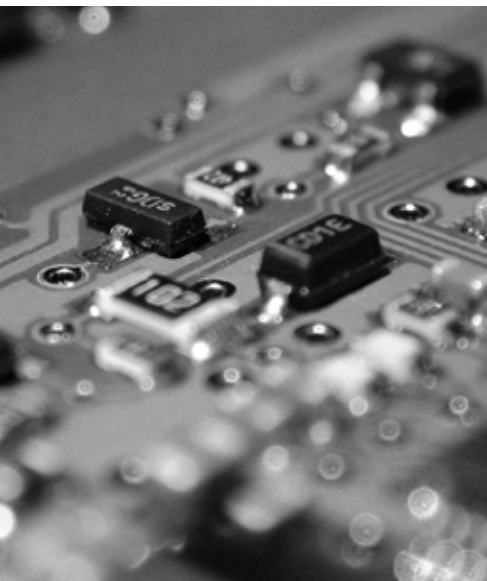


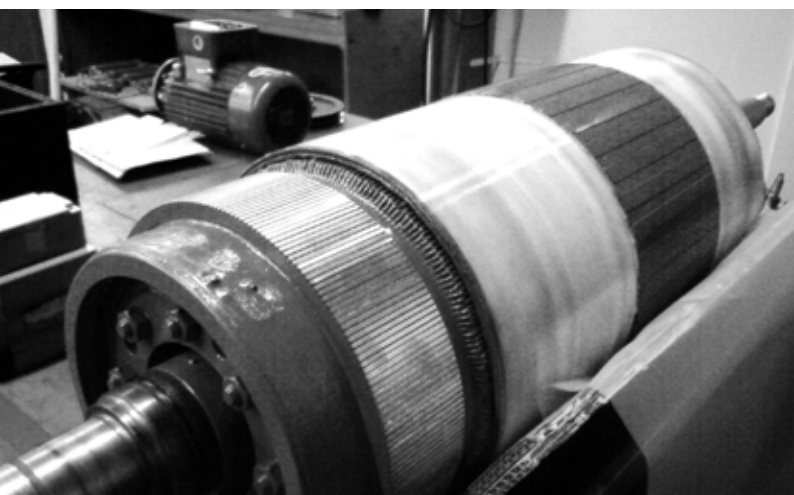
SIRMELEC

SERVICE & MAINTENANCE
DE MATÉRIEL ÉLECTRIQUE



LE SERVICE ET LA MAINTENANCE DE MATÉRIEL ÉLECTRIQUE

*UNE PROFESSION
AU CŒUR DES
ENJEUX INDUSTRIELS
ET DE L'USINE DU FUTUR*



EDITO

Cet ouvrage, qui est autant un recueil de témoignages sur la réalité d'une profession qu'une analyse prospective, vise à mettre en lumière quelques notions structurantes de ce métier ainsi que quelques lignes directrices sur son avenir.

