation de distribution électrique</i> SCHNEIDER ELECTRIC</p> <p>p. 19 <i>Formations de techniciens supérieurs dans le domaine de la maintenance industrielle : cursus, spécificités et débouchés.</i> A. BRUGIER Département Génie Industriel et Maintenance, IUT de Saint-Denis</p> <p>p. 30 <i>Diagnostic de machines électriques utilisant six capteurs de champ extérieur</i> M. IRHOUMAH^{1,2}, R. PUSCA¹, E. LEFEVRE², D. MERCIER², R. ROMARY¹ ¹ Univ. Artois, Laboratoire LSEE BETHUNE ² Univ. Artois, Laboratoire LGI2A BETHUNE</p> <p style="text-align: right;">Hors Thème :</p> <p>p. 37 <i>Modèle générique de mécanique des solides indéformables</i> P. MASSONNAT ISEN de BREST</p> <p>p. 46 <i>Lampe LEDs filament : alimentation, durée de vie, éclairage (Partie 1)</i> A.SIVERT, B. Vacossin, F. Betin Laboratoire des Technologies Innovantes (L.T.I GEII) SOISSONS</p> <p>p. 60 <i>Architectures de contrôle RISE et RISE-Backstepping d'une chaîne de conversion d'énergie pour la traction électrique</i> Y. RKHISSI KAMMOUN*, M. BOUKHNIFER**, J. GHOMMAM*, F. MNIF* * Laboratoire Control and Energy Management (CEMLab), école Nationale d'Ingénieurs de Sfax, TUNISIE ** ESTACA, Ecole d'Ingénieurs, SAINT-QUENTIN-EN-YVELINES</p> <p>p. 67 <i>Informations, publications</i></p>
---	---

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).

Le thème de ce nouveau numéro de La Revue 3EI est celui de la "maintenance des équipements et installations électriques". Ce sujet prend de plus en plus d'importance dans le milieu professionnel étant donné les besoins actuels en personnels ayant des connaissances et de compétences pointues pour appréhender les systèmes multi-techniques complexes que les industriels doivent maintenir en condition optimale de fonctionnement et ce, avec des contraintes de coût, de délai, de qualité et de sécurité importantes. Nous vous présentons ainsi le point de vue de certains de ces industriels, les formations de techniciens supérieurs dans le domaine de la maintenance et un exemple de travaux de recherche en maintenance prévisionnelle sur les machines électriques.

Le premier article du thème présente la maintenance en action sur le plus grand réseau de transport d'électricité d'Europe et la capacité des équipes de RTE à surveiller, réparer et entretenir ce réseau.

Après les experts du réseau, M. Sivert et ses coauteurs nous plongent dans le monde de l'usine et plus particulièrement des verreries pour lesquelles ils nous décrivent la stratégie de maintenance de l'entreprise Verallia.

Le troisième article nous donne le point de vue du concepteur dans la modernisation d'une installation électrique. Ce texte de la société Schneider a été initialement rédigé à destination des maîtres d'œuvre désirant candidater à un marché d'organisation et de pilotage des interventions de maintenance sur une installation de distribution de l'énergie électrique (TGBT).

Faisant le pendant au point de vue des industriels, M. Brugier fait le point sur les formations de techniciens supérieurs dans le domaine de la maintenance. Ces parcours pluri-disciplinaires, méritent d'être mis en valeur auprès des lycéens et des lycéennes car ils mènent vers de nombreuses carrières. Cet article présente également un exemple de support de projet propre à la formation DUT GIM : le concours national d'éolien urbain (GIMEOLE).

Enfin, en complément du très intéressant article « Discussion sur le suivi de l'état de santé des modules de puissance constitués de MOSFET en carbure de silicium » du laboratoire Ampère à Lyon publié dans notre précédent numéro, nous clôturerons ce thème avec une autre contribution à l'étude des modes de défaillance et au diagnostic de constituants électriques avec un article relatif au « Diagnostic de machines électriques utilisant six capteurs de champ extérieur » des LSEE et LGI2A de l'Université d'Artois (Béthune).

Les articles hors thèmes sont de natures très diverses. Le premier texte est du à M. Massonnat de l'ISEN qui propose une approche des notions mécaniques de bases dans une synthèse qui pourra être utile aux collègues de culture Génie Electrique qui ont à enseigner la mécanique en pré bac.

Dans le second article hors thème, M. Sivert et ses collègues se proposent de répondre pédagogiquement à un grand nombre de questions sur les LEDs. Quelles sont leurs caractéristiques et leurs modèles ? Quelle est leur puissance maximale dans un encombrement donné ? Quelles sont les types de convertisseurs permettant de les alimenter ? Peut-on améliorer le rendement de ces convertisseurs si le volume du culot le permet ? Est-ce que leur durée de vie ou leur fiabilité augmente grâce à leur électronique plus simple ? Quel doit être le nombre de LEDs ou de filaments en série pour avoir un rendement maximal ? La seconde partie de cet article sera publiée dans le numéro de janvier 2018 de la revue 3EI.

Pour clore ce numéro, nous vous proposons un article plus pointu sur la comparaison entre deux architectures de contrôle d'une chaîne d'énergie pour la traction électrique. Bien que d'un niveau de lecture plus élevé, cet article de l'équipe de M. Boukhnifer nous permet de nous tenir au courant des avancées dans ce domaine d'actualité.

Bonne lecture

Le Comité de Publication de la Revue 3EI

Faites connaître notre revue !
Vous en assurez ainsi la pérennité.

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

Surveiller, réparer, entretenir : la maintenance en action

RESEAU DE TRANSPORT D'ÉLECTRICITÉ (RTE), rte-france.com

PERRINE MAS, Direction de la communication, service presse: perrine.mas@rte-france.com

PATRICK BORTOLI, Directeur de la maintenance.

Résumé : *le service maintenance de Rte, Réseau de Transport d'Electricité, est composé de 4 000 collaborateurs dédiés à une mission : assurer la maintenance du plus grand réseau de transport d'électricité d'Europe. Ses équipes contrôlent, entretiennent, remplacent et dépannent les équipements et installations, conduisent les systèmes de télésurveillance, de contrôle et de veille et participent aux actions de sécurisation, prévention et gestion des situations d'urgence.*

1. Des métiers et des hommes au service de la performance du réseau

Gestion d'infrastructures physiques, développement de l'informatique industrielle, surveillance des espaces naturels sous les lignes, gestion des relations avec les tiers... (Cf. fig. 1) : les activités de la maintenance de Rte (1) recouvrent des métiers très variés sur le réseau de transport, de répartition et d'interconnexion (tensions comprises entre 63kV et 400kV).gffgdfqg



Figure 1 : chantier de la ligne 63 kV Bancairon-Courbaisse : agent RTE guidant des agents du GET Côte d'Azur et Cévennes lors de la mise en place du poste de travail de la phase 3. (©ROUX Lionel/RTE 2013)

1.1. La maintenance en chiffres

- Au sein de Rte, les effectifs dédiés aux principales activités de maintenance peuvent se décomposer comme suit :
 - • 1 000 agents de groupement de postes assurant la surveillance et le premier dépannage du réseau,
 - • 500 « lignards » entretiennent et expertisent les lignes aériennes ainsi que leur environnement,
 - • 350 techniciens spécialistes de la maintenance des postes électriques,
 - • 700 techniciens et experts en charge des automatismes et de l'informatique industrielle,

- • 40 câbleurs spécialisés en maintenance des liaisons souterraines,
- • 120 techniciens en environnement et relations avec les tiers.

1.2. Les rôles associés à la maintenance chez Rte

Les équipes sont chargées de surveiller, d'entretenir et de dépanner l'ensemble des actifs industriels du réseau électrique et numérique de Rte, c'est-à-dire un peu plus de 100 000 km de lignes aériennes, 5 000 km de lignes souterraines, près de 3 000 postes électriques mais aussi tous les équipements qui composent notre réseau de télécommunication : automates de protection destinés à la sécurité des personnes et des biens, 22 000 km de fibres optiques, etc.

La maintenance assure aussi un rôle plus méconnu, mais tout aussi important, portant sur la sécurité des tiers et sur le respect des engagements environnementaux de Rte. Elle est l'interlocuteur de proximité d'un grand nombre de publics : propriétaires des terrains situés sous l'emprise de nos lignes, riverains, collectivités, acteurs du BTP, du monde agricole, de la pêche et de l'environnement. Ces liens permettent, par exemple, de conduire des actions conjointes de prévention aux risques électriques ou de préservation de la biodiversité sous les lignes.

1.3. Organisation de la maintenance chez RTE

Le premier enjeu de la maintenance est la rapidité d'intervention. En cas d'incident dans les postes les plus sensibles pour le réseau, nous sommes tenus d'intervenir dans les 40 minutes. Pour des avaries sur les réseaux importants, Rte s'est doté de « task-forces » régionales : les groupes d'intervention prioritaires. Nous sommes présents sur l'ensemble du territoire au plus près de nos infrastructures et de nos interlocuteurs, avec 170 équipes opérationnelles et des personnels d'astreinte mobilisables 7j/7 : les personnels de nos 75 groupements de poste assurent la surveillance des

matériels 24h/24 et traitent les informations remontées par notre réseau de télécommunications. L'autre facteur clé est bien sûr, au regard de la grande diversité de nos actifs, la capacité de la maintenance à réunir au sein de ses équipes des métiers hautement qualifiés et des compétences extrêmement variées (Cf. fig. 2).



Figure 2 : maintenance d'un transformateur au groupement de postes Val de Seine (©Goldstein Julien / RTE 2015)



Figure 3 : une journée avec le GMR Sologne : réglage d'un sectionneur neuf 400 kV au poste de Verger (©Lafontan Mikael / RTE 2016)

Notre deuxième enjeu est de connaître parfaitement l'environnement de notre patrimoine comme, par exemple, une modification de la nature des terrains sous nos lignes, la présence de travaux ou d'une activité professionnelle. C'est une condition indispensable pour assurer la sécurité de nos missions mais aussi des riverains et des personnes en activité à proximité des lignes. Ce rôle de « vigie » (cadastre, urbanisation, plan d'aménagement du territoire, ...) est celui de nos 30 groupes de maintenance répartis sur tout le territoire et de leurs techniciens experts en environnement et relations tiers. Ils facilitent également les interventions de nos équipes opérationnelles car ils ont aussi pour mission d'expliquer aux parties prenantes nos rôles et activités et favoriser l'acceptation des ouvrages.

La maintenance sait être réactive, mais l'anticipation et la flexibilité des interventions sont aussi des éléments clés de notre performance. Dans un

double contexte de fortes évolutions technologiques et de transition énergétique (accueil des EnR notamment) nos opérations de maintenance (Cf. fig. 3) s'appuient sur une programmation pluriannuelle allant des opérations les plus légères (surveillance visuelle, essais fonctionnels,...) aux plus complexes (remplacement de pièces d'usure ou reconditionnement complet des matériels voire maintenance à distance dans un contexte d'accélération de la numérisation des postes électriques).

1.4. Evolution des métiers de la maintenance

Le grand défi en terme de ressources humaines consiste à combiner les compétences nécessaires à la gestion d'infrastructures d'ancienne et de nouvelle génération – les composants du réseau de RTE ont généralement une durée de vie de 10 à 50 ans. Avec la transition énergétique, nous devons aussi intégrer de nouvelles contraintes qui appellent toujours plus de flexibilité et de rapidité dans les interventions. Ainsi, l'intégration de la production d'énergie électrique d'origine renouvelable et de nature intermittente nécessitera des travaux beaucoup plus opportunistes organisés selon, par exemple, les prévisions météorologiques afin de ne pas pénaliser la production d'énergie correspondante. Il faudra donc devenir encore plus agile car il sera de plus en plus compliqué de programmer très à l'avance les interventions.

Nous devons, de plus, intégrer dans nos opérations de nouvelles techniques et technologies numériques. Demain, la maintenance devra gérer l'entretien des réseaux off-shore aussi bien que des postes nouvelle génération 100% numériques.

Des métiers liés à l'environnement apparaissent également et sont dédiés à la gestion de la végétation. Cette question tient une place grandissante à toutes les étapes de nos activités : programmation, déroulement de l'intervention ou reporting. Connaître la présence d'essences rares ou les périodes de nidification, par exemple, sont des paramètres que toutes les équipes doivent intégrer sur le terrain, comme en back-office (Cf. fig. 4).



Figure 4 : pose de balises avisphères dans le massif de la Vanoise. (@seignettelafontan.com/RTE2017)

2. La révolution de la technologie par la maintenance

Les techniques de pointe s'invitent déjà au quotidien dans les missions de maintenance : drones, télécommunications, capteurs, échométrie, ... Elles permettent de gagner en agilité et en efficacité en termes de qualité d'alimentation en électricité. Demain, avec la connectivité renforcée des équipements, les capacités nouvelles d'analyse de données et l'intelligence artificielle, la maintenance sera prédictive et toujours plus télé-monitorée. On trouvera ci-dessous quelques projets et innovations qui préparent la maintenance de demain chez RTE.

2.1. Contrôle-commande : vers une plus grande réactivité

L'expérimentation en cours du poste électrique 100% numérique est une première étape vers le déploiement généralisé de systèmes de contrôle-commande tout numériques à partir de 2020 (Cf. fig. 5). Équivalent d'un tableau électrique truffé d'automates, le système de contrôle-commande assure les fonctions d'« observabilité », de « protégeabilité » et de « télécommandabilité » du réseau électrique. Il joue un rôle essentiel dans sa protection et celle des tiers, notamment en envoyant des ordres d'ouverture aux disjoncteurs en cas de détection d'un défaut. Lorsqu'un matériel est mis hors service, les techniciens de la maintenance n'ont actuellement pas d'autre alternative que de se rendre sur place pour procéder à l'analyse de l'incident avant de réarmer la protection. Demain, grâce au numérique couplé à la transmission des données en très haut débit, ces opérations pourront être effectuées à distance dans des centres de télé-administration, ce qui réduira le délai de remise en service des équipements.



Figure 5 : poste de transformation 400 kV de Verger à la sortie de la Centrale Nucléaire de Saint-Laurent-des-Eaux (CNPE). (© Didier Marc / RTE / 2010)

2.2. Drones : des inspections rapides, précises et moins émissives

Aujourd'hui, l'inspection de l'état des lignes électriques aériennes sur de longues distances se fait essentiellement par hélicoptère. Demain, quand la réglementation du survol de l'espace aérien

l'autorisera, cette opération, qui est généralement réalisée une fois par an, pourra être effectuée par des drones. Ceux-ci, télé-pilotés, embarqueront du matériel et notamment des capteurs thermiques pour contrôler les zones d'échauffement des équipements et des appareils photo ou laser pour réaliser des prises de vue aériennes haute définition. Les données ainsi obtenues seront ensuite analysées pour identifier les besoins en maintenance. L'usage généralisé de drones permettra ainsi de réaliser le même travail avec une empreinte carbone nettement inférieure et à moindre coûts. Sans compter qu'en se substituant aux interventions humaines dans des zones difficiles d'accès ou potentiellement dangereuses, le drone va permettre, grâce à l'inspection à distance et à l'imagerie numérique haute définition, d'enrichir notre cartographie.

Depuis 2011, la maintenance de RTE expérimente déjà les drones pour inspecter les pylônes, les postes électriques et contrôler l'entretien de la végétation sous ses lignes (Cf. fig. 6).



Figure 6 : surveillance de ligne à l'aide d'un drone à TESE, le 24 avril 2012. Drone effectuant un survol des pylônes pour repérer leur corrosion. (© ROUX Lionel/RTE/2012)

2.3. « Mobiposte », des outils de mobilité au service de la productivité des techniciens et de la maîtrise du patrimoine

Depuis un an, les 75 groupements de techniciens qui inspectent les postes électriques sont équipés de terminaux distants qui leur permettent de renseigner immédiatement toutes leurs observations (anomalies, photos, notes, référence des équipements concernés). Ces informations sont automatiquement mises à jour dans la base de données du patrimoine de RTE pour un meilleur partage d'information en temps réel.

2.4. Plus de sécurité pour les travaux sous tension (TST)

D'ici 2018, toutes les équipes postes qui réalisent des travaux sous tension seront équipées d'une plateforme élévatrice de nouvelle génération. Parmi ces nombreuses innovations, elle permet aux techniciens d'intervenir sur les ouvrages sous tension même par temps de brouillard ou de pluie fine alors qu'auparavant ces conditions météorologiques auraient

nécessité de suspendre le chantier. Ce nouvel engin illustre la collaboration de la R&D de RTE avec l'industrie pour développer des techniques qui facilitent les opérations de maintenance (Cf. fig.7 et 8).



Figure 7 : les 50 ans du SERECT à Mulhouse : démonstration de la nouvelle plateforme élévatrice mobile, (@Stéphane Herbert/RTE2013)



Figure 8 : essais utilisateurs de la nouvelle plateforme élévatrice mobile (PEMP). (©ULRICH Olivier / RTE 2013)

2.5. Des capteurs pour élargir les champs d'intervention par télémaintenance.

De plus en plus de postes et de lignes électriques de RTE sont équipés de capteurs de mesure (température, vibration, intensité du courant, etc.). Ils transmettent des informations nécessaires au pilotage en temps réel de la performance du matériel à distance. Bientôt, ces nouveaux outils seront couplés à des technologies d'analyse des données qui joueront un rôle majeur pour aider la maintenance à relever un défi crucial : localiser automatiquement les pannes sur le réseau. On mesure aisément le gain en termes de rapidité d'intervention sur des lignes électriques parfois longues de plus de 100 km. Ces technologies permettront également d'établir des pré-diagnosics à distance. Ce rôle sera celui des équipes des 7 unités de CASTER (Centre Administration et Supervision Télémaintenance Régional) du territoire français qui supervisent aujourd'hui l'ensemble des données transmises par les capteurs. A l'avenir, leurs apports en termes d'expertise aux équipes de maintenance sur le terrain iront grandissants.

3. Une expertise unique : les travaux sous tension (TST)

En 1957, les travaux de maintenance étaient responsables de la moitié des interruptions de service du réseau électrique. Face à l'ampleur de l'enjeu, des pays comme les États-Unis d'Amérique, l'URSS ou la Suède développèrent alors des techniques de travaux sous tension. A l'initiative d'EDF, la France se lança alors aussi dans cette aventure et créa une cellule dédiée en 1962 : la SERECT. Elle ne tarde pas à devancer ses homologues grâce à une approche fondée sur l'analyse préalable du risque qui offre une grande souplesse d'intervention aux opérateurs.

Afin d'éviter tout risque de court-circuit et d'électrisation, les TST s'appuient sur deux fondements : la maîtrise de l'isolation et la maîtrise de l'énergie. Il convient donc de respecter des distances minimales entre l'opérateur et les pièces nues sous tension ou conductrices de la zone de travail. Cette « isolation » repose sur des règles d'intervention très strictes et sur des outils de protection adaptés. Il faut aussi prendre en compte le facteur humain – par exemple le geste involontaire – en adoptant des marges de sécurité suffisantes.

300 opérateurs « lignes et postes électriques » de la maintenance de RTE sont spécifiquement formés aux TST. Ils réalisent chaque année environ 1500 chantiers partout en France qui mobilisent 5 à 7 opérateurs placés sous la responsabilité d'un chargé de travaux (Cf. fig.9). Le jour de l'intervention ce dernier ne décrit point par point le scénario d'intervention choisi : chaque geste, chaque déplacement et chaque point de vérification y sont clairement consignés.

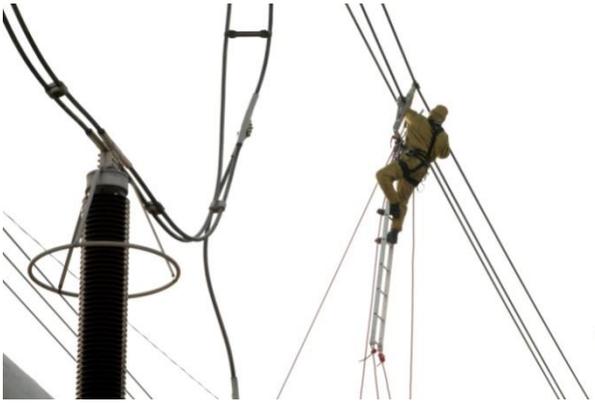


Figure 9 : pose sous tension d'entretoises triple faisceaux sur la ligne 400kV Marlenheim-Scheer par l'équipe d'entretien de ligne du GET Alsace, Marlenheim (68) le 9 février 2012 : lignard en action en tenue de travail TST. (© Médiathèque RTE)

Selon les contraintes du chantier, deux méthodes peuvent être utilisées :

- le travail à distance : depuis le sol (pour les postes) ou un pylône (pour les lignes), le technicien utilise des outils fixés sur des perches ou des cordes isolantes,
- une intervention dite « au potentiel » : installé dans un support isolant (plateforme élévatrice, échelle à palan, siège TST, tour (Cf. fig.10 et 11), le technicien est positionné au plus près de l'équipement sur lequel il intervient.



Figure 10 : réparation de la canalisation à isolation gazeuse (CIG). Les techniciens du GET-Anjou interviennent sous tension grâce à une tour isolante de positionnement. (©Sargos Alexandre / RTE 2006)

Quelle que soit la méthode d'approche utilisée, le travail sous tension exige des outils et accessoires spécialement conçus. La protection de l'opérateur contre les effets du champ électrique est assurée par un vêtement conducteur agissant comme une cage de Faraday autour du technicien. La « cage » devant être fermée, l'habit conducteur comprend également des chaussures, des gants et une cagoule à visière.

La maintenance de RTE dispose aussi de 64 opérateurs formés aux travaux sous tension hélicoptérés pour intervenir depuis une nacelle sur des lignes situées en zones montagneuses ou difficilement accessibles (Cf. fig. 12).



Figure 11 : cinq postiers équipés d'une combinaison conductrice travaillent sous tension (TST). Ils assurent le remplacement d'un sectionneur des lignes électriques 400 kV alimentant l'agglomération de Toulouse (poste de Verfeil) à l'aide d'une tour isolante de positionnement (TIP) et d'une nacelle. (©Bellavia Christian / RTE 2008)

Chacun des chantiers – 30 à 50 par an – nécessite au préalable une semaine de reconnaissance des lieux d'intervention et une semaine de préparation.



Figure 12 : vue d'une intervention hélicoptérée. (© RTE)

4. Des installations pédagogiques grandeur nature pour une formation de pointe

La formation comprend un volet théorique et une partie pratique enseignée directement sur le réseau ou sur des plate-formes pédagogiques. Unique en France, le centre de formation de Lyon-Jonage accueille les équipes de maintenance et d'ingénierie qui interviennent sur le réseau électrique haute et très haute tension (2). Sur 4 ha, il reproduit les conditions réelles d'exercices des missions grâce à des équipements pédagogiques d'envergure illustrant la diversité des installations et des appareillages rencontrés sur le terrain, lignes et postes électriques. Environnement, prévention sécurité, travaux sous tension, mise à niveau technologique... une rigueur du geste enseignée de la formation initiale au maintien en compétences pour expert.

5. Ressources

- (1) <http://lemag.rte-et-vous.com/dossiers/surveiller-reparer-entretenir-la-maintenance-en-action>.
- (2) <http://www.dailymotion.com/video/x5b5f8g>

Stratégie de Maintenance : Externalisation de la gestion du stock de matériel

ARNAUD SIVERT, LAURENT DOS SANTOS, FRANCK BETIN

U.P.J.V Université de Picardie Jules Verne, Institut Universitaire de Technologie de l'Aisne GEII, 02880 SOISSONS
Laboratoire des Technologies innovantes (L.T.I), équipe Énergie Électrique et Systèmes Associés (EESA)

Résumé : *La stratégie de maintenance dans une entreprise qui perd plusieurs milliers d'euros par heure à cause d'un blocage de production est capitale. De plus, lorsque la production est à flux tendu, un arrêt de production risque de mettre les clients en rupture ou les détourner vers concurrence pour satisfaire leurs commandes. Dans un premier temps, nous allons présenter l'entreprise et les spécificités du site de production de la société Verallia ainsi que les outils pour connaître l'historique de la maintenance et la criticité de l'équipement. Puis, nous allons présenter un cas concret sur la stratégie de stockage d'un variateur de 200kW pour savoir s'il faut externaliser la gestion du stock du matériel de rechange en fonction de son coût. La politique de la maintenance sur la standardisation des pièces sera aussi présentée pour faire une synthèse sur la bonne productivité avec un minimum d'arrêt de production.*

1. Introduction

VERALLIA est une multinationale qui fabrique des bouteilles et des pots en verre avec 7 usines en France, 5 en Espagne, 4 en Allemagne et 5 en Italie, mais aussi en Amérique du sud, en Europe de l'Est et une en Afrique du nord [1].

La verrerie de Vauxrot (Soissons 02) produit environ 300 Millions de bouteilles par an soit environ 800 milles bouteilles par jour. (Bières, Vins, Apéritifs, Liqueurs) avec près de 200 salariés.

Son parc de machines comprend 3 lignes de production (5 machines) et 1 four.

Le four en fusion fonctionne de façon permanente et demande une production continue en 3x8 heures et que les 3 lignes de production fonctionnent en permanence.

L'inventaire en stock de pièces de rechange mécanique, électrique, pneumatique représente un coût de 1,5 millions € afin d'assurer le bon fonctionnement de la production.

Sur la figure suivante, on peut observer une ligne de production de bouteille.

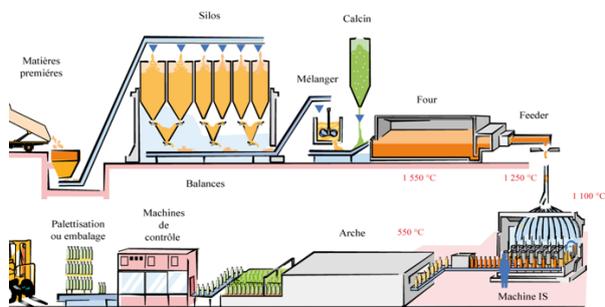


Figure 1 : production de bouteille en verre

Cette unité de production nécessite une équipe de maintenance (38 personnes dont 8 électriciens) dans laquelle de nombreux techniciens et cadres viennent de l'IUT Génie électrique de Soissons.

Tous les électriciens sont habilités B2V (chargé de travaux), BR (chargé de maintenance), BC (chargé de consignation) et connaissent très bien l'installation électrique pour en faire la maintenance très rapidement.

La formation de nouveaux techniciens prend environ 2 à 3 années avant qu'ils soient pleinement opérationnels.

La politique de la verrerie est de garder leur savoir faire technique, donc de minimiser la sous-traitance à son maximum.

En cas d'interruption d'électricité, un groupe électrogène de 1250kVA avec un moteur V6 bi turbo démarre en 4 secondes et permet d'alimenter les circuits prioritaires de l'usine afin de secourir l'outil de travail.

D'ailleurs, tous les automates sont alimentés par l'intermédiaire d'onduleurs qui peuvent maintenir l'alimentation pendant environ 15 minutes. Ces onduleurs sont dans une salle climatisée et leurs batteries au plomb sont changées tous les 4 ans de manière préventive.

Auparavant il y avait deux groupes électrogènes de 800 kVA qui ont fonctionné pendant près de 50 ans. Chaque mois, il y a des essais de bon fonctionnement du groupe électrogène pendant environ 1 heure à charge réelle avec couplage au réseau EDF afin de ne pas faire de coupure de courant.

Après cette rapide présentation des spécificités de l'entreprise, nous allons nous intéresser à la manière dont est organisée la gestion de la maintenance ?

2. Outils de gestion de la maintenance

Les éditeurs de gestion de maintenance assistée par ordinateur GMAO sont nombreux et très courants [2].

La verrerie utilise le progiciel de chez SAP (Systems, Applications and Product) [3].

D'ailleurs, toute l'usine a été décomposée en divers éléments en indiquant :

- le risque lié à la sécurité des biens et des personnes,
- les risques sur l'environnement,
- les risques d'arrêt de production donc de chômage partiel,
- la maintenance préventive à effectuer.

Ceci s'appelle la Matrice de Criticité des équipements et permet d'adapter la maintenance préventive et les pièces détachées en fonction des équipements. Certaines installations peu critiques ne nécessitent pas de maintenance préventive et offre la possibilité d'attendre le défaut pour une maintenance curative alors que d'autres bien plus critiques nécessitent une attention particulière (maintenance préventive, prédictive et pièces détachées disponibles sans délai).

Le progiciel de GMAO demande à chaque responsable environ 1 heure de travail par jour et aux techniciens environ 15 minutes par jour pour rentrer leurs interventions.

Cette entreprise ne peut pas se permettre d'arrêter son flux de production et doit avoir une bonne gestion de ces équipements et gérer un stock important de pièces détachées, ce qui représente un coût important.

D'ailleurs, toutes les usines de Verallia en France ont choisi d'avoir une standardisation de l'équipement électrique. La GMAO gère également le stock du groupe en France mais aussi des pays limitrophes, donc une pièce stockée dans une usine peut partir très rapidement dans une autre usine en taxi-colis.

Pour l'anecdote, il arrive fréquemment que des pièces d'une valeur de moins de 1 000 € soient transportées entre usine par taxi pour un coût de transport de plusieurs milliers d'euros. Mais les coûts d'arrêt de production sont souvent bien plus importants que ces frais de transport.

La rapidité d'approvisionnement en pièces détachées est très liée au bassin industriel. En effet, plus la région est industrialisée et plus la facilité d'obtention de ces pièces sera grande.

Cette gestion du stock a demandé une standardisation du matériel électrique dans le groupe Verallia. Cette standardisation (benchmark) implique des réunions 1 à 2 fois par an des responsables techniques qui sont parfois accompagnés de technicien de chaque usine.

Ce benchmark n'est en place que depuis une dizaine d'années. Il y a donc encore un grand nombre d'équipements spécifiques différents implantés dans les usines du groupe en fonction des cahiers des charges, des sous-traitants et de l'historique des différentes verreries.

La standardisation a permis d'avoir des salariés plus compétents sur certains équipements et le savoir

faire peut-être plus facilement transmissible d'une verrerie à l'autre, de même pour des mouvements de personnels.

L'étude d'un cas concret de gestion de matériel de maintenance sur un variateur de vitesse va nous permettre de préciser notre propos.

3. Gestion d'équipement (stock, extension de garantie)

Nous allons prendre un cas particulier mais transposable à tout équipement pour lequel on doit s'assurer un délai de ré-approvisionnement de quelques heures. Un variateur de fréquence de moteur asynchrone 200kW, U/F constant Schneider ATV 61, 350kg dans une armoire de 2,5m de haut et 0,7m de largeur qui a un coût d'environ 13 000 € HT et une garantie contractuelle classique de 24 mois. Ce variateur alimente un moteur de ventilateur servant à refroidir les moules d'une machine de fabrication de bouteilles. Il fonctionne 24h sur 24h et 365 jour par an dans des conditions de température ambiante de 40 à 50°C.

La défaillance la plus fréquente sur un variateur est le vieillissement (séchage) des condensateurs de filtrage entre le redresseur et l'onduleur. Leur durée de vie est d'environ 5 ans à une température ambiante de 45°C [6].

Certains fabricants de variateurs demandent de charger 2 fois l'année les condensateurs pour augmenter leur durée de vie et de stocker le variateur dans un endroit de 25°C.



Figure 2 : Armoire du variateur ATV 61 de 200kW chez le réparateur

Il est nécessaire de mettre sous tension selon une rampe de tension progressive de 1 à 2 heures au moins une fois par an les condensateurs de filtrage du variateur via les bornes du bus continu [7].

Sur les variateurs, il y a des pannes récurrentes sur le « relais de pré-coupures » qui minimise la pointe de courant des condensateurs de filtrages lors de l'alimentation du variateur. Le variateur doit se mettre en sécurité si la température des transistors de l'onduleur se situe au delà de 100°C. D'ailleurs, le

variateur est protégé en température par un petit ventilateur de 20W. Bien que le capteur de température des transistors de l'onduleur interne au variateur devrait détecter une éventuelle défaillance de ce ventilateur et arrêter l'alimentation du moteur, il arrive parfois qu'un emballement thermique des transistors se produise et conduise à leur destruction.

Dans de nombreux variateurs, cette valeur de température limite de fonctionnement des transistors ne peut être paramétrée. Pour obtenir une marge de sécurité, on peut alors surveiller la température à l'aide d'un autre capteur et générer une alarme à partir d'une supervision.

Dans le cas des variateurs Leroy Sommer installés dans l'usine, une dynamo tachymétrique indique la vitesse du ventilateur de 20W et c'est parfois celle-ci qui met en défaut le variateur alors que le ventilateur fonctionne correctement ! La fiabilité des composants du variateur est importante, mais celle des composants de sécurité ne l'est pas moins car ils peuvent bloquer le système à cause d'une mesure erronée.

Ce moto variateur de 200kW ventile les moules permettant la fabrication des bouteilles de verre sur la machine de la figure 1. En effet, la "thermie" est très importante dans le *process* verrier. Il faut réguler différentes pressions et températures sur les machines de fabrication des bouteilles pour les refroidir de manières constantes. La gamme de vitesses de ce ventilateur est comprise entre 70% et 100%. Cette plage de variation de vitesse permet de minimiser la consommation d'énergie. Auparavant, la vitesse était constante, on assurait la diminution de la pression en fermant l'ouverture du débit d'air avec un système à aubages mécanique très énergivore.

Le variateur de vitesse a permis une régulation bien plus précise mais surtout, a permis une diminution de la puissance absorbée qui passe de 200kW pour 100% de la vitesse à 68 kW avec une vitesse de 70%. En effet, la puissance demandée par le ventilateur correspond à l'équation suivante avec N la vitesse en tr/min:

$$P_r = a \cdot N^3 \quad \text{Eq. 1}$$

Sachant que le variateur tourne 50% du temps à 70% avec un prix de l'électricité à 0,08 €/kW.h, le gain de la minimisation de la consommation d'électricité correspond à l'équation 2 suivante :

$$\text{Gain} = 0,08 \text{ €} \cdot 12h \cdot (200 \text{ kW} - 68 \text{ kW}) = 127 \text{ €} / \text{jour}$$

Par conséquent, le retour sur investissement de ce variateur est court par rapport à son obsolescence technique car il correspond à l'équation suivante :

$$n \cdot \text{brjour} = 15 \text{ 600 € TTC} / 127 \text{ €} = 122 \text{ jours} \quad \text{Eq. 3}$$

Cette installation implique de gérer le stockage d'un variateur de rechange en cas de défaillance sachant que même sans utilisation du variateur, il y a

une obsolescence du produit à cause des condensateurs de filtrage.

3.1. Coût de l'extension de garantie

Le fabricant du variateur préconise une extension de garantie après les 24 mois dont le coût le suivant :

- Pour 1 an 400 € HT,
- Pour 2 ans 800 € HT,
- Pour 3 ans 1200 € HT.

L'extension de garantie de l'équipement Schneider est en général limitée à 5 ans. Elle peut être étendue à 7 ans si une visite de maintenance à la fin de la 5^{ème} année est prévue avec un changement des condensateurs (Cette visite a un coût de 1400€). Il faut alors prévoir un variateur d'avance pour ne pas avoir d'arrêt de fonctionnement pendant cette maintenance préventive.

La solution technique d'un *by-pass* par contacteur pour alimenter ce moteur ventilateur n'est plus possible car la partie mécanique (aubage) qui régule la pression par bridage de l'aspiration n'existe plus et il faudrait remettre en place un système de démarrage (statorique par exemple).

Les prestations de l'extension de garantie pour les variateurs de vitesse de forte puissance comprennent les prestations suivantes :

- déplacement sur site en heures ouvrées,
- dépannage par des ingénieurs spécifiquement formés et certifiés.

Cette opération est en général réalisée par une entreprise sous-traitante agréé par le fabricant tel que « Devos Vandenhove » sur le soissonnais (spécialiste de la réparation aux composants des variateurs) [4]. De nombreux techniciens supérieurs viennent de l'IUT Génie électrique de Soissons qui ont poursuivi leurs études (école d'ingénieurs, master et surtout licence pro en automatisme)

- La fourniture des pièces nécessaires au dépannage.

Une extension de garantie représente environ 3% du prix d'achat par an du variateur, ce qui est très raisonnable mais ne garantit pas une rapidité d'exécution de la maintenance. En effet, le constructeur fait un geste commercial sachant qu'il y a 7 variateurs identiques à la vente dans la verrerie de Soissons. L'ensemble de la distribution électrique et tout l'automatisme de l'usine est également de la même marque.

Cette extension de garantie a donc un coût mais la possession d'un stock de pièces de rechange a également un coût. Mais quel est-il ?

3.2. Frais de possession d'un stock

L'équipementier électrique possède sa propre plateforme de stock mais avec un délai de livraison de 24 heures en général comme nous pouvons l'observer sur la figure suivante.

Il peut proposer aussi une solution avec le matériel en stock consignation directement chez le client pour minimiser les temps de livraisons.

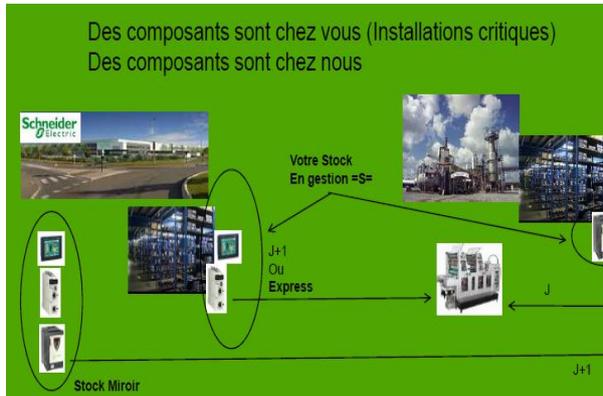


Figure 3 : Coût entre l'achat et le stockage chez le client avec les délais de livraisons

Le stock a un coût entre 20 % à 30 % de la valeur moyenne de l'équipement [5]. Ce pourcentage peut prendre 5% supplémentaire avec les taux d'intérêts s'il y a un emprunt.

Ces frais proviennent des charges financières :

- Coûts de l'argent immobilisé,
- Frais administratifs et impôts.

Mais aussi des frais de magasinage :

- Coûts de fonctionnement
- Amortissements locaux, loyer et équipements
- Primes d'assurances (incendie, vol),
- Coût d'obsolescence, détérioration du matériel, vol;

Il y a aussi les frais de surface qui représente 8 % de la valeur moyenne des stocks, dans le cas ou Schneider Electric constitue un stock de pièces de rechange disponibles dans les locaux du client, il faudra alors tenir compte des frais dits de surface et des frais liés à la responsabilité civil du client.

Si l'on prend un coût d'immobilisation de 24% du prix du variateur par an, cela représente près de 3000 € pour la verrerie. Avec une gestion sur une plateforme Schneider le tarif est presque identique à 2900€. On peut observer sur la figure suivante les différents coûts pour les 3 solutions de stockage.

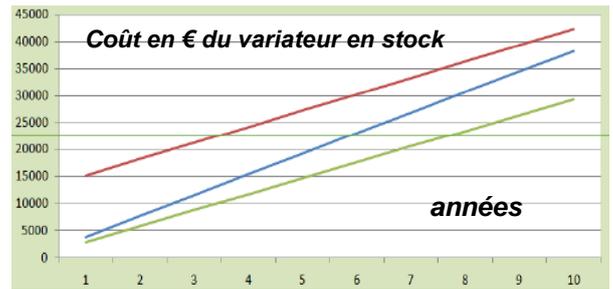


Figure 4 : Coût entre l'achat et le stockage par le client (rouge), le prix du stockage chez le fournisseur (bleu) ou chez le client (vert) du variateur 200kW

Sur la figure précédente, nous pouvons remarquer qu'il y a une différence importante entre le coût d'un stock de consignation et l'achat d'un variateur la première année. Cependant, la proposition de stockage sur site proposée par Schneider est très intéressante car étant donné la criticité du variateur, ce dernier sera présent sur site à tout moment pour dépanner la production en cas de besoin et les coûts engagés s'élèveront au coût d'achat du variateur mais seulement au bout de 5 années.

De plus, lorsque le client possède l'équipement sur son site, il n'y a pas de frais de prises en charge d'urgence comme on peut l'observer sur la figure suivante :

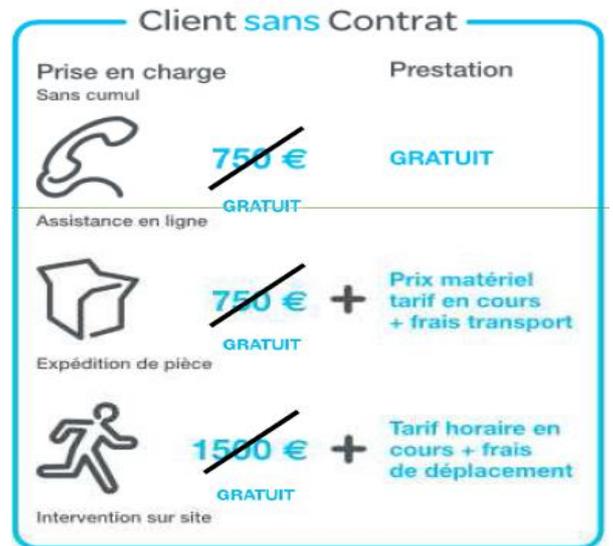


Figure 5 : Client ayant un contrat de maintenance avec l'équipementier sur site

En résumé, les avantages et les inconvénients des différents modes de stockages pour la maintenance sont représentés sur la figure suivante :

Stock Client Classique	Stock Hors site	Stock sur site client
Le client constitue chez lui un stock de pièces de rechange	Un stockage en nos locaux, pour du matériel disponible sous un délai contractuel.	un stockage en vos locaux, pour du matériel immédiatement disponible et au plus proche de vos équipes maintenance
Avantages : Disponibilité des pièces	Avantages : Pas d'investissement Initial Pas d'immobilisation de Capital Pas de frais de possession Les pièces de rechange sont garanties 18 mois à l'arrivée chez client Délai de ré appro garanti	Avantages : Pas d'investissement Initial Pas d'immobilisation de Capital Pas de frais de possession Les pièces de rechange sont garanties 12 à 18 mois à l'utilisation La certitude, par la mise en place d'un stock image en nos locaux, D'un premier réapprovisionnement sous délai garanti.
Inconvénients : Investissement Initial important Immobilisation du capital Coûts de possession Les pièces ne sont plus garanties au delà de 18 Mois Délai de ré appro non Garanti Etat de matériel ! Vol et Dégradation	Inconvénients : Temps d'acheminement du composant	

Figure 6 : Avantages et inconvénients des différents modes de stockages pour la maintenance

Mais quel est le coût de la maintenance après la défaillance du produit ? Après une panne, faut-il acheter un matériel neuf ou faire réparer ?

3.3. Prix de la maintenance curative

Début 2016, un des variateurs de 200KW est tombé en panne au bout de 6 ans de bon fonctionnement 24h/24 365j/an. Trois heures ont été nécessaires pour remplacer l'armoire électrique par l'équipe de Verallia.

L'afficheur « Pocket » qui a le paramétrage en EPROM n'a pas eut besoin d'être remplacé, ni de re-paramétrage par PC.

Le variateur a été réparé pour un coût de 6000 € avec une nouvelle garantie de 12 mois par la société Devos Vandenhove. Le ventilateur de 20W qui est placé à l'arrière du variateur demande une manutention importance. La carte de commande de ce ventilateur était également défectueuse.

Parfois, les coûts de la maintenance pourraient être amoindris, si les pièces étaient plus accessibles.

Dans ce cas, le produit a été réparé. Mais que ce passe-t-il lorsque les pièces ne sont plus sur le marché ?

3.4. Changement de produit par la marque

L'évolution de la technologie des processeurs fait que les variateurs sont renouvelés par les constructeurs environ tous les 8 ans avec de nouveaux algorithmes et de nouveaux « softs » pour les paramétrer. Il faut souvent 1 à 2 journées de formation pour bien manipuler ces outils par un électrotechnicien chevronné.

Pour information, ces variateurs peuvent aussi bien commander des moteurs brushless, asynchrone avec une commande scalaire ou flux vectoriel, avec ou sans capteur de position....

Ce renouvellement de gamme occasionne donc des problèmes pour garantir une maintenance rapide surtout si la régulation est complexe. Lorsque l'équipement n'est plus sur le marché, il faut impérativement avoir un variateur paramétré de rechange ou bien une solution alternative type *by-pass*.

3.5. Test de bon fonctionnement du variateur

L'entreprise Devos Vandenhove teste toutes les fonctionnalités du variateur après réparation, en charge dans leurs locaux jusqu'à 200kW.

Les ingénieurs aux nombres de 6 réparent environ 15 à 20 variateurs par semaine, avec un rayon d'action de 200km autour de Soissons ainsi que tous types de matériels électroniques. Il y a aussi 6 technico-commerciaux dans ce centre Devos Vandenhove qui font du diagnostic, du paramétrage et pas seulement du démarchage, facturation et autres.

Le centre de Soissons possède de nombreux bancs de tests ainsi que l'abonnement électrique pour tester du matériel jusque 200kW comme on peut le voir sur la figure suivante :



Figure 7 : Banc de test pour moto variateur de 200kW

Sur la figure précédente, On peut observer de nombreuses petites motorisations pour tester les petits variateurs, ainsi que les différentes armoires d'alimentation.



Figure 8 : motorisation pour variateur de 200kW (vue de dessus)

La maintenance demande d'avoir un matériel assez conséquent pour faire les tests, ainsi que des ingénieurs hautement qualifiés. La société Devos compte d'autres spécialistes sur toute la France qui peuvent être dépêchés d'urgence pour répondre à des besoins spécifiques d'installation ou de maintenance électrique.

4. Conclusion

Peut-importe le type de service maintenance (interne ou sous-traitance) que possède une entreprise à feu continu comme les verreries, les pièces de rechange des machines dites « critiques » sont primordiales.

Cet article a pu démontrer que le stockage d'équipement coûte relativement cher mais que les fournisseurs proposent certaines solutions économiquement viables.

5. Référence

[1] <http://www.verallia.com/notre-entreprise/nos-usines>

[2] https://fr.wikipedia.org/wiki/Gestion_de_maintenance_assist%C3%A9e_par_ordinateur#Liste_des_principaux_.C3.A9diteurs_sp.C3.A9cialistes_GMAO_en_France

[3] [https://fr.wikipedia.org/wiki/SAP_\(progiciel\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/SAP_(progiciel))

[4] <http://www.dv-groupe.fr/activities.html>

[5] L'Usine Nouvelle « Pratique de la gestion des stocks » Pierre ZERMATI et Fabrice MOCELLIN et Hervé BLASSELLE IUT de Metz Département Droit Economie Gestion)

[6] Michel Laurent « Condensateurs de puissance : des composants « vivants » au cœur des équipements »

<http://www.electromagazine.fr/index.php/les-plus-du-mag/les-solutions-techniques/1834-n%C2%B070-condensateurs-de-puissance%20des-composants-%C2%AB%20vivants%20%C2%BB-au-c%C5%93ur-des-%C3%A9quipements.html>

[7] https://en.wikipedia.org/wiki/Aluminum_electrolytic_capacitor

Recommandations techniques pour les maintenances préventive et corrective ainsi que pour la modernisation d'une installation de distribution électrique (selon Schneider Electric)

SCHNEIDER ELECTRIC

35 Rue Joseph Monier, 92500 Rueil-Malmaison

Résumé : nous présentons ici un document de prescription de l'entreprise Schneider Electric à destination des maîtres d'œuvre désirant candidater à un marché d'organisation et de pilotage des interventions de maintenance sur une installation de distribution de l'énergie électrique (TGBT). Bien qu'assez formel, ce document permet de comprendre quelles sont les attentes du maître d'ouvrage dans ce domaine et ce que cela implique en termes de tâches, de compétences et de connaissances (notamment en maintenance, technologies et sécurité électriques) pour les intervenants désignés. Gageons que ce document sera utile à la rédaction des projets tuteurés et ce, notamment dans le cadre des activités de BTS électrotechnique et BTS MS.

1. Introduction

Le présent marché a pour objet la maintenance des équipements basse et haute tensions d'une installation électrique, comprenant :

- les cellules équipant les tableaux HTA,
- les TGBT et leurs équipements associés,
- les transformateurs de puissance,
- les relais de protection,
- les batteries de condensateurs.

Les prestations de maintenance comprennent la maintenance préventive effectuée de manière régulière, ainsi que les interventions de maintenance corrective faisant suite à un dysfonctionnement inopiné ou détecté lors d'une visite de maintenance.

Au sens du présent marché, le terme "maintenance" vise l'ensemble des opérations de :

- maintenance préventive à caractères systématique et programmé, ayant pour but de réduire les risques de pannes et de maintenir dans le temps les performances des appareils et équipements à un niveau proche de celui des performances initiales,

mais aussi :

- maintenance prédictive avec outils de diagnostic (sur site) et instrumentation à distance (si l'instrumentation a été réalisée),
- maintenance curative : remise à niveau technique, adaptation aux normes, etc...,
- MCO.
- maintenance corrective à caractère ponctuel, ayant pour but de rétablir durablement dans ses performances initiales, dans les meilleurs délais et conditions de sécurité, les

installations ne fonctionnant plus ou fonctionnant mal.

L'aspect rénovation ne pouvant être dissocié de la maintenance préventive, celui-ci est également traité dans ce document.

Par ailleurs, le prestataire de maintenance doit avoir une parfaite connaissance technique des équipements concernés et de l'environnement de l'installation. En conséquence, une visite préalable doit permettre de définir la meilleure offre technico-économique pour répondre aux besoins identifiés.

2. Exigences de la proposition technique

La proposition technique devra prendre en compte tous les éléments listés ci-dessous et joindre chaque fois que cela est précisé des exemples de réalisation.

2.1. Compétences

Pour les opérations de maintenance préventive, le ou les techniciens intervenants dans le cadre du présent marché devront avoir le niveau de compétence adapté aux tâches qu'ils ont à réaliser, ce qui correspond à une qualification de niveau 4 suivant la norme FDX 60-000.

Pour justifier du niveau 4 de maintenance en accord avec le fascicule AFNOR FDX 60-000 et la norme NF EN 13306, le prestataire devra fournir un certificat de formation émanant du constructeur des équipements concernés, datant au plus de 2 ans.

Dans le cas contraire, le prestataire devra fournir la preuve que le niveau 4 sera exécuté par le constructeur concerné.

Le titulaire devra avoir la compétence pour la maintenance corrective des équipements concernés. Au

delà de la maintenance des équipements, le titulaire devra avoir un rôle de conseil et d'expert sur le périmètre de la distribution électrique, pour pouvoir proposer des informations et solutions sur :

- l'installation des équipements suivant les règles de l'art et les préconisations du constructeur,
- les conditions d'exploitation,
- la réalisation d'étude de protection ou de sélectivité suite à un incident ou une simple demande.

2.2. Sécurité

Dans le but de mettre en avant l'engagement et le comportement adapté de tous les acteurs dans la prévention des risques, le prestataire devra posséder une certification MASE ou être en cours de démarche d'obtention.

Une évaluation des risques liés au métier devra être réalisée annuellement dans le cadre de la rédaction du document unique.

Le prestataire devra également fournir le suivi des taux d'accidentologie et de gravité sur 12 mois glissants et pour les 3 dernières années.

Suivant les prestations fournies, le prestataire devra être formé suivant la réglementation, pour intervenir sur le gaz SF6 et sur les produits amiantés.

Les produits utilisés lors des maintenances préventive et corrective devront faire l'objet d'une analyse des risques chimiques. Chaque intervenant sera en possession des fiches de données sécurité des différents produits. Leur mise à jour régulière devra être réalisée.

Les intervenants du prestataire devront être également formés à la rédaction et à la compréhension des plans de prévention et analyse des risques et posséder une délégation de signature de ces plans de prévention.

Ces intervenants devront être capables de réaliser les différentes étapes de la consignation électrique BT et HTA. Les titres d'habilitations électriques seront vérifiés annuellement et faire l'objet d'un recyclage triennal. Le prestataire devra posséder tous les équipements de protections individuelle et collective adaptés à ses interventions. Ces équipements devront posséder une date de validité conforme et/ou être en bon état et enfin faire l'objet d'une vérification annuelle.

Lors de la prestation, le prestataire devra s'assurer de la présence d'au minimum un intervenant ayant suivi la formation « secouriste du travail ».

2.3. Qualité

Le titulaire devra :

- être certifié ISO 9001,
- réaliser ses prestations conformément aux recommandations du constructeur et assurer les mises à jour techniques sur les équipements selon les informations fournies par ce dernier,
- pouvoir présenter un outil de mesure de satisfaction client garant du souci permanent de l'amélioration, notamment au travers d'audits de chantier,
- pouvoir certifier des formations techniques de niveau 4 déployées auprès de ses techniciens.

Par ailleurs, le titulaire devra présenter une procédure de suivi pour l'ensemble de ses moyens de mesure et réaliser des évaluations annuelles et/ou audits des fournisseurs avec lesquels il travaille.

3. Les prestations

3.1. Plan de maintenance

Un plan de maintenance devra être proposé par le titulaire qui définira pour chacun des ensembles d'équipements une fréquence et un niveau de maintenance associés.

Pour définir ce plan de maintenance, le titulaire devra prendre en compte :

- l'âge et la gamme des équipements :
 - o positionner chacun des équipements dans son cycle de vie.
- l'état de vétusté :
 - o prendre en compte l'historique de maintenance,
 - o faire un état des lieux pour définir un niveau de vétusté.
- les conditions d'exploitation :
 - o prendre en compte les cadences de manœuvres, les niveaux de charge, les fréquences de mise en route et les sollicitations particulières.
- les conditions environnementales.
 - o les températures, l'humidité, la ventilation, les poussières, les différentes ambiances corrosives ou autres pollutions et la qualité du réseau.
- l'importance stratégique de l'énergie distribuée :
 - o mesurer l'impact humain et/ou économique d'une coupure d'alimentation,
 - o prendre en compte les dispositifs d'alimentation parallèle : onduleurs, redondance, groupe électrogène, etc...

- les contraintes du site :
 - prendre en compte les éventuelles contraintes de coupure liées à la vie du site.

Ce plan de maintenance pourra évoluer en fonction des constats et diagnostics réalisés au cours des opérations de maintenance.

3.2. Maintenance préventive

Les visites de maintenance préventive ont pour but de réduire les risques de panne et de maintenir dans le temps les performances des matériels ou équipements à un niveau proche des performances initiales. Ces visites de maintenance doivent également permettre d'assurer la protection des personnes et des biens.

Pour répondre à ces besoins, les opérations de maintenance à effectuer devront être conformes aux spécifications du constructeur et prendre en compte les points suivants qui seront rattachées à la réponse technique :

- les procédures de maintenance, pour chaque famille d'équipements, devront répondre aux niveaux 1 à 4, conformément à la norme AFNOR NFX-60 010,
- le titulaire devra impérativement réaliser la totalité des prestations correspondantes en veillant à utiliser l'ensemble des outils techniques préconisés par le constructeur. A cet effet, les éléments suivants devront être transmis dans le mémoire technique notamment les fiches techniques des outils utilisés lors des maintenances préventives pour permettre le diagnostic et l'analyse des risques suivants :
 - détection des effluves dans les cellules HTA,
 - risques d'échauffement des pinces d'embrochage sur disjoncteurs BT,
 - risque d'emballement thermique sur fusibles HTA,
 - mesure des temps de déclenchement des disjoncteurs BT sur injection de courant avec émission d'un rapport retraçant la courbe de déclenchement et les seuils de tolérance,
 - mesure des temps de déclenchement des relais de protection HTA sur injection de courant avec émission d'un rapport retraçant la courbe de déclenchement et les seuils de tolérance.
- les produits utilisés lors de la maintenance, pour le nettoyage ou la lubrification/graissage, devront être renseignés et conformes aux exigences du constructeur,
- la maintenance d'un disjoncteur HTA ou BT devra inclure impérativement le test de sa protection associée. Ce test doit valider la

chaîne de mesure et de déclenchement, en prenant en compte les réglages du relais de protection. Le résultat de ce test devra être renseigné dans le rapport d'intervention.

- le mémoire technique devra proposer un plan de maintenance prenant en compte l'état initial des équipements, les conditions d'installation et d'exploitation, le niveau d'obsolescence ainsi que le critère d'importance de chacun des équipements dans l'installation.
- l'obsolescence des équipements. Pour chacun des équipements, le prestataire devra renseigner le niveau d'obsolescence, en précisant :
 - si l'équipement est toujours commercialisé,
 - si les pièces de rechange sont toujours disponibles,
 - si une solution de remplacement existe ou peut être étudiée,
- le prestataire sera en mesure de former le personnel exploitant sur la maintenance de niveau 1-2 et l'exploitation des équipements HTA et BT concernés.

3.3. Maintenance corrective

La maintenance corrective pourra être déclenchée par l'exploitant, suite à une panne. Elle pourra également faire suite à une visite de maintenance préventive pendant laquelle un problème sur l'équipement concerné a été décelé.

Intervention demandée par l'exploitant :

- la demande devra être recevable 24h/24, 7j/7,
- la demande devra pouvoir se faire par téléphone, l'appel sera tracé,
- une première expertise devra pouvoir se réaliser par téléphone, dans l'heure qui suit la demande,
- une intervention pourra être déclenchée avec l'arrivée sur site d'un technicien sous 8 H horloge,
- si le dépannage nécessite une pièce de rechange, le technicien devra avoir la compétence pour l'identifier et la remplacer, L'approvisionnement de la pièce de rechange devra se faire sous 24H horloge maximum,
- si l'intervention nécessite le remplacement de l'équipement complet, l'approvisionnement de celui-ci devra se faire sous 24H horloge maximum. Il sera possible de mettre en place un équipement d'occasion si celui-ci est garanti par le constructeur d'origine,
- un rapport d'intervention détaillera la prestation de dépannage.

3.4. La rénovation

Le prestataire devra avoir un rôle de conseil sur la pérennité d'une installation et être force de proposition pour assurer une transition entre la maintenance préventive et la rénovation.

L'obsolescence des équipements de distribution électrique est une situation complexe à gérer :

- augmentation des risques pour le personnel et pour le site en général,
- baisse de la fiabilité générant des coûts importants de maintenance curative,
- disponibilité et coût des pièces de rechange,
- non conformités.

Pour ce faire, le titulaire devra être en mesure d'identifier le moment opportun et proposer une solution de rénovation sur chacun des équipements concernés, en prenant en compte les trois critères suivants :

- - la maximisation de la fiabilité,
- - la minimisation du temps d'indisponibilité, conditionné par le temps de réparation,
- - le coût d'indisponibilité de l'installation.

Pour assurer cette mission, le prestataire devra avoir la compétence pour réaliser un audit du parc concerné et proposer la meilleure solution technico économique. Un exemple d'audit sera rattaché à l'offre.

Si une solution de rénovation par substitution est retenue, le prestataire devra fournir un dossier de conception incluant :

- les études et la conception (recherches et développement),
- la réalisation d'un prototype,
- les tests de qualification du prototype,
- la fabrication et les essais de routine.

La solution de substitution devra assurer une comptabilité complète avec l'ancien appareil et offrir un fonctionnement optimal, en prenant en compte :

- l'environnement qui peut agir sur les contraintes d'échauffement. Il déterminera pour cela le type d'appareil, son indice de protection et son mode de pose ou d'installation,
- les caractéristiques et performances de l'équipement à remplacer,
- la mécanique de liaison pour garantir la tenue à l'ICC (intensité de court circuit),
- l'application des normes, CEI 60947 pour les appareils, 604439-1 pour les tableaux et 60364-1 pour le degré de protection.

Le titulaire présentera le dossier de conception complet d'une rénovation. Il devra également joindre à l'offre un exemple de réalisation en basse et haute tension

4. Généralités

4.1. Organisation

Le titulaire présentera son organisation générale et plus particulièrement celle mise en place ou adaptée pour répondre à cet appel d'offres.

Cette organisation désignera plus précisément :

- un interlocuteur principal pour la gestion contractuelle qui sera le point d'entrée pour la planification des interventions,
- un interlocuteur technique pour répondre à des questions spécifiques liées ou pas au contrat en cours,
- un interlocuteur commercial pour d'éventuelles évolutions du contrat ou autres aspects économiques.

Le titulaire notifiera les adresses électroniques et coordonnées téléphoniques des interlocuteurs concernés.

Lors de chaque visite de maintenance préventive, un chef de chantier sera désigné par le titulaire. L'identité des intervenants sera précisée par écrit au client au moins 48 heures avant l'intervention.

Si un découplage du réseau électrique public est nécessaire pour les interventions de maintenance, le titulaire pourra, sur demande du client, prendre à sa charge l'organisation du rendez vous avec le fournisseur d'énergie.

4.2. Astreinte

Pour répondre à un besoin de dépannage urgent, le prestataire devra disposer d'un service d'astreinte 24H/24 et 7J/7, pouvant assurer :

- une expertise technique en ligne dans un délai d'une heure,
- un envoi de pièces ou d'équipements de rechange dans les 24H,
- une intervention sur site dans un délai de 8H.

L'organisation et les moyens mis en place pour ce service d'astreinte devront être présentés dans le mémoire technique.

4.3. Stock d'urgence pour pièces ou équipements complets

Le titulaire renseignera dans son mémoire technique, une liste de pièces de rechange premier niveau, pour chacun des équipements concernés.

Il devra pouvoir garantir un délai de livraison de 24H sur les pièces de rechange et équipements complets.

Une visite de la zone de stockage sera organisée. Le processus permettant la réception de la demande jusqu'à l'expédition des équipements fera partie des documents rattachés à l'offre.

Le prestataire devra être en mesure d'identifier et fournir l'ensemble des pièces de rechange, celles-ci devront être neuves ou avoir obtenu le label "requalifiée par le constructeur".

4.4. Echange d'informations

Le titulaire proposera gratuitement, au titre du présent contrat, un système de gestion informatisé détaillé dans son mémoire technique et incluant :

- le descriptif, par poste, des équipements HTA & BT,
- les indicateurs du niveau de fonctionnalité des équipements de distribution électrique,
- les indicateurs du niveau d'obsolescence des équipements de distribution électrique,
- l'accès au calendrier pour planification des interventions préventives,
- la possibilité pour le client d'associer des documents/plans/notices sur chaque poste ou équipement,
- la possibilité pour le client de gérer les accès aux informations,
- la possibilité pour le client de générer des analyses croisées d'informations : niveau d'obsolescence, qualité des équipements, niveau d'avancement de la maintenance...

Cet accès sera conditionné et sécurisé par mot de passe et destiné au responsable technique du marché.

4.5. Rapport d'intervention

L'issue des contrôles sur site, d'une intervention de maintenance préventive ou corrective, un rapport détaillé sera transmis au correspondant concerné. Ce rapport devra également être posté sur la plateforme informatisée et sécurisée décrite dans le chapitre précédent.

Le rapport devra faire apparaître à minima les éléments et valeurs demandées de contrôles et réglages, mais aussi les informations qui y sont relatives, a savoir :

- l'identification de l'équipement,
- les prestations effectuées dans le cadre de l'intervention,
- en cas d'anomalie constatée, la rédaction d'un constat d'anomalie et la préconisation d'une solution,
- la liste des pièces remplacées au cours de la visite,
- des recommandations. Chaque recommandation devra faire ressortir un degré d'urgence, en précisant si celle-ci a des conséquences sur la protection du bien et/ou des personnes. Une solution devra accompagner chacune des recommandations,
- le niveau d'obsolescence de l'équipement.

- La proposition doit inclure un exemple de rapport d'intervention.

4.6. Garantie

Les interventions de maintenance préventive ou corrective devront être garanties 18 mois à minima.

Le titulaire définira les zones d'exclusions à cette garantie.

5. Références

- norme NF X60-000 Avril 2016 : Maintenance industrielle - Fonction maintenance
- norme NF EN 13306 Octobre 2010 : Maintenance - Terminologie de la maintenance
- catalogue 2016-17 « Distribution HTA jusqu'à 24kV - SM6 - RM6 », Schneider Electric.

Formations de technicien(ne)s supérieur(e)s dans le domaine de la maintenance industrielle : cursus, spécificités et débouchés

ARNAUD BRUGIER

Enseignant SII, spécialité ingénierie électrique

Département Génie Industriel et Maintenance, IUT de Saint-Denis, Université Paris 13

Résumé : cet article présente au lecteur les contenus et modalités de formation de deux parcours menant au titre de technicien(ne) supérieur(e) : le DUT Génie Industriel et Maintenance (GIM) et le BTS Maintenance des Systèmes (MS). Ces parcours pluri-disciplinaires, dédiés au suivi, à la surveillance et à la maintenance des équipements et installations multi-techniques, méritent d'être mis en valeur auprès des lycéens et des lycéennes car ils mènent vers de nombreuses carrières de cadres techniques et ce, dans des secteurs d'activités aussi divers que la production de biens et de services, l'énergie, les transports, l'immobilier d'entreprise ou les infrastructures. Sera également présenté un exemple de support de projet propre à la formation DUT GIM : le concours national d'éolien urbain (GIMEOLE). Celui-ci permet d'aborder des problématiques pluri-techniques dans le domaine des énergies renouvelables tout en s'appuyant sur les différents aspects de la formation.

(Remarque : cet article est principalement basé sur des ressources officielles : études ministérielles, référentiels et repères pour la formation (STS MS), PPN (DUT GIM), ... qui sont référencées dans le paragraphe « ressources » ainsi que sur les productions des organisateurs du concours GIMEOLE.)

1. Le métier de technicien(ne) supérieur(e) de maintenance et les secteurs d'activité

1.1. Les activités

L'activité du/de la technicien(ne) supérieure porte tout à la fois sur la maintenance des équipements, des installations et sur l'amélioration continue des procédés dont il/elle a la charge. Ce(tte) professionnel(le) polyvalent(e) exerce ainsi principalement les activités suivantes :

- réalisation des interventions de maintenances corrective et préventive,
- amélioration de la fiabilité, de la disponibilité, de la maintenabilité et de la sécurité des procédés,
- participation au choix et intégration de nouveaux systèmes, amélioration ou mise en conformité de systèmes ou procédés existants, mise en service,
- organisation des activités de maintenance, planification des tâches et gestion des plannings, gestion des contrats et de la sous-traitance,
- suivi des interventions et mise à jour de la documentation,
- évaluation des coûts de maintenance et suivi budgétaire du service,
- rédaction de rapports, communication interne et externe, production d'indicateurs (notamment via une GMAO),

- animation, encadrement et coordination des équipes d'intervention,
- information, voire formation,
- conseil et assistance technique dans certains domaines : diagnostic, méthodes d'intervention et outils, fiabilisation, examens et contrôles non destructifs (courants de Foucault, ultrasons, ...), surveillance (analyse vibratoire, d'huile, thermographie IR, ...), outils de maintenance prévisionnelle, ...

Ses connaissances des principes physiques, sa maîtrise du fonctionnement et de la constitution technologique des systèmes pluri-technologiques en font un(e) interlocuteur(ice) privilégié(e) tant pour les opérateur(ice)s que pour les décideur(euse)s.

1.2. Secteurs d'activité

Avec les compétences et connaissances acquises, ce(tte) professionnel(le) peut exercer ses activités dans pratiquement tous les secteurs :

- production de biens manufacturés, aéronautique, automobile, naval, constructions électronique et électrique,...
- agroalimentaire, *process* continu, chimie, pétrochimie, pharmaceutique,
- industries extractives et de transformation,
- production et gestion des énergies et des fluides, notamment dans le contexte actuel de transition énergétique,
- transports,
- médical et hospitalier,

- loisirs,
- tertiaire, bâtiment industriel et infrastructures, patrimoine,
- etc...

Il peut travailler dans différents services : études et travaux neufs, maintenance, production, qualité, sécurité, énergie et environnement, service technico-commercial, après-vente,...

1.3. Exigences transversales aux activités professionnelles

1.3.1. Santé et sécurité

Le développement au sein des entreprises d'un système de gestion de la santé et de la sécurité au travail contribue à la fois à réduire les risques accidentels, à prévenir les maladies professionnelles et à accroître la productivité.

Le/la futur(e) technicien(ne) de maintenance est sensibilisé(e) aux enjeux de santé et de sécurité. Pour cela, une démarche de maîtrise et de prévention des risques est nécessaire, incluant des formations liées aux habilitations professionnelles, en particulier électriques. Ces formations à la prévention des risques seront donc mises en œuvre en visant la prise en compte :

- du respect de la conformité (lois, normes et réglementation) ;
- des produits nocifs utilisés (tri, valorisation des déchets dangereux ou non) ;
- de l'identification des risques encourus (en les diminuant ou en les supprimant) ;
- de la conduite des équipements installations (optimisation de la production).

Le/la technicien(ne) de maintenance est l'un des principaux acteurs de la mise en œuvre de la politique globale de prévention de l'entreprise. Dans toutes les activités professionnelles induites par le métier, il/elle sera amené(e) :

- à participer, à son niveau, à l'analyse des risques professionnels en appréhendant les dangers pour sa santé et sa sécurité ainsi que pour celles des autres, tout en préservant les biens. Ces contributions seront consignées et permettront la mise à jour du document unique ;
- à mettre en œuvre les principes généraux de prévention des risques professionnels et de secours aux personnes.

1.3.2. Environnement

En vue de répondre aux exigences environnementales, à la gestion des déchets, et à la maîtrise des consommations énergétiques, l'action du/de la technicien(ne) de maintenance s'exerce dans le respect des normes françaises et européennes en vigueur. Ainsi, les accords de Kyoto puis Paris ont mis en évidence le besoin de limiter les émissions de gaz à effet de serre. Pour cela, il est obligatoire d'avoir une attestation d'aptitude pour manipuler des fluides

frigorigènes prévue par l'article R 543-106 du code de l'environnement.

La loi du 15 juillet 1975, renforcée par le décret du 4 janvier 1985, prévoit que chaque entreprise de production est responsable de ses déchets jusqu'à leur élimination complète. Le suivi, le contrôle, la traçabilité des circuits d'élimination des déchets sont imposés aux entreprises. Cette politique de maîtrise des déchets oblige le technicien de maintenance à réaliser les opérations de tri et de stockage provisoire dans des containers ou autres, conformes à la réglementation, afin d'orienter chaque catégorie de déchets vers une filière de traitement adaptée.

Face aux risques environnementaux immédiats, le/la technicien(ne) de maintenance doit intervenir pour les supprimer et mettre en œuvre des solutions techniques (analyse, kits anti-pollution, etc.) afin de minimiser l'impact sur l'environnement. C'est ainsi que ce/te technicien(ne) dans son activité quotidienne contribue à la préservation des ressources naturelles et des biens matériels.

1.3.3. Qualité

Les entreprises doivent satisfaire à des exigences croissantes de qualité et de gestion de la qualité. Nombreuses sont celles qui détiennent ou recherchent une certification qualité. La recherche et le maintien de ce type de certification affectent fortement les *process* de production et par voie de conséquence les services et les outils de maintenance. Le technicien de maintenance contribue à la démarche qualité au sein de l'entreprise, en améliorant ce *process* de production.

Le/la technicien(ne) apporte son concours dès la mise en service et tout au long de la vie du bien. En outre, il/elle adapte ses méthodes de travail pour suivre l'évolution du processus de production.

1.3.4. Coûts

Bien que le/la technicien(ne) supérieur(e) ne soit pas décideur.se dans ce domaine, les impératifs de coûts doivent être constamment pris en compte dans les choix et les actions de maintenance à réaliser sur un bien.

1.3.5. Communication dans une langue étrangère

Il est attendu que ce/te technicien(ne) maîtrise une langue étrangère (l'anglais généralement) afin de communiquer correctement avec les collaborateur(rice)s, les client(e)s et les fournisseur(se)s, d'écrire des rapports clairs et concis, de comprendre les instructions et de se former à de nouvelles techniques. Ces compétences sont désormais nécessaires dans les PME comme dans les grandes entreprises. Les rapports d'activité, les guides d'utilisation, les catalogues et documentations techniques sont le plus souvent rédigés en anglais. Les systèmes techniques disposent d'interfaces de dialogue en langue anglaise.

Les échanges entre technicien(ne)s européen(ne)s et internationaux(ale)s se généralisent en langue anglaise, langue de diffusion de l'information et de

communication à l'intérieur et à l'extérieur de l'entreprise, à l'écrit comme à l'oral.

2. Besoins en technicien(ne)s et agent(e)s de maîtrise

Le récent rapport « Prospective des métiers et des qualifications (PMQ) », exercice conjoint réalisé par France Stratégie et la DARES (direction de l'animation de la recherche, des études et des statistiques), réunit l'ensemble des partenaires et administrations concernés afin d'examiner les perspectives en matière d'évolution des ressources en main-d'œuvre et d'emploi par métiers. Le/la technicien(ne) ou agent(e) de maîtrise de la maintenance fait son entrée dans la liste des 20 métiers les plus pourvoyeurs d'emplois d'ici 2022 : 100000 départs en fin de carrière à remplacer et 42000 créations nettes, pour 479000 emplois en 2022 : « Sur la période 2012-2022, certains métiers industriels devraient bénéficier de créations d'emploi, mais en nombre limité : il s'agirait surtout de professions intermédiaires telles que les technicien(ne)s et les agent(e)s de maîtrise des industries de process et de la maintenance en raison d'équipements industriels ou non industriels toujours plus élaborés. »(1). Le rapport classe aussi ce métier dans le groupe de ceux offrant un fort potentiel de développement de l'apprentissage.

3. Formations de technicien(ne)s supérieur(e)s

3.1. formations multi-techniques

En termes de contenus spécifiques, les formations de technicien(ne)s supérieur(e)s en maintenance sont caractérisées par :

- un enseignement de spécialité en maintenance et sûreté de fonctionnement axé sur les outils et méthodes mais aussi sur les techniques avancées et innovantes,

- la formation aux exigences transversales nécessaires aux activités professionnelles,

- et un fort contenu multi-disciplinaire du point de vue des enseignements de physique appliquée et technologiques. En effet, afin d'appréhender correctement un système pluri-technologique dans la phase « exploitation et maintien en conditions opérationnelles » de son cycle de vie, il est nécessaire de posséder des connaissances actualisées et génériques dans les domaines suivants : électricité, électronique, électrotechnique et électronique de puissance, automatismes et informatique industrielle, réseaux locaux industriels, automatique, mécanique, matériaux, thermodynamique et thermique, mécanique des fluides, hydraulique et pneumatique, ... ceci implique l'intervention d'enseignant(e)s du secondaire de sciences industrielles de l'ingénieur (ingénierie mécanique et ingénierie électrique principalement) – ainsi que d'enseignant(e)s-chercheur(se)s spécialistes en DUT – et de sciences physiques et chimiques fondamentales et appliquées (SPCFA). Ces connaissances seront évidemment par la suite

contextualisées et spécialisées selon l'environnement professionnel futur du technicien.

3.2. Le DUT Génie Industriel et Maintenance

Les départements Génie Industriel et Maintenance forment en quatre semestres des technicien(ne)s supérieur(e)s ayant vocation à s'insérer dans les secteurs de la production (biens, énergie, transport, tertiaire et infrastructures...), de la recherche appliquée et des services aux entreprises. La formation est basée sur l'acquisition par les futurs technicien(ne)s supérieur(e)s de compétences, savoirs et savoir-faire issus de neuf activités professionnelles recensées et relatives à cette spécialité : maintenance corrective, maintenance préventive, amélioration, intégration, organisation, support logistique, animation et encadrement, sécurité et environnement, gestion de l'information.

L'enseignement vise à faire acquérir aux étudiant(e)s des méthodes de travail et de raisonnement autant que des connaissances, des principes de mise en œuvre et des procédés plutôt que des recettes.

La durée de formation (Cf. fig. 1) conduisant au DUT est de quatre semestres et répartie entre formation encadrée (1800h) et formation dirigée (300h). L'enseignement est divisé en trois Unités d'Enseignement (U(e)) par semestre, elles-mêmes formées de modules :

- 51 modules représentant le cœur de compétences dont le programme pédagogique national (PPP), soit 1500 heures, (Cf. fig. 2)
- 9 modules complémentaires à hauteur de 300 heures choisis par l'étudiant dans l'offre de formation.

GIM	Horaires		
Cœur de Compétence et PPP	1500 h (51 modules)	83%	Formation Encadrée
Modules Complémentaires	300 h (9 modules)	17%	1 800 h
Projets Tutorés	300 h		Formation Dirigée 300h Volume horaire étudiant
Formation en entreprise (stage)			10 semaines Volume horaire étudiant
			2 100 Heures
			350 h

Figure 1 : volume horaire de la formation (DUT GIM)

Le parcours de formation conduisant au DUT est constitué d'une majeure, qui garantit le cœur de compétence du DUT, et donc de modules complémentaires. Ces modules complémentaires sont destinés à enrichir le parcours de l'étudiant(e), en fonction de son Projet Personnel et Professionnel (PPP), qu'il/elle souhaite une insertion et une intégration professionnelles rapides (y compris via une poursuite d'études en licence professionnelle en apprentissage) - les capacités complémentaires attendues sont alors de l'ordre de l'approfondissement technologique et du renforcement des compétences professionnelles - ou qu'il/elle souhaite une poursuite d'études vers d'autres formations de l'enseignement

supérieur (études longues) – les capacités complémentaires attendues sont alors de l'ordre de l'ouverture scientifique. Dans ce dernier cas, les étudiant-e-s poursuivent généralement leurs études en école d'ingénieur - soit directement soit après une année de CPGE ATS - ou en licence 3 « Sciences Pour l'Ingénieur ».

UE 33	Ingénierie de la maintenance	Volume Horaire (3 CM, 12h TD, 15h TP)
	Maintenance, Technologie et Sécurité électriques	
M 3305C	MTS 3	Semestre 3
Objectifs du module : Appréhender la lecture et l'interprétation des schémas électroniques ou électrotechniques. Connaître les éléments permettant de valider une fonction électronique ou électrotechnique simple. Choisir, installer, mettre en service et maintenir des sous-ensembles électroniques ou électrotechniques. Choisir et mettre en œuvre des appareils pour les tests des circuits électroniques ou électrotechniques. Se sensibiliser aux problèmes de compatibilité électromagnétique (masses, blindages, filtres, ...).		
Compétences visées : Dans les domaines de l'électronique et de l'électrotechnique : <ul style="list-style-type: none"> - savoir lire et comprendre un schéma et valider une fonction simple, - être capable de choisir, d'installer, de mettre en service et de maintenir un sous-ensemble, - Mettre en œuvre des solutions de CEM, - être en mesure d'effectuer des tests avec les appareils appropriés. 		
Prérequis : M 1203, M 2201, M 2202, M 3201, M 3202		
Contenus : Exploitation de fiches techniques et de catalogues constructeurs. Conception et réalisation d'une fonction électronique ou électrotechnique à partir d'un cahier des charges. Maintenance des équipements électroniques ou électrotechniques et mise en œuvre d'outils de test. Eléments de compatibilité électromagnétique.		
Modalités de mise en œuvre : En respectant un cahier des charges, faire concevoir et réaliser des fonctions électronique ou électrotechnique simples à partir de bases de données techniques, économiques et environnementales Présenter les problèmes et solutions de compatibilité électromagnétique (CEM).		
Prolongements possibles :		
Mots clés : Installations et équipements – Fonctions électroniques – Fonctions électrotechniques - CEM		

Figure 2 : exemple de description pédagogique d'un module de formation (MTS3, DUT GIM)

Un stage en milieu industriel d'au moins 10 semaines complète cette formation. Il a pour but de confronter l'étudiant(e) aux fonctions de technicien(ne) supérieur(e) au sein d'une organisation d'entreprise.

Trois modules de projets tutorés sont conduits par les étudiant(e)s, en petits groupes. Les thèmes sont généralement fournis par des entreprises du territoire ou des laboratoires. Ceux-ci peuvent aussi s'inscrire dans des compétitions inter-départements (Cf. exemple développé plus loin de GIMEOLE), inter-IUT ou nationales. Les trois modules s'enchaînent afin d'aborder toutes les étapes de la conception d'une solution technique, d'une méthode ou d'un outil, à sa validation et sa mise en œuvre, notamment dans le cadre du suivi, de la surveillance et de la maintenance d'un équipement ou d'une installation.

En tant que formation dans un IUT, le DUT GIM présente différentes spécificités :

- enseignements qui peuvent être adaptés aux orientations industrielles locales. Ces adaptations, laissées libres à chaque département, peuvent être définies en concertation avec les professionnel(le)s du

territoire dans le cadre de leur participation et peuvent atteindre 20 % du volume horaire global de la formation.

- plusieurs modules tout au long de la formation permettent d'aborder les questions de la sécurité, de l'environnement et du développement durable. Les problématiques de développement durable sont également traitées au sein de plusieurs modules. En effet, les actions de maintenance sont susceptibles, par exemple, d'améliorer le bilan carbone de l'entreprise (efficacité énergétique des procédés et utilités) ou la durabilité des équipements et installations.
- d'autres modules permettent à l'étudiant(e) d'acquérir les connaissances nécessaires dans les domaines de la législation, de l'approche économique, de la propriété industrielle mais aussi de la gestion de projets.
- développement de l'autonomie en matière d'apprentissage grâce au tutorat et à l'innovation pédagogique. La formation de l'étudiant(e) aux techniques d'auto-apprentissage et de recherche d'informations est nécessaire pour assurer une bonne efficacité de cette approche. Ainsi, les modalités pédagogiques innovantes nommées « Apprendre Autrement » peuvent prendre, à titre d'exemple, la forme de visites d'entreprises ou d'installations, de rencontres avec des professionnels, de participations à des forums ou salons sur les métiers, de recherches sur des thèmes scientifiques ou techniques, d'utilisation de cours en ligne MOOC et plateformes d'enseignement à distance (plateformes de e-learning « Moodle » via l'ENT ou « IUT_en_ligne » par ex.), etc.
- un projet personnel et professionnel (PPP), développé au cours des deux ans, qui doit permettre à l'étudiant(e) de se faire une idée précise des métiers de la spécialité Génie Industriel et Maintenance et de ce qu'ils nécessitent comme aptitudes personnelles. Il doit amener l'étudiant(e) à mettre en adéquation ses souhaits professionnels immédiats et futurs, ses aspirations personnelles, ses capacités et ses manques afin de concevoir un parcours de formation cohérent avec le ou les métiers visés.
- des enseignants aux profils variés : issus du secondaire, enseignants-chercheurs,

professionnels ou CDI/CDD ayant ou ayant eu une activité professionnelle en relation avec la spécialité enseignée.

- des liens avec des universités étrangères : échanges d'étudiants, semestre à l'étranger, intervention d'enseignant(e)s d'universités partenaires, projets communs, ...

3.3. Le BTS Maintenance des Systèmes

Ce BTS, issu de la rénovation des BTS MI (maintenance industrielle) et FEE (fluides, énergies et environnement) intègre 3 options : systèmes de production, systèmes énergétiques et fluidiques et systèmes éoliens.

En fonction de la taille et de l'organisation de l'entreprise industrielle, le/la titulaire du BTS prend en charge, au-delà de son rôle de technicien(ne) de terrain, l'organisation des interventions et le dialogue avec les intervenant(e)s extérieur(e)s. Il/elle intervient notamment sur les équipements et installations qu'ils soient regroupés sur un même site ou qu'ils soient répartis sur un territoire.

A 7	CONDUITE	T 7.2	Effectuer les réglages et les paramétrages
Description de la tâche			
<ul style="list-style-type: none"> Effectuer les réglages et les paramétrages des éléments de l'installation. Réaliser périodiquement les mesures des grandeurs physiques. Effectuer périodiquement les relevés de consommations énergétiques, fluidiques et les quantités vendues au client. Optimiser le fonctionnement des installations énergétiques. Calculer et analyser les ratios d'énergie par rapport aux engagements contractuels. Réaliser et renseigner un cahier de suivi. Participer à l'analyse des indicateurs d'état et de leurs dérivés. Proposer des modifications de réglages ou paramètres sur une installation. 			
Situation de début			
<ul style="list-style-type: none"> Une installation fonctionnant ou prête à fonctionner (raccordée, disposant des sources d'énergie nécessaires) (livret de chaufferie ou cahier de mise en route avec les réglages initiaux). Les appareils de contrôle sont étalonnés. 			
Conditions de réalisation			
<ul style="list-style-type: none"> Moyens <ul style="list-style-type: none"> La documentation technique de l'installation ou du bien. Les relevés sur le site. Le matériel informatique et les logiciels appropriés. Liaisons <ul style="list-style-type: none"> Les fournisseurs. Le concepteur. Le service exploitation. Références et ressources <ul style="list-style-type: none"> Le guide de conduite. Le livret de chaufferie. L'historique des consommations. Les notices techniques. Les préconisations de maintenance. 			
Résultats attendus			
<ul style="list-style-type: none"> Le dossier établi permet de recueillir les indicateurs d'état de l'ouvrage. Les bilans des consommations sont établis. Le dossier permet d'analyser le comportement de l'ouvrage. Les dérivés de fonctionnement sont constatés et les causes sont déterminées. Les points critiques sont identifiés. Les résultats sont interprétés pour fixer les valeurs et tolérances des réglages. Un rapport est rédigé et présenté à la hiérarchie. La correction effectuée respecte le cahier des charges. Les paramètres modifiés permettent une amélioration du fonctionnement. Les procédures de mesurage sont correctement mises en œuvre. Les valeurs de réglages sont optimisées. Les performances sont atteintes. Une note de remise en service est établie en indiquant entre autres les paramètres de fonctionnement de l'installation. 			
Autonomie			
<i>Champ technique</i>	<i>Autonomie totale</i>	<i>Autonomie partielle</i>	<i>Tâche non réalisée</i>
Systèmes de production			
Systèmes énergétiques et fluidiques			
Systèmes éoliens			

Figure 3 : exemple de description d'activité et de tâche professionnelle (BTS MS)

Bien que le cœur de métier du/de la technicien(ne) MS mobilise des compétences et des savoirs communs, les activités et tâches professionnelles ne sont pas intégralement identiques dans les trois options (systèmes de production, systèmes énergétiques et fluidiques, systèmes éoliens). Une adaptation de la formation et de la certification à la spécificité technique de chaque domaine a été retenue afin de répondre aux exigences de la maintenance de ces systèmes au travers d'un BTS à trois options.

Le référentiel est bâti autour d'un socle commun de compétences et d'une approche pluri-technique des systèmes. Sa structure est organisée à partir des activités et tâches professionnelles visées desquelles découlent les compétences professionnelles, elles mêmes décrites en savoirs et savoirs-faire (Cf. fig. 3 et fig. 4).

C 2 - ANALYSER LE FONCTIONNEMENT D'UN BIEN		
C 23 Identifier et caractériser la chaîne d'énergie	Tâches : A1 – A2 – A3 – A4 – A7	
Données	Compétences détaillées	Indicateurs de performance
<ul style="list-style-type: none"> Le dossier technique du bien. La documentation technique. Les textes réglementaires. Les performances attendues. Les contraintes d'exploitation. Les consommations et productions d'énergie. 	<p>Identifier les composants qui réalisent les fonctions :</p> <ul style="list-style-type: none"> alimenter, distribuer, convertir, transmettre, stocker, moduler. <p>Justifier le rôle, les caractéristiques et l'agencement des composants qui réalisent ces fonctions.</p> <p>Identifier les matériels concourant à assurer la protection des personnes et des biens.</p> <p>Justifier le choix de la source d'énergie.</p> <p>Justifier la valeur des paramètres de réglage.</p> <p>Établir le bilan de puissance, de consommation ou de production de l'installation.</p> <p>Critiquer les solutions techniques retenues.</p>	<ul style="list-style-type: none"> Les composants sont correctement identifiés. Le rôle, les caractéristiques et l'agencement des composants sont correctement justifiés. Les matériels sont identifiés. La protection des personnes et des biens est caractérisée. Le choix de la source d'énergie et les conditions d'exploitations sont justifiés. La valeur des paramètres de réglage est correctement justifiée. Le bilan est établi. Les avantages et les inconvénients des solutions techniques sont identifiés.

Figure 4 : exemple de description de la compétence C2 (BTS MS)

Les savoirs sont décomposés en savoirs et savoir-faire technologiques (Cf. fig.5 et fig.6) et fondamentaux (culture générale et expression, anglais, mathématiques et physique-chimie) décrits précisément dans le référentiel de formation.

TÂCHES DU RAP	MACRO-COMPÉTENCES	COMPÉTENCES	SAVOIRS TECHNOLOGIQUES ASSOCIÉS					
			S5 Analyse et fonctionnelle	S6 Chaîne d'énergie	S7 Flux d'information	S8 Santé - sécurité - environnement	S9 Stratégie et organisation	S10 Fabrication et maintenance et de contrôle
1.1	Réaliser les interventions de maintenance	C 11 Diagnostiquer les pannes						
1.3, 1.4, 6.1		C 12 Réparer, dépanner et éventuellement remettre en service						
2.2, 2.3, 7.4		C 13 Réaliser des opérations de surveillance et d'inspection et/ou de maintenance préventive						
3.3, 6.1, 4.2		C 14 Réaliser des travaux d'amélioration, réceptionner un nouveau bien						
1.1, 1.3, 1.4, 2.2, 4.2, 7.1, 7.2, 7.3	Analyser le fonctionnement d'un bien	C 15 Identifier les risques pour les personnes ou l'environnement, définir et respecter les mesures de prévention adaptées						
1.1, 2.1, 3.1, 3.2		C 21 Analyser la fiabilité, la maintenabilité et la sécurité						
A1, A2, A3, A4, A7		C 22 Analyser l'organisation fonctionnelle, structurelle et temporelle						
		C 23 Identifier et caractériser la chaîne d'énergie						
	C 24 Identifier et caractériser la chaîne d'information							
3.1, 3.2, 5.1, 5.2, 6.1	Organiser l'activité de maintenance	C 31 Organiser la stratégie et la logistique de maintenance						
1.2, 2.1, 2.2, 2.3, 6.1		C 32 Préparer les interventions de maintenance corrective et préventive						
3.3, 4.2, 6.1		C 33 Préparer les travaux d'amélioration ou d'intégration d'un nouveau bien						
3.2, 4.1, 6.1, 7.2, 7.4	Concevoir des solutions techniques	C 41 Proposer et/ou concevoir des solutions pluritechniques d'amélioration						
1.2, 2.2, 2.3, 5.1, 5.2, 6.1, 7.3, 7.4		C 51 Rédiger des comptes rendus et renseigner les outils de maintenance						
6.1, 6.2	Communiquer les informations	C 52 Présenter une activité de maintenance						
6.1, 6.2		C 53 Exposer oralement une solution technique						
7.1, 7.2		C 61 Assurer la mise en service et l'arrêt						
6.1, 7.3, 7.4	Conclure en vue d'optimiser ses opérations	C 62 Réaliser la conduite						

Figure 5 : relations tâches-compétences-savoirs technologiques (BTS MS)

MODULES PHYSIQUE ET CHIMIE	Transversal	Systèmes de production	Systèmes énergétiques et fluidiques	Systèmes éoliens
S4.1 - Énergie	X			
S4.2 - Distribution de l'énergie électrique	X			
S4.3 - Électromagnétisme		X		X
S4.4 - Conversion de l'énergie électrique		X		X
S4.5 - Capteurs et chaîne de mesures	X			
S4.6 - Les ondes mécaniques	X			
S4.7.1 - Thermodynamique : fondamentaux	X			
S4.7.2 - Thermodynamique : applications			X	
S4.8 - Transferts thermiques	X			
S4.9 - Mécanique des fluides	X			
S4.10 - États de la matière			X	
S4.11 - pH-métrie et réactions acide-base			X	
S4.12 - Chimie : Oxydoréduction	X			
S4.13 - Matériaux organiques		X		X

Figure 6 : exemples de savoirs à aborder en fonction de l'option du BTS MS

Ici aussi, un stage en entreprise d'une durée de 10 semaines est prévu (4 semaines en fin de première année / 6 semaines lors du premier semestre de deuxième année). Par ailleurs, en parallèle des questions d'évaluations détaillées dans les textes officiels, ces derniers présentent également les démarches et l'organisation pédagogiques innovantes qu'il est nécessaire de mettre en oeuvre au sein de l'équipe pédagogique et de l'établissement pour attendre les objectifs de formation.

Des poursuites d'études sont possibles, principalement en licences professionnelles pour se spécialiser ou en école d'ingénieur. Dans ce dernier cas, le passage par une CPGE ATS est alors souvent nécessaire.

4. Zoom sur le concours inter-départements GIMEOLE (DUT GIM)



4.1. Présentation

Créé à l'initiative de l'équipe pédagogique du département GIM (Génie Industriel et Maintenance) de l'IUT de Cherbourg en 2008, le concours GIMEOLE (www.gimeole.fr) accueille tous les ans près de 150 étudiant-e-s venus de toute la France. Le 16, 17 et 18 mars dernier, les équipes, issues des différents départements GIM de France, ont eu la possibilité de confronter les éoliennes urbaines qu'ils ont conçues, fabriquées et testées au cours de l'année. Le but du concours est de concevoir et fabriquer un aéro-générateur le plus performant possible, tout en respectant un ensemble de contraintes liées à son utilisation en milieu urbain. Aussi, le classement général prend évidemment en compte la quantité d'énergie produite (50 % des points) mais aussi de nombreux critères complémentaires.

C'est la deuxième année consécutive que Roanne accueille le concours et met donc à disposition sa soufflerie aérodynamique permettant de reproduire des vents urbains à la fois laminaires et/ou très perturbés et ce, avec deux veines indépendantes :

- la veine principale (veine 1) génère un flux d'air de 0 à 80 km/h, relativement laminaire,
- la veine secondaire (veine 2) génère un flux d'air de 0 à 40 km/h, très perturbé (sortie de ventilateur).

Seulement deux souffleries de ce type existent en France actuellement (Cf. figure 7).

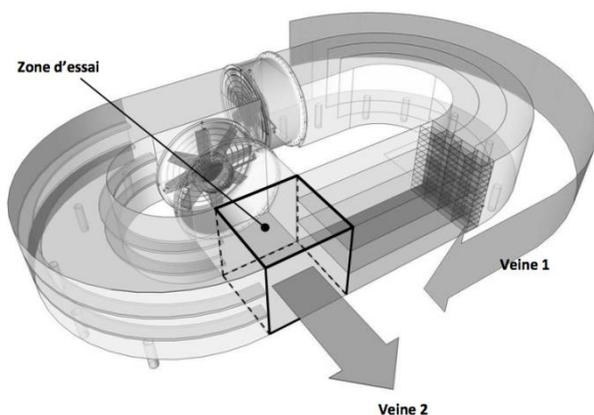


Figure 7 : vue 3D de la soufflerie

Les éoliennes sont placées dans la zone d'essai sur un pied pouvant pivoter à 360° et ce, dans les deux sens (Cf. fig. 8 et fig. 9). Lors des différentes manches, les intensités des deux flux d'air sont variables, permettant de simuler des changements rapides d'orientation du vent. La rotation du pied permet de ne pas favoriser un côté de l'éolienne par rapport à un autre.



Figures 8 et 9 : lors d'une manche du concours et au cours de la mise en place d'un aérogénérateur urbain en soufflerie par l'équipe de Blagnac.

A aucun moment la partie mécanique de l'éolienne ne doit pouvoir sortir d'un cube de 780mm de côté (orientation libre), centré sur l'axe vertical central de la

zone d'essai. L'ensemble des composants électriques et électroniques peut être réparti à la fois dans le volume dédié à la base (780 x 780 x 400) mais aussi dans le cube dédié à la partie mécanique (turbine principalement). Avant de pouvoir accéder à la zone d'essai, chaque éolienne doit passer par le stand du contrôle technique pour vérifier la conformité de l'éolienne (sécurité, respect du règlement et de la catégorie choisie).

Les éoliennes doivent fournir l'énergie produite à une charge électrique équipée d'un dispositif de mesure de courant, de tension, de puissance, et d'énergie. Lors des épreuves, chaque éolienne sera successivement soumise aux deux types de charge suivants :

- **charge en $I^{1/2}$** : charge se rapprochant de la caractéristique tension/courant idéalement bien adaptée aux éoliennes et pour laquelle la tension est proportionnelle à la racine carré du courant,
- **charge 48V** : charge équivalente à une batterie 48V vue à travers un redresseur.

Lors de chaque manche officielle, toutes les éoliennes sont soumises au même cycle de vent. Ce cycle comporte les phases suivantes :

- **Phase 1 : vents théoriques**
 - o pied pivotant (180° dans les deux sens)
 - o charge en $I^{1/2}$
 - o montée progressive du vent de 10 à 80 km/h puis stabilisation à 40 km/h
 - o durée 60 s

Cette phase permet de tester différents paramètres de l'éolienne, notamment sa vitesse d'accroche et son fonctionnement à vitesse maximale et stabilisée, avec un flux laminaire et un flux très légèrement perturbé.

- **Phase 2 : vents réels**
 - o pied pivotant (180° dans les deux sens)
 - o charge en 48V
 - o durée 180 s
 - o profil très varié simulant des vents perturbés : vents forts, vents faibles, vents moyens, phases montantes, phases stationnaires, phases descendantes, série de rafales de vent, alternance entre la veine 1 et la veine 2,
 - o lors des dix dernières secondes, l'éolienne est testée avec la soufflerie à vitesse maximale (« crash-test »).

Cette phase permet de tester le comportement des éoliennes en milieu urbain. La répartition des vitesses de vents (hors phase de « crash-test ») suit approximativement la répartition des vents observés dans la nature (loi de Rayleigh avec une vitesse moyenne de 40 km/h).

- **Phase 3 (facultative) : essai de freinage**

A la demande de l'équipe, un essai de freinage peut être réalisé. Le but est de tester la mise en sécurité de l'éolienne en cas de vent trop fort. La soufflerie génère

un flux d'air de vitesse maximale (80 km/h) et l'éolienne doit réagir en se plaçant en mode « sécurité » (arrêt total ou limitation de la vitesse) soit de manière automatique soit par intervention manuelle. Pour les éoliennes qui réussissent cet essai, un bonus sera apporté au critère « fiabilité ».

A partir de l'édition 2018, le concours introduit deux catégories :

- **catégorie « ultimate »** : l'équipe doit avoir conçu et réalisé entièrement l'éolienne, aussi bien les parties électrique, électronique, mécanique que la turbine et les pales. Aucun gros constituant de l'éolienne ne doit être une copie ou une amélioration d'un gros constituant d'une éolienne du commerce. L'équipe doit être capable d'expliquer le travail réalisé et de valoriser la création de l'éolienne de A à Z.
- **catégorie « open »** : cette catégorie est moins restrictive. Sont autorisées l'utilisation de génératrices du commerce ainsi que la copie ou l'amélioration de gros constituants d'éoliennes du commerce (turbine ou électronique de régulation par exemple). L'équipe doit être capable d'expliquer le travail réalisé et de valoriser les améliorations apportées.

Pour plus d'informations, on trouvera sur le site www.gimeole.fr tous les classements par critère ainsi que le descriptif détaillé des activités organisées durant le concours 2017 (livret d'accueil avec animations, défis, phase du concours, planning...). On y trouvera aussi le règlement du concours GIMEOLE 2018 regroupant toutes les informations relatives à la soufflerie, aux charges, aux phases d'essai et aux critères qui seront utilisés par les jurys.

4.2. Intérêt du concours GIMEOLE pour la formation de technicien(ne)s supérieur(e)s (DUT GIM)

L'intérêt d'un tel événement au cours de la formation de nos jeunes technicien(ne)s supérieur(e)s réside dans le fait de pouvoir les confronter, sur un même support technique et sur une période plus ou moins longue (fin S2 et/ou S3 et/ou début S4), à différents aspects de l'étude d'un système pluritechnologique :

- conception, fabrication et essais :

les critères « performance » (énergie totale fournie en phase 1 et en phase 2 - meilleur total sur les deux essais), « innovation » (par rapport aux éoliennes du commerce, par rapport aux autres éoliennes présentées, par rapport aux éoliennes du même département les années précédentes), « vitesse d'accrochage » (pour le premier watt produit en phase 1), « intégration urbaine » (esthétique, design, finitions, nuisances

sonores, sécurité) ainsi que les prix spéciaux « génératrice » et « écoconception » poussent les étudiant-e-s à imaginer des solutions techniques innovantes, basées sur des principes nouveaux ou sur des idées ou solutions existantes ainsi qu'à envisager les moyens de fabrication et d'essai nécessaires. Une recherche bibliographique relative aux principes physiques, l'étude des aérogénérateurs réalisés depuis une dizaine d'années (Cf. paragraphe 4.3.) voire l'étude de solutions industrielles commercialisées peuvent servir de socle de base à l'élaboration de l'aérogénérateur. La mobilisation des connaissances et compétences acquises dans les différents modules d'enseignement de la formation permet alors de renforcer auprès de l'étudiant(e) l'intérêt pour la formation qui se veut pluridisciplinaire du point de vue technologique.

- génie industriel :

le prix spécial du « génie industriel » permet de valoriser la gestion du projet (planification, ressources, répartition des tâches, pilotage ...), l'organisation des tâches de conception, de fabrication et d'essais ainsi que les choix de procédés qui auront été faits par l'équipe pour aboutir au prototype pour le concours et, pourquoi pas, à un aérogénérateur facilement industrialisable en petite série. Le groupe d'étudiant(e)s assure alors la maîtrise d'oeuvre du projet selon le cahier des charges fourni (règlement du concours) et peut ainsi développer, dans ce cadre, les connaissances et compétences visées par la formation.

- maintenance et fiabilité :

les critères « fiabilité » (pannes ou défaillances pendant le concours, solidité, tenue aux intempéries, système de freinage) et « maintenance » (intégration de capteurs à l'éolienne, traitement-communication des informations à l'utilisateur, documents - gammes de montage-démontage, de maintenance, etc..) permettent de s'assurer que, dans le cadre de l'exploitation de l'aérogénérateur (durant le concours principalement mais aussi durant les phases d'essai pré-concours si possible), l'équipe a pris en compte et considéré les différents aspects de la maintenance (corrective, préventive voire prédictive et de la « sûreté de fonctionnement » de son système). Nous sommes là aussi au cœur de la formation et le cadre du réinvestissement des contenus abordés en classe et des compétences acquises est idéal.

- communication :

Enfin, le critère de « communication » (présentation multimédia, pages internet dédiées sur le site www.gimeole.fr, poster technique, documents complémentaires, gestion du stand, présentation orale au jury, ...) permet aux étudiant(e)s de synthétiser les informations relatives à leur production et de mettre en avant leurs solutions et organisations auprès des jurys et des visiteurs. Il s'agit là d'un aspect important car ces données, ainsi capitalisées, permettent à chaque équipe d'avancer d'une année sur l'autre en sachant ce

que leurs aîné(e)s ont réalisé et quels résultats ils/elles ont obtenus les années précédentes.

Véritable outil de promotion de la formation, GIM'EOLE est aussi une vitrine des connaissances et savoir-faire acquis par les étudiant-e-s au cours de leur formation. Le choix, la réalisation et la mise en œuvre des différentes solutions technologiques dont sera constitué le système pluri-technologique permet de placer l'étudiant(e) en situation d'apprentissage par l'action et les essais selon une démarche itérative et qui plus est, dans le cadre d'un travail collaboratif et organisé par le pilote du projet. Ces actions peuvent être menées dans le cadre des modules de projet tuteuré (Cf. PPN DUT GIM). Certains départements, comme celui de Saint-Denis (Cf. fig. 10), ont poussé les étudiant(e)s à créer leur association étudiante pour financer le projet et permettre la mise en place d'une réelle dynamique en dehors des heures de présence obligatoire (travail sur l'éolienne aux pauses, le jeudi après-midi et en soirée). La nature de l'objet technique à réaliser et à exploiter n'est pas pour rien dans la motivation des participant(e)s au concours et la grande majorité d'entre eux/elles parviennent sans mal à valoriser cette expérience dans les jurys d'admission en école d'ingénieur ou en licence professionnelle. Enfin, l'ouverture que permet ce projet sur les problématiques de sécurité, de développement durable et d'accès à l'énergie est plus qu'appréciée par les étudiant-e-s mais aussi par les lycéen(ne)s et les organismes financeurs.



Figure 10 : photo de l'équipe de St-Denis 2 (GIM'Eole 2017). Retrouvez la vidéo de l'aventure des équipes de St-Denis lors du concours 2017 sur : <https://www.univ-paris13.fr/departement-genie-industriel-et-maintenance-gim-concours-gimeole/>

4.3. 10 ans d'innovation à GIMEOLE

Au cours des 10 éditions du concours, nombreux ont été les prototypes mettant en œuvre des principes, des constituants, des matériaux et des procédés de fabrication originaux et pertinents. Quelques exemples sont donnés ici :

- **2008** : pour la première édition du concours les éoliennes sont principalement

de type Savonius (ex. : Cherbourg qui remporte la première édition du concours). Les éoliennes de type Savonius fonctionnent selon le phénomène de trainée : le vent pousse les pâles. Ces éoliennes génèrent un couple important et démarrent seules, même avec des vents assez faibles. Après le concours, cette éolienne a été installée à proximité de l'IUT de manière à produire de l'électricité qui sert à recharger des vélos électriques.

- **2009** : Schiltigheim présente une éolienne innovante à 8 pâles textiles, avec une génératrice entièrement « faite maison ». Epinal réalise une éolienne entièrement en bois. Durant les dix ans du concours GIMEOLE, de nombreuses éoliennes ont été réalisées soit avec des matériaux écologiques soit avec des matériaux de récupération (éoliennes « zéro euro »).
- **2010** : plusieurs équipes présentent des turbines à très bas coût, réalisées entièrement à partir de matériaux de récupération (vieilles roues de vélo, vieux bidons métalliques ou tubes PVC pour Perpignan). Pour la première fois des éoliennes « mixtes » (Savonius et Darrieus intégrées dans la même éolienne) sont présentées au concours.
- **2011** : Saint-Denis présente un concept innovant d'éolienne-drapeau : un drapeau qui flotte au vent entraîne une génératrice linéaire. Cette éolienne a été très délicate à mettre au point et à fiabiliser. Différentes évolutions ont été présentées trois ans de suite au concours.
- **2012** : Saint-Nazaire présente une éolienne originale fabriquée à partir d'une voile, de tiges de bambou et de cordes pour la structure. La voile servait à canaliser le flux d'air, pour le concentrer sur une turbine de taille réduite qui produisait l'énergie.



Figure 11 : photo de la turbine de Bayonne (2013)

- **2013** : Tulle présente une éolienne dont les pales s'orientent de manière dynamique avec le vent. Le pilotage des pales est effectué sans électronique, grâce à un système de chaînes. Bayonne présente une éolienne à la forme originale, obtenue à l'aide de plusieurs plaques de tôle qui ont été roulées, de manière à obtenir une turbine de type Savonius (Cf. fig.11).
- **2014** : Roanne présente une éolienne munie d'un bouclier. La forme particulière du bouclier, mise au point par essais successifs en soufflerie, fait qu'il se positionne de manière dynamique en fonction de la direction du flux d'air afin de masquer les pâles qui remontent au vent et ce, sans avoir besoin de le piloter. Les gains estimés sont entre 10 et 40% selon le type de turbine avec lequel il est associé. C'est une évolution qui vient améliorer le concept présenté en 2013 qui avait alors permis à l'équipe de Roanne de gagner.
- **2015** : en 2014 l'éolienne de Perpignan avait déjà été très performante mais avait ..(e)xplosé ! En 2015, la fiabilité a été améliorée et les pales en forme d'anneau de la turbine renforcées, ce qui a leur a permis de remporter le concours. Ce type d'éolienne, à axe horizontal, est bien adapté aux vents réguliers des campagnes, mais moins aux vents perturbés des zones urbaines. Sur ce prototype, le manque d'efficacité lorsque le vent change de direction est compensé par une puissance instantanée importante (1000W à 80 km/h). Pour la première fois l'impression 3D est utilisée par Cherbourg pour réaliser les pales d'une éolienne de type Darrieus.

Un prototype d'éolienne est présenté (hors-concours) qui produit de l'énergie uniquement grâce à des éléments piézo-électriques.

- **2016** : l'éolienne de Saint-Denis, de type Darrieus, remporte l'édition 2016. Ses pales, son pied et même sa génératrice sont réalisés en bois. La génératrice, très performante, a été mise au point par les étudiant-e-s grâce aux moyens d'essais (petite soufflerie, équilibrée, charge électrique, ...) de leur GIM'lab. Les éoliennes à axe vertical sont insensibles aux changements de direction du vent et sont donc bien adaptées aux vents perturbés des villes. Plusieurs équipes ont travaillé sur l'implantation de systèmes de supervision permettant de contrôler le fonctionnement de l'éolienne à distance.
- **2017** : Roanne présente une éolienne (hors-concours) dont la turbine a été fabriquée en un seul bloc par une imprimante 3D de grand format.

5. Conclusion

Bien que moins connues que leurs homologues des domaines spécifiques de la conception électrique (BTS SN ou électrotechnique, DUT GEII), mécanique (BTS CPI ou CPRP ou CRSA ou DUT GMP) ou thermique (BTS FED ou DUT GTE), les formations menant au DUT GIM et au BTS MS méritent une plus grande audience auprès des jeunes lycéens et lycéennes, voire des enseignant(e)s de SII et des professionnel(le)s de l'orientation. Bien que concernant une autre étape du cycle de vie de l'équipement ou de l'installation (l'exploitation et le maintien en conditions opérationnelles) que les formations citées précédemment, leur caractère pluridisciplinaire ouvrent de nombreuses possibilités d'évolutions professionnelles et personnelles aux titulaires.

6. Ressources et liens

- **(1) Les métiers en 2022** (<http://www.strategie.gouv.fr/publications/metiers-2022>)
- **Association Française des Ingénieurs de Maintenance (AFIM) et « réseau maintenance francophone »** (<http://www.afim.asso.fr>).
- « **Maintenance Expo** » et le 28ème forum francophone de la maintenance (Afim) : 27 au 29 mars 2018 - Parc des expositions de Paris Nord Villepinte.
- **Revue « Maintenance & Entreprise - les services à l'industrie »** apporte l'information indispensable dans tous les secteurs clés de l'industrie où la maintenance constitue une

- fonction stratégique (<http://www.maintenance-entreprise.com>)
- **Revue « Production Maintenance »** est le magazine d'information professionnelle de référence sur la maintenance et la prévention des risques (<http://www.production-maintenance.com>)
 - **Techniques de l'Ingénieur** (<http://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/genie-industriel-th6/maintenance-ti095/>) : 64 articles sur 4 rubriques (Fonction stratégique de la maintenance / Méthodes et management de la maintenance / Mise en œuvre de la maintenance / Soutien de maintenance).
 - Quelques **normes françaises** relatives à la maintenance (AFNOR) :
 - NF X60-000 Avril 2016 : Maintenance industrielle - Fonction maintenance
 - NF EN 15341 Juin 2007 : Maintenance - Indicateurs de performances clés pour la maintenance
 - NF X60-027 Août 2013 : Maintenance - Processus maintenance et indicateurs associés
 - NF EN 13460 Octobre 2009 : Maintenance - Documentation pour la maintenance
 - NF EN 13306 Octobre 2010 : Maintenance - Terminologie de la maintenance
 - NF EN 15628 Octobre 2014 : Maintenance - Qualification du personnel de maintenance
 - FD X60-090 Juillet 2011 : Maintenance - Critères de choix du type de contrat de maintenance - Contrat de moyens - Contrats de résultats
 - ...
 - **Programme Pédagogique National du DUT Génie Industriel et Maintenance** ([http://www\(e\)nseignementsup-recherche.gouv.fr/cid53575/programmes-pedagogiques-nationaux-d.u.t.html#nouveaux-programmes-DUT-categories](http://www(e)nseignementsup-recherche.gouv.fr/cid53575/programmes-pedagogiques-nationaux-d.u.t.html#nouveaux-programmes-DUT-categories))
 - **Référentiel BTS Maintenance des Systèmes** ([http://eduscol\(e\)ducation.fr/sti/sites/eduscol\(e\)ducation.fr.sti/files/textes/formations-bts-bts-maintenance-des-systemes-ms/3950-referentiel-bts-ms_0.pdf](http://eduscol(e)ducation.fr/sti/sites/eduscol(e)ducation.fr.sti/files/textes/formations-bts-bts-maintenance-des-systemes-ms/3950-referentiel-bts-ms_0.pdf)) et **Repères pour la formation BTS Maintenance des Systèmes** ([http://eduscol\(e\)ducation.fr/sti/sites/eduscol\(e\)ducation.fr.sti/files/textes/formations-bts-bts-maintenance-des-systemes-ms/5239-reperes-pour-la-formation-bts-ms-30112014.pdf](http://eduscol(e)ducation.fr/sti/sites/eduscol(e)ducation.fr.sti/files/textes/formations-bts-bts-maintenance-des-systemes-ms/5239-reperes-pour-la-formation-bts-ms-30112014.pdf))
 - **Séminaire national BTS Maintenance des Systèmes** des 13 et 14 novembre 2014 : ([http://eduscol\(e\)ducation.fr/sti/seminaires/seminaire-national-bts-maintenance-des-systemes](http://eduscol(e)ducation.fr/sti/seminaires/seminaire-national-bts-maintenance-des-systemes)).
 - **Fédération des Services Energie Environnement** (<http://www.fedene.fr>)
 - **Syndicat des Energies Renouvelables** ([http://www\(e\)nr.fr](http://www(e)nr.fr))
 - **Confédération Française pour les Essais Non Destructifs** (<http://www.cofrend.com>)
 - **Revue l'Usine Nouvelle** (<http://www.usinenouvelle.com/recherche=maintenance>)
 - **EDUSCOL STI** – ressources pédagogiques pour STS MS : [http://eduscol\(e\)ducation.fr/sti/](http://eduscol(e)ducation.fr/sti/)
 - **IUT en ligne** – ressources pédagogiques pour les enseignements en IUT : [http://www.iutenligne\(ne\)t/](http://www.iutenligne(ne)t/)
 - site national de ressources du **DUT GIM** : <http://www.iutgim.org/>
 - site du concours national étudiant **GIMEOLE** : www.gimeole.fr

Diagnostic de machines électriques utilisant six capteurs de champ extérieur

MIFTAH IRHOUMAH(1)(2), REMUS PUSCA(1), ERIC LEFEVRE(2), DAVID MERCIER(2), RAPHAEL ROMARY(1)

(1) Univ. Artois, EA 4025, Laboratoire Systèmes Electrotechniques et Environnement (LSEE), F-62400, Béthune, France

(2) Univ. Artois, EA 3926, Laboratoire de Génie Informatique et d'Automatique de l'Artois (LGI2A), F-62400, Béthune, France

miftahaldwiab_irhoumah@ens.univ-artois.fr

Résumé. Cet article propose une méthode de diagnostic pour détecter des défauts de type court-circuit entre spires dans les machines électriques. Cette méthode présente l'avantage d'être totalement non-invasive en utilisant comme information le champ magnétique rayonnant autour de la machine. Les informations sont fournies par six capteurs de flux externes fixés sur une « ceinture » autour de la machine. Dans cet article, on exploitera deux indicateurs de défauts : le « Sens de Variation des Amplitudes, SVA » et le « Coefficient de corrélation, r » relatifs à une raie sensible du spectre du champ extérieur. Ces méthodes ont la capacité d'identifier les bobines défectueuses. Les résultats expérimentaux sont relatifs à une machine asynchrone (MA) à cage d'écurie de 4 pôles, 50 Hz, 3.5 kW, 380/660 V, $I_n=23.2$ A, $\cos\phi=0.83$, 1450 tr/min, possédant 48 encoches au stator et 32 barres rotoriques.

Abstract: This paper proposes a diagnostic method for detection of inter turn short circuits in electrical machines. The method has the advantage of being totally non-invasive by using as information the magnetic field around the machine. This information is provided by six external flux sensors placed on a "belt" fixed on the machine. In this paper, two indicators of the fault are used: the "direction of variation of the amplitudes SVA" and "Coefficient of correlation r " relative to a sensitive line of the spectrum of the external field. These methods have the ability to identify the defective coil. The experimental results concern a 4-pole, 50 Hz, 3.5 kW, 380/660 V, $I_n = 23.2$ A, $\cos\phi = 0.83$, 1450 rpm, induction machine with 48 stator slots and 32 rotor bars..

Mots clés : Machines électriques, coefficient de corrélation, capteur bobiné, court-circuit entre spires, champ magnétique extérieur.

1. Introduction

Les moteurs asynchrones sont les machines électriques tournantes les plus couramment utilisées dans l'industrie. Ces machines sont sujettes à différents types de défaillance : roulements (41%), bobinage statorique (37%), rotor (10%), ou d'autres types de défaut (12%). La défaillance du bobinage statorique concerne essentiellement le défaut de court-circuit entre spires, qui est par conséquent l'un des défauts les plus communs dans les machines asynchrones. Les raisons des défaillances dans les machines électriques tournantes sont diverses et peuvent avoir pour origine la conception, la tolérance de fabrication, l'assemblage, l'installation, l'environnement de travail, la nature de la charge. La défaillance du bobinage statorique est considérée comme grave car elle augmente la contrainte sur l'isolation du bobinage, ce qui peut à terme endommager le bobinage jusqu'à entraîner une rupture de l'isolation avec la masse [1][2]. Il est donc important de détecter un tel défaut rapidement avant le déclenchement des protections différentielles [3]. Les problèmes de détection de défauts de court-circuit entre spires dans les machines électriques ont fait l'objet de

nombreuses recherches et d'investigations dans diverses applications depuis de nombreuses années [4]. Les méthodes classiquement utilisées pour le diagnostic des machines électriques sont basées sur des mesures du courant, de la tension, des vibrations, ou encore du bruit. Bien que leur efficacité ait été démontrée, la généralisation de ces méthodes dans le milieu industriel reste limitée car leur coût est relativement important [5]. Plus récemment des méthodes ont été développées avec de nouvelles stratégies proposées pour détecter le défaut de court-circuit entre spires comme le vecteur espace [6], le multilayer artificial neural network (MANN) [2], ou encore des méthodes basées sur l'utilisation des Wavelet [7].

Les méthodes basées sur des mesures de champ magnétique à l'extérieur de la machine sont intéressantes car elles sont peu onéreuses et faciles à mettre en œuvre. Ces méthodes ont toutefois du mal à percer dans le milieu industriel car elles souffrent d'un manque de confiance de la part des exploitants de machines. Dans cet article, les méthodes proposées utilisent comme information la variation du champ magnétique de dispersion présent autour d'une machine asynchrone. Ces méthodes permettent de baisser le coût et ainsi de pouvoir généraliser la surveillance. Il est mis

en évidence la possibilité de détecter des défauts dans les machines électriques par une analyse spectrale qui permet en outre de classer différents niveaux de court-circuit. Dans ces méthodes, le diagnostic est basé sur l'analyse du champ magnétique en utilisant deux indicateurs : le « Sens de Variation des Amplitudes SVA » [7] et « Coefficient de corrélation ». Les analyses sont axées sur la raie sensible à 850 Hz dans le spectre du signal de tension induite délivrée par six capteurs de type bobiné placés par paire en trois positions autour de la machine. Chaque paire de capteurs est placée de façon diamétralement opposée comme indiqué à la figure 1.

2. La Méthodologie

La méthodologie utilisée permet de détecter des défauts de court-circuit entre spires à partir de plusieurs mesures, à vide et en charge du champ magnétique de dispersion. La mesure du champ est réalisée avec six capteurs de type bobiné, et où chaque paire de capteurs est décalée de 180° [8] comme la montre la Fig.1.a. On a donc trois positions : Position 1 pour les capteurs C1-C4, position 2 pour les capteurs C2-C5, position 3 pour les capteurs C3-C6. Les tests ont été réalisés sur une Machine Asynchrone (MA). C'est la machine sur laquelle le développement analytique. La figure 1.b présente la machine asynchrone expérimentale.

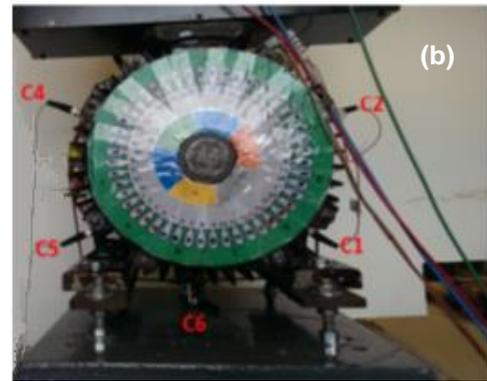
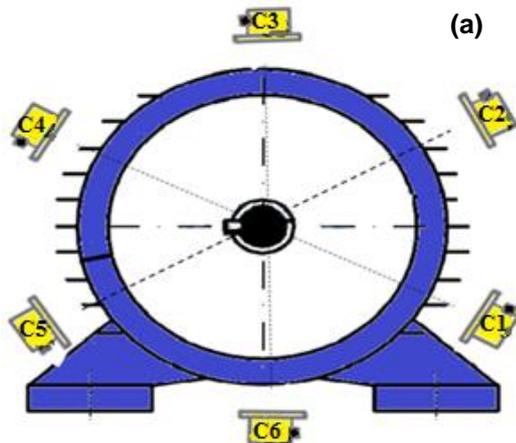


Figure 1 : machine asynchrone expérimentale instrumentée avec des capteurs de flux

L'ensemble du bobinage de la machine a été modifié de façon à offrir la possibilité de réaliser des courts-circuits entre spires. L'analyse sera axée sur la raie à 850 Hz sur le spectre du signal de tension induite délivrée par les capteurs de type bobinés placés en trois positions diamétralement opposées. La théorie montre que l'harmonique de champ à cette fréquence est sensible au défaut de court-circuit entre spires [8]. Les différents tests effectués sont récapitulés dans le tableau 1 avec indication des bornes de connexion de la MA utilisées pour réaliser le défaut. Les différentes charges et les positions des capteurs. I_{cc1} , I_{cc2} , I_{cc3} , correspondent à la valeur efficace du courant dans les spires en court-circuit (limité par un rhéostat). On compare ensuite l'évolution de l'amplitude des harmoniques sensibles pour chaque paire de capteurs diamétralement opposés à partir des deux indicateurs : « Sens de Variation des Amplitudes SVA » et « Coefficient de Corrélation ».

Tableau 1. Les types des charges, types des défauts, positions des défauts et les bornes des défauts

Les types des charges		Les types des défauts	Les positions des capteurs		Les bornes des défauts	
vide	machine à vide	sans défaut	Position 1	C1 décalé de 180° avec C4	P (1-2)	Borne de court-circuit des connexions 1-2
CH1	= 128 watt	Défaut de la résistance R_1 $I_{cc1}=5A$	Position 2	C2 décalé de 180° avec C5	P (9-10)	Borne de court-circuit des connexions 9-10
CH2	= 385 watt	Défaut de la résistance R_2 $I_{cc2}=10A$	Position 3	C3 décalé de 180° avec C6	P (17-18)	Borne des connexions 17-18
CH3	=750 watt	Défaut de la résistance R_3 $I_{cc3}=15A$			P (25-26)	Borne de court-circuit des connexions 25-26
CH4	=1240 watt				P (33-34)	Borne de court-circuit des connexions 33-34
CH5	=1500 watt				P (41-42)	Borne de court-circuit des connexions 41-42

2.1. Sens de variation des amplitudes SVA

L'exploitation de l'information SVA va permettre de répondre à une question d'intérêt. Dans le cadre de la méthode développée, la question posée est : "Y-a-t-il un défaut de court-circuit entre spires dans la machine ?". Les réponses possibles à cette question constituent le cadre de discernement, où l'élément correspond à la proposition : "oui, il y a un défaut", et à : "non, il n'y a pas de défaut". Le principe peut être décrit comme suit : pour la machine saine, les amplitudes de la raie à 850 Hz mesurées par deux capteurs opposés augmentent avec la charge dans les trois positions P1, P2 et P3. Pour la machine défectueuse, il peut arriver que les harmoniques à 850 Hz varient en sens opposé (l'amplitude diminue d'un côté et augmentent de l'autre côté). Les valeurs issues des capteurs n'évoluent donc pas de façon similaire comme le montre la figure 2. Pour chaque paire de capteurs diamétralement opposés dans les trois positions P1, P2 et P3 lorsque la charge varie.

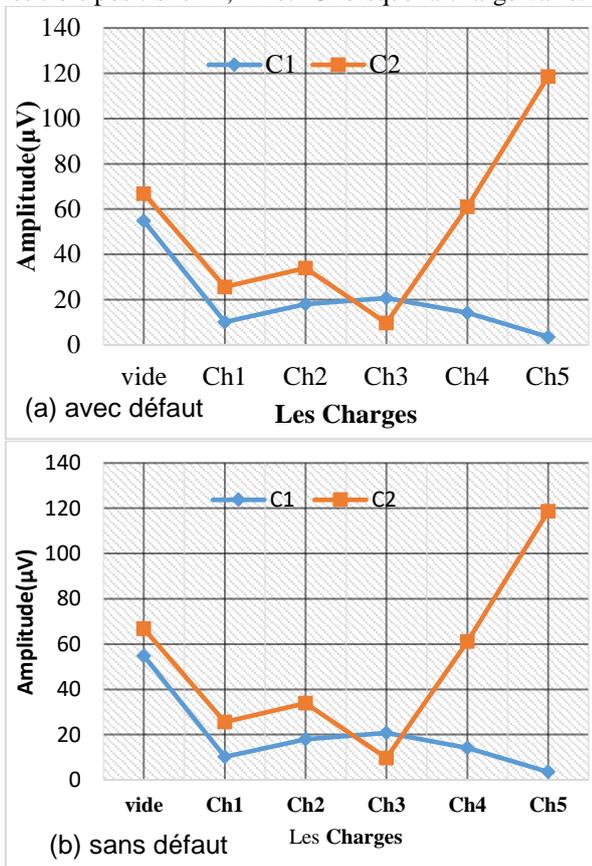


Figure 2 : variation des amplitudes des harmoniques à 850 Hz en cas de variation de charge pour une machine

2.2. Coefficient de Corrélation r

L'utilisation du coefficient de corrélation est une technique qui permet d'étudier la relation qui pourrait exister entre deux variables. Ce coefficient varie entre -1 et +1 ; l'intensité de la relation linéaire sera d'autant plus forte que la valeur du coefficient est proche de +1 ou de -1, et d'autant plus faible qu'elle est proche de 0. Par convention, on dira que la relation entre deux caractères est : parfaite si $r = 1$, très forte si $r > 0.8$, forte

si r se situe entre 0.5 et 0.8. D'intensité moyenne si r se situe entre 0.2 et 0.5, faible si r se situe entre 0 et 0.2, nulle si $r = 0$, comme illustré à la figure 3. Pour la machine asynchrone utilisée dans les tests expérimentaux, l'amplitude de l'harmonique à 850 Hz dans les deux positions est analysée.

- Si les valeurs (r) sont proches de 1, il existe une forte corrélation linéaire positive entre les deux variables, ce qui signifie que les variables varient dans le même sens. Ceci indique qu'il n'y a pas de défaut dans le stator de la machine.
- Si les valeurs (r) sont proches de 0, il n'y a pas de corrélation linéaire ou de faible corrélation linéaire entre les deux variables, ce qui signifie que les variables ne changent pas de la même façon. Ceci indique la présence d'un défaut dans le stator de la machine.
- Si les valeurs (r) sont proches de -1, il existe une forte corrélation linéaire négative entre les variables et les variables varient dans le sens opposé (négatif). Ceci indique la présence d'un défaut au stator de la machine.

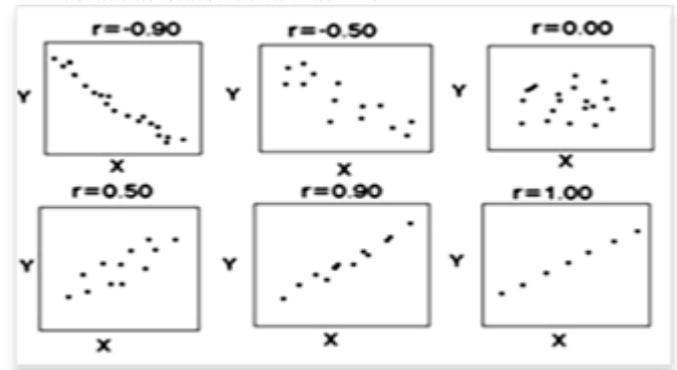


Figure 3 : Différentes valeurs du coefficient de corrélation

La formule mathématique pour calculer le coefficient de corrélation de Pearson (r) pour deux ensembles de valeurs : $X = \{x_1, \dots, x_n\}$ et $Y = \{y_1, \dots, y_n\}$ est :

$$r_i = \frac{\sum_{k=1}^n e_{C_i}(k) \cdot e_{C_{(i+3)}}(k) - \frac{\sum_{k=1}^n e_{C_i}(k) \sum_{k=1}^n e_{C_{(i+3)}}(k)}{n}}{\sqrt{\left(\sum_{k=1}^n e_{C_i}(k)^2 - \frac{\left(\sum_{k=1}^n e_{C_i}(k) \right)^2}{n} \right) \left(\sum_{k=1}^n e_{C_{(i+3)}}(k)^2 - \frac{\left(\sum_{k=1}^n e_{C_{(i+3)}}(k) \right)^2}{n} \right)}} \quad (1)$$

Où n est le nombre de valeurs considérées (dans cette

application la valeur de n correspondant au nombre de charge est fixée à 6.

L'équation (1) devient avec les mesures de champs magnétiques obtenues :

$$r_i = \frac{\sum_{k=1}^n e_{C_i}(k) \cdot e_{C_{(i+3)}}(k) - \frac{\sum_{k=1}^n e_{C_i}(k) \sum_{k=1}^n e_{C_{(i+3)}}(k)}{n}}{\sqrt{\left(\sum_{k=1}^n e_{C_i}(k)^2 - \frac{\left(\sum_{k=1}^n e_{C_i}(k) \right)^2}{n} \right) \left(\sum_{k=1}^n e_{C_{(i+3)}}(k)^2 - \frac{\left(\sum_{k=1}^n e_{C_{(i+3)}}(k) \right)^2}{n} \right)}} \quad (2)$$

Dans cette relation i représente la position de la paire de capteurs ($i=1, \dots, 3$) et $e_{C_i}(k)$ l'amplitude de l'harmonique à 850 Hz mesurée par le capteur C_i pour la charge k avec $k = 1, \dots, 6$.

3. Résultats Expérimentaux

Afin de valider les méthodes de diagnostic proposées, une campagne expérimentale a été menée sur une machine asynchrone de 11kW. Des fonctionnements sains et avec des défauts de court-circuit entre les spires du bobinage statorique ont été analysés. Un exemple de mesures obtenues est présenté dans ce paragraphe. Les mesures des amplitudes de l'harmonique sensible obtenues par 6 capteurs positionnés par paires à 180 ° autour de la machine et pour 6 valeurs de charges sont présentées dans le tableau 2. Les résultats correspondent à une machine sans défaut et une machine en défaut avec un courant de court-circuit I_{cc} de 15A rms mesuré dans l'enroulement correspondant aux bornes 1-2.

Ces valeurs sont obtenues pour trois positions P1, P2 et P3 comme présenté dans la figure 1.

Ces mesures relevées sont par la suite utilisées pour la mise en place de deux méthodes d'analyse : la méthode de sens de variation d'amplitudes (SVA) et la méthode du coefficient de corrélation (r).

3.1. Analyse par la méthode du Sens de Variation des Amplitudes

Cette méthode prend en compte le sens de variation des harmoniques sensibles au défaut pour des capteurs positionnés en opposition autour de la machine. Le tableau 3 montre les résultats des différences (dif) de variations obtenues pour chaque paire de capteurs dans les trois positions et indique le sens de la variation (SVA). « Oui » signifie que les amplitudes varient dans le même sens.

Tableau 2: Mesures obtenues en cas de machine saine et de machine en défaut

Machine saine							Machine en défaut 1 avec $I_{cc}=15A$, borne 1-2						
Charges	(P1)		(P2)		(P3)		Charges	(P1)		(P2)		(P3)	
	C 1 (µV)	C 4 (µV)	C 2 (µV)	C 5 (µV)	C 3 (µV)	C 6 (µV)		C 1 (µV)	C 4 (µV)	C 2 (µV)	C 5 (µV)	C 3 (µV)	C 6 (µV)
vide	11	23	18	11	20	11	vide	45,6	202,7	219,2	131,8	64,3	267,4
Ch1	14	24	22	15	26	12	Ch1	45	148,5	194,9	109,5	58,9	212,2
Ch2	19	30	28	23	36	16	Ch2	30,1	44,1	96	38,4	47,4	66,5
Ch3	27	42	39	35	54	24	Ch3	41,4	46,8	47,7	43,2	59,6	52,4
Ch4	43	69	62	58	89	41	Ch4	36	41,3	15,1	16,5	67,7	83,7
Ch5	64	105	91	87	132	61	Ch5	59,1	67,8	114,5	66	108,2	169

Tableau 3 : Sens des variations des amplitudes SVA pour la machine sans défaut

	P1					P2					P3				
	C 1 (µV)		C 4 (µV)			C2 (µV)		C 5 (µV)			C 3 (µV)		C 6 (µV)		
	11	dif	23	dif	SVA	18	dif	11	dif	SVA	20	dif	11	dif	SVA
Ch1- vide	14	3	24	1	oui	22	4	15	4	oui	26	6	12	1	oui
Ch2- Ch1	19	5	30	6	oui	28	6	23	8	oui	36	10	16	4	oui
Ch3- Ch2	27	8	42	12	oui	39	11	35	11	oui	54	18	24	8	oui
Ch4- Ch3	43	16	69	27	oui	62	23	58	23	oui	89	35	41	17	oui
Ch5- Ch4	64	21	105	36	oui	91	29	87	29	oui	132	43	61	20	oui

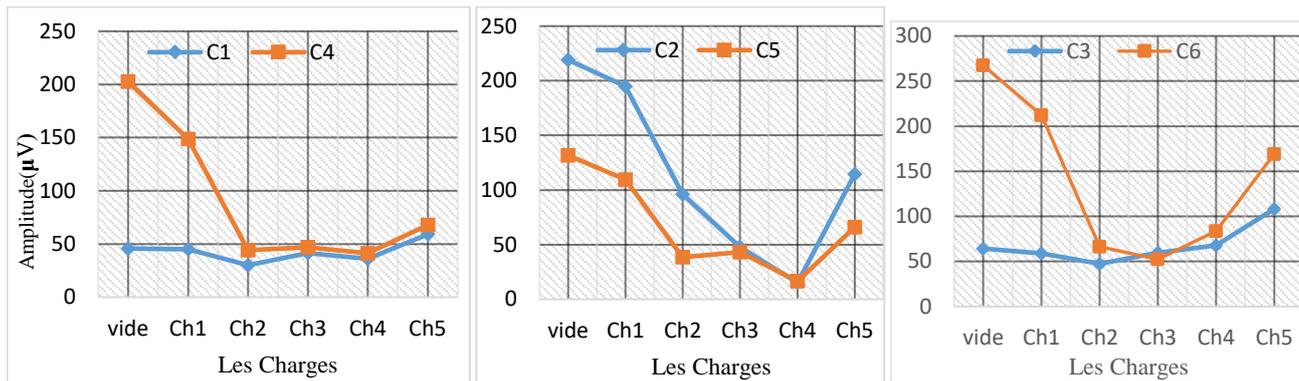


Figure 4 : Variation des amplitudes des harmoniques à 850Hz pour la machine en défaut

La figure 4 présente l'évolution de l'harmonique sensible mesurée autour de la machine saine pour différentes charges dans les trois positions P1, P2 et P3. On remarque une croissance continue dans le cas de la machine saine : les amplitudes de la raie à 850 Hz augmentent avec la charge et elles varient dans le même sens (positif).

Les différences et le sens de variations des amplitudes pour une machine avec défaut de court-circuit ($I_{cc} = 15A$) sont présentés dans le tableau 4. On remarque que, dans le cas de la machine défectueuse, il peut arriver que ces amplitudes n'évoluent pas de façon similaire. Cette différence d'évolution a été détectée par les capteurs en position 2 et en position 3.

Tableau 2 : Sens des variations des amplitudes SVA pour la machine en défaut

	P1					P2					P3				
	C 1 (µV)		C 4 (µV)			C 2 (µV)		C 5 (µV)			C 3 (µV)		C 6 (µV)		
	46	dif	203	dif	SVA	219	dif	132	dif	SVA	64	dif	267	dif	SVA
Ch1-vide	45	-1	149	-54	oui	195	-24	110	-22	oui	59	-5	212	-55	oui
Ch2-Ch1	30	-15	44	-105	oui	96	-99	38	-72	oui	47	-12	67	-145	oui
Ch3-Ch2	41	11	47	3	oui	48	-48	43	5	non	60	13	52	-15	non
Ch4-Ch3	36	-5	41	-6	oui	15	-33	17	-26	oui	68	8	84	32	oui
Ch5-Ch4	59	23	68	27	oui	115	100	66	49	oui	108	40	169	85	oui

La figure 5 donne une représentation graphique de l'évolution de l'amplitude de l'harmonique à 850Hz pour la machine en défaut avec la même variation des charges que celle considérée dans la figure 4. On remarque des variations non-monotones des courbes avec un sens de variation contraire entre les deux capteurs pour les positions P2 et P3.

La position P1 est influencée par le défaut mais pas

suffisamment pour pouvoir le mettre en évidence par un inversement du sens de variation.

Pour déterminer la sensibilité de la méthode, les tests ont été réalisés avec trois valeurs du courant de court-circuit : $I_{cc1} = 5A$, $I_{cc2} = 10A$, $I_{cc3} = 15A$, 6 charges données et 6 positions de défaut. Le tableau 5 présente le nombre de variations des amplitudes SVA en sens opposé obtenu pour les trois positions P1, P2 et P3.

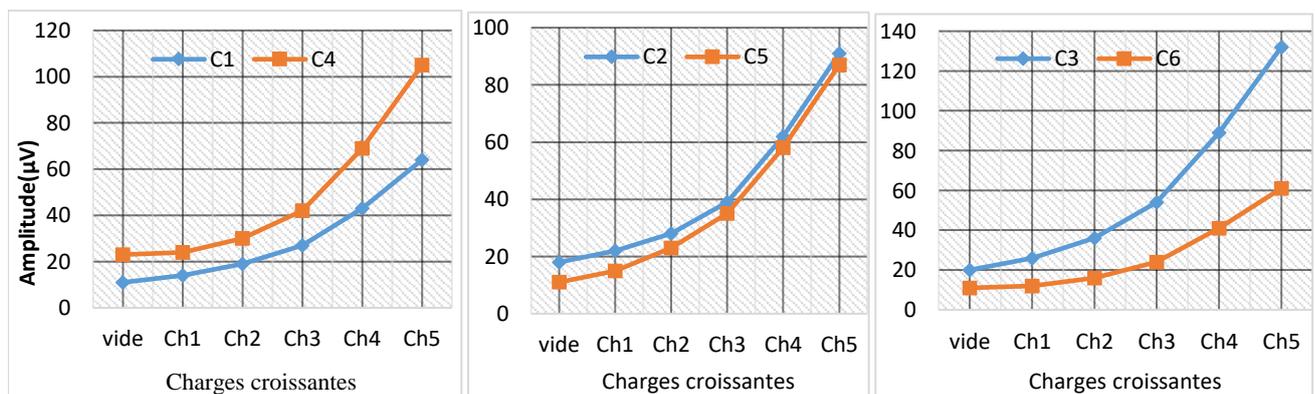


Figure 5 Variation des amplitudes des harmoniques à 850Hz pour la machine saine

On remarque qu'il est possible de déterminer le défaut par cette méthode dans un nombre important de cas de mesures comparé au nombre total de mesures. Toutefois si on considère les informations données par les trois paires de capteurs en même temps, alors la totalité des défauts (18 défauts) sont détectés car l'information SVA en sens opposé apparaît au moins une fois dans une des positions P1, P2, P3.

Tableau 3 : Nombres des variations contraires des amplitudes SVA

	P1	P2	P3
Sans défaut	0	0	0
Avec défauts	12/18	12/18	15/18

3.2. Analyse par Coefficient de Corrélation r

En considérant l'équation (2) et les mesures présentées dans le tableau 2 on a obtenu les valeurs suivantes du coefficient de corrélation pour la machine sans défaut : $r_{p1} = 0,9972$, $r_{p2} = 0,9997$ et $r_{p3} = 0,9995$. On observe que ce coefficient (r) est très proche de +1 dans les trois positions P1, P2 et P3. Cela signifie que la relation entre les deux capteurs est linéaire et la machine est saine. Les valeurs du coefficient de corrélation pour la machine en défaut sont : $r_{p1} = 0,3151$, $r_{p2} = 0,9706$ et $r_{p3} = 0,2509$. La figure 6 montre la linéarité des points pour la machine saine (figure 6 a,b,c) avec une grande valeur de r et une non-linéarité pour le cas en défaut (figure 6 d,e,f) caractérisé par une faible valeur de r. Le cas en défaut dans la position P2 est faiblement visible d'où l'intérêt de plusieurs points de mesure autour de la machine.

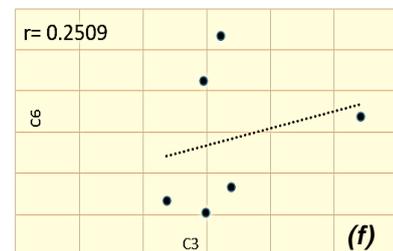
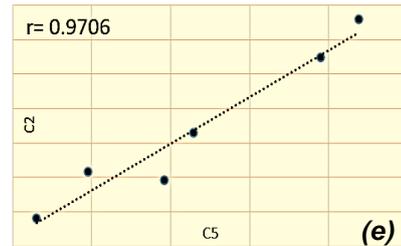
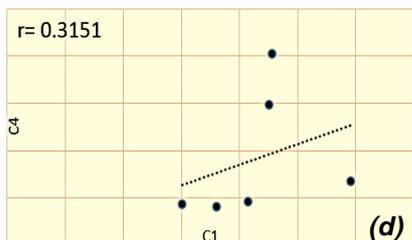
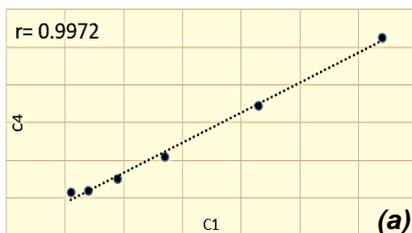


Figure 6 : Coefficient de corrélation r pour la machine sans défaut (a,b,c) et la machine avec défaut (d,e,f)

Ces mesures ont été réalisées avec trois valeurs du courant de court-circuit : $I_{cc1} = 5A$, $I_{cc2} = 10A$, $I_{cc3} = 15A$, avec 6 positions de défaut et 6 charges données. Le tableau 6 centralise la valeur du coefficient de corrélation r pour la machine sans défaut et la machine en défaut dans les trois positions P1, P2 et P3. Pour analyser l'influence d'un seuil de valeurs sur l'efficacité de la détection de défaut les valeurs suivantes ont été considérées :

- pour $r_{max} = 0,990$, la méthode peut détecter 18/18 cas de défauts.
- pour $r_{max} = 0,90$, la méthode peut détecter 13/18 cas de défauts.
- pour $r_{max} = 0,85$, la méthode peut détecter 13/18 cas de défauts.

On peut noter généralement une diminution du coefficient de corrélation r avec l'augmentation du courant I_{cc} pour chaque position du court-circuit (1-2 ; 9-10 ; 71-18...) dans le stator de la machine.

Tableau 4 : Evolution du coefficient de corrélation r

Position 1			Position 2			Position 3			
Sans défaut	$r=0,9972$		$r=0,9997$			$r=0,9995$			
Icc	5A	10A	15A	5A	10A	15A	5A	10A	15A
1-2	0,9294	0,5290	0,3151	0,9994	0,9612	0,9707	0,9634	0,6326	0,2509
9-10	0,9921	0,7616	0,9200	0,9779	0,6829	0,7825	0,9919	0,6603	0,9566
71-18	0,9595	0,2885	0,8125	0,6329	0,7391	0,3202	0,9923	0,7024	0,2128
25-26	0,9922	0,8069	-0,4171	0,9990	0,7180	0,6999	0,9758	-0,5976	-0,1012
33-34	0,9107	-0,2844	0,6681	0,9107	0,5967	0,8607	0,9498	0,9751	0,6053
41-42	0,9149	0,9610	0,9707	0,9850	0,5839	-0,0507	0,9920	0,8975	0,9698

4. Conclusion

La méthode de diagnostic proposée dans cet article ne nécessite pas la connaissance de l'état sain initial de la machine et la rend très intéressante pour une application industrielle car, en pratique, les informations relatives à cet état sain sont nécessaires comme référence et souvent, l'exploitant n'a pas pris soin de les enregistrer. Elle peut être appliquée dans le milieu industriel pour les opérations de maintenance prédictive et de surveillance des machines électriques afin d'améliorer leur efficacité énergétique et leur productivité. Cependant, l'utilisation de cette méthode de diagnostic nécessite quelques précautions de mesures spécifiques comme le positionnement symétrique des capteurs par rapport à l'axe de la machine (décalage spatial de 180°) et la réalisation des mesures en plusieurs endroits autour de la machine. Les deux analyses proposées ont l'avantage d'être complémentaires, non invasives et de faible coût.

5. Références

- [1] T.Ch. Anil Kumar, V.N.A. Naikan, "Induction motor inter turn fault detection using infrared thermographic analysis Infrared", *Infrared Physics and Technology*, vol. 77, pp. 277-282, July 2016.
- [2] S.S. Moosavi, A. Djerdir, Y. Ait-Amirat, D.A. Khaburi. "ANN based fault diagnosis of permanent magnet synchronous motor under stator winding shorted turn", *Electric power systems research*, pp. 67-82, August 2015.
- [3] L. Frosini, S. Zanazzo and A. Albini, "A wavelet-based technique to detect stator faults in inverter-fed induction motors" 2016 XXII International Conference on Electrical Machines (ICEM), Lausanne, pp. 2917-2923, 2016.
- [4] H. Henao et al., "Trends in Fault Diagnosis for Electrical Machines: A Review of Diagnostic Techniques," *IEEE Industrial Electronics Magazine*, vol. 8, no. 2, pp. 31-42, June 2014.
- [5] R. Pusca, C. Demian, D. Mercier, E. Lefevre, R. Romary, "An improvement of diagnosis procedure for AC machines using two external flux sensors based on a fusion process with belief functions", 38th annual conference on IEEE Industrial Electronics Society, IECON2012, Montreal, Canada, pp. 5078-5083, October 2012.
- [6] A. Berzoy; A. A. S. Mohamed; O. Mohammed, "Complex-Vector Model of Inter-Turn Failure in Induction Machines for Fault Detection and Identification", *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. PP, no.99, pp.1-1, 2016.
- [7] L. Frosini, S. Zanazzo and A. Albini, "A wavelet-based technique to detect stator faults in inverter-fed induction motors", XXII International Conference on Electrical Machines (ICEM), Lausanne, , pp. 2917-2923, 2016.
- [8] R. Pusca, R. Romary, A. Ceban, and J.-F. Brudny, "An Online Universal Diagnosis Procedure Using Two External Flux Sensors Applied to the AC Electrical Rotating Machines", *Sensors*, vol. 10, pp. 10448-10466, 2010.

Modèle générique de mécanique des solides indéformables

PIERRE MASSONNAT

ISEN de Brest

pierre.massonnat@isen-bretagne.fr

Résumé : dans cet article, on propose un modèle générique de mécanique des solides indéformables. On commence par présenter les formules de bases, puis on développe les équations clés pour finalement expliquer comment développer un logiciel capable de modéliser tout type de mécanisme "classique" non hyperstatique grâce à une approche objet en graphe. Enfin, quelques exemples de résultats sont présentés.

1. Introduction

En France, il existe un certain clivage entre les disciplines techniques. Ce clivage est parfois montré du doigt comme dans certains ouvrages économiques tel que [3]. Et pour cause, au nom de la spécialisation et de ce qu'elle peut apporter [2], il n'est pas rare de rencontrer un mécanicien qui ne comprend rien à l'électrotechnique ou un électricien qui ne comprend pas la mécanique. Pourtant, sur des systèmes de conversion d'énergie tels que les éoliennes, les hydroliennes ou tout autre système électromécanique il y a bien des problématiques électrique et mécanique. La mécanique c'est compliqué, électriciens, je vous propose un modèle simple et générique pour faire des calculs mécaniques sans être un spécialiste. Vous trouverez aussi un peu de conception objet dans cet article et quelques conseils de programmation pour vous développer vos propres bibliothèques de calcul mécanique.

2. La Modélisation

2.1. Les équations de base

Le modèle s'appuiera sur les équations de base de la dynamique des solides indéformables (les solides considérés ne se déforment pas). Pour se faire, on doit d'abord définir ce que sont les torseurs statiques et les torseurs dynamiques. Un torseur est une entité mathématique qui peut s'exprimer comme un couple de vecteur en un point.

$$\{D_{s/R}\}_A^{(R_0)} = \begin{Bmatrix} m_s \overline{A}_{A,s/R}^{(R_0)} \\ [I_{A,s}] \overline{W}_{A,s/R}^{(R_0)} \end{Bmatrix} \quad (1)$$

Ainsi, le torseur dynamique tel que présenté dans la formulation (1) est composé des deux vecteurs :

- $m_s \overline{A}_{A,s/R}^{(R_0)}$: la masse du solide s fois le vecteur accélération du solide s par rapport à R , au point A , exprimé dans le repère (R_0) ;

- $[I_{A,s}] \overline{W}_{A,s/R}^{(R_0)}$: la matrice des moments d'inertie du solide s exprimé dans le repère (R_0) fois le vecteur d'accélération angulaire avec le même point, même référentiel et même repère d'expression.

La matrice de moment d'inertie est une matrice 3 x 3 qui est définie dans l'équation (2).

$$[I_{A,s}^{(R_0)}] = \begin{bmatrix} \int (y^2 + z^2) \cdot dm & - \int yx \cdot dm & - \int zx \cdot dm \\ - \int xy \cdot dm & \int (x^2 + z^2) \cdot dm & - \int zy \cdot dm \\ - \int xz \cdot dm & - \int yz \cdot dm & \int (y^2 + x^2) \cdot dm \end{bmatrix} \quad (2)$$

Où soit M le point d'intégration :

- x est la composante sur \vec{x} du vecteur \overline{AM} ;
- y est la composante sur \vec{y} du vecteur \overline{AM} ;
- z est la composante sur \vec{z} du vecteur \overline{AM} ;
- dm est la portion de masse du solide au point d'intégration.

$$\{S_{s/R}\}_A^{(R_0)} = \begin{Bmatrix} \overline{F}_{A,s/R}^{(R_0)} \\ \overline{M}_{A,s/R}^{(R_0)} \end{Bmatrix} \quad (3)$$

Le torseur statique exprimé dans la formulation (3) est quant à lui composé de :

- $\overline{F}_{A,s/R}^{(R_0)}$: la force appliquée par s sur R au point A exprimée dans le repère (R_0) ;
- $\overline{M}_{A,s/R}^{(R_0)}$: le moment (assimilable à un couple avec une direction) avec le même point, même appliquant et même repère d'expression.

Ainsi, la première loi de la dynamique des solides indéformables qui va nous intéresser est exprimée dans l'équation (4). Elle est une réexpression de la première loi de Newton qui dit que l'accélération fois la masse d'un objet est égale à la somme des forces qui lui sont appliquées.

$$\{D_{s/R}\}_A^{(R_0)} = \sum_i \{S_{i/s}\}_A^{(R_0)} \quad (4)$$

Notons que pour appliquer cette relation, les tenseurs doivent être sur le même point A et exprimés dans le même repère (R_0) .

La deuxième loi découle de la deuxième loi de Newton, à savoir que toute force appliquée par un solide sur un autre solide engendre une force égale et opposée sur lui-même. Elle s'exprime en torseur comme dans l'équation (5).

$$\{S_{s/R}\}_A^{(R_0)} = -\{S_{R/s}\}_A^{(R_0)} \quad (5)$$

Dans ce cas-ci aussi, les tenseurs doivent être sur le même point A et exprimés dans le même repère (R_0) . Ce qui nous renvoie à la question : que faire si nos forces et nos accélérations ne sont pas toutes sur le même point ? Les torseurs sont porteurs d'une propriété mathématique, quand on les connaît en un point, on peut les déterminer sur tous les points de l'espace. Grâce aux deux équations (6) et (8) qui expriment respectivement comment déterminer les torseurs dynamique et statique sur un autre point M quand on les connaît en A .

$$\{D_{s/R}\}_A^{(R_0)} = \left\{ \begin{array}{c} m_s \overrightarrow{A_{A,s/R}}^{(R_0)} + \overline{MA} \wedge \overline{W_{A,s/R}}^{(R_0)} \\ [I_{M,s}] \overline{W_{A,s/R}}^{(R_0)} \end{array} \right\} \quad (6)$$

Notez que l'on peut aussi dire :

$$\left\{ \begin{array}{c} \overline{A_{M,s/R}}^{(R_0)} \\ \overline{W_{M,s/R}}^{(R_0)} \end{array} \right\}_M^{(R_0)} = \left\{ \begin{array}{c} \overline{A_{A,s/R}}^{(R_0)} + \overline{MA} \wedge \overline{W_{A,s/R}}^{(R_0)} \\ \overline{W_{A,s/R}}^{(R_0)} \end{array} \right\} \quad (7)$$

$$\{S_{s/R}\}_A^{(R_0)} = \left\{ \begin{array}{c} \overline{F_{A,s/R}}^{(R_0)} \\ \overline{M_{A,s/R}}^{(R_0)} + \overline{MA} \wedge \overline{F_{A,s/R}}^{(R_0)} \end{array} \right\} \quad (8)$$

On voit encore ici qu'il faut que les torseurs soient exprimés dans le même repère pour que ça marche.

2.2. Les entités de base

Maintenant que l'on connaît toutes les équations dont on a besoin pour poser le problème, il faut déterminer comment les utiliser et pour faire quoi. Pour ce faire, on va définir des entités de base :

- les efforts (forces ou moments) ;
- la masse ;
- les solides ;
- les liaisons.

2.2.1. Les efforts

Les efforts sont les conditions aux limites de notre système et ils servent aussi d'interactions entre les solides. À chaque fois qu'un effort est exprimé en un point sous la forme d'un torseur statique, on sait qu'il sera accompagné d'un autre effort égal et opposé sous la forme d'un autre torseur statique opposé et appliqué sur un autre solide (voir équation (5)). Un effort peut être représenté par son torseur, c'est à dire par :

- un vecteur force ;
- un vecteur moment ;
- un point d'application ;
- un solide sur lequel il est appliqué ;
- un repère (en générale le repère de la masse : (R_0)).

2.2.2. La masse

La masse est un solide spécial. Il a une fonction similaire à la masse (ou le neutre) dans un circuit. C'est lui qui sert de référence, il est donc immobile et absorbe toutes les forces. Pour que les lois que l'on a présentées s'appliquent, il faut que ce solide soit en mouvement rectiligne uniforme par rapport au soleil, à la terre ou à un objet fixé au sol. Quand un effort est placé en condition aux limites, on doit placer l'effort qui lui est opposé sur la masse afin que celle-ci reste immobile. Par ailleurs, il peut être intéressant de donner une masse et un moment d'inertie important à la masse pour qu'elle absorbe plus facilement les erreurs. Lorsque la masse est utilisée comme référentiel, on placera le sigle $/R$ comme indice du vecteur car la masse porte aussi le repère global considéré comme immobile.

2.2.3. Les solides

C'est dans les solides que s'applique la relation (4) qui permettra de déterminer l'accélération du solide. C'est aussi dans le solide que se font en amont tous les changements de point d'application des torseurs statiques pour les ramener en un seul point (voir équation (8)). Par ailleurs, le solide assure une "cohérence" des accélérations puisqu'il ne se déforme pas. Ainsi, tous les torseurs dynamiques appliqués sur un même solide devront avoir la même valeur lorsqu'ils sont recalculés sur le même point (voir équation (7)). Un solide peut être représenté par :

- une masse ;
- une matrice de moment d'inertie au centre d'inertie ;
- un repère local (qui donne la position de son centre d'inertie et son orientation angulaire).

2.2.4. Les liaisons

Les liaisons sont toutes les interactions mécaniques entre solides. On considère qu'il y a 6 degrés de libertés en mécanique, un solide peut se déplacer sur l'axe des x , l'axe des y , l'axe des z ou tourné autour de l'axe des x , l'axe des y ou l'axe des z . Une liaison mécanique peut être définie par les degrés de liberté qu'elle autorise ou qu'elle empêche. Par exemple, si on prend la liaison linéique illustrée dans la figure 1, on voit que l'on peut

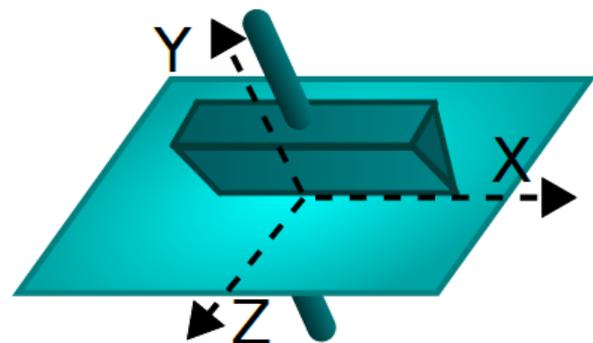


Figure 1 - Schéma d'une liaison linéique

déplacer le manche sur l'axe x , sur l'axe z mais pas sur l'axe y (on imagine que l'on ne peut pas séparer les deux

solides) ; on peut par ailleurs tourner le manche autour de l'axe x, de l'axe y mais pas de l'axe z. Pour cette liaison, les degrés de liberté peuvent être présentés par l'expression (9) où la première colonne représente les degrés de libertés en translation et la deuxième ceux en rotation. Les zéros sont les composantes sur lesquels on peut bouger.

$$\begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}^{(R_1)} = \begin{pmatrix} L(1) \\ L(2) \\ L(3) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} L(4) \\ L(5) \\ L(6) \end{pmatrix}^{(R_1)} \quad (9)$$

Ainsi, si on nomme les deux solides liés par cette liaison s1 et s2, on peut poser des équations associées. Les composantes mobiles ne transmettront pas d'efforts (on néglige les frottements), on a donc ici deux équations restantes de la loi (5) pour les efforts dans la liaison (voir (10)).

$$\begin{aligned} \overrightarrow{F}_{A,s1/s2}^{(R_0)} \cdot \overrightarrow{y} &= -\overrightarrow{F}_{A,s2/s1}^{(R_0)} \cdot \overrightarrow{y} \\ \overrightarrow{M}_{A,s1/s2}^{(R_0)} \cdot \overrightarrow{z} &= -\overrightarrow{M}_{A,s2/s1}^{(R_0)} \cdot \overrightarrow{z} \end{aligned} \quad (10)$$

Les autres composantes de la force et du moment des efforts transmis par la liaison sont nulles. Pour ce qui est des déplacements, les composantes non libres vont faire que si un solide se déplace sur une de ces composantes, l'autre le suivra. On obtient ainsi les deux équations du mouvement dans (11).

$$\begin{aligned} \overrightarrow{A}_{A,s1/R}^{(R_0)} \cdot \overrightarrow{y} &= \overrightarrow{A}_{A,s2/R}^{(R_0)} \cdot \overrightarrow{y} \\ \overrightarrow{W}_{A,s1/s2}^{(R_0)} \cdot \overrightarrow{z} &= \overrightarrow{W}_{A,s2/R}^{(R_0)} \cdot \overrightarrow{z} \end{aligned} \quad (11)$$

Pour les accélérations les autres composantes ne sont pas forcément nulles et la liaison n'impose pas de relations entre ces accélérations. Le raisonnement suivi pour cette liaison linéique peut être adopté pour toutes les autres liaisons possibles. Une liaison peut être représentée par :

- un repère local (qui donne le centre de la liaison et l'orientation de ses axes) ;
- un ensemble de 6 valeurs pour ses degrés de liberté (comme dans l'expression 9) ;
- 2 solides d'applications.

3. Le calcul

3.1. La construction de la matrice

3.1.1. Le Graphe

Si on considère qu'un circuit mécanique est composé de solides reliés entre eux par des liaisons et sur lesquels on va appliquer des forces, il est alors possible de représenter n'importe quel mécanisme sous la forme d'un graphe. Par exemple, pour le cas simple d'un barillet dans une glissière (voir figure 2) on peut construire le graphique (3). Dans le graphe (3), les

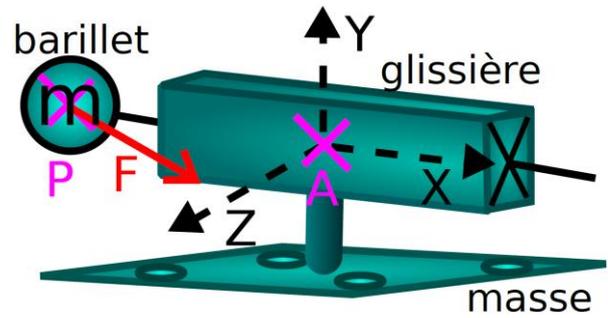


Figure 2 - Schéma cinématique d'un barillet dans une glissière

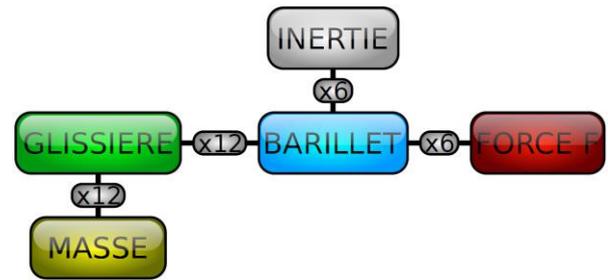


Figure 3 - Graphe de représentation du mécanisme du barillet dans la glissière

nœuds sont les entités telles que définies dans la partie modélisation (sauf bloc "inertie" sur lesquels on reviendra) avec leurs paramètres de représentation et les liens représentent des variables d'état que l'on veut calculer. Il ne pas y avoir de liens qu'entre un solide (masse incluse comme un solide) et une liaison ou entre un effort et un solide. S'il s'agit d'un lien entre un solide s et une liaison l au point A, le lien contient 12 variables (ou on peut considérer qu'il y a en fait 12 liens en parallèle) :

- $\overrightarrow{F}_{A,l/s}^{(R_0)} \cdot \overrightarrow{x}$: la composante en \overrightarrow{x} de la force de la liaison l sur s au point A ;
- $\overrightarrow{F}_{A,l/s}^{(R_0)} \cdot \overrightarrow{y}$: sa composante en \overrightarrow{y}
- $\overrightarrow{F}_{A,l/s}^{(R_0)} \cdot \overrightarrow{z}$: sa composante en \overrightarrow{z}
- $\overrightarrow{M}_{A,l/s}^{(R_0)} \cdot \overrightarrow{x}$: la composante en \overrightarrow{x} du moment
- $\overrightarrow{M}_{A,l/s}^{(R_0)} \cdot \overrightarrow{y}$: sa composante en \overrightarrow{y}
- $\overrightarrow{M}_{A,l/s}^{(R_0)} \cdot \overrightarrow{z}$: sa composante en \overrightarrow{z}
- $\overrightarrow{A}_{A,s/R}^{(R_0)} \cdot \overrightarrow{x}$: la composante en \overrightarrow{x} de l'accélération du point A appartenant au solide s (notez que ce point A n'a pas besoin de se trouver réellement dans le solide s, on le considère simplement comme attaché s) ;
- $\overrightarrow{A}_{A,s/R}^{(R_0)} \cdot \overrightarrow{y}$: sa composante en \overrightarrow{y}
- $\overrightarrow{A}_{A,s/R}^{(R_0)} \cdot \overrightarrow{z}$: sa composante en \overrightarrow{z}
- $\overrightarrow{W}_{A,s/R}^{(R_0)} \cdot \overrightarrow{x}$: la composante en \overrightarrow{x} de l'accélération angulaire
- $\overrightarrow{W}_{A,s/R}^{(R_0)} \cdot \overrightarrow{y}$: sa composante en \overrightarrow{y}
- $\overrightarrow{W}_{A,s/R}^{(R_0)} \cdot \overrightarrow{z}$: sa composante en \overrightarrow{z}

En revanche, s'il s'agit d'un lien entre un effort f en A et un solide s , il y aura 6 variables :

- $\overrightarrow{F}_{A,f/s}^{(R_0)} \cdot \overrightarrow{x}$: la composante en \overrightarrow{x} de la force de l'effort f sur s au point A ;
- $\overrightarrow{F}_{A,f/s}^{(R_0)} \cdot \overrightarrow{y}$: sa composante en \overrightarrow{y} ;
- $\overrightarrow{F}_{A,f/s}^{(R_0)} \cdot \overrightarrow{z}$: sa composante en \overrightarrow{z} ;
- $\overrightarrow{M}_{A,f/s}^{(R_0)} \cdot \overrightarrow{x}$: la composante en \overrightarrow{x} du moment ;
- $\overrightarrow{M}_{A,f/s}^{(R_0)} \cdot \overrightarrow{y}$: sa composante en \overrightarrow{y} ;
- $\overrightarrow{M}_{A,f/s}^{(R_0)} \cdot \overrightarrow{z}$: sa composante en \overrightarrow{z} ;

Enfin, les liens entre un nœud "inertie" et un solide s contiendront 6 variables :

- $\overrightarrow{A}_{G,s/R}^{(R_0)} \cdot \overrightarrow{x}$: la composante en \overrightarrow{x} de l'accélération du centre d'inertie G du solide s ;
- $\overrightarrow{A}_{G,s/R}^{(R_0)} \cdot \overrightarrow{y}$: sa composante en \overrightarrow{y} ;
- $\overrightarrow{A}_{G,s/R}^{(R_0)} \cdot \overrightarrow{z}$: sa composante en \overrightarrow{z} ;
- $\overrightarrow{W}_{G,s/R}^{(R_0)} \cdot \overrightarrow{x}$: la composante en \overrightarrow{x} de l'accélération angulaire ;
- $\overrightarrow{W}_{G,s/R}^{(R_0)} \cdot \overrightarrow{y}$: sa composante en \overrightarrow{y} ;
- $\overrightarrow{W}_{G,s/R}^{(R_0)} \cdot \overrightarrow{z}$: sa composante en \overrightarrow{z} ;

3.1.2. Les expressions locales et l'expression globale

Dans un graphe, une fois que sa structure est figée, il est possible d'allouer un numéro N_i^M à chaque lien ou chaque variable avec i un indice allant de 1 au nombre total de variables. Ce numéro sera associé à un numéro de colonne de matrice (nous reviendrons là-dessus). On définit aussi $Nb_{variable}$ le nombre total de variables.

On peut aussi allouer ces numéros en les associant à des nœuds. Ainsi pour le nœud "barillet", les liens des variables peuvent aussi avoir des numéros $N_{i,j}^{barillet}$ où i correspond à l'indice de l'autre nœud associé à ce lien et j le numéro de la variable entre 1 et 12 si c'est une liaison ou entre 1 et 6 si c'est un effort ou une inertie. On définit aussi $Nb_{voisins}^{solide}$ le nombre de nœuds reliés au solide $solide$ et $Nb_{variable,i}^{solide}$ le nombre de variables (ou de lien) que le solide $solide$ partage avec son i ème voisin. Notez que le premier voisin d'un solide sera toujours un nœud "inertie".

Dans tous les cas, il faut que pour une même variable ses numéros soient égaux quelques soient leurs référentiels, c'est à dire que l'on a

$$N_i^M = N_{i,j}^{barillet} = \dots \text{ pour une même variable.}$$

Par ailleurs, on considérera qu'il y a un repère global (R_0) qui est en fait associé à la masse et un repère local pour chaque nœud $((R_l))$ nommé ainsi dans le nœud concerné.

3.1.3. La mise en place des équations

Toutes les équations linéaires peuvent être exprimées en remplissant une matrice dont chaque colonne est associée à une variable et un vecteur qui représente le résultat de l'équation. A titre d'exemple on peut se référer à l'expression (12).

$$\begin{aligned} 3 \times x_1 - 2 \times x_2 &= 4 \\ 5 \times x_1 &= 6 \end{aligned} \Leftrightarrow \begin{bmatrix} 3 & 2 \\ 5 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 4 \\ 6 \end{bmatrix} \quad (12)$$

Ainsi, on peut placer toutes les équations associées aux entités des nœuds du graphe dans une grande matrice $[M]$. On considérera que les N_i^M des variables contiennent les numéros de colonne de celles-ci.

Si on associe à chaque type d'entité (solide, liaison, force, inertie) sa propre fonction de remplissage de la matrice $[M]$ et que l'on démarre avec une matrice nulle, le remplissage de cette matrice revient à appliquer l'algorithme de la figure 4. Notez que dans la suite les arguments des fonctions sont en entrée/sortie et que $M(i,j) = v$ veut dire de placer la variable v à la i ème colonne et à la j ème ligne de la matrice M . Ainsi, il

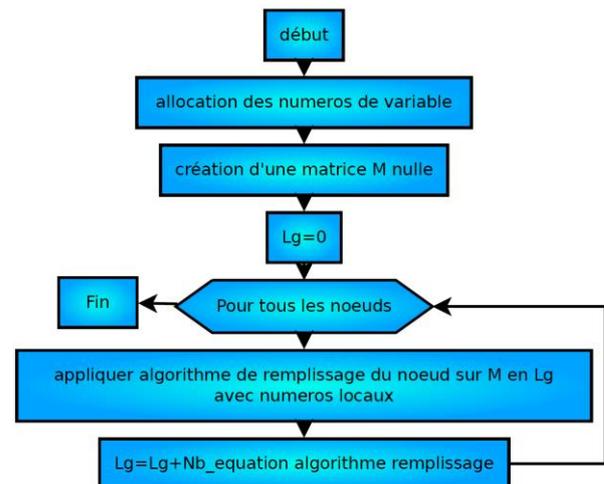


Figure 4 - Algorithme général du remplissage de la matrice M

convient de spécifier pour chaque type son algorithme de remplissage. Tout d'abord, l'algorithme du type "inertie" est vide, cette entité n'existe que pour rajouter les variables d'accélération des solides.

Ensuite, l'algorithme associé au remplissage pour les efforts est très simple puisqu'il consiste à mettre des 1 dans la colonne de chaque variable qui lui est liée et la valeur qu'il veut lui associer dans le vecteur des résultats. Un effort ajoutera donc systématiquement 6 équations dans la matrice M et sera lié par 6 variables à un solide.

Dans le cas d'une liaison, il y aura toujours 12 équations de rajoutées dans M pour $12 \times 2 = 24$ variables de liées. La liaison place systématiquement 6 équations du type des équations (10) (une par composante). Puis elle ajoute des équations du type $F_{A,s1/s2}^{(R_0)} \cdot \overrightarrow{x} = 0$ sur les composantes où le mouvement est autorisé. Enfin, elle ajoute des équations du type des équations (11) sur les composantes où le mouvement est transmis d'un solide à l'autre.

La figure (5) montre l'algorithme de remplissage pour la liaison, (R_i) est le repère local de la liaison et $L(i)$ la matrice colonne qui contient les six « 0 » ou « 1 » des degrés de libertés tels qu'exprimés dans (9).

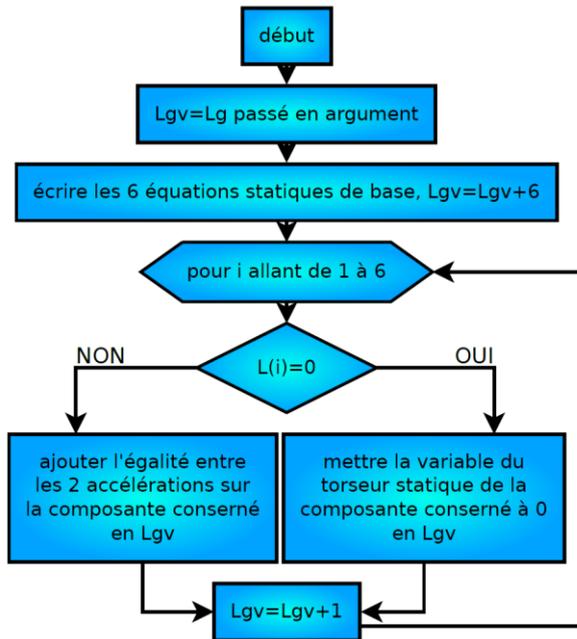


Figure 5 - Algorithme de remplissage de la matrice M pour une liaison

Enfin, les solides ont la fonction de remplissage la plus complexe. En effet, si l'on considère qu'une liaison ne peut exister qu'entre deux solides, il y a nécessairement 2 fois plus de voisins liaison aux solides qu'il n'y a de liaison. Or, chaque liaison crée 24 variables pour 12 équations donc laisse un manque de 12 équations à rajouter par les solides. Ainsi, la fonction de remplissage pour les solides doit placer $\frac{12}{2} Nb_{voisin \in liaison}^{solide} + 6$ équations pour que le système ait autant d'inconnues que d'équations et que la matrice [M] soit carrée (donc potentiellement inversible). Pour commencer, la fonction de remplissage des solides doit placer les 6 équations qui découlent de la loi (4). Ensuite viennent les lois des "cohérences" des accélérations évoquées avec la relation (7). En effet, chaque accélération liée au solide doit avoir la même valeur en un même point du solide. On va ainsi leur imposer une égalité après réexpression sur le point du centre d'inertie aux variables d'accélération du centre d'inertie, cela représente $6 \times Nb_{voisin \in liaison}^{solide}$ équations supplémentaires. L'algorithme de la figure (6) résume ce qui a été dit dans ce paragraphe. Bien que la masse soit un solide, elle ne doit pas remplir les mêmes équations car certaines d'entre elles pourraient être colinéaires avec l'ensemble des autres équations du système entrant en jeu dans une boucle mécanique de la masse vers la masse. Ainsi, la masse est placée sans bloc "inertie" et n'impose que $6 \times Nb_{voisin \in liaison}^{solide}$ équations qui imposent toutes une valeur nulle aux accélérations des points liés à la masse.

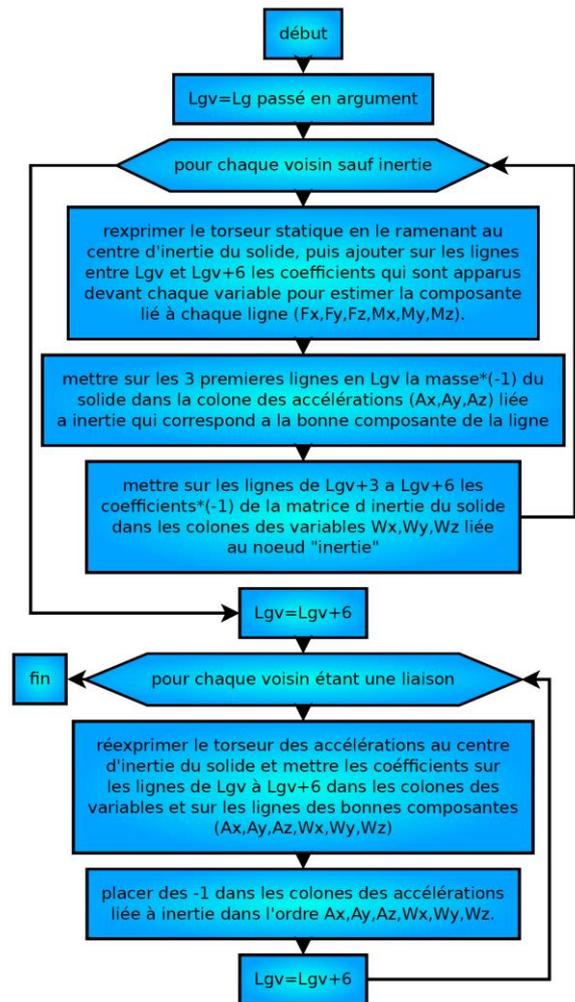


Figure 6 - Algorithme de remplissage de la matrice M pour un solide

3.2. La résolution de la matrice

Une fois la matrice [M] remplie, il est possible de trouver les solutions des variables du système en créant une matrice composée de la matrice [M] et du vecteur résultat \vec{R} tel que présenté dans (13).

$$[N] = [M][\vec{R}] \tag{13}$$

On peut appliquer un algorithme à la matrice [N] pour que les solutions des variables apparaissent dans l'ordre dans la colonne des résultats. Cette algorithme est l'algorithme de Gauss-Jordan. On préférera l'algorithme de Gauss-Jordan à pivot partiel car il peut y avoir des 0 sur la diagonale de la partie carrée de la matrice qui rendent caduc la méthode de Gauss-Jordan de base. L'algorithme utilisé pour résoudre le système est donné dans la figure (7). La valeur des variables calculées peut ensuite être facilement récupérée dans la matrice grâce à son numéro N_i^M .

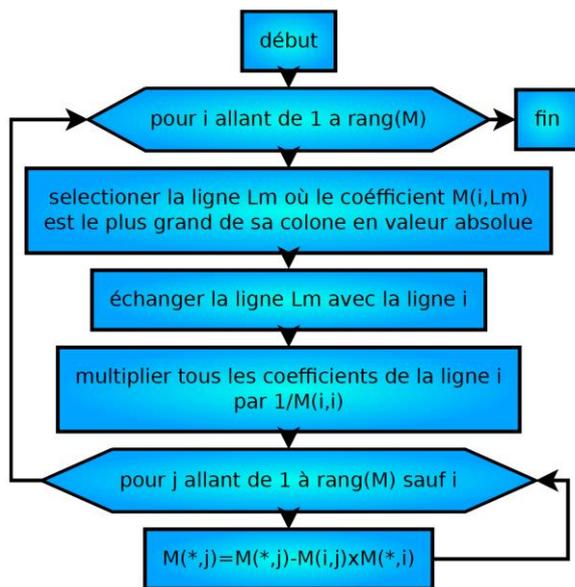


Figure 7 - Algorithme de Gauss-Jordan au pivot partiel

3.3. Les calculs du mouvement

A ce stade du calcul, tous les efforts et accélérations sont connus. Afin de calculer les mouvements et les positions futurs des solides, on utilise une méthode explicite. On ajoute à une variable interne de chaque solide, ses vitesses de translation et de rotation, l'accélération fois un pas de temps et la vitesse fois un pas de temps est ajouté à la position de son repère local. Si on définit le repère local comme $(R_1) = \vec{d}, \vec{x}, \vec{y}, \vec{z}$ avec \vec{d} le vecteur entre le point O de (R_0) et le point O de (R_1) qui est aussi G son centre d'inertie. Ainsi, on obtient les équations (14).

$$\begin{aligned} \vec{V}_{s/R}^{(R_0)}(t + \Delta t) &= \vec{V}_{s/R}^{(R_0)}(t) + \vec{A}_{G,s/R}^{(R_0)} \times \Delta t \\ \vec{\Omega}_{s/R}^{(R_0)}(t + \Delta t) &= \vec{\Omega}_{s/R}^{(R_0)}(t) + \vec{W}_{G,s/R}^{(R_0)} \times \Delta t \\ \vec{d}(t + \Delta t) &= \vec{d}(t) + \vec{V}_{s/R}^{(R_0)}(t) \times \Delta t \\ [\vec{x}, \vec{y}, \vec{z}](t + \Delta t) &= \\ &\begin{bmatrix} u_x^2(1-c) + c & u_x u_y(1-c) - u_z s & u_x u_z(1-c) + u_y s \\ u_x u_y(1-c) + u_z s & u_y^2(1-c) + c & u_y u_z(1-c) - u_x s \\ u_x u_z(1-c) - u_y s & u_y u_z(1-c) + u_x s & u_z^2(1-c) + c \end{bmatrix} \\ &\times [\vec{x}, \vec{y}, \vec{z}](t) \end{aligned}$$

avec :

$$\begin{aligned} c &= \cos \left(\left\| \vec{\Omega}_{s/R}^{(R_0)}(t) \right\| \right) \\ s &= \sin \left(\left\| \vec{\Omega}_{s/R}^{(R_0)}(t) \right\| \right) \\ \begin{bmatrix} u_x \\ u_y \\ u_z \end{bmatrix} &= \frac{\vec{\Omega}_{s/R}^{(R_0)}(t)}{\left\| \vec{\Omega}_{s/R}^{(R_0)}(t) \right\|} \end{aligned} \quad (14)$$

La matrice utilisée dans l'équation (14) [1] est une matrice de rotation autour d'un axe quelconque.

Mais ce n'est pas fini, il faut encore remettre à jour les positions des liaisons et les matrices de moments d'inerties. Pour les liaisons, on peut considérer qu'une liaison est déplacée par les solides qui lui sont liés sur ses composantes non libres. C'est à dire que là où la liaison ne permet pas le mouvement, elle sera déplacée

en même temps que l'un ou l'autre des solides attachés, tout autre déplacement n'a pas besoin d'être considéré puisqu'il ne changera pas ses propriétés. Ainsi, pour chaque liaison, on va appliquer la relation (15).

$$\begin{aligned} \vec{V}_{l/R}^{(R_0)}(t) &= L(1)\vec{x}^{(R_1)} \cdot \vec{V}_{s1/R}^{(R_0)}(t) \\ &+ L(2)\vec{y}^{(R_1)} \cdot \vec{V}_{s1/R}^{(R_0)}(t) \\ &+ L(3)\vec{z}^{(R_1)} \cdot \vec{V}_{s1/R}^{(R_0)}(t) \\ \vec{W}_{l/R}^{(R_0)}(t) &= L(4)\vec{x}^{(R_1)} \cdot \vec{W}_{s1/R}^{(R_0)}(t) \\ &+ L(5)\vec{y}^{(R_1)} \cdot \vec{W}_{s1/R}^{(R_0)}(t) \\ &+ L(6)\vec{z}^{(R_1)} \cdot \vec{W}_{s1/R}^{(R_0)}(t) \end{aligned} \quad (15)$$

Il est ensuite possible d'utiliser la vitesse de la liaison de la même manière que dans l'équation (14) pour calculer sa nouvelle position et orientation. Notons cependant qu'un tel système de calcul, bien qu'il permette une vitesse de calcul accrue, engendre des accumulations d'erreurs importantes au cours du temps puisque s'il existe une erreur de *der* sur l'accélération, elle sera ajoutée à la vitesse à chaque pas de temps et que le cumul de toutes ces erreurs ajoutées à la vitesse sera ajouté à chaque pas de temps à la position. Ainsi, l'erreur cumulée sur la position due à l'erreur *der* sur l'accélération sera (dans l'hypothèse d'une erreur constante) tel que donné en (16).

$$\begin{aligned} DER &= (der \times \Delta t \times Nb_{pas}) \times \Delta t \times Nb_{pas} \\ &= \Delta t^2 \times Nb_{pas}^2 \times der \end{aligned} \quad (16)$$

avec Nb_{pas} le nombre de pas de calcul fait depuis le début. On remarque cependant qu'avec une précision en double float on garde une bonne précision sur des temps de simulation raisonnable (de l'ordre de quelques minutes) et des mécanismes peu complexes (une ou deux dizaines de solide) pour un pas de temps de $\Delta t = 0.01s$ et des vitesses faibles $cm.s^{-1}$. On peut bien sur modéliser des mécanismes plus complexes ou faire des simulations plus longues en diminuant le pas de temps, cela reste à évaluer empiriquement au cas par cas (tous les mécanismes ne se valent pas en terme de stabilité numérique et la vitesse du mouvement joue un rôle important).

Pour ce qui est des matrices de moment d'inertie, elles sont toujours initialement exprimées dans un repère attaché au solide considéré. En effet, si ce solide bouge ou tourne, sa matrice de moment d'inertie ne sera plus la même exprimée par rapport à un point fixe. Dans notre cas, une translation n'est pas un problème puisque le centre d'inertie se déplace en même temps que le solide et que la matrice de moment d'inertie est exprimée et utilisée sur ce point. Par contre une rotation du solide doit être pris en compte. La technique la plus évidente pour garder la bonne matrice de moment d'inertie est de la calculer au début dans le repère local du solide $[I_G^{(R_1)}]$, puis de la recalculer dans le repère (R_0)

à chaque changement du repère (R_l), ainsi, après chaque pas de temps, on appliquera la relation suivante (17) :

$$[I_G^{(R_0)}] = [P_{(R_1) \rightarrow (R_0)}] [I_G^{(R_1)}] [P_{(R_1) \rightarrow (R_0)}]^{-1}$$

avec

$$[P_{(R_1) \rightarrow (R_0)}] = [\vec{x}, \vec{y}, \vec{z}] \quad (17)$$

4. La conception objet

La manière dont est conçue ce modèle permet une programmation objet rendant possible l'ajout de fonctionnalités supplémentaires facilement. Ainsi, on peut identifier plusieurs objets et couches d'héritages :

1. un objet qui permet de construire une matrice à partir d'un graphe et résoudre cette matrice et appliquer un pas de temps (SYSTEME) ;
2. un objet qui permet de simuler un circuit mécanique présenté comme un graphe (MECANISME) ;

Et pour les composants :

1. un objet nœud de graphe qui place une équation dans une matrice et se mettre à jour quand on l'appelle avec un pas de temps (ENTITE) ;
2. un objet nœud composant mécanique virtuel (COMPOSANTMECANIQUE) :
 - un objet composant mécanique de type solide (SOLIDE) ;
 - un objet composant mécanique de type solide (MASSE) ;
 - un objet composant mécanique de type liaison (LIAISON) ;
 - un objet composant mécanique de type effort (EFFORT).

La figure (8) récapitule les héritages entre objets. En distribuant la programmation ainsi, il est possible

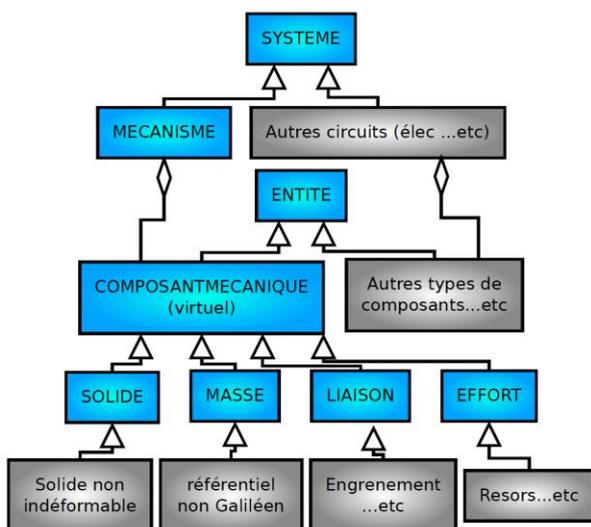


Figure 8 - Récapitulation des héritages entre les Objets

d'utiliser les objets SYSTEME et ENTITE pour modéliser d'autres circuits comme par exemple des circuits électriques, thermiques, magnétiques ...etc. Il est

aussi possible de créer de nouveau composants mécaniques à partir de LIAISON tel qu'un engrenement ou tout autre type de liaison spécifique qui ne se déplace pas de façon "naturelle". On peut aussi créer des ressorts à partir d'un objet EFFORT ...etc. Pour ce faire certaines méthodes doivent être définies impérativement pour certains objets :

- ENTITE :
 - Placer des équations dans la matrice ;
 - Updater les grandeurs internes en regardant dans les liens et en s'appuyant sur un pas de temps.
- SYSTEME :
 - Ajouter un nœud ENTITE ;
 - Ajouter un lien en précisant son numéro d'indice (une valeur qui dit à quoi il correspond pour le nœud) pour ENTITE ;
 - Supprimer un nœud ou un lien ;
 - Construire la matrice en appelant les fonctions de placement des équations des ENTITE ;
 - Résoudre la matrice ;
 - Redistribuer les résultats dans les liens ;
 - Lancer les fonctions d'Updatage de toutes les ENTITE en précisant un pas de temps.
- MECANISME :
 - Définir une masse, cette méthode crée une MASSE sans lui ajouter de bloc "inertie" ;
 - Ajouter un SOLIDE, cette méthode créera automatiquement une ENTITE "inertie" et la reliera au solide ajouté ;
 - Ajouter une LIAISON, placera la liaison et fera les liens entre les deux SOLIDE passés avec en argument ;
 - Ajouter un EFFORT, placera l'EFFORT et le liera au SOLIDE voulu ;
 - Supprimer un SOLIDE, une LIAISON ou un EFFORT, supprime l'objet et ses liens proprement.

5. Exemple de résultats obtenus

5.1. Cas simple d'un barillet dans une glissière

Le mécanisme du barillet présenté dans la figure (2) a été simulé avec les grandeurs données dans (18).

$$\begin{aligned} \vec{F} &= \begin{bmatrix} 2N \\ 1N \\ 0N \end{bmatrix} \\ m &= 1 \text{ kg} \\ P &(-1,0,0) \end{aligned} \quad (18)$$

La figure (9) donne son accélération, la figure (10) donne sa vitesse et la figure (11) donne sa position et le tableau (1) donne les efforts constants calculés dans la liaison glissière.

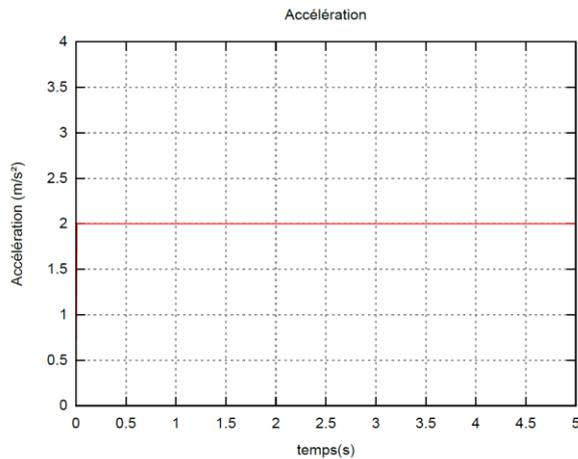


Figure 9 - Accélération du barillet

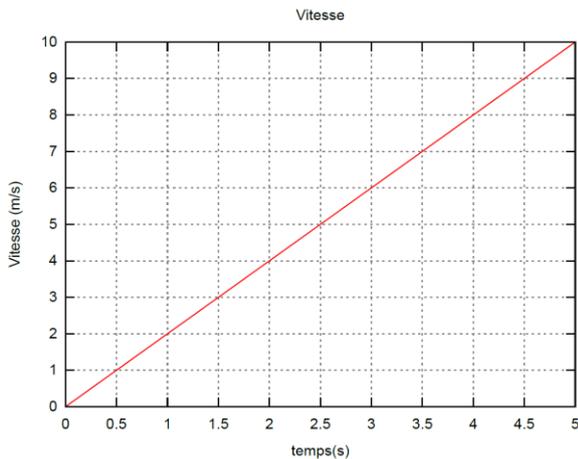


Figure 10 - Vitesse du barillet

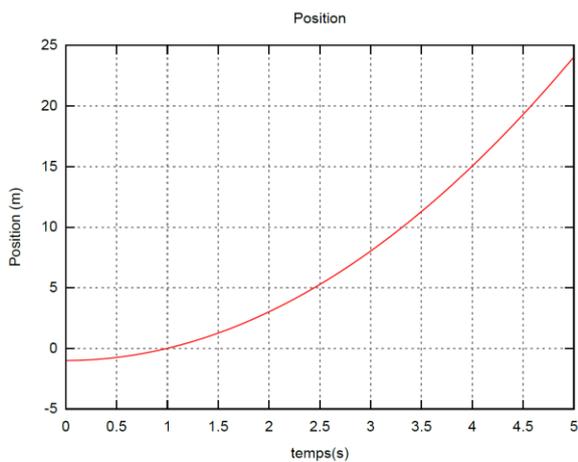


Figure 11 - Position du barillet

$Fx_{g/b}$	$Fy_{g/b}$	$Fz_{g/b}$
0 N	-1 N	0 N
$Mx_{g/b}$	$My_{g/b}$	$Mz_{g/b}$
0 N.m	0 N.m	1 N.m

$Fx_{g/b}$	$Fy_{g/b}$	$Fz_{g/b}$
0 N	1 N	0 N
$Mx_{g/b}$	$My_{g/b}$	$Mz_{g/b}$
0 N.m	0 N.m	-1 N.m

Tableau 1 - Efforts dans la glissière

On observe sans surprise que l'accélération est constante, ce qui est normal puisque la force appliquée est constante et maintenue au même point. On y voit aussi que la vitesse est linéaire, ce qui est normal puisque l'accélération est constante et que la position est parabolique due à une vitesse linéaire... La valeur de l'accélération est égale à la projection de la force sur l'axe de la glissière divisé par la masse du barillet ($m \vec{F} \cdot \vec{x} = A \Rightarrow 1 \times 2 = 2$) comme l'exige la première loi de Newton. Si l'on regarde la valeur de la force de la glissière sur le barillet, on trouve ce qui reste de la force appliquée au barillet et ne créant pas d'accélération ($\vec{F}_{(barillet/glissiere)} + \vec{F} \cdot \vec{x}\vec{x} = \vec{F}$). Par ailleurs, on voit un moment dans la glissière, ce moment est dû à la composante de la force sur \vec{y} . Il est d'ailleurs égale à : $M_z = F_y P_x$ avec M_z la composante sur \vec{z} du moment du barillet sur la glissière, F_y la composante \vec{y} de la force appliqué et P_x la position du point P sur l'axe \vec{x} . Enfin, il faut signaler que l'on trouve bien $\vec{F}_{barillet/glissiere} = -\vec{F}_{glissiere/barillet}$.

5.2. Cas simple d'un engrenement

On propose aussi de modéliser le mécanisme présenté dans la figure (12) qui est composé de deux engrenages de diamètres identiques $D = 0.5$ m, tenus par

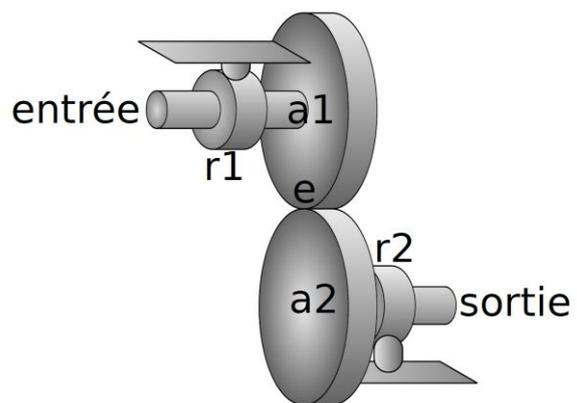


Figure 12 - Schéma cinématique de l'engrenement

des liaisons pivot (un seul degré de liberté, la rotation autour de \vec{x}). La figure (13) affiche les vitesses des axes d'entrée et de sortie lorsqu'un couple $C = 2$ N.m est appliqué en entrée sous forme d'un EFFORT. Le tableau (2) donne la valeur des efforts dans les liaisons mécaniques. Il a fallu ici créer un nouvel objet fils de LIAISON : ENGRENEMENT qui est en fait ici une liaison linéique qui ne se déplace pas avec les solides au

moment de la mise à jour (l'Updatage) de sa position. La figure (13) montre que les vitesses de rotation d'entrée et de sortie sont d'amplitudes égales et

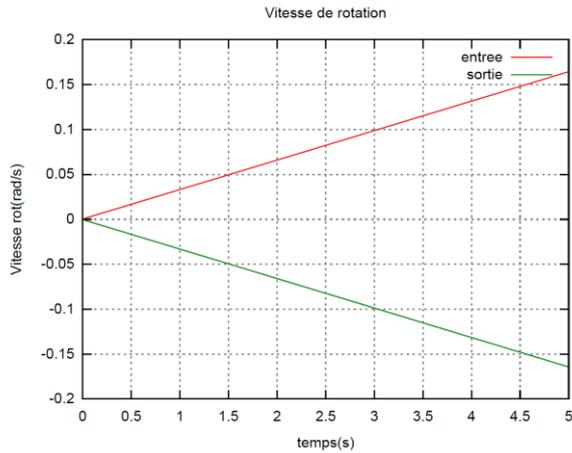


Figure 13 - Vitesses d'entrée et de sortie de l'engrenage

opposées comme on peut l'attendre d'un engrènement entre deux engrenages de même taille. Par ailleurs, on observe une force tangente aux engrenages dans l'engrènement, c'est cette force qui transmet le couple d'un engrenage vers l'autre. On observe aussi des efforts dans les liaisons pivots. Sans ces efforts, les arbres des engrenages ne resteraient pas centrés dans les liaisons

$F_{x_{r1/a1}}$	$F_{y_{r1/a1}}$	$F_{z_{r1/a1}}$
0 N	0 N	2 N
$M_{x_{r1/a1}}$	$M_{y_{r1/a1}}$	$M_{z_{r1/a1}}$
0 N.m	-1 N.m	0 N.m
$F_{x_{r2/a2}}$	$F_{y_{r2/a2}}$	$F_{z_{r2/a2}}$
0 N	0 N	-2 N
$M_{x_{r2/a2}}$	$M_{y_{r2/a2}}$	$M_{z_{r2/a2}}$
0 N.m	-1 N.m	0 N.m
$F_{x_{e/a2}}$	$F_{y_{e/a2}}$	$F_{z_{e/a2}}$
0 N	0 N	2 N
$M_{x_{e/a2}}$	$M_{y_{e/a2}}$	$M_{z_{e/a2}}$
0 N.m	0 N.m	0 N.m

Tableau 2 - Efforts dans les liaisons de la gearbox

pivot et les engrenages seraient tentés de partir chacun d'un côté quand une dent de l'un pousse une dent de l'autre. Connaître ces efforts peut être important car ce sont des paramètres influençant le vieillissement des Gear Box. Ainsi, une commande maladroite de moteur peut engendrer des forces nocives pour les systèmes mécaniques... Et inversement, certains mécanismes de transmission ne seront pas idéaux pour les systèmes électromécaniques étudiés.

6. Conclusion

Un modèle mécanique simple a été développé dans cet article. Ce modèle s'appuie sur quelques formules de base de la dynamique des solides indéformables qui sont elles-mêmes issues des lois de Newton. Afin de pouvoir modéliser un grand nombre de mécanismes à partir d'un seul programme, les mécanismes sont transformés en circuits ou graphes composés d'entités type :

- les solides ;
- les efforts ;
- les liaisons.

On a vu ensuite, que chaque entité type possédait ses propres équations et qu'il était par conséquent aisé de construire un système global sous forme d'une matrice pour l'ensemble du système et faisant ajouter ses équations à chaque entité. Nous avons vu par la suite qu'une approche objet pouvait non seulement permettre de généraliser ce paradigme de vision des circuits ou systèmes mais en plus permettre des ajouts d'entités filles nécessaires pour modéliser de nouveaux mécanismes.

Nous avons choisi d'utiliser une méthode explicite de calcul ce qui permet un calcul rapide mais impose un choix empirique du bon pas de temps Δt .

Quelques résultats simples de simulation ont été présentés pour vérifier la cohérence du calcul. Il faut cependant noter que la modélisation de systèmes mécaniques basés sur la mécanique des solides indéformables ne permet pas la simulation de mécanisme dit "hyperstatique" où le système est trop contraint (pas assez de degré de liberté) pour que la matrice obtenue soit inversible. Cependant, on s'arrange généralement en mécanique pour concevoir des systèmes "isostatiques" donc non hyperstatiques de façon à limiter les coûts d'usinage. En effet, un système isostatique rend beaucoup plus facile l'assemblage de pièces mécaniques produites avec une précision moindre.

Références

- [1] wikipedia.
- [2] Jacques Ferber. Les systèmes multi-agents, vers une intelligence collective. InterEditions, 1995.
- [3] Jean Tirole. Economie du bien commun. PUF, 2016.

Lampe LEDs filament : alimentation, durée de vie, éclairage (Partie 1)

Arnaud Sivert*, Bruno Vacossin*, Franck Betin*

*Laboratoire des Technologies Innovantes (L.T.I), équipe Énergie Électrique et Systèmes Associés (EESA)
U.P.J.V Université de Picardie Jules Verne, Institut Universitaire de Technologie de l'Aisne GEII, 02880 SOISSONS.

Résumé : Les lampes à LEDs SMD (Surface Mounted Device) coûtent relativement chers par rapports aux halogènes à cause de l'électronique interne. En effet, le convertisseur interne doit diminuer la tension secteur de 230 V à des tensions inférieures à une dizaine de volts pour des courants demandés de l'ordre de 0.5 A à 1 A. Les lampes à LEDs consomment 10 fois moins d'énergies que les halogènes. Les LEDs seraient donc rentables grâce à un seuil de durée de vie plus élevé que celui des lampes halogènes. Les constructeurs des lampes à LEDs indiquent d'ailleurs la durée de vie de leurs produits pour justifier leur rentabilité et les vendre. **Mais comment est déterminée cette durée de vie ?** Depuis 2015, les LEDs filaments COB (Chip On Board, 28 LEDs en série, 80 V, 0.012 A, 1 W) ont permis de baisser le prix en utilisant une électronique simple (alimentation capacitive) pouvant être placée dans le culot de la lampe et permettant d'avoir un éclairage à 360°. Par conséquent, le coût de ces LEDs filaments COB est bien plus faible que leurs homologues SMD. De plus, ces LEDs en filament n'ont pas besoin de dissipateur de chaleur mais sont, en revanche, limitées à une certaine puissance pour un encombrement donné. Cet article répond à de nombreuses questions sur les LEDs filaments pour en faire une exploitation pédagogique : **Quelles sont leurs caractéristiques et leurs modèles ? Quelle est leur puissance maximale dans un encombrement donné ? Quelles sont les types de convertisseurs permettant de les alimenter ? Peut-on améliorer le rendement de ces convertisseurs si le volume du culot le permet ? Est-ce que leur durée de vie ou leur fiabilité augmente grâce à leur électronique plus simple ? Quel doit être le nombre de LEDs ou de filaments en série pour avoir un rendement maximal ?**

1. Introduction

La transition énergétique demande une baisse de la consommation de l'énergie de 50% d'ici 2050. Depuis 2009, l'éclairage à LEDs aurait dû remplacer les lampes halogènes. Mais la faible fiabilité des éclairages à LEDs (SMD) et leurs prix plus importants n'ont pas provoqué l'adoption de cette technologie par de nombreux consommateurs. De plus, la variation de ces prix étant très étendue, cela ne facilite pas le choix lors de l'achat par le consommateur. En 2016, il y a eu une campagne en France de 5 ampoules LED SMD gratuites pour faire adhérer les consommateurs à ce produit [13] due à une décision prise lors de la COP21.

En marketing, les facteurs qui conduisent à l'adoption d'un produit sont : les avantages relatifs, la compatibilité, la complexité ou la simplicité d'utilisation, la possibilité d'essai, la disponibilité, les actions publicitaires et le prix. Or le prix des lampes à LEDs SMD est multiplié par 10 à cause

de l'électronique interne. En revanche, les lampes à LEDs peuvent réduire la consommation d'énergie par 10 par rapport à une lampe halogène et les LEDs ont une durée de vie 10 fois plus importantes.

Par ailleurs, des magazines pour aider les consommateurs dans leur choix, font régulièrement des tests de durée de vie et des comparatifs de prix [2, 3]. Mais, les packagings changent régulièrement et le consommateur ne peut pas faire des choix guidés.

L'étiquette européenne sur de l'éclairage, indique qu'il faut une valeur supérieure à 115 lm/W pour avoir la note A++, 85 lm/W pour A+ et 70 lm/W pour A.

En 2015, l'électronique des lampes à LEDs a été simplifiée grâce aux LEDs COB ce qui a permis de réduire le coût de fabrication.

Dans cet article, leurs alimentations seront étudiées pour pouvoir présenter leurs avantages et leurs inconvénients lors d'une exploitation pédagogique. Mais dans un premier temps, la caractéristique des

LEDs filaments et leur durée de vie en fonction de la température vont être présentées.

2. Caractéristiques des LEDs filaments

Les filaments LEDs de 1 W à 0.5 € (28 LEDs sont en série sur un support de 4 cm). La tension de seuil est de 80 V à 15 mA avec une luminosité de 135 lm. Ces LEDs filaments ont un rayonnement à 270° et permettent d’avoir un éclairage à moitié direct et indirect en fonction du support. Certaines peuvent supporter jusqu’à 1.5W par filament. Ces LEDs filaments sont compatibles avec les éclairages à halogène. Les fabricants de filaments LEDs (Epistar, EngLED, Edison...) ne sont pas nombreux encore en 2016. En revanche, il y a de nombreux fabricants de lampes de grandes marques qui les utilisent (Osram, Dial, Philips, CosmosLED, Sylvania, Leedaron...) car le marché de l’éclairage est très important.

La variation du courant de la LED est souvent présentée par l’équation suivante :

$$I_{d_{forward}} = I_{ss} \cdot e^{\frac{V_d(\theta_j) \cdot q}{k \cdot k_B \cdot (\theta_j + 273)}} \quad (1)$$

Avec I_{ss} courant de saturation inverse (10^{-5} , q charge d’électrons ($1.36 \cdot 10^{-19}$), k_B constante de Boltzmann ($1.38 \cdot 10^{-23}$), θ_j température de jonction (°C), k dépend du coefficient du semi-conducteur. L’évolution de la tension de seuil en fonction du courant et en fonction de la température correspondre aux figures suivantes :

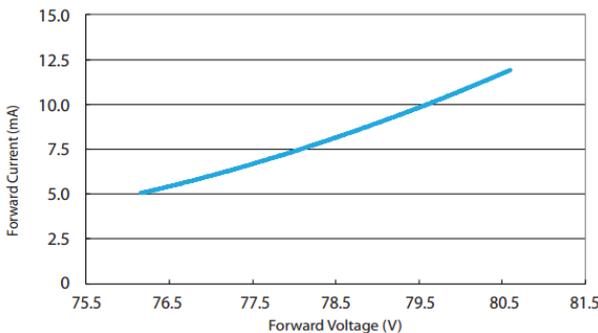


fig 1: Evolution de la tension de seuil en fonction du courant de la LED filament 1W à 25°C [6]

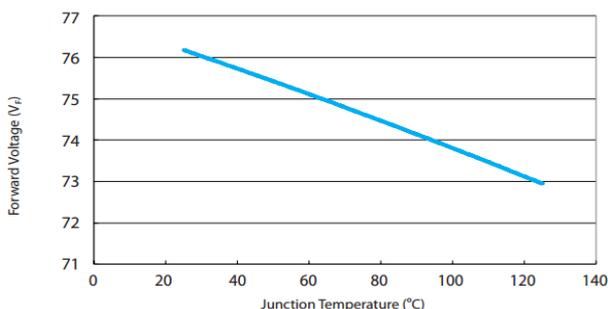


fig 2: Variation de la tension de seuil en fonction de la température de la LED filament 1W [6]

Ces filaments de LEDs sont recouverts de Ceriums phosphore qui atténue l’émission bleue que produit les LEDs blanches. La couleur de la lumière émise sera donc un blanc « chaud ». La durée de vie donnée par les constructeurs est de 50 kheures à une température ambiante de 65°C sachant que la LED est considérée défaillante pour une diminution du flux lumineux de 70% (**norme IEC 62717**) comme on peut l’observer sur la figure suivante.

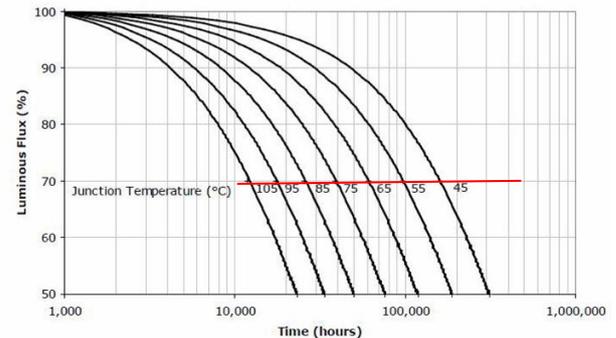


fig 3: Estimation de la diminution du flux lumineux en fonction du temps de fonctionnement et de la température avec limite à 70% [10]

De nombreux modèles mathématiques dans la littérature [10] existent sur la durée de vie des LEDs. Le plus usité correspond à l’équation suivante :

$$\phi(\%) = 100 e^{\alpha \cdot \text{temps}(h)} \quad (2)$$

Le coefficient de la durée de vie α varie en fonction de la température. Les valeurs pour la courbe précédente peuvent être identifiées de façon simple par une fonction affine :

$$\alpha(h^{-1}) \approx a \cdot T(^{\circ}C) + b = 6.4 \cdot 10^{-7} \cdot T - 3.2 \cdot 10^{-5} \quad (3)$$

Un modèle polynomial de 3^{ème} ordre de α aura évidemment une meilleure estimation que la fonction précédente. En effet, la durée de vie des LEDs est estimée avec des essais de 2000 h puis il y a une estimation pour connaître leur durée de vie.

La résistance thermique $R_{TH_{JG}}$ des LEDs filaments est de 60°C/W. Par conséquent, en considérant qu’il n’y a pas d’interaction de chaleur en les LEDs, une augmentation de 60°C par filament sera provoquée pour 1 W nominal. Pour la lampe E27 « ballon », la résistance thermique $R_{TH_{G,Amb}}$ entre le verre est la température ambiante est de 3.5°C/W. Le modèle thermique de l’ampoule est représenté sur la figure suivante :

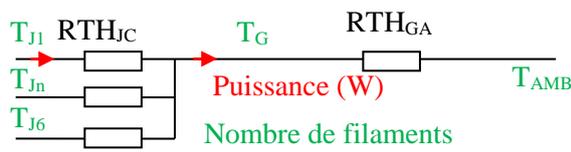


fig 4: Modèle thermique d'une ampoule à LED 6 filaments

Ce modèle permet de connaître la température de jonction des LEDs.

Exemple : Pour une température ambiante de 18°C, la température de jonction correspondra à l'équation suivante avec n le nombre de LEDs filaments :

$$T_j = RTH_{JG} \cdot P + n \cdot P \cdot RTH_{GAmb} + T_{amb} \quad (5)$$

$$T_j = 60(\text{°C/W}) \cdot 1W + 6 \cdot 1W \cdot 3.5(\text{°C/W}) + 18 = 99\text{°C}$$

Sur la figure suivante, on peut observer la température du filament à l'air libre et celle de l'ampoule.

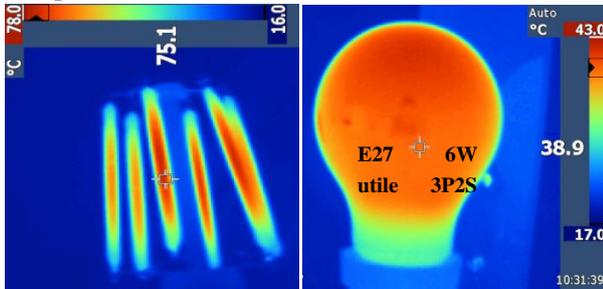


fig 5: Mesure de la différence de température de LED filament pour une température ambiante de 18°C.

Pour une lampe E14 « flamme », la résistance thermique $RTH_{G,Amb}$ est de 5.75°C/W.

Donc dans un encombrement donné, plus il y aura de filaments de LEDs, plus la température sera importante et donc plus la durée de vie diminuera.

Pour ampoule « bulle » E27, le nombre maximum de LEDs filaments 1W sera de 6 et pour une ampoule « flamme » seulement de 4 filaments.

Le prix d'une lampe à LEDs filaments devrait être donné en fonction de sa puissance et donc en fonction du nombre de filaments. Le rapport puissance/prix ou lumen/prix devrait être constant. Cela n'est pas le cas pour les lampes halogènes : le prix d'une lampe de faible ou de grande puissance, n'est pas lié à la matière première. Le prix, dans ce cas, est sensiblement constant. Mais quelle est la rentabilité d'un éclairage à LEDs en fonction de son prix et de sa consommation d'énergie ?

3. Coût variable et rentabilité entre 2 éclairages (Total Cost of Ownership : TCO :)

Le coût variable entre 2 éclairages différents correspond à l'équation suivante avec PF le prix de la fabrication, M la marge du vendeur et du constructeur, PW la puissance du produit, TJ le temps d'utilisation par jour, PE le prix de l'énergie électrique.

$$Cout_Va(jours) = PF \cdot M + PW \cdot TJ \cdot PE \cdot Jours \quad (6)$$

En France, le temps d'éclairage moyen chez les ménages est de 2 464 h par an, soit 6,7 h par jour. Chaque foyer possède en moyenne 25 points lumineux et consomme 450 kWh/an pour cet éclairage. Le prix de l'électricité en France est de 0.12 €/kWh.

Pour faire une comparaison du coût variable, une lampe 1300 lumens va être utilisée. Pour une LED de 10 Watt à 15€ et pour une lampe halogène de 100W à 1 €, le coût variable correspond à l'équation suivante pour l'éclairage à LEDs :

$$Cout_Va(jours) = 15€ + 10W \cdot 6.7h \cdot \frac{0.12€}{1000Wh} \cdot Jours$$

Sur la figure suivante, on peut observer qu'il faut 193 jours pour le seuil de rentabilité entre l'éclairage à LEDs et halogène malgré la différence de prix entre ces 2 technologies.

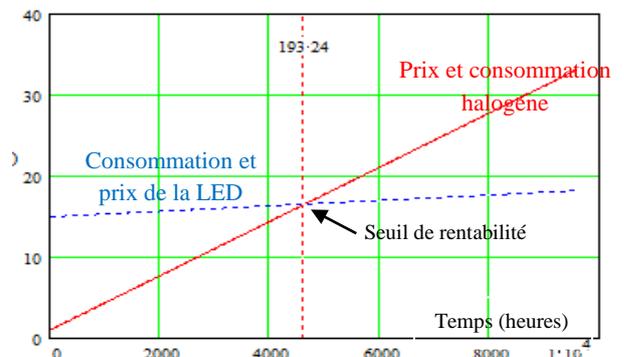


fig 6: Coût variable entre un éclairage de 1300 lumen entre un halogène et un éclairage LED en 2016

Rappel pour un éclairage à 360°, donc isotrope, l'angle solide est de 4.π stéradians. La relation entre les lumens et les lux correspond à l'équation suivante et à la figure suivante

$$E(\text{lux}) = \frac{I(\text{Cd})}{\text{distance}(m)^2} = \frac{\phi(\text{lm})}{4 \cdot \pi \cdot \text{distance}(m)^2} \quad (8)$$

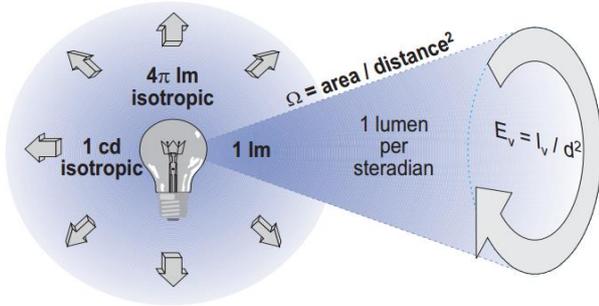


fig 7: Relation entre les différentes unités pour un éclairage à 360°.

Mais comment calculer le flux lumineux ou la puissance en Watt nécessaires pour une pièce d'une maison ?

Suite à l'équation précédente, Pour avoir 125 lux (éclairage pour un couloir) à 1 m de la lampe, il faut 10 lumens. Mais à 2 m, il faudra 40 lumens, à 3 m 90 lumens et à 4 m 160 lumens. L'efficacité lumineuse des LEDs filaments ont un éclairage de 100 à 125 lumen/W nommé mathématiquement « ηlampe » dans l'équation suivante. Le nombre de lumens en fonction de la distance ne permet pas de déterminer la puissance qu'il faut pour la surface d'une pièce

Le flux et la puissance correspondante sont plutôt définis par les équations suivantes :

$$\phi(lm) = E(\text{lux}) \cdot \text{Surface}(m^2) \quad (9)$$

$$P(W) = E(\text{lux}) \cdot \text{Surface}(m^2) \cdot \eta_{lampe} (\text{lm/w}) \quad (10)$$

Ainsi, pour les LEDs filaments il faut environ 1 W/m² et pour un éclairage à halogène 10 W/m². Pour avoir 300 lux (cuisine, bureau), il faudra 3 fois plus de puissance par m². En éclairage direct (éclairage à 120°), il faut environ 2 fois moins de puissance mais il faut multiplier le nombre de points lumineux. Cela dépendra de la hauteur du plafond ainsi que de la hauteur de l'éclairage. Des logiciels de simulations existent (Relux, Calculux, DIALux...) avec des bases de données de différents fournisseurs de lampes.

Pour valoriser certaines technologies d'éclairage, Il existe des sites web [5] et des applications qui déterminent le coût de la rentabilité. Or le consommateur ne sachant pas comment le calcul est effectué, cela ne permet d'avoir une confiance absolue et de faire un choix en toute confiance.

Le prix d'un éclairage à LED va dépendre de la complexité de l'alimentation.

Trois alimentations pour éclairage à LEDs vont être présentées et simulées pour démontrer leurs avantages et leurs inconvénients.

4. Alimentation redressée pour LEDs filaments

Les LEDs filaments qui ont une tension de seuil de 80V peuvent utiliser tout simplement une alimentation redressée monophasée avec un pont de diodes double alternance surnommé PD2 [11] comme on peut l'observer sur le schéma électrique suivant. Le condensateur C1 permet de diminuer le taux d'ondulation. La résistance R2 permet de limiter le courant dans les LEDs filaments mais provoque aussi des pertes.

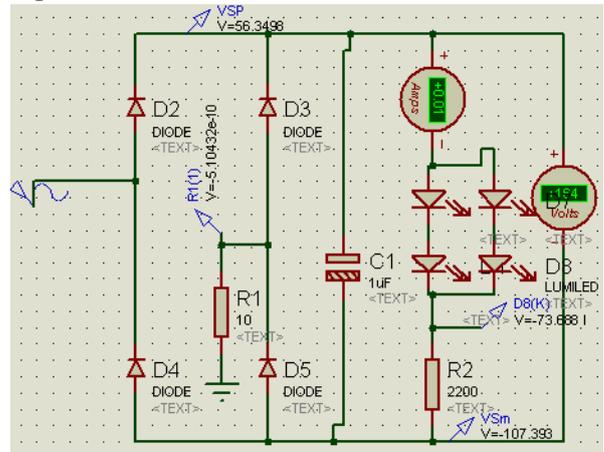


fig 8: Alimentation redressée et filtrée pour lampe filament 4W 2P (parallèle) de 2S (série)

Sans condensateur C1, on peut observer sur la figure suivante la tension et le courant LED qui présente une forte ondulation. Par conséquent, cela provoque une fluctuation à 100 Hz de la lumière. Or, l'œil humain ne perçoit pas cette fluctuation du scintillement à cause de sa persistance rétinienne qui est de 25 Hz.

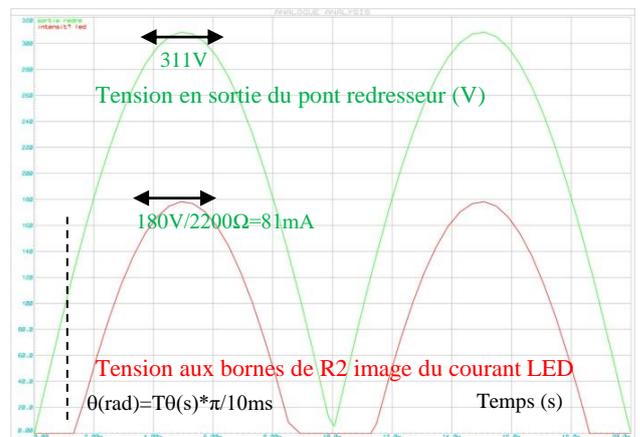


fig 9: Tension et courant sans condensateur 4 W

Le courant max dans la LED peut être déterminé théoriquement par l'équation suivante :

$$I_{Fmax} = (V\sqrt{2} - E) / R_2 \quad (11)$$

Avec V, la tension efficace secteur, E la tension de seuil des LEDs en série, R₂ la résistance de limitation de courant.

Le courant moyen dans la LED correspond à l'équation suivante :

$$I_{Fmoy} = \frac{2}{\pi \cdot R_2} (V\sqrt{2} \cos \theta + E(\theta - \frac{\pi}{2})) \quad (12)$$

Avec l'angle θ correspondant à l'angle pour lequel le courant commence à être passant ce qui correspond à l'équation suivante :

$$\theta = A \sin(E / V\sqrt{2}) \quad (13)$$

Remarque : une caractéristique importante des ponts redresseurs est l'ondulation relative du courant qui s'exprime de la manière suivante :

$$\tau_{ond} = (I_{Fmax} - I_{Fmini}) / I_{Fmoy} \quad (14)$$

Normalement, il faut que I_{Fmax} ne soit pas trop grand par rapport au courant moyen sauf si la LED peut le supporter sans que sa durée de vie ne diminue.

Quelle sera l'évolution de la résistance de limitation de courant et du facteur de puissance si la tension de seuil E augmente ?

A partir des équations 12 et 13, la variation de la résistance de limitation de courant en fonction de la tension de seuil de la LED filament et pour une valeur de courant moyen donnée, correspond à la courbe suivante. On peut observer que plus E augmente, plus la résistance diminue et donc plus les pertes seront faibles.

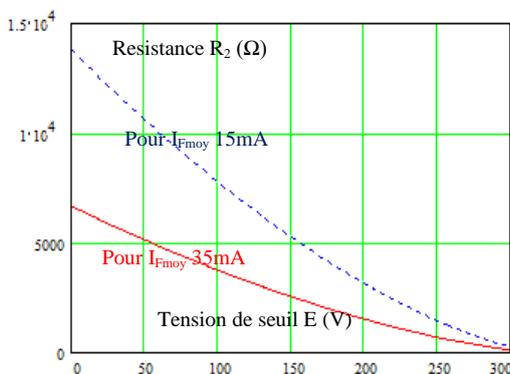


fig 10: Résistance en fonction de la tension seuil des LEDs séries et pour 2 courants moyens.

Quelle sera la relation entre le courant efficace secteur et le courant moyen dans la LED ?

Le courant efficace d'entrée correspond au courant efficace dans la LED ce qui correspond à l'équation suivante (15):

$$I_{Feff} = \frac{I}{R_2} \left[\frac{(\pi - 2\theta)(V^2 + E^2) - 3VE\sqrt{2} \cos \theta}{\pi} \right]^{0.5}$$

Le courant efficace est toujours plus grand que le courant moyen. D'ailleurs, on peut observer le rapport entre le courant moyen et le courant efficace en fonction de la tension E sur la figure suivante :

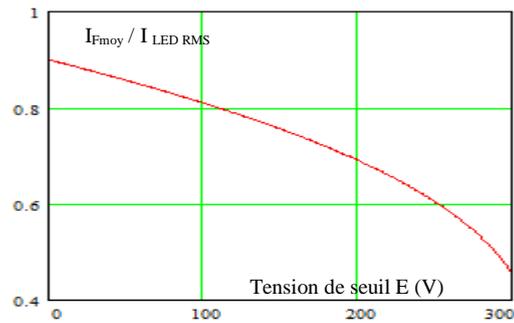


fig 11: Rapport entre le courant moyen et le courant efficace en fonction de la tension de seuil

Le pont de diodes provoque un facteur de puissance donc une puissance réactive qui correspond à l'équation suivante :

$$Fp = \frac{P_{sortie} (W)}{S_{entrée} (V \cdot A)} = \frac{E \cdot I_{Fmoy}}{V_{eff} \cdot I_{eff}} \quad (16)$$

Le facteur de puissance est indépendant de la résistance de limitation à cause des rapports de courant. L'évolution du facteur de puissance en fonction de la tension E est représentée sur la figure suivante.

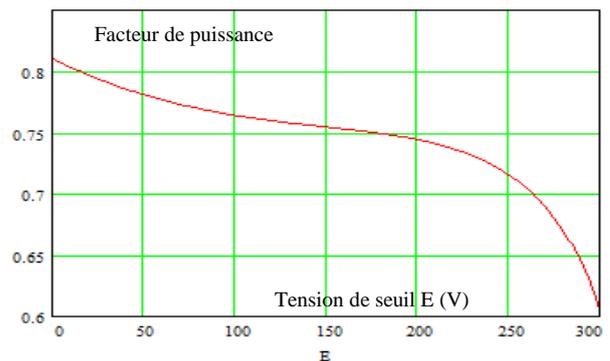


fig 12: Facteur de puissance en fonction de la tension de seuil

Par conséquent, pour ne pas avoir trop de perte dans la résistance de limitation de courant et un facteur de puissance honorable, la tension seuil E doit se situer entre 150 V et 200 V.

Une autre caractéristique des ponts PD2 est le taux de distorsion harmonique qui rend compte de la

pollution harmonique d'un signal. Il est caractérisé par l'équation suivante avec le courant efficace par rapport à la fondamentale qui est aussi appelé harmonique H_1 .

$$THD = \frac{(I_{entrée\ eff}^2 - I_{entrée\ eff\ H1}^2)^{0.5}}{I_{entrée\ eff}} \quad (17)$$

Avec H_1 qui représente le courant d'harmonique 1. Plus le taux de distorsion est grand et plus il y aura des harmoniques qui peuvent provoquer des perturbations électromagnétiques.

Mais étant donné que le courant est faible, les perturbations électromagnétiques dans l'installation électrique provoquée par une lampe LED seront faibles.

Exemple : avec une tension secteur de 220 V avec une lampe de 2P de 2S ($E=160V$), une résistance R_2 de 2200 Ω , alors les valeurs des équations précédentes seront :

$$\theta = A \sin(E / V \sqrt{2}) = A \sin(160 / 220 \sqrt{2}) = 0.54 \text{ rad} ,$$

$$T\theta = 1.71 \text{ ms}, I_{F\ max} = 0.068 \text{ A}, I_{F\ moy} = 0.029 \text{ A},$$

avec un taux d'ondulation de 2.34.

Est-ce que ce courant max peut être supporté par la LED sachant que l'on désire une valeur moyenne correspondant à un nombre de lumens ? Est-ce qu'il n'y aura pas une saturation de l'éclairage pour ce courant max ?

Il n'y a pas d'informations dans les documentations constructeurs au sujet du courant maximum.

Si l'on désire minimiser la fluctuation du courant dont le courant maximal par rapport au courant moyen désiré, une première solution est d'utiliser une inductance qui filtrera le courant. Cette inductance devrait être supérieure à 10 H. Cette valeur entrainerait un volume très important qui n'est possible d'installer dans le culot de la lampe. Une autre solution pour minimiser la fluctuation du courant est de placer un condensateur C_1 pour filtrer la tension redressée. La valeur du condensateur C_1 devra avoir une valeur supérieure à la valeur suivante avec dt égale à la période secteur divisée par 4 :

$$C_1 = i_c(t) \cdot \frac{dt}{dU_c} > I_{F\ moy} \frac{5\text{ms}}{220\sqrt{2}} \quad (18)$$

Pour un courant de moyen de 0.029A, il faudra une valeur de condensateur supérieure à 0.47 μ F. D'ailleurs si l'on simule le montage avec un condensateur de 1 μ F sur la figure suivante, on peut

observer la fluctuation de tension dU_c qui est divisée par 2. Le courant moyen augmente mais le courant max ne change pas. En effet, la tension filtrée va être proche de la tension maximale. Le courant moyen sera donc proche de la valeur maximale et il faudra augmenter la valeur de la résistance pour avoir le courant moyen désiré. Cette augmentation de résistance R_2 entrainera une augmentation des pertes, donc une diminution du rendement.

Malgré ceux-ci, l'éclairage aura une valeur quand même supérieure à 40 lm/W donc obtiendra la note A++.

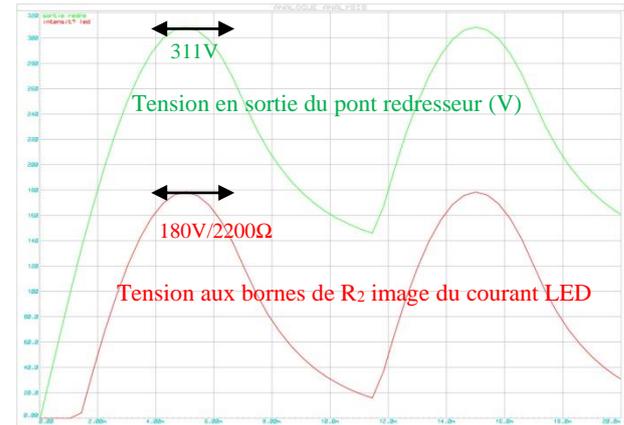


fig 13: Tension et courant ($C_1=1\mu F$) 4W 2P de 2S

Le rendement de cette alimentation va dépendre des pertes dans la résistance R_2 et correspondra à l'équation suivante (19) :

$$\eta = \frac{P_{utile}}{P_{utile} + P_{resistance}} \quad \text{avec} \quad \begin{cases} P_{utile} = E \cdot I_{F\ moy} \\ P_{resistance} = R_2 \cdot I_{F\ moy}^2 \end{cases}$$

Le tableau suivant fait un récapitulatif des performances d'une lampe à LEDs en fonction de sa puissance et du nombre en série de LEDs. On peut observer que le rendement va dépendre de l'écart entre la tension E et la tension maximum secteur car la différence est perdue dans la résistance. Il n'est pas possible de mettre 4 LEDs séries car la tension de seuil est supérieure à la tension d'alimentation maximale du secteur.

Tableau 1 : Performance des différentes LEDs sans condensateur de filtrages sous 220V AC.

Combinaison de filaments	R2 (Ω)	Puissance consommée	Rendement
2 séries, 2 Watts	6300	3.1 W	0.66 %
3 séries, 3 Watts	2600	3.4 W	0.88 %
2 Séries 2 //, 4 W	3150	6 W	0.66 %

Avec la tension redressée filtrée, on peut observer que sur le tableau suivant la résistance a augmenté alors le rendement diminue.

Tableau 2 : Performance des différentes LEDs avec condensateur de filtrage sous 220 V AC.

Combinaison	R2 (Ω)	P _{conso}	Rendement
2 séries, 2 Watts	13.8k Ω	4.4 W	0.47%
3 séries, 3 Watts	7600	4.4W	0.70%

Pour diminuer les pertes dans la résistance R₂, une alimentation capacitive va être utilisée.

5. Alimentation capacitive redressée

L'alimentation capacitive demande juste un condensateur C₂ qui permet de diminuer la tension d'entrée du pont de diodes comme on peut l'observer sur le schéma électrique de figure suivante. En effet, le condensateur parfait n'a pas de pertes de puissance active. De plus, la puissance réactive capacitive permet de relever le facteur du réseau électrique. Cette tension en amont du pont redresseur étant plus faible, alors l'angle d'ouverture du courant est plus faible ce qui entraîne un rapport courant max sur courant moyen plus important. A cause de la tolérance sur le condensateur C₁ et sur les variateurs de la tension secteur, une résistance de limitation de courant LED R₂ devra quand même être utilisée. Par contre, cette résistance R₂ sera bien plus faible que celle retenue pour l'alimentation redressée. La valeur de la capacité C₂ est déterminée par l'équation suivante :

$$C_2 = \frac{I_{\text{entrée RMS}}}{(V_{\text{secteur RMS}}^2 - V_{\text{redress RMS}}^2)^{0.5} \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50\text{Hz}} \quad (20)$$

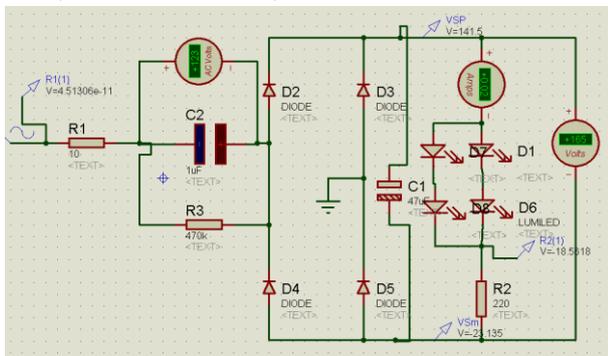


fig 14: Alimentation capacitive pour 2 LEDs filament 4W 2P (parallèle) de 2S (série)

La tension redressée RMS doit être déterminée en fonction de la résistance R₂ (inférieure à 100 Ω) et le courant moyen désiré.

Exemple : pour une tension LED de 160 V, courant moyen de 31 mA, R₂ à 100 Ω, à partir de l'équation (12), il faudra une tension redressée RMS de 125 V et un angle θ=1.13 rad. A partir de l'équation (15), le courant efficace traversant le condensateur sera de 65 mA et il faudra un condensateur C₂ de 1.1 μF pour une tension secteur de 220 V.

On peut observer que la tension redressée est plus faible que la valeur précédente, donc la résistance de limitation de courant sera plus faible et il y aura moins de perte.

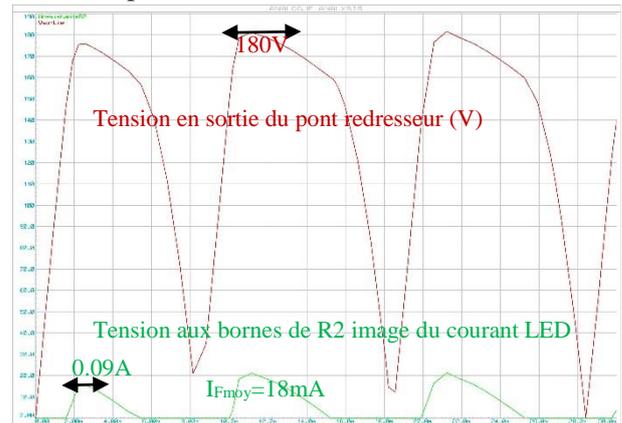


fig 15: Alimentation capacitive pour LED filament 4W avec condensateur C₂ de 1 μF sans C₂.

Le courant moyen dans la LED correspondra à l'équation suivante (21) :

$$I_F = \left[\left[V_{RMS} \cdot \sqrt{2} - \frac{I_F}{2 \cdot \pi \cdot F \cdot C_2} \right] \frac{2}{\pi} - V_{Fled} \right] \frac{1}{R_2} \text{ Donc}$$

$$I_{F \text{ moy}} \approx \frac{(V_{RMS} \cdot \sqrt{2} \cdot 2 / \pi - V_{Fled})}{R_2 + (1 / \pi^2 \cdot F \cdot C_2)} \quad (22)$$

Etant donné que R₂ est négligeable devant l'impédance du condensateur alors le courant dans la LED sera proportionnel à la valeur du condensateur C₂.

Exemple : avec une tension secteur de 220 V et 2 LEDs série, avec un condensateur de C₂ 1 μF alors le courant moyen sera de 17 mA.

Mais avec le courant max théorique du 81mA que l'on peut observer sur la figure précédente :

L'angle d'ouverture du courant est plus faible que pour le redressement non filtré mais il n'y a pas d'effet de papillonnement de l'éclairage à 100 Hz

Comme pour l'alimentation redressée, un condensateur de filtrage peut être mis pour minimiser l'ondulation du courant. Avec un condensateur C₁ de 10 μF, l'ondulation est de 50 mA pour courant moyen de 27 mA. Avec un condensateur C₁ de 47 uF, l'ondulation passe à 14 mA pour un courant moyen

de 27 mA comme on peut l'observer sur les 2 figures suivantes. On peut observer aussi que la tension en sortie du redresseur est relativement faible.

Le condensateur « film polyester » C_2 devra supporter la tension secteur et doit donc être de classe X2 150 V alternatifs norme IEC664 [7] donc moins encombrant que le condensateur C_1 qui doit supporter 250 V. Les condensateurs de classe X ne doivent pas au cours d'un mode de défaillance provoquer de court-circuit.

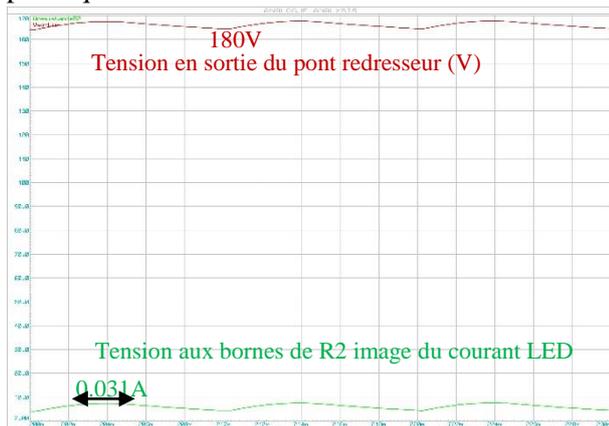


fig 16: Alimentation capacitive pour LED filament 4 W avec condensateur C_1 de 47 μF , $I_{Fmoy}=18$ mA

Une résistance R_3 très grande (470k Ω) permet de décharger le Condensateur C_2 lorsque l'alimentation est arrêtée. En effet sans cette résistance, si une personne manipule les fils électriques le condensateur se déchargera dans l'impédance de la personne (environ 1500 Ω).

Il existe des circuits intégrés tel que le MAX 610 qui réalise des alimentations très faibles puissances en utilisant une capacité C_2 série et qui régule le courant.

La capacité d'entrée C_2 ont un volume important. Mais, ils peuvent est installé dans un culot E14 ou un culot E27 comme on peut l'observer sur la photo suivante sans gêner l'éclairage à 360°.

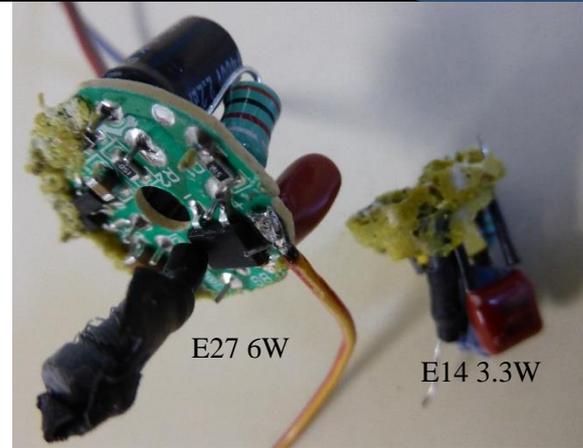


fig 17: Alimentation dans un culot E27 et E14

Si l'alimentation des LEDs filaments est à l'intérieur du culot, ce n'est pas le cas pour les alimentations de LED SMD. Car ces LEDs ont besoins de plus de composants comme nous allons le présenter.

6. Alimentation lampe à LEDs SMD

Les LEDs SMD ont des puissances plus importantes que les filaments de LEDs. D'ailleurs, les LEDs SMD ont une tension de seuil de 3 V avec des courants de 0.3 À 1 A.

Exemple pour une lampe de 5 W, 5 LEDs série SMD, une tension de 15 V et un courant de 0.33 A doivent être utilisés.

Si l'on utilisait l'alimentation redressée de la figure 7, le rendement serait seulement de 7%, avec une résistance de limitation de 523 Ω /64W ce qui serait idiot. Par conséquent, un hacheur doit fortement baisser la tension secteur et réguler le courant comme on peut l'observer sur la figure suivante :

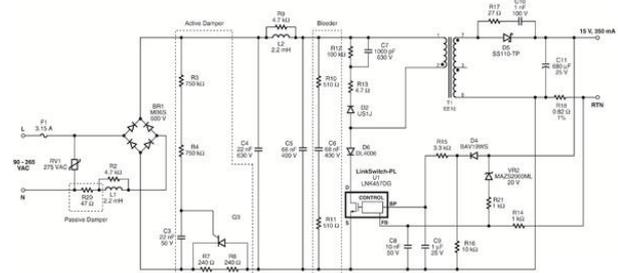


fig 18: Alimentation de 5 LEDs SMD, convertisseur basse tension 220V/15V, 0.35 A [8]

Le flux lumineux est indépendant de la fluctuation de la tension secteur car le courant dans la LED est régulé. Cependant, la complexité du circuit augmente le coût de l'éclairage. De plus, cette complexité diminue la durée de vie et la fiabilité.

Mais comment calculer la durée de vie de l'électronique ?

7. Durée de vie de l'électronique

Le condensateur est considéré comme le maillon le plus faible pour la durée de fonctionnement de l'électronique.

Les condensateurs électrolytiques (1 μF à 1000 μF de 16 V à 500 V) sont polarisés donc sont pour le filtrage de la tension en sortie du redresseur C_1 . Mais leur durée de vie est faible par rapport aux condensateurs film. De plus, il ne faut surtout pas que la tension maximum des électrolytiques soit dépassée.

Pour une alimentation capacitive non polarisée, la technologie du condensateur film est donc plus appropriée (100 pF à 1 μF pour 63V à 1 kV)

La durée de vie des condensateurs diminue en fonction de la température et de la tension en fonction de l'équation suivante [8] (23) :

$$Lyfe\ capa = Lo \cdot e^{-\frac{\Delta T}{T_0} - \frac{\Delta U}{U_0}} = Lo \cdot e^{-\frac{T_{ref} - T_c}{T_0} - \frac{U_{max} - U_c}{U_0}}$$

Avec Lo , la durée de vie (environ 5 kh à 100 kh à la température de référence de 25°C et pour la tension max). T_c est la température de fonctionnement du condensateur et U_c la tension d'utilisation.

To (14 à 25°C) et Uo (200 à 64) sont les constantes de la durée de vie du condensateur film qui vont dépendre des techniques de fabrications et donc du constructeur.

Le choix d'une énergie volumique plus élevée avec des champs électriques plus élevés entrainera une dégradation plus accélérée du condensateur.

Sur la figure suivante, la durée de vie peut être observée pour une tension de 150 V. La durée de vie est de 6000 h à 50°C. Elle est donc supérieure à celle des LEDs.

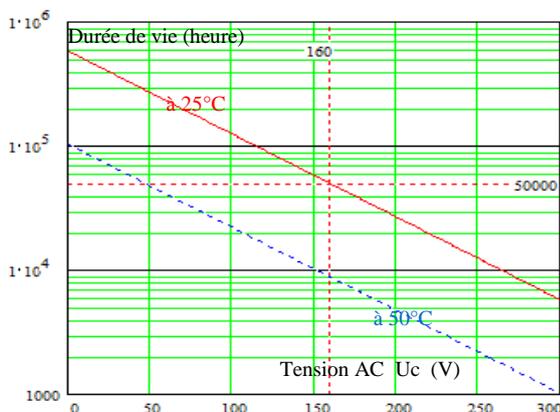


fig 19: Durée de vie d'un condensateur film pour une durée de vie de 50 kh à 25°C avec U_{max} 160 V.

Le courant d'ondulation (ripple current) crée de l'effet Joule dans le condensateur ce qui le conduit à s'échauffer. En effet, le condensateur a son propre échauffement correspondant à l'équation suivante :

$$T_c = I_{RMS}^2 \cdot ESR \cdot R_{TH} + T_{amb} \quad (24)$$

Avec R_{TH} résistance thermique du condensateur et ESR la résistance série équivalente du condensateur correspondant théoriquement à l'équation suivante avec ϕ angle de perte du condensateur :

$$ESR = \tan \phi / (C \cdot \omega) \quad (25)$$

Exemple pour un condensateur de filtrage de l'alimentation redressée précédente de 1 μF , les données constructeurs donnent des valeurs à 100 Hz de ESR de 10 m Ω pour une taille 6054 (15x13.5mm) pour une tension max de 250 V [8]. La puissance perdue dans le condensateur avec une ondulation de 150 V correspondra donc à l'équation suivante :

$$Perte\ joule = ESR \cdot (C \cdot \omega \cdot U_{RMS})^2 \quad (25)$$

$$Perte\ joule = 0.01 \cdot (1 \cdot 10^{-6} \cdot 2 \cdot \pi \cdot 100\text{Hz} \cdot (150\text{V})^2) = 40\mu\text{W}$$

Cette puissance est négligeable puisqu'un boîtier CMS (2010) peut dissiper 0.5 W à 80°C.

Après avoir déterminé la durée de vie de l'alimentation capacitive, quelle est la fiabilité des éclairages à LED ?

8. Fiabilité, durée de vie, norme

Il ne faut pas confondre, en général, fiabilité et durée de vie d'un produit. En effet, la fiabilité est selon la norme EN 13306, l'aptitude d'un bien à accomplir une fonction requise, dans des conditions données, durant un intervalle de temps donné. Plus simplement, la fiabilité est l'aptitude du produit à être le moins possible défaillant avec une étude statistique. Pour un produit comme une ampoule qui n'est généralement pas réparable, la fiabilité et la durée de vie peuvent être rapprochées (même tendance) sans être confondues.

Les études de fiabilité donnent le temps moyen entre deux défaillances (MTBF : Mean Time Between Failures).

Les fabricants de lampes ne donnent pas le taux de défaillance de leurs éclairages. Mais, il peut être déduit facilement de la MTBF (taux de défaillance = 1/MTBF).

Le taux de défaillance pourrait aussi être estimé en prenant en compte le nombre de retours de garantie et le nombre de produits traités en recyclage mais il faudrait alors connaître le temps d'utilisation. Ce type d'expérimentation pourrait aussi se faire par échantillonnage avec une clientèle associée aux essais.

De toute manière, les modifications de fabrication sont tellement fréquentes que la fiabilité est malheureusement mal prise en compte dans le matériel d'éclairage.

Si nous avons pu estimer la durée de vie en fonction du matériel électrique dans cet article. La fiabilité d'une lampe peut être faible comme, par exemple, juste à cause d'un silicone de mauvaise qualité ne supportant pas une chaleur de 80°C. La qualité de construction est donc un facteur très important en ce qui concerne la fiabilité.

Les industrielles peuvent se rassembler pour créer une norme et améliorer la qualité d'un produit.

Ainsi, un label de certifications a vu le jour tel que ENEC+. Mais elles ne sont pas connues du grand public [1]. La grande distribution, quant à elle, vend de l'éclairage sous son nom d'enseigne et n'a généralement pas de certification produit.

9. Tests et Exploitations Pédagogiques.

Les lampes à LEDs filaments sont des produits qui permettent de montrer l'utilité des ponts redresseurs monophasés et de faire un bilan de puissance de d'un convertisseur à moindre coût.

La difficulté reste la mesure des courants faibles avec des pinces Ampères-métriques qui ne sont pas prévus pour cela. Par conséquent, 50 spires ont été réalisées pour mesurer les courants avec des pinces watt-métrique de mesure.

La réalisation de petits boîtiers avec câble double puits a permis de s'affranchir des problèmes de sécurité liés à la tension secteur.

Pour vérifier le modèle théorique, nous allons montrer, par quelques courbes obtenues avec un oscilloscope, la validité des **résultats expérimentaux pour une lampe 3P2S**

Sur la figure suivante, on peut observer le courant dans la LED ainsi que la tension

312V

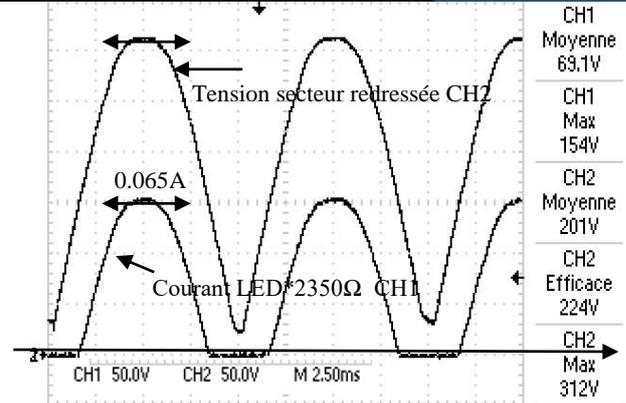


fig 20: Courant LED et tension en sortie du redresseur sans Filtrage $R_2=2350 \Omega$.

L'angle ou le courant LED correspondent bien à la valeur suivante

$$\theta = A \sin(160 / 230\sqrt{2}) = 0.51 \text{ rad}$$

Le courant moyen mesuré est de 29.5 mA avec un courant max de 65 mA.

Une étude de la CEM peut être effectuée assez facilement en Travaux Pratiques. En effet, une étude en 2011 disait qu'une ampoule à LED sur trois ne respectait pas la norme CEM en vigueur, norme 2004/108/EC [12].

On peut observer la FFT (Fast Fourier Transform) du courant dans la LED. L'harmonique du courant 1 est bien à la fréquence de 100 Hz avec 21dB, sachant que la référence de l'oscilloscope est réglée pour une amplitude de 0.707 V.

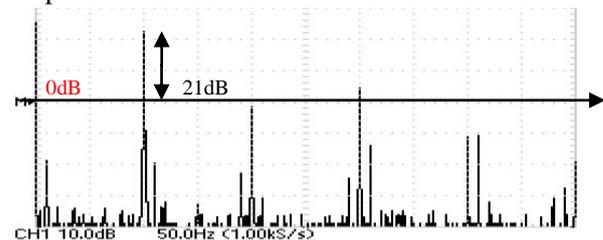


fig 21: Mesure de la FFT du courant LED pour l'alimentation redressée.

Avec le condensateur C_1 de filtrage de 1 μF , Le courant moyen a augmenté à 35 mA mais le courant max reste à 65 mA. Comme prévue si l'on filtre plus, il faudra utiliser une plus grande valeur de résistance qui entrainera des pertes.

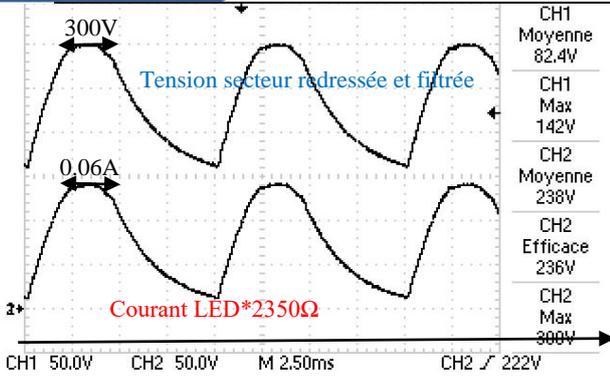


fig 22: Courant LED et tension en sortie du redresseur $C_1=1\mu F$ $R_2=2350\Omega$

Sur la figure suivante, le courant moyen est toujours de 37 mA mais avec une valeur max de 138 mA car l'angle d'ouverture des diodes a diminué sans que cela ne provoque de problème. Par contre, grâce à la capacité C_2 , la résistance R_2 a

Tableau 3 : performance de LEDs 6 leds filaments avec 3 Séries et 3 parallèles

convertisseur	R2 (Ω) Capacitor	U _{RMS} secteur (V) I _{RMS} secteur (I)	Power secteur (W) Factor Power	U redressé RMS (V) I redresse RMS (A)	Tension LED averag I LED average (A)	Power LED (W) Rendement (%)
Alimentation redressée	2350 Ω $C_1=--\mu F$	223V 40mA	8 W 0.94	222V 38mA	128V 27mA	4.24 W 53%
Alimentation redressée	2350 Ω $C_1=1\mu F$	210V 51.6mA	8 W 0.77 capa	226V 36mA	152V 31mA	4.52 W 56%
Alimentation capacitive	100 Ω $C_1=1.1\mu F$	240V 66mA	8 W 0.55 capa	152V 63mA	151V 42mA	7.2W 90%

Quelle est la sensibilité de l'éclairage LEDs filaments en fonction des variations de la tension d'alimentation, du courant ?

En effet, la tension EDF peut varier de 207 V à 253 V donc de 10% autour de 230 V.

Sur la figure suivante, on peut comparer l'évolution du courant moyen dans la LED en fonction de la variation de la tension pour l'alimentation capacitive et redressée avec une puissance absorbée de 8W pour 230V. L'alimentation capacitive est petit moins sensible et à une variation de la tension qui est de 3.25mA/V.

En fonction de la tension, la puissance utile de la LED pour l'alimentation capacitive varie de 4.76W à 7W (56mW/V) alors que pour l'alimentation redressée est 3.4W à 5.46W (51mW/V).

fortement diminuée et sa valeur est passée à 100 Ω .

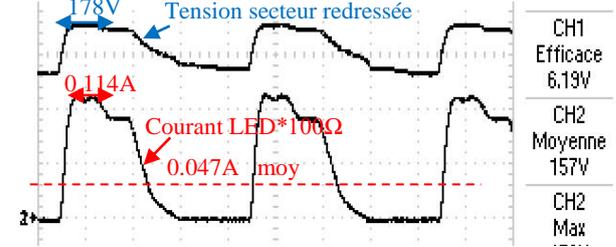


fig 23: Courant LED et tension en sortie du redresseur pour l'alimentation capacitive avec $C_2=1.1\mu F$ et $R_2=100\Omega$ avec $V_{secteur}$ de 230V.

On peut observer le bilan de puissance pour les 2 alimentations précédentes. On peut remarquer que le rendement est bien meilleur pour l'alimentation capacitive.

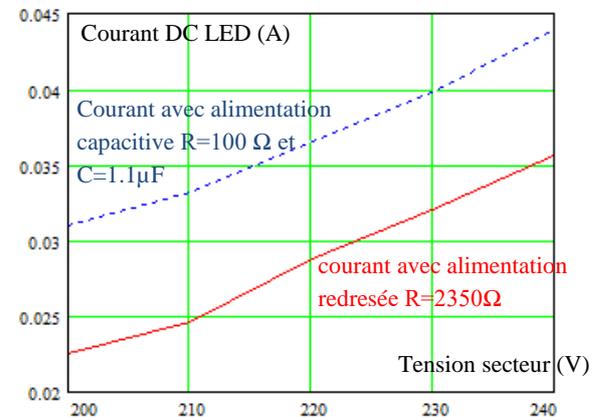


fig 24: Variation du courant dans la LED en fonction de la tension secteur.

De plus, la mesure de l'éclairage au luxmètre à 30 cm a été effectuée pour observer l'influence du courant sur l'éclairage.

Sur la figure suivante, on peut observer que le flux lumineux correspond bien à l'équation théorique suivant provenant de l'équation (8) avec k (200 lm/W) correspondant à l'efficacité énergétique de la LED.

$$E(\text{lux}) = k \frac{E \cdot I_{Fmoy}}{\text{distance}^2 \cdot 4 \cdot \pi} \quad (26)$$

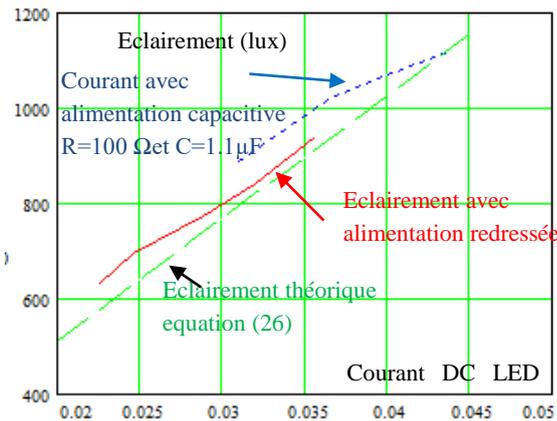


fig 25: Variation de l'éclairage en fonction du courant moyen dans la LED à 30cm.

Pour caractériser l'éclairage, une mesure avec le luxmètre en fonction de la distance a été effectuée entre 0.1 et 2 m correspondant à l'éclairage d'une pièce pour une puissance consommée de 8 W avec l'alimentation redressée (4.4 W utile) et capacitive (6.84 W utile). Sur la figure suivante, on peut aussi observer que la tendance de l'équation (8) est bien vérifiée mais avec un nombre de lumens de 1700 (248lm/w) pour l'alimentation capacitive et de 942 lumen (214lm/w) pour l'alimentation redressée à la place de 150 lumen/W théorique.

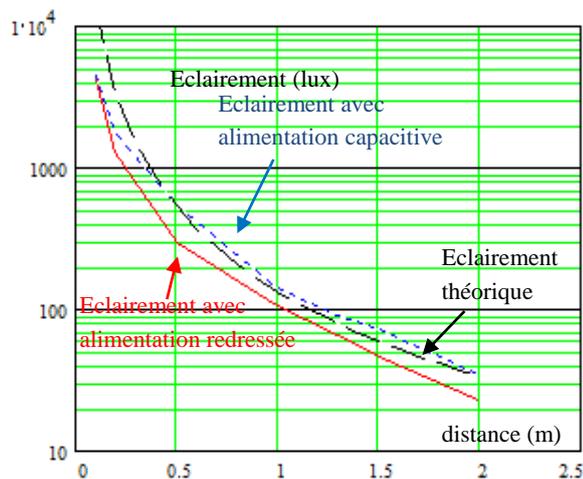


fig 26: Lux en fonction de la distance pour 230 V pour un éclairage 3S2P et les 2 alimentations.

Un smartphone peut être utilisé comme luxmètre. Une étude de différentes applications sur de nombreux smartphones a été effectuée et publiée [15]. L'exploitation pédagogique de la variation de la lumière peut être effectuée avec un gradateur [14] à angle de phases. En effet, un autre avantage des LEDs filaments, est de pouvoir faire varier leur

puissance lumineuse avec le montage simple d'un gradateur monophasé. En revanche, les LEDs filaments utilisant une alimentation capacitive ne fonctionneront pas avec le gradateur alors que celles utilisant une alimentation redressée fonctionnera parfaitement. Les éclairages à LEDs SMD qui ont un régulateur interne ne peuvent pas avoir une variation d'éclairage. Par contre, elles peuvent fonctionner sur une plage de tension secteur allant de 100 V à 250 V.

10. Conclusions

Cet article a présenté l'exploitation pédagogique de LEDs filaments pour étudier leurs caractéristiques mais aussi de redresseurs pour pouvoir faire un bilan de puissance de ces éclairages.

Cette étude a prouvé qu'il était possible d'améliorer le rendement de ce type de lampes avec quelques composants supplémentaires qui seraient vite rentabilisés par la diminution du coût énergétique.

Par ailleurs l'article montre comment déterminer un seuil de rentabilité en fonction de la durée de vie de l'éclairage à LED.

Dans les essais effectués, nous avons mis un compteur de fonctionnement ??? pour savoir si la durée de vie allait diminuer en fonction du courant max et des caractéristiques de l'alimentation capacitive. 300 heures de tests sur des LEDs filaments ont été effectuées sans voir d'effets sur l'éclairage.

Cette étude a été réalisée par 2 étudiants d'IUT au semestre 3 en Travaux de Réalisation (40 heures) à partir d'un cahier des charges. Le plus dur pour les étudiants est de choisir une bonne méthodologie d'essais et de créer des tableaux adaptés pour obtenir des conclusions exploitables. La création et la validation du modèle Spice de la LED pour ISIS a été problématique à cause de l'absence de bases mathématiques des étudiants. Cependant, malgré des difficultés, la mise en équations a permis de connaître le bon compromis pour le choix de la tension E et donc le calcul du nombre de LEDs à mettre en série. La simulation a permis aux étudiants de comprendre le fonctionnement d'une alimentation capacitive. Une autre difficulté est la maîtrise de la technologie des condensateurs et des LEDs. Une autre embuche qui peut se présenter aux étudiants, est de privilégier la recherche d'informations sur internet au sujet des redresseurs au lieu de prendre du temps pour démontrer les équations.

Pour finir, une question d'ordre sociétale se présente : Est-ce que l'éclairage à LED permettra réellement d'économiser de l'énergie ? Ce n'est pas si sûr : car si l'éclairage à LED a une consommation plus faible que les lampes halogènes. L'appétit humain de consommation d'éclairage sera peut-être sans frein. En conséquence, la « production de lumens » devrait continuer à s'accroître dans le futur et la consommation de l'éclairage dépendra surtout de l'évolution du coût de l'énergie électrique en fonction du coût de la vie.

11. Références

- [1] Organisme de certification LED <http://www.lcie.fr/1069-europeenne/marque-enec-.html>
- [2] Magazine « Que choisir » octobre 2016 et de Mai 2014 <https://www.quechoisir.org/comparatif-ampoules-LED-n22469/>
<http://velorizantal.bbfr.net/t16874p175-eclairage-a-del-pour-velo-LED-light-for-bike-light-electro-diode>
- [3] Magazine « 60 millions de consommateurs » N°22 janvier 2017, Lampes basse consommation janvier 2010 <http://www.60millions-mag.com/kiosque/les-lampes-qu-il-vous-faut>
- [4] <http://www.digikey.com/en/articles/techzone/2012/jun/abcs-of-LED-thermal-management>
- [5] <http://www.megaman.fr/tableau-de-rentabilite-declairage.html>
- [6] http://www.edison-opto.com/files/doc/Edison%20Opto_Filament%2068V_Eng_V2.pdf
<http://www.edison-opto.com.tw/files/product/2014102116512456.pdf>
- [7] http://www.farnell.com/datasheets/1674204.pdf?_ga=1.134705718.655824972.1486237744
<http://www.vishay.com/capacitors/film/rfi-xy/>
- [8] <http://ele-tech.com/html/powerintlnk457dg7wb10LED-light-power-scheme-der324.html>
- [9] Maawad MAKDESSI thèse « Modélisation, vieillissement et surveillance de l'état de santé des condensateurs films utilisés dans des applications avioniques » 04/2014 UNIVERSITE DE LYON
<https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01058227/document>
- [10] M. Yazdan Mehr, "Accelerated life time testing and optical degradation of remote phosphor plates" journal Microelectronics Reliability 02/2014
<http://www.LEDsmagazine.com/articles/2012/11/the-elusive-life-of-LEDs-how-tm-21-contributes-to-the-solution-magazine.html>
http://www.climateactionprogramme.org/images/uploads/documents/Philips_Understanding_Power_LED_Lifetime_Analysis.pdf
- [11] Cours sur les redresseurs
http://geii.iut-nimes.fr/sites/default/files/u60/conversion_AC_DC_facteur_puissance_0.pdf
- [12] Cours CEM (Compatibilité électromagnétique)
http://perso.crans.org/gherauld/Cours/CEM/Cours_DEA_Complet.pdf
- [13] <https://www.mesampoulesgratuites.fr/>
- [14] http://sitelec.org/cours/abati/flash/graduateur_mono.htm
http://pedagogie.ac-toulouse.fr/BTS_electrotechnique-tarbes/download/GRADATEUR.pdf
- [15] Etude luxemètre pour différentes applications et smartphones
<http://velorizantal.bbfr.net/t16874-eclairage-a-del-pour-velo-LED-light-for-bike-light-electro-diode>

Evaluation rapide 45minutes

1) Quelles sont les caractéristiques de leds filaments étudiés ?

nombre de leds série :	puissance nominale,
tension de seuil :	courant nominale :
lumen nominal	lux à 30 cm
température nominale	température max
Durée de vie :	

2) Pourquoi faut-il au minimum un redresseur et une résistance pour alimenter des leds filaments à partir de la tension secteur alternatif 230V AC 50Hz ?

3) Dessiner le chronogramme de la tension et du courant en fonction du temps pour 2 led série qui ont une tension de seuil de 65V (une résistance de 2350Ω) alimenté par la tension secteur.	4) Déterminer le courant max et l'angle d'ouverture θ ou la led va devenir passant (une résistance de 2350Ω).
	5) Déterminer le courant moyen à partir de l'équation suivante : $I_{F\ moy} = \frac{2}{\pi \cdot R_2} (V \sqrt{2} \cos \theta + E(\theta - \frac{\pi}{2})) =$

6) Calculer les pertes dans la résistance

7) Calculer le rendement électrique de cette lampe

Que peut on faire pour améliorer ce rendement ?

8) Dessiner le chronogramme et la tension et du courant en fonction du temps de 2 leds séries alimenter par un gradateur qui a un angle

9) Quel est le problème de l'angle d'ouverture de la diode sur l'émission de la lumière ?

Que peut on faire pour minimiser ce problème ?

10) Pour une température ambiante de 20°C, Calculer la température de jonction de chaque 4 led filaments traverser par une puissance de 1W qui ont 60°C/W avec une résistance thermique de 3.5°C/W entre les leds filament et l'ampoule

Comment mesure-t-on cette température de jonction ?

Architectures de contrôle RISE et RISE-Backstepping d'une chaîne de conversion d'énergie pour la traction électrique

YOSRA RKHISSE KAMMOUN*, MOUSSA BOUKHNIFFER, JAWHER GHOMMAM*, FAISEL MNIF*

*Laboratoire Control and Energy Management (CEMLab), Ecole Nationale d'Ingénieurs de Sfax, BP 1173, 3038 Sfax, Tunisie. yosra.rkhissi@gmail.com, jawhar.ghommam@gmail.com, mnif@squ.edu.om
ESTACA, Ecole d'Ingénieurs, 12 avenue Paul Delouvrier - RD10 78066 Saint-Quentin-en-Yvelines, France. moussa.boukhniifer@estaca.fr

Résumé : Cet article est dédié à une étude comparative entre deux approches de commande appliquées sur une chaîne de traction électrique à base d'une machine asynchrone. La première approche est basée sur la commande RISE récemment développée et la deuxième est une version modifiée du RISE combinée avec la commande Backstepping (RISE-Backstepping). L'apport majeur de ces approches est que la stabilité asymptotique du système est assurée et vérifiée par la théorie de Lyapounov tout en assurant une loi de commande continue. Des résultats de simulation sont fournis pour montrer l'efficacité des deux approches en terme de performance et de robustesse.

1. INTRODUCTION

Les préoccupations actuelles en terme de réchauffement climatique et de déplétion des réserves en énergies fossiles ont poussé les constructeurs automobiles à proposer d'autres alternatives de motorisation dont l'une des plus prometteuses est le véhicule électrique (EV). Pour relever cet enjeu majeur, le développement des EV s'appuie essentiellement sur l'amélioration de leur chaîne de propulsions conçues autour d'un nombre important de constituants à savoir la source d'énergie, le convertisseur et la machine électrique. Parmi les solutions qui existent pour cette dernière, on retient la machine asynchrone pour sa fiabilité, sa grande robustesse, son faible entretien et sa capacité à fonctionner dans des environnements hostiles (Raisemeche et al. 2014) ; (Tabbache et al. 2013).

Cependant, la commande de ce moteur reste difficile à cause de la dynamique fortement non linéaire et multivariable, les couplages importants et les incertitudes paramétriques.

Pour pallier ces problèmes, plusieurs approches linéaires ont été synthétisées dont la plupart sont basées sur les techniques vectorielles à flux orienté (Blaschke 1972) et la commande directe du couple (DTC) (Takahashi et Noguch 1986). Quant aux techniques non linéaires, de nouvelles approches performantes ont trouvé des applications portant entre autres sur la commande par modes glissants (Dunnigan et al. 1998), la commande par retour d'état linéarisant Yazdanpanah et al. (2008), la commande par passivité (Xu et al. 2008) et la commande par Backstepping (Hualin et Jie 1999 ; Krstic et al. 1995 ; Yaolong et al. 2003 ; Hwang et al. 2008).

Dans ce présent papier, nous allons présenter et comparer deux techniques de commande : La commande robuste basée sur l'intégrale de l'erreur (RISE) initialement développée dans Xian et al. (2004) et une autre version modifiée de la commande RISE

combinée avec la technique de Backstepping RISE-Backstepping.

La technique RISE est inspirée de la technique des modes glissants d'ordre deux mais sa nouveauté est d'assurer une loi de commande continue tout en éliminant le phénomène de chattering (phénomène de résonance). De plus, la stabilité asymptotique du système non linéaire bouclé est assurée malgré les éventuelles perturbations, les non linéarités et les incertitudes qui existent dans la dynamique du système.

Dans Zhang et al. (2005), la combinaison de la technique RISE avec un observateur d'état possédant un gain assez élevé a été utilisée pour une classe de système non linéaire multivariable présentant des incertitudes non linéaires en assurant une convergence semi-asymptotique de la sortie commandée vers la trajectoire de référence. Dans Gay et al. (2006), les auteurs l'ont utilisée pour résoudre le problème de la poursuite de trajectoire avec la compensation de certaines perturbations additives.

Vu que la technique RISE est un outil à gain de retour élevé, beaucoup de travaux ont proposé de combiner la technique RISE avec un terme anticipatif afin de réduire l'effort de la commande mais aussi d'améliorer les performances de fonctionnement en régimes transitoire et permanent (Patre et al. 2008) ; (MacKunis et al. 2010). Combiner la technique RISE avec la commande Backstepping présente une solution intéressante qui a été traitée dans Cai et al. (2004) ; Cai et al. (2005b) ; Cai et al. (2005a) ; Z. Cai et Dawson (2006) pour un système non linéaire multivariable sous la forme strictfeedback affecté de perturbations additives et d'incertitudes paramétriques.

Notre contribution dans ce papier consiste à la mise en œuvre de deux variantes de la commande RISE sur une machine asynchrone. Ces approches de commande n'ont jamais été testées sur la machine asynchrone, un système caractérisé par sa dynamique fortement non linéaire multivariable et sujet à des perturbations additives dues aux variations du couple de charge. Les avantages et les inconvénients de ces stratégies de commande sont dégagés.

Notre article est organisé comme suit : Dans un premier temps, nous donnons les équations de modèle de la machine asynchrone. Dans la deuxième partie, nous synthétisons les lois de commande pour les deux approches proposées. Des résultats de simulation sont donnés pour montrer l'efficacité des approches proposées.

2. Modélisation de la machine asynchrone

Le modèle résultant de la machine asynchrone dans le référentiel (d - q) peut se mettre sous la forme d'état suivante Leonhard (2001) :

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = f(x) + Bu + dC_r \\ y = Cx \end{cases} \quad (1)$$

$$x = [I_{sd} \ I_{sq} \ \Phi_{rd} \ \Phi_{rq} \ \omega]^T \quad u = [u_{sd} \ u_{sq}]^T$$

$$f = [f_1 \ f_2 \ f_3 \ f_4 \ f_5]^T \quad B = \begin{bmatrix} b_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & b_2 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$d = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ d_1]^T \quad C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Les variables d'états sont les courants statoriques, les flux rotoriques et la vitesse électrique du rotor ω_r . Le vecteur d'entrée est constitué par les tensions statoriques. C_r est le couple de charge. Le vecteur $f(x)$ est donné par :

$$\begin{cases} f_1 = a_1x_1 + \theta_s x_2 + a_2x_3 \\ f_2 = a_1x_2 + \theta_s x_1 + a_5x_3x_5 \\ f_3 = a_7x_1 + a_8x_3 \\ f_4 = 0 \\ f_5 = a_{14}x_2x_3 + a_{15}x_5 \end{cases} \quad (3)$$

Les composantes de ce vecteur s'expriment en fonction des paramètres de la machine asynchrone comme suit :

$$\begin{cases} \dot{\theta}_s = x_5 + a_7 \frac{x_2}{x_3} \\ \sigma = 1 - \frac{M^2}{L_s \cdot L_r}; \quad T_r = \frac{L_r}{R_r}; \quad T_s = \frac{L_s}{R_s} \\ a_1 = a_4 = -\left(\frac{1}{T_s \cdot \sigma} + \frac{1 - \sigma}{T_r \cdot \sigma}\right); \quad a_2 = a_6 = \frac{1 - \sigma}{T_r \cdot M \cdot \sigma} \\ a_3 = -a_5 = \frac{1 - \sigma}{M \cdot \sigma}; \quad a_7 = a_{10} = \frac{M}{T_r} \\ a_8 = a_{12} = -\frac{1}{T_r} \\ a_9 = -a_{11} = -1; \quad a_{13} = -a_{14} = \frac{p^2 M}{J \cdot L_r} \\ a_{15} = -\frac{f}{J}; \quad b_1 = b_2 = \frac{1}{\sigma \cdot L_s}; \quad d_1 = -\frac{P}{J} \end{cases}$$

Où L_s, R_s, L_r, R_r sont les inductances et résistances statoriques et les inductances et résistances rotoriques respectivement.

M est l'inductance mutuelle, J le moment d'inertie des parties tournantes de l'ensemble machine/charge, f le coefficient de frottements visqueux et p est le nombre de paire de pôles dans la machine.

3. Architecture de commande

L'objectif principal des approches proposées consiste à trouver une loi de commande continue qui assure la poursuite de la trajectoire désirée en termes de flux Φ_{ref} et de vitesse Ω_{ref} et l'encadrement de tous les signaux en boucle fermée de sorte que les limites suivantes soient satisfaites :

$$\begin{aligned} \lim_{t \rightarrow \infty} |\Phi_{ref} - \Phi_r| &= 0 \\ \lim_{t \rightarrow \infty} |\Omega_{ref} - \Omega| &= 0 \\ \lim_{t \rightarrow \infty} \Phi_{rq} &= 0 \end{aligned}$$

3.1. Loi de commande RISE

Pour le système (1), les hypothèses suivantes sont exploitées Patre (2009) :

A1 : La matrice B est symétrique définie positive.

A2 : Les fonctions B^{-1} et $f(x)$ sont des fonctions non linéaires de classe⁽¹⁾ C^2 de sorte que $B^{-1}(\cdot), \dot{B}^{-1}(\cdot), \ddot{B}^{-1}(\cdot), f(\cdot), \dot{f}(\cdot), \ddot{f}(\cdot) \in L_\infty$, si $x^{(i)}(t) \in L_\infty$ $i=0, 1, 2$.

A3 : La matrice des perturbations $d \in C^2$ et $\|d\| < \bar{d}_0, \|\dot{d}\| < \bar{d}_1, \|\ddot{d}\| < \bar{d}_2$, où $\bar{d}_0, \bar{d}_1, \bar{d}_2$ sont des constantes positives inconnues et $\|\cdot\|$ représente la norme Euclidienne.

Dans la commande à flux orienté, le flux rotorique est orienté suivant la direction de l'axe d. Les courants de référence sont déduits selon les équations suivantes (Raisemeche et al. 2014) :

$$\begin{cases} I_{sd}^* = \frac{\Phi_r^*}{J \cdot L_r} \\ I_{sq}^* = \frac{L_r \cdot C_{em}^*}{p \cdot M \cdot \Phi_r^*} \end{cases} \quad (6)$$

Pour satisfaire les objectifs de la commande, on propose dans un premier temps d'implanter la stratégie de contrôle RISE selon la figure 1.

En s'inspirant des travaux de Xian et al. (2004), l'erreur de suivi de sortie e_y et l'erreur filtrée r sont introduites afin de faciliter les calculs et les analyses ultérieurs de la commande.

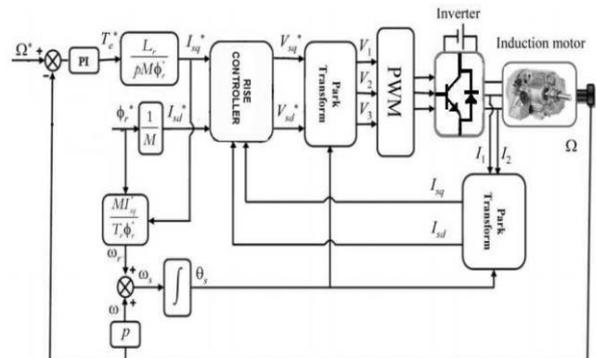


Figure 1. Architecture de la commande RISE de la MAS

(1) Une fonction f est de classe C^k si toutes les dérivées de f jusqu'à l'ordre k existent sur un intervalle I de R , et si $f^{(k)}$ est continu sur I .

Ces erreurs sont définies comme suit :

$$e_y = y_d - y = C(x_d - x) = \begin{bmatrix} I_{sdref} - I_{sd} \\ I_{sqref} - I_{sq} \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$r = \dot{e}_y + \alpha \cdot e_y \quad (8)$$

Où $y_d(t) \in \mathbb{R}^2$ est la trajectoire de référence et $x_d(t) \in \mathbb{R}^5$ est le vecteur d'état désiré vérifiant :

$$\frac{d^i x_d}{dt^i} \in L_\infty, \quad \text{avec } i=0, 1, 2, 3 \quad (9)$$

$(\cdot)^i(t)$ est la $i^{\text{ème}}$ dérivée par rapport au temps et $\alpha \in \mathbb{R}^{2 \times 2}$ est une matrice diagonale définie positive à gains constants.

La formulation du système d'erreur en boucle ouverte est obtenue en dérivant par rapport au temps (8) et en la multipliant des deux côtés par $B^{-1}C^{-1}$:

$$B^{-1}C^{-1}r = B^{-1}C^{-1}(\dot{e}_y + \alpha \cdot e_y) = \frac{1}{b_1} \cdot \dot{r} \quad (10)$$

En utilisant (7) et la dérivée du système à commander (1), on obtient le système suivant :

$$\frac{1}{b_1} \cdot \dot{r} = N - e_y - \dot{u} \quad (11)$$

Où N est une fonction auxiliaire définie comme suit :

$$N = B^{-1}\ddot{x}_d - B^{-1}\dot{f} + B^{-1}\alpha\dot{x}_d - B^{-1}\alpha f - \alpha u + e_y \quad (12)$$

En utilisant le système d'erreur en boucle ouverte précédent, la loi de commande RISE, comme c'est introduit dans Xian et al. (2004), est exprimée par $u(t)$:

$$u(t) = (k_s + 1)e_y(t) - (k_s + 1)e_y(0) + \int_0^t [(k_s + 1)\alpha \cdot e_y(\tau) + \beta \text{sgn}(e_y(\tau))] d\tau \quad (13)$$

Où k_s et β sont des matrices diagonales définies positives à gains constants. La dérivée par rapport au temps de (13) est donnée par :

$$\dot{u} = (k_s + 1)r - \beta \text{sgn}(e_y) \quad (14)$$

Par conséquent, la formulation du système d'erreur en boucle fermée revient essentiellement à substituer (14) dans (11) ce qui donne :

$$\frac{1}{b_1} \cdot \dot{r} = N - e_y - (k_s + 1)r - \beta \text{sgn}(e_y) \quad (15)$$

L'équation (15) peut être réécrite sous la forme :

$$\frac{1}{b_1} \cdot \dot{r} = \tilde{N} + N_d - e_y - (k_s + 1)r - \beta \text{sgn}(e_y) \quad (16)$$

Où N_d et \tilde{N} sont données par :

$$N_d = B^{-1}(\ddot{x}_d - \dot{f}) \quad (17)$$

$$\tilde{N} = N - N_d \quad (18)$$

3.2. Loi de commande RISE-Backstepping

Pour le système (1), les hypothèses suivantes sont exploitées (Z. Cai et Dawson 2006) :

A1 : $B > 0$ et $f(x)$ sont des fonctions non linéaires incertaines de classe C^2 .

A2 : La matrice des perturbations $d \in C^2$ et $\|d\| < \bar{d}_0$, $\|d\| < \bar{d}_1$, $\|d\| < \bar{d}_2$, où $\bar{d}_0, \bar{d}_1, \bar{d}_2$ sont des constantes positives inconnues.

Afin de développer la loi de commande $u(t)$ et l'implanter selon la figure 2, on définit l'erreur de suivi de sortie comme suit :

$$e = y_d - y = \begin{bmatrix} e_\Phi \\ e_\omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Phi_{ref} - \Phi_r \\ \omega_{ref} - \omega \end{bmatrix} \quad (19)$$

Où la trajectoire désirée, $y_d(t) \in \mathbb{R}^2$ est choisie de sorte que :

$$\frac{d^i y_d}{dt^i} \in L_\infty, \quad \text{avec } i=0, 1, 2, 3 \quad (20)$$

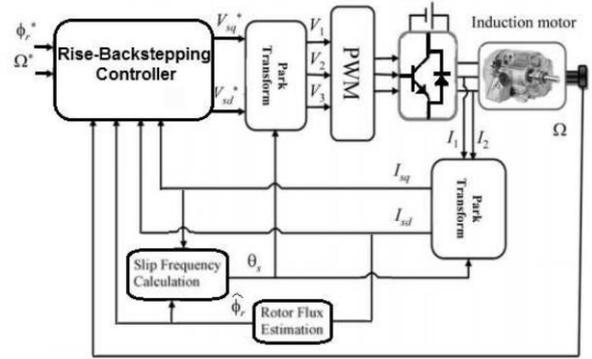


Figure 2. Architecture de la commande RISE Backstepping de la MAS

$$\dot{e} = \begin{bmatrix} \dot{e}_\Phi \\ \dot{e}_\omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{\Phi}_{ref} - a_8 \cdot x_3 - a_{10} \cdot x_1 \\ \dot{\omega}_{ref} - a_{14} \cdot x_2 \cdot x_3 - a_{15} \cdot x_5 - d_1 \cdot C_r \end{bmatrix} \quad (21)$$

On peut réécrire (21) d'une autre manière tel que :

$$\dot{e} = \begin{bmatrix} \dot{\Phi}_{ref} - a_8 \cdot x_{3ref} - a_{10} \cdot x_1 + \varpi_1 \\ \dot{\omega}_{ref} - a_{14} \cdot x_2 \cdot x_3 - a_{15} \cdot x_{5ref} - d_1 \cdot C_r + \varpi_2 \end{bmatrix} \quad (22)$$

Où

$$\varpi = \begin{bmatrix} \varpi_1 \\ \varpi_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_8 \cdot x_{3ref} - a_8 \cdot x_3 \\ a_{15} \cdot x_{5ref} - a_{15} \cdot x_5 \end{bmatrix} \quad (23)$$

L'application du RISE-Backstepping à la commande de la machine asynchrone est divisée en deux étapes : Dans la première étape, on suit la même démarche que la technique de Backstepping standard (Krstic et al. 1995).

On définit :

$$\eta = \begin{bmatrix} \eta_1 \\ \eta_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{c_{11}} \cdot (\alpha_{11} - x_1) \\ \frac{1}{c_{12}} \cdot (\alpha_{12} - x_2) \end{bmatrix} \quad (24)$$

Où $c_1 = [c_{11}, c_{12}]^T$. c_{11}, c_{12} sont des constantes positives et $\alpha_{11}, \alpha_{12} \in \mathbb{R}$ sont les fonctions stabilisantes (Commande virtuelle) à calculer. Soit la fonction de Lyapunov définie positive (FDP) sur \mathbb{R}^2 :

$$V_1 = \ln(\cosh(e_\Phi)) + \ln(\cosh(e_\omega)) \quad (25)$$

En utilisant (23) et (24) dans la dérivée de (25), on obtient :

$$\dot{V}_1 = \tanh(e_\Phi) [\dot{\Phi}_{ref} - a_8 \cdot x_{3ref} - a_{10}(\alpha_{11} - c_{11} \cdot \eta_1) + a\varpi_1] + \tanh(e_\omega) \cdot [\dot{\omega}_{ref} - a_{14} \cdot x_3 (\alpha_{12} - c_{12} \cdot \eta_2) - a_{15} \cdot x_{5ref} - d_1 \cdot C_r + \varpi_2] \quad (26)$$

On choisit les fonctions stabilisantes comme suit :

$$\left\{ \begin{array}{l} \alpha_{11} = \dot{i}_{sdref} = \frac{1}{a_{10}} [c_{11} \cdot \tanh(e_\Phi) + \dot{\Phi}_{ref} - a_8 \cdot x_{3ref}] \\ \alpha_{12} = \dot{i}_{sqref} = \frac{1}{a_{14} \cdot x_3} [c_{12} \cdot \tanh(e_\omega) + \dot{\omega}_{ref} - a_{15} \cdot x_{5ref} - d_1 \cdot C_r] \end{array} \right. \quad (27)$$

On aura la dérivée de la fonction de Lyapunov par rapport au temps négative :

$$\dot{V}_1 = c_{11} \cdot \tanh^2(e_\phi) + \tanh(e_\phi) [a_{10} \cdot c_{11} \cdot \eta_1 + \omega_1] - c_{12} \cdot \tanh^2(e_\omega) + \tanh(e_\omega) [c_{12} \cdot \eta_2 + \alpha_{14} \cdot x_3 + \omega_2] \quad (28)$$

Dans la seconde étape, on introduit une technique de Backstepping modifiée combinée à la commande RISE pour compenser les perturbations additives dans le système (1). On définit la variable auxiliaire $r(t)$ comme suit :

$$r(t) = \frac{1}{c_2} \cdot \dot{\eta} + \eta \quad (29)$$

Où $c_2 = [c_{21}, c_{22}]^T$. c_{21}, c_{22} sont des constantes positives. On dérive (29) ce qui donne :

$$\dot{r}(t) = \frac{1}{c_2} \cdot \ddot{\eta} + c_2 \cdot r - c_2 \cdot \eta \quad (30)$$

Le terme $\ddot{\eta}$ dans (30) est calculé comme suit :

$$\ddot{\eta} = \begin{bmatrix} \frac{1}{c_{11}} \cdot (\ddot{\alpha}_{11} - \dot{f}_1(x) - b_1 \cdot \dot{u}_{sd}) \\ \frac{1}{c_{12}} \cdot (\ddot{\alpha}_{12} - \dot{f}_2(x) - b_2 \cdot \dot{u}_{sq}) \end{bmatrix} \quad (31)$$

Commençons par calculer le terme $\ddot{\alpha}$ dans (31) :

$$\begin{cases} \ddot{\alpha}_{11} = \frac{1}{a_{10}} [c_{11}(1 - \tanh^2(e_\phi))\dot{e}_\phi + \ddot{\Phi}_{ref} - a_8 \cdot \dot{x}_{3ref}] \\ \ddot{\alpha}_{12} = \frac{1}{a_{14} \cdot x_3} [c_{12}(1 - \tanh^2(e_\omega))\dot{e}_\omega + \ddot{\omega}_{ref} - a_{15} \cdot \dot{x}_{5ref}] \end{cases} \quad (32)$$

A partir de (22), (23), (24) et (27), on obtient :

$$\dot{e} = \begin{bmatrix} -c_{11} \cdot \tanh(e_\phi) + a_{10} \cdot c_{11} \cdot \eta_1 - a_8 \cdot x_3 + a_8 \cdot x_{3ref} \\ -c_{12} \cdot \tanh(e_\omega) + a_{14} \cdot x_3 \cdot c_{12} \cdot \eta_2 - a_{15} \cdot x_5 + a_{15} \cdot x_{5ref} \end{bmatrix} \quad (33)$$

En substituant (33) dans (32), on aura :

$$\begin{cases} \ddot{\alpha}_{11} = \frac{1}{a_{10}} [\Phi_{11} - c_{11}(1 - \tanh^2(e_\phi))a_8 \cdot x_3] \\ \ddot{\alpha}_{12} = \frac{1}{a_{14} \cdot x_3} [\Phi_{12} - c_{12}(1 - \tanh^2(e_\omega))a_{15} \cdot x_5] \end{cases} \quad (34)$$

Où l'on a :

$$\Phi = \begin{bmatrix} \Phi_{11} \\ \Phi_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{11}(1 - \tanh^2(e_\phi))(-c_{11} \tanh(e_\phi) + a_{10} \cdot c_{11} \cdot \eta_1 + a_8 \cdot x_{3ref}) + \ddot{\Phi}_{ref} - a_8 \cdot \dot{x}_{3ref} \\ c_{12}(1 - \tanh^2(e_\omega))(-c_{12} \tanh(e_\omega) + a_{14} \cdot x_3 \cdot c_{12} \cdot \eta_2 + a_{15} \cdot x_{5ref}) + \ddot{\omega}_{ref} - a_{15} \cdot \dot{x}_{5ref} \end{bmatrix} \quad (35)$$

$\Phi(\cdot)$ est une inconnue. La dérivée de (34) donne :

$$\begin{cases} \ddot{\alpha}_{11} = \frac{1}{a_{10}} [\Phi_{11} - c_{11}(1 - \tanh^2(e_\phi))a_8 \cdot \dot{x}_{3ref} + c_{11}(1 - \tanh^2(e_\phi))(a_8 + 2\tanh(e_\phi)a_8 \cdot x_3)\dot{e}_\phi] \\ \ddot{\alpha}_{12} = \frac{1}{a_{14} \cdot x_3} [\Phi_{12} - c_{12}(1 - \tanh^2(e_\omega))a_{15} \cdot \dot{x}_{5ref} + c_{12}(1 - \tanh^2(e_\omega))(a_{15} + 2\tanh(e_\omega)a_{15} \cdot x_5)\dot{e}_\omega] \end{cases} \quad (36)$$

En substituant (33) dans (36), on obtient :

$$\ddot{\alpha} = \begin{bmatrix} \ddot{\alpha}_{11} \\ \ddot{\alpha}_{12} \end{bmatrix} = \Phi(\cdot) + l_1(y, e, \eta) + g_1(y, e, t) \quad (37)$$

Où $l_1(\cdot) = \begin{bmatrix} l_{11} \\ l_{12} \end{bmatrix}$ et $g_1(\cdot) = \begin{bmatrix} g_{11} \\ g_{12} \end{bmatrix}$ sont données en annexe 6 (47) à (50)

Une fois le terme $\ddot{\alpha}$ dans (31) est calculé, on se focalise maintenant sur le calcul du terme $\dot{f}(x)$ en utilisant (20) et (24) ce qui donne :

$$\dot{f}(x) = \begin{bmatrix} \dot{f}_1(x) \\ \dot{f}_2(x) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (a_2 - a_7 \frac{x_2^2}{x_3^2})(\dot{x}_{3ref} - \dot{e}_\phi) + a_1(\dot{\alpha}_{11} - c_{11} \cdot \dot{\eta}_1) + (x_5 + a_{10} \frac{2x_2}{x_3})(\dot{\alpha}_{12} - c_{12} \cdot \dot{\eta}_2) + x_2(\dot{x}_{5ref} - \dot{e}_\omega) \\ (a_1 - a_7 \frac{x_1}{x_3})(\dot{\alpha}_{12} - c_{12} \cdot \dot{\eta}_2) + (a_5 \cdot x_3 - x_1)(\dot{x}_{5ref} - \dot{e}_\omega) + (a_5 \cdot x_5 + a_7 \frac{x_1 \cdot x_2}{x_3^2})(\dot{x}_{3ref} - \dot{e}_\phi) - (\dot{\alpha}_{11} - c_{11} \cdot \dot{\eta}_1)(x_5 + a_7 \frac{x_2}{x_3}) \end{bmatrix} \quad (38)$$

En substituant (29), (32) et (33) dans (38), on obtient :

$$\dot{f}(x) = l_2(y, x_1, x_2, e, r, \eta, t) + g_2(y, x_1, x_2, t) \quad (39)$$

Où $l_2(\cdot) = \begin{bmatrix} l_{21} \\ l_{22} \end{bmatrix}$ et $g_2(\cdot) = \begin{bmatrix} g_{21} \\ g_{22} \end{bmatrix}$ sont données en annexe 6 (51) à (54).

En utilisant (31), (37) et (39), on peut réécrire (30) ainsi :

$$f(t) = \frac{1}{c_1 c_2} [\Phi(\cdot) + l_1(y, e, \eta) + g_1(y, e, t) - l_2(y, x_1, x_2, e, r, \eta, t) + g_2(y, x_1, x_2, t) - Bu] + c_2 \cdot r - c_2 \cdot \eta \quad (40)$$

Remarque : En utilisant (24) et (27), les variables d'états x_1 et x_2 peuvent être décomposées comme suit :

$$x_1 = \underbrace{c_{11} \tanh(e_\phi)}_{\zeta_{\eta 11}} + \underbrace{c_{11} \eta_1 + \Phi_{ref} - a_8 x_{3ref}}_{\zeta_{b 11}}$$

$$x_2 = \underbrace{c_{12} \tanh(e_\omega) - c_{12} \eta_2}_{\zeta_{\eta 12}} \quad (41)$$

$$+ \underbrace{\dot{\omega}_{ref} - a_{15} x_{5ref} - d_1 C_r}_{\zeta_{b 12}}$$

Où $\zeta_\eta = \begin{bmatrix} \zeta_{\eta 11} \\ \zeta_{\eta 12} \end{bmatrix}$ et $\zeta_b = \begin{bmatrix} \zeta_{b 11} \\ \zeta_{b 12} \end{bmatrix}$. ζ_η st une fonction de la variable η et le terme ζ_b est borné.

On ajoute et on supprime les termes $g_{b1} = g_1(\zeta_{b11}, y_d, \dot{y}_d)$ et $g_{b2} = g_2(\zeta_{b12}, y_d, \dot{y}_d)$ à la partie droite de (40) ce qui donne :

$$\dot{r}(t) = \frac{1}{c_1 c_2} [\Phi(\cdot) + l_1 - l_2 - Bu + \underbrace{g_{b2} - g_2 + g_1 - g_{b1}}_{l_3} + \underbrace{g_{b1} - g_{b2}}_h] + c_2 r - c_2 \eta \quad (42)$$

Où la fonction $h(y_d, \zeta_{b1}, \dot{y}_d)$ se caractérise par $h(t), \dot{h}(t) \in L^\infty$ dû à (20). Finalement, (41) peut être réécrite comme suit :

$$\dot{r}(t) = [\Phi(\cdot) + h - B\dot{u}] + l + c_2 r - c_2 \eta \quad (43)$$

Où $l = \frac{l_1 - l_2 + l_3}{c_1 c_2}$. En se basant sur (40), La commande \dot{u} , comme c'est introduit dans Xian et al. (2004), est exprimée par :

$$\dot{u} = B^{-1}[\dot{\Phi} + \beta sgn(\eta) + c_1 c_2 (c_2 + c_3 + 1)r] \quad (44)$$

Où $c_3 = [c_{31}, c_{32}]^T$ et $\beta = [\beta_1, \beta_2]^T$. c_{31}, c_{32}, β_1 et β_2 sont des constantes positives. La loi de commande continue $u(t)$ est donnée par :

$$u(t) = B^{-1}[\Phi(\cdot) - \Phi(0) + c_1 c_2 (c_2 + c_3 + 1)(\eta(t) - \eta(0)) + \int_0^t [c_1 c_2 (c_2 + c_3 + 1)\eta(t) + \beta sgn(\eta(t))] dt] \quad (45)$$

Où $u(0) = 0$. En substituant (44) dans (40), on obtient le système d'erreur en boucle fermée :

$$\dot{r}(t) = -r - c_2 \eta + f(\cdot) - c_3 r + \frac{1}{c_1 c_2} [h(\cdot) + \beta sgn(\eta)] \quad (46)$$

4. Résultats de imulation

Afin de tester les performances de chaque solution de commande proposée, des simulations numériques, développées dans l'environnement Matlab/Simulink, ont été effectuées sur une machine asynchrone de 7.5 kW-50Hz et d'une tension d'alimentation (230 – 380V). Les caractéristiques mécaniques et électriques de la machine sont données dans le tableau 1.

Le tableau 2 présente les paramètres de la commande RISE tandis que le tableau 3 celui de la commande RISE-Backstepping.

Les références de la vitesse et du flux sont fixées à $\Omega_{ref} = 100 \text{ rad/s}$, $\Phi_{ref} = 1 \text{ Wb}$, respectivement. A $t = 5 \text{ s}$, on introduit un couple de charge $Cr = 5 \text{ N.m}$ avec une variation de 50 % dans la valeur de la résistance rotorique.

Table 1 . Paramètres de la machine

Description	Paramètre	Valeur	Unité
Inductance statorique	Ls	0.2225	H
Résistance statorique	Rs	0.68	Ω
Inductance rotorique	Lr	0.2268	H
Résistance rotorique	Rr	0.395	Ω
Inductance mutuelle	M	0.22	Ω
Moment d'inertie	J	0.01	kg.m^2
Coefficient de frottement	f	0.001	kg/m.s
Nombre de paires de pôles	p	1	—

Table 2 . Paramètres de la commande RISE

α_1	α_2	k_{s1}	k_{s2}	β_1	β_2
1	1	25	15	15	25

Table 3 . Paramètres de la commande RISE-Backstepping

c_{11}, c_{12}	c_{21}, c_{22}	c_{31}, c_{32}	β_1, β_2
2000	3000	300	10

Les figures 3, 4 et 5 montrent les résultats obtenus en terme de flux, vitesse et couple électromagnétique pour l'approche RISE et RISE-Backstepping respectivement.

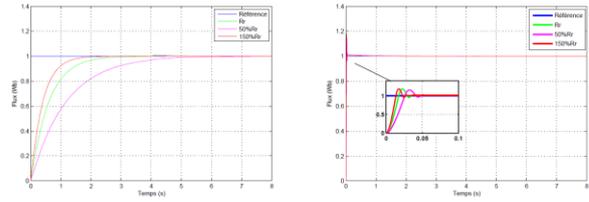


Figure 1 . La réponse du flux rotorique

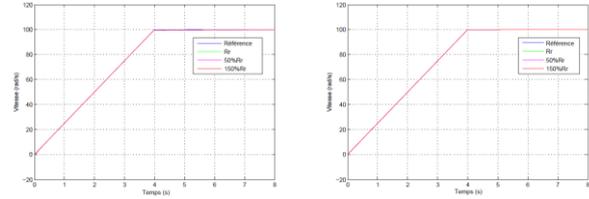


Figure 2 . La réponse de la vitesse

En analysant ces résultats, on peut constater que le suivi de trajectoire est assez satisfaisant et que les deux

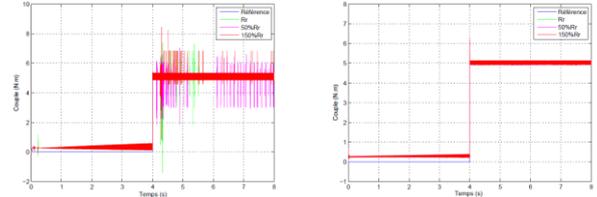


Figure 3 . La réponse du couple

commandes sont robustes par rapport à la variation de la résistance rotorique et du couple de charge. Néanmoins, c'est la commande RISE-Backstepping qui offre les meilleures performances. En effet, la réponse en terme flux est assez lente pour la commande RISE ; le temps de réponse est $t_r = 3 \times \tau_r = 1.7446 \text{ s}$. Pour ce qui est du couple, on note de fortes oscillations (phénomène de chattering) pour la commande RISE qui sont pratiquement éliminées avec la deuxième approche RISE-Backstepping.

Pour approfondir la comparaison entre les deux architectures, les deux approches sont évaluées avec la référence de vitesse NEDC (Nouveau Cycle de Conduite Européen). Ce nouveau cycle de vitesse vise à évaluer les niveaux d'émission et d'économie du carburant des véhicules en Europe. Le NEDC inclut quatre segments ECE-15 et un cycle "Extra-Urban driving cycle" (EUDC).

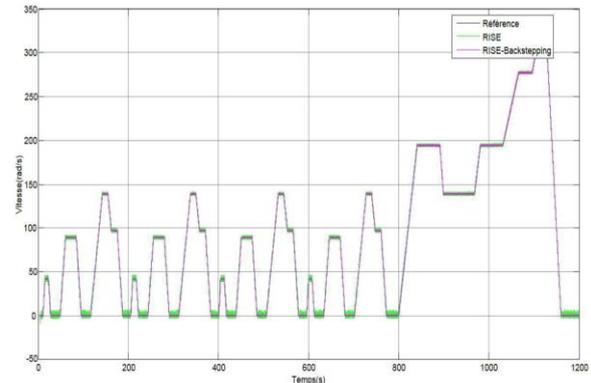


Figure 4 . La réponse de la vitesse pour un cycle NEDC

On remarque que l'approche RISE présente de fortes oscillations surtout en basses vitesses. Cependant, en hautes vitesses, les deux méthodes présentent de bonnes performances avec un léger avantage pour l'approche RISE-Backstepping : Le système arrive à suivre la vitesse de référence avec une erreur qui ne dépasse pas 5% pour les deux approches.

Table 4. Comparatif des deux approches sur le profil NEDC

Structure	Basses vitesses	Hautes vitesses
RISE	-	+
RISE-Backstepping	++	++

5. Conclusion

Dans cet article, deux approches de commande ont été étudiées et appliquées sur la machine asynchrone : la première approche est basée sur la technique RISE récemment développée et la deuxième approche est une version modifiée du RISE combinée avec la commande Backstepping (RISE-Backstepping). Les deux approches assurent une stabilité asymptotique du système, en revanche la technique RISE-Backstepping assure une meilleure performance et une bonne robustesse vis-à-vis les variations du couple de charge et de la résistance rotorique. Les résultats de simulation sont encourageants et incitent à envisager une validation expérimentale des deux approches sur un banc d'essai à actionneur asynchrone dédié spécifiquement à la traction électrique. Ce banc d'essai permet de valider des lois de commande avancées en temps réel et de réaliser des tests matériels ou logiciels.

Références

- Blaschke, F. (1972). *The principle of field orientation applied to the new transvector closed-loop control system for rotating field machines*, volume 39. Siemens Review.
- Cai, Z., de Queiroz, M., et Dawson, D. (2005a). *Robust adaptive asymptotic tracking of nonlinear systems in the presence of additive disturbance*. Thèse de doctorat, Louisiana State Univ., Baton Rouge, LA, Tech. Rep. ME-MS1-05.
- Cai, Z., de Queiroz, M., et Dawson, D.M. (2005b). Asymptotic adaptive regulation of parametric strict-feedback systems with additive disturbance. in *Proc. American Control Conference, ACC'2005, Portland, Oregon*, 3707–3712.
- Cai, Z., de Queiroz, M., Xian, B., et Dawson, D.M. (2004). Adaptive asymptotic tracking of parametric strict-feedback systems in the presence of additive disturbance. *43th IEEE Conference on Decision and Control, CDC'04*, 1146–1151.
- Dunnigan, M., S. Wade and, B.W., et Yu, X. (1998). Position control of a vector controlled induction machine using sliding mode control approach. *IEE Proceeding on Electrical Power Applications*, 145(3), 231–238.
- Gay, Z., Queiroz, M.D., et Dawson, D. (2006). Robust adaptive asymptotic tracking of nonlinear systems with additive disturbance. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 51(3), 524–529.
- Hualin, T. et Jie, C. (1999). Adaptive backstepping control of induction motor with uncertainty. in *Proc. American Control Conference, ACC'99, San Diego, California*, 1–5.
- Hwang, Y., Park, K., et Yang, H. (2008). Robust adaptive backstepping control for efficiency optimization of induction motors with uncertainties. *IEEE International Symposium on Industrial Electronics, ISIE'2008*, 878–883.
- Krstic, M., Kanellakopoulos, I., et Kokotovic, P. (1995). *Nonlinear and Adaptive Control Design*. New York : Wiley.
- Leonhard, W. (2001). *Control of electrical drive*. SpringerVerlag, Berlin, Germany.
- MacKunis, W., Patre, P., Kaiser, M., et Dixon, W.E. (2010). Asymptotic tracking for aircraft via robust and adaptive dynamic inversion methods. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 18.
- Patre, P., MacKunis, W., Makkar, C., et Dixon, W. (2008). Asymptotic tracking for systems with structured and unstructured uncertainties. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 16, 373–379.
- Patre, P. (2009). *Lyapunov-based robust and adaptive control of nonlinear systems using a novel feedback structure*. Thèse de doctorat, Univ. of Florida, Gainesville, Florida.
- Raisemeche, A., Boukhnifer, M., Larouci, C., et Diallo, D. (2014). Two active fault tolerant control schemes of induction motor drive in ev or hev. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 63(1), 19–29.
- Tabbache, B., Benbouzid, M., Kheloui, A., et Bourgeot, J. (2013). Virtual-sensor-based maximum-likelihood voting approach for fault tolerant control of electric vehicle powertrains. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 62(3), 1075–1083.
- Takahashi, I. et Noguch, T. (1986). A new quick-response and high efficiency control strategy of an induction motor. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, I A-22(5), 820–827.
- Xian, B., Dawson, D., de Queiroz, M., et Chen, J. (2004). A continuous asymptotic tracking control strategy for uncertain multi-input nonlinear systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 49, 1206–1211.
- Xu, Z., Wang, J., et Wang, P. (2008). Passivity-based control of induction motor based on euler-lagrange (el) model with flexible damping. *11th International*

Conference on Electrical Machines and Systems, ICEMS'2008, 48–52.

Yaolong, T., Jie, C., et Hualin, T. (2003). Adaptive backstepping control and friction compensation for ac servo with inertia and load uncertainties. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 50, 944–952.

Yazdanpanah, R., Soltani, J., et Markadeh, G. (2008). Nonlinear torque and stator flux controller for induction motor drive based on adaptive input-output feedback linearization and sliding mode control. *Energy Conversion and Management*, 49, 541–550.

Z. Cai, M.d.Q. et Dawson, D. (2006). Robust adaptive asymptotic tracking of nonlinear systems with additive disturbance. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 51, 527–529.

Zhang, X., Behal, A., Dawson, D., et Xian, B. (2005). Output feedback control for a class of uncertain mimo nonlinear systems with non-symmetric input gain matrix. *44th IEEE Conference on Decision and Control 44th and European Control Conference, CDC-ECC'2005*, 7762–7767.

6. Annexes

$$l_{11} = \frac{1}{a_{10}} [\dot{\Phi}_{11} + c_{11} \tanh^2(e_\Phi) a_8 \dot{x}_{3ref} - c_{11} (1 - \tanh^2(e_\Phi)) (a_8 + 2 \tanh(e_\Phi) a_8 x_3) (c_{11} \tanh(e_\Phi) a_{10} c_{11} \eta_1) + c_{11} 2 \tanh(e_\Phi) a_8 x_3 (a_8 \dot{x}_{3ref} - a_8 x_3) - c_{11} \tanh^2(e_\Phi) (a_8 + 2 \tanh(e_\Phi) a_8 x_3) (a_8 \dot{x}_{3ref} - a_8 x_3)] \quad (47)$$

$$g_{11}(\cdot) = \frac{c_{11} a_8}{a_{10}} [a_8 \dot{x}_{3ref} - \dot{x}_{3ref} - a_8 x_3] \quad (48)$$

$$l_{12} = \frac{1}{a_{14} x_3} [\dot{\Phi}_{12} + c_{12} \tanh^2(e_\omega) a_{15} \dot{x}_{5ref} - c_{12} (1 - \tanh^2(e_\omega)) (a_{15} + 2 \tanh(e_\omega) a_{15} x_5) (c_{12} \tanh(e_\omega) a_{14} c_{12} \eta_2) + c_{12} 2 \tanh(e_\omega) a_{15} x_5 (a_{15} \dot{x}_{5ref} - a_{15} x_5) - c_{12} \tanh^2(e_\omega) (a_{15} + 2 \tanh(e_\omega) a_{15} x_5) (a_{15} \dot{x}_{5ref} - a_{15} x_5)] \quad (49)$$

$$g_{12}(\cdot) = \frac{c_{12} a_{15}}{a_{14} x_3} [a_{15} \dot{x}_{5ref} - \dot{x}_{5ref} - a_{15} x_5] \quad (50)$$

$$l_{21}(\cdot) = \frac{c_{11}}{a_{10}} a_1 \tanh^2(e_\Phi) (a_8 \dot{x}_{3ref} - a_8 x_3) - a_1 (c_{11} c_{21} r_1 - c_{11} c_{21} \eta_1) + [(a_2 - a_{10} \frac{x_2^2}{x_3^2}) - \frac{c_{11}}{a_{10}} a_1 \tanh^2(e_\Phi)] (c_{11} \tanh^2(e_\Phi) - a_{10} c_{11} \eta_1) + \frac{c_{12}}{a_{14}} x_3 \tanh^2(e_\omega) (x_5 + a_{10} \frac{2x_2}{x_3}) (a_{15} \dot{x}_{5ref} - a_{15} x_5) - (x_5 + a_{10} \frac{2x_2}{x_3}) (c_{12} c_{22} r_2 - c_{12} c_{22} \eta_2) + [x_2 - \frac{c_{12}}{a_{14}} x_3 (1 - \tanh^2(e_\omega)) (x_5 + a_{10} \frac{2x_2}{x_3})] (c_{12} \tanh(e_\omega) - a_{14} x_3 c_{12} \eta_2) \quad (51)$$

$$g_{21}(\cdot) = \left(\frac{c_{11}}{a_{10}} a_1 - \left(a_2 - a_{10} \frac{x_2^2}{x_3^2} \right) \right) \quad (52)$$

$$(a_8 \dot{x}_{3ref} - a_8 x_3) + \dot{x}_{3ref} a_1 \left(a_2 - a_{10} \frac{x_2^2}{x_3^2} \right) + \left(\frac{\dot{x}_{3ref}}{a_{10}} - \frac{a_8}{a_{10}} \dot{x}_{3ref} \right) + \left[\frac{c_{12}}{a_{14}} x_3 \left(x_5 - a_{10} \frac{2x_2}{x_3} \right) - x_2 \right] (a_{15} \dot{x}_{5ref} - a_{15} x_5) + x_2 \dot{x}_{5ref} - a_{10} \frac{2x_2}{x_3} \left(\frac{\dot{x}_{5ref}}{a_{14}} x_3 - \frac{a_{15}}{a_{14}} x_3 \dot{x}_{5ref} \right) \quad (53)$$

$$l_{22}(\cdot) = \frac{c_{12}}{a_{14}} x_3 \tanh^2(e_\omega) \left(a_1 - a_7 \frac{x_1}{x_3} \right) (a_{15} \dot{x}_{5ref} - a_{15} x_5) - \left(a_1 - a_7 \frac{x_1}{x_3} \right) (c_{12} c_{22} r_2 - c_{12} c_{22} \eta_2) + [(a_5 x_3 - x_1) - \frac{c_{12}}{a_{14}} x_3 (1 - \tanh^2(e_\omega)) \left(a_1 - a_7 \frac{x_1}{x_3} \right)] (c_{12} \tanh(e_\omega) - a_{14} x_3 c_{12} \eta_2) - \frac{c_{11}}{a_{10}} x_3 \tanh^2(e_\Phi) \left(x_5 + a_7 \frac{x_2}{x_3} \right) (a_8 \dot{x}_{3ref} - a_8 x_3) + \left(x_5 + a_7 \frac{x_2}{x_3} \right) (c_{11} c_{21} r - c_{11} c_{21} \eta_1) + [(a_5 x_5 + a_7 \frac{x_1 x_2}{x_3^2}) - \frac{c_{11}}{a_{10}} (1 - \tanh^2(e_\Phi)) \left(x_5 + a_7 \frac{x_2}{x_3} \right)] (c_{11} \tanh(e_\Phi) - a_{10} c_{11} \eta_1)$$

$$g_{22}(\cdot) = \left[-\frac{c_{11}}{a_{10}} \left(x_5 + a_7 \frac{x_2}{x_3} \right) - (a_5 x_5 + a_7 \frac{x_1 x_2}{x_3^2}) \right] (a_8 \dot{x}_{3ref} - a_8 x_3) + \dot{x}_{3ref} (a_5 x_5 + a_7 \frac{x_1 x_2}{x_3^2}) - (x_5 + a_7 \frac{x_2}{x_3}) \left(\frac{\dot{x}_{3ref}}{a_{10}} - \frac{a_8}{a_{10}} \dot{x}_{3ref} \right) + \left[\frac{c_{12}}{a_{14}} x_3 \left(a_1 - a_7 \frac{x_1}{x_3} \right) - (a_5 x_3 - x_1) \right] (\dot{x}_{5ref} a_{15} - a_{15} \dot{x}_{5ref}) + \dot{x}_{5ref} (a_5 x_3 - x_1) + \left(a_1 - a_7 \frac{x_1}{x_3} \right) \left(\frac{\dot{x}_{5ref}}{a_{14}} x_3 - \frac{a_{15}}{a_{14}} x_3 \dot{x}_{5ref} \right) \quad (54)$$

Références

- [1] J. Le Besnerais, V. Lanfranchi, M. Hecquet, P. Brochet, "Bruit audible d'origine magnétique dans les machines asynchrones », *Techniques de l'Ingénieur*, référence D3580, (2013).



De l'origine de l'Univers à l'origine de la vie
Une virgule dans l'espace-temps

Sylvie Vauclair
 JACOB

ODILE

Quand on racontait l'histoire de l'homme, on raisonnait en termes de siècles ou de millénaires. C'est en milliards d'années que l'on relate aujourd'hui l'histoire de l'Univers. Mais, plus encore que ce vertige temporel, c'est l'apparition du vivant qui fascine les scientifiques, le passage de la matière brute à l'être organisé capable de se reproduire et de s'adapter à son environnement.

C'est le mystère que tente ici de saisir Sylvie Vauclair, en synthétisant les grands résultats de la cosmologie et ceux ayant trait à l'émergence de la vie, pour comprendre comment le temps, l'espace et la complexité tissent la trame de l'histoire de la matière, fût-elle pensante.

Nous sommes des « poussières d'étoile » fort complexes et douées de raison, mais aussi condamnées à l'éphémère. « Une respiration, un souffle, une ponctuation active – une virgule dans l'espace-temps. »



La maintenance préventive en 28 fiches outils

Claude Kojchen

DUNOD

La maintenance préventive consiste à vérifier l'état de fonctionnement et d'usure des matériels, de façon régulière et planifiée, afin de suivre leur dégradation et de prévenir les pannes.

Cet ouvrage constitue un véritable guide pratique pour la mise en œuvre d'une politique de maintenance préventive dans l'entreprise. Dans la collection « cahiers techniques », ce livre propose, sous forme de fiches-outils identifiées par un rubriquage clair (« repère », « savoir-faire » et « en pratique ») les actions de maintenance préventive à entreprendre dans différents domaines industriels : mécanique, pneumatique, hydraulique, électricité, automatisme et froid



Aide-mémoire - Traitement du signal - 3e édition

Francis Cottet

DUNOD

Cet ouvrage synthétique reprend les principaux résultats du domaine, très important notamment en écoles d'ingénieurs. Il couvre à la fois les signaux analogiques et numériques, et fournit un rappel des outils mathématiques indispensables. Un chapitre tourné vers la mise en œuvre et les applications du traitement du signal a été ajouté.

Sommaire

- Le traitement des signaux analogiques. Définition et représentation des signaux. Transformations de Fourier. Systèmes de transmission. Filtrage. Modulation des signaux. Signaux aléatoires, bruit.

- Le traitement des signaux numériques. Numérisation des signaux. Analyse spectrale des signaux discrets. Filtrage numérique. Annexes. Impulsion de Dirac. Fonctions mathématiques utilisées en traitement du signal. Transformée de Laplace. Mise en œuvre et applications.



BIM et énergétique des bâtiments

Karim Beddjar, Fabien Imbault

DUNOD

Le BIM et la maquette numérique offrent au secteur de la construction une opportunité majeure de rupture pour maîtriser les processus, les coûts et la qualité. Ils permettent d'optimiser chaque étape du cycle de vie d'un ouvrage – de la conception à la déconstruction en passant par la maintenance – ainsi que la communication et la collaboration entre les différents acteurs du projet. Ce livre offre à ces derniers la grille de lecture la plus complète possible leur permettant d'appréhender la réalité énergétique et environnementale de leurs ouvrages, à l'échelle du bâtiment comme à l'échelle urbaine, en utilisant le BIM.

Cet ouvrage est un point d'appui méthodologique indispensable pour les différents acteurs intervenant tout au long du cycle d'un projet de construction : architectes, urbanistes, BET, maîtres d'ouvrage, etc. Sa construction pédagogique permet aux étudiants d'appréhender ces concepts nouveaux du BIM, mais aussi le bâtiment et la ville du futur.



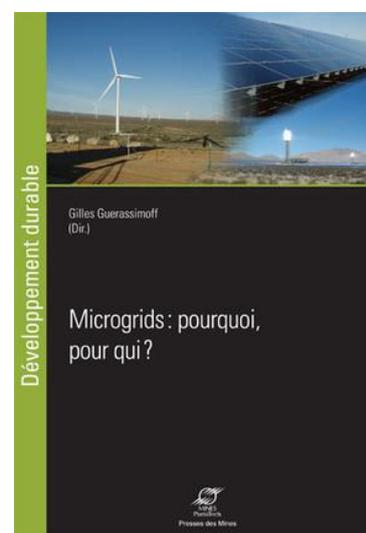
Calcul des ouvrages géotechniques selon l'Eurocode 7

Sébastien Burlon, Clément Desodt, Julien Habert, Philippe Reiffsteck

DUNOD

L'Eurocode 7 et ses normes d'application nationale ont introduit ces dernières années de nouvelles procédures et méthodes de calcul des ouvrages géotechniques. Cet ouvrage propose une synthèse et une analyse des principaux changements introduits et met en évidence les différences entre ce nouvel ensemble de normes et celui plus ancien.

Chaque chapitre correspond à un type d'ouvrages géotechniques (fondations superficielles, fondations profondes, écrans de soutènement, etc.) et comprend à la fois des explications et commentaires sur les documents normatifs à utiliser et des exercices basés sur des exemples concrets. L'objectif est de permettre aux étudiants et aux jeunes ingénieurs de rapidement acquérir la maîtrise des principales procédures et méthodes de calcul proposées par l'Eurocode 7.



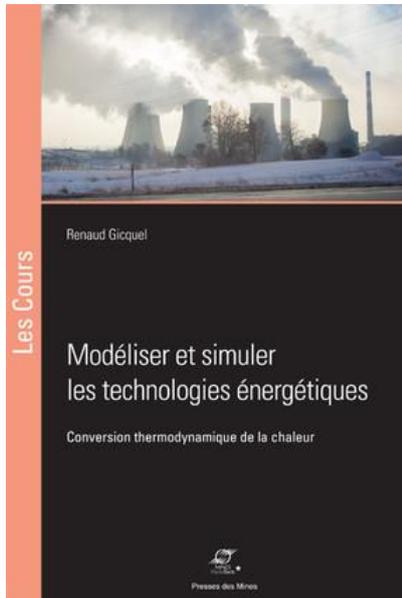
Microgrids : pourquoi, pour qui ?

Gilles Guerassimoff

PRESSES DES MINES

Dans un contexte empreint de doutes sur l'avenir énergétique et climatique, de nombreuses solutions émergent pour oeuvrer à l'amélioration de nos systèmes de production d'énergie. Électrification rurale, insularité, réseau vieillissant, intégration des énergies renouvelables, réduction des gaz à effet de serre, maîtrise de la demande en énergie, sécurité, fiabilité, sont autant de raisons pour la promotion des réseaux dits intelligents (smart grids).

En France, la plupart des expérimentations lancées en 2009 dans le cadre de la feuille de route "réseaux électriques intelligents" arrivent à leur terme et les premières leçons peuvent ainsi être tirées dans les quatre grandes thématiques explorées : favoriser la maîtrise et la gestion de l'énergie, faciliter l'intégration des EnR décentralisées, anticiper l'évolution des réseaux électriques existants et préfigurer les modèles d'affaires.



Modéliser et simuler les technologies énergétiques **Conversion thermodynamique de la chaleur**

Renaud GICQUEL

PRESSES DES MINES

Les technologies de l'information permettent de renouveler de manière radicale l'apprentissage et l'approfondissement d'une discipline scientifique et technique classique, considérée jusqu'ici comme particulièrement difficile par des générations d'étudiants et d'ingénieurs.

Cet ouvrage montre comment il est aujourd'hui possible de calculer des systèmes énergétiques - même très complexes - sans écrire une seule équation ni programmer une ligne de code tout en obtenant facilement des résultats extrêmement précis.

Une trentaine d'exemples de cycles thermodynamiques résolus avec le progiciel Thermoptim illustrent la méthode proposée.

En moins de 250 pages, les lecteurs disposent des notions essentielles pour comprendre à la fois le fonctionnement des systèmes énergétiques assurant la conversion thermodynamique de la chaleur et la manière dont ils peuvent être modélisés.

Même si certains de ces systèmes existent depuis plusieurs décennies, de nouveaux développements sont aujourd'hui nécessaires pour faire face aux défis du monde actuel, en particulier pour limiter les émissions de gaz à effet de serre et combattre le changement climatique. Cette méthode devrait susciter des vocations chez les jeunes ingénieurs et scientifiques désireux de mettre leurs compétences au service de la transition énergétique.

L'essentiel de son contenu constitue par ailleurs le support de cours du MOOC Conversion Thermodynamique de la Chaleur, décomposé en deux parties, Modéliser et Simuler (CTC-MS) et Cycles Classiques et Innovants (CTC-CCI), dont les apprenants ont apprécié la pédagogie novatrice.



Enseignements technologiques transversaux - Term **STI2D - Édition 2017**

G. LAUNAY

NATHAN

Un guide complet pour comprendre, réviser toute l'année et réussir l'épreuve du Bac.

** Toutes les notions essentielles des enseignements technologiques transversaux au programme de Terminale (communs à toutes les spécialités).*

** Des QCM sur l'ensemble des notions.*

** Des exercices d'entraînement issus de sujets de Bac et leurs corrigés.*

** Votre livret détachable : les formules indispensables.*

BULLETIN D'ABONNEMENT A LA REVUE 3EI Année 2018
n°91 (Janvier 2018), n°92 (Avril 2018), n°93 (Juillet 2018) et n°94 (Octobre 2018)

Pour l'année 2018, nous vous proposons

3 formules d'abonnement :

- Formule « papier et accès aux articles numériques au format pdf » sur le site SEE revue 3EI
- Formule « accès aux articles numériques au format pdf SEUL » sur le site SEE revue 3EI
- FORMULE ECO : Adhésion SEE + Tarif préférentiel à la revue 3E.I format papier + Accès numérique aux revues 3E.I et REE + Tarifs préférentiels conférences et journées d'études + Réduction fiscale (voir en page de couverture)

Depuis le 01/01/2017, les tarifs pour la revue 3EI sont les suivants :

➤ <u>Abonnement individuel</u>	France et pays de l'UE	Pays hors UE
<u>Abonnement papier et accès aux articles numériques</u>	42 € TTC	53 € HT
<u>Accès aux articles numériques</u>	30 € TTC	

➤ <u>Abonnement « Institutionnel »</u>	France et pays de l'UE	Pays hors UE
<u>Abonnement papier et accès aux articles numériques</u>	60 € TTC	75 € HT
<u>Accès aux articles numériques</u>	30 € TTC	

L'abonnement institutionnel concerne les bibliothèques, CDI, laboratoires, entreprises, universités, écoles d'ingénieur, lycée, IUT ...). Prendre soin de mentionner sur le bon de commande le lieu de livraison de la revue ainsi que le destinataire (personne physique ou service).

TRES IMPORTANT L'adresse électronique à laquelle vous recevrez le code d'accès au site de la SEE-revue 3EI est indispensable en cas d'abonnement avec accès numérique.

<p>Nom :..... Prénom :.....</p> <p>Adresse d'expédition de la revue 3EI :</p> <p>Rue, n° :</p> <p>Code postal : Ville :</p> <p>Pays :</p> <p>Adresse électronique :</p> <p>Activité (pour statistiques) :</p>
--

Adresser le bulletin renseigné, accompagné d'un chèque libellé à l'ordre de :
SEE- la revue 3EI ou d'un bon de commande pour les institutions, à l'adresse suivante

<p>SEE-la revue 3EI 17 rue Hamelin, 75783 PARIS CEDEX 16</p>
--

<p>Vous pouvez également vous abonner sur le site http://www.see.asso.fr/3ei</p>

Abonnez-vous !

15 ans d'archives 3EI en DVD

La SEE vous propose d'acquérir le DVD « archives » 3EI regroupant tous les articles des numéros 0 à 59, de mai 1994 à décembre 2009, sous forme numérique (PDF scannés/ vectoriels).



Pour toute commande merci de remplir le bulletin joint ci-dessous et de l'envoyer à l'adresse indiquée :

BON DE COMMANDE

Raison Sociale :
Adresse :
Ville :
Tel. :
E-mail :

Nom du contact : M/Mme
Pays :
Fax :

Tarif	France et pays de l'UE	Hors Union Européenne
Individuel	60 €	70 €
Institutionnel (CDI/Laboratoires...)	100 €	110 €

MONTANT TOTAL DE LA COMMANDE :€ HT soit€ TTC (TVA 20%).

REGLEMENT:

- Par chèque bancaire à l'ordre de la « SEE »
- Par virement bancaire :
**BNP Paribas, Paris Associations
(02837)**

RIB: 30004 00274 00010336242 58
IBAN: FR76 3000 4002 7400 0103
3624 258
BIC: BNPAFRPPAA

Date, Lieu

Cachet, Signature
(Précédés de la mention "lu et approuvé")

Contact : Aurélie COURTOISIER

Tél : 01 56 90 37 17 - abo@see.asso.fr

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

17, rue de l'Amiral Hamelin

75783 Paris Cedex 16

www.see.asso.fr