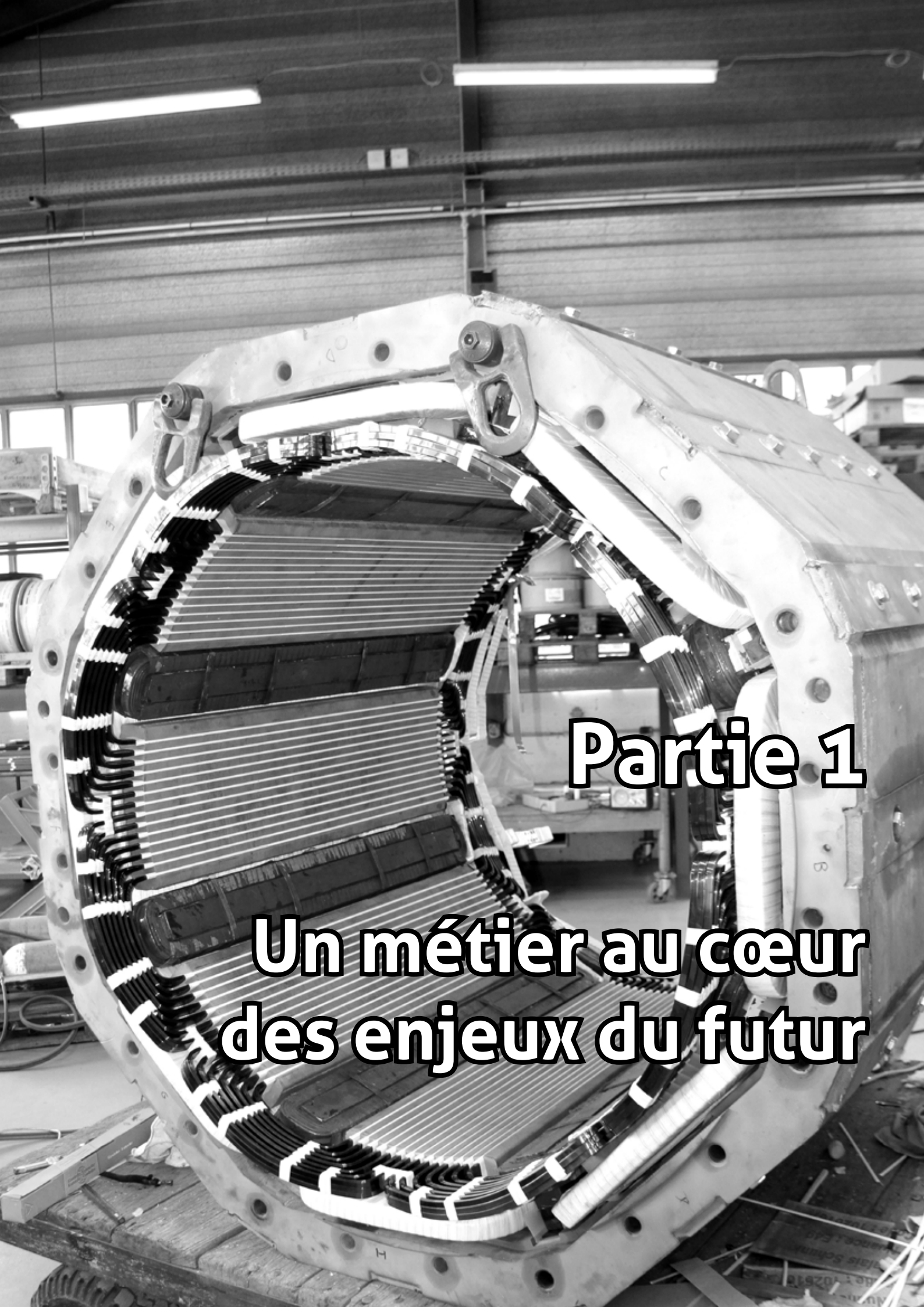
Tout d'abord, ce qui ressort avec force de la rencontre avec les hommes et les femmes qui constituent cette profession est leur attachement à leur savoir-faire qui entraîne une exigence extrême à l'égard de la qualité des prestations et au respect du travail bien fait. Proximité, technicité réactivité sont notamment des termes qui reviennent fréquemment et constituent le cœur du savoir-faire du métier.

Cette notion de service au client est d'ailleurs si centrale qu'elle en constitue le fil d'Ariane de la profession vers son avenir. En effet, quelles que soient les évolutions et les mutations technologiques induites notamment par la numérisation croissante des matériels et des activités, ce qui constitue le lien entre l'exercice de la profession d'hier et de demain, c'est qu'elle s'inscrit au service du client.

Ainsi, la profession constitue le troisième sommet d'un triangle composé par les fabricants d'une part et les clients d'autre part. La synergie entre ces trois acteurs est la condition d'une efficacité industrielle maximale où les compétences de chacun sont optimisées pour parvenir à la satisfaction du besoin du client.

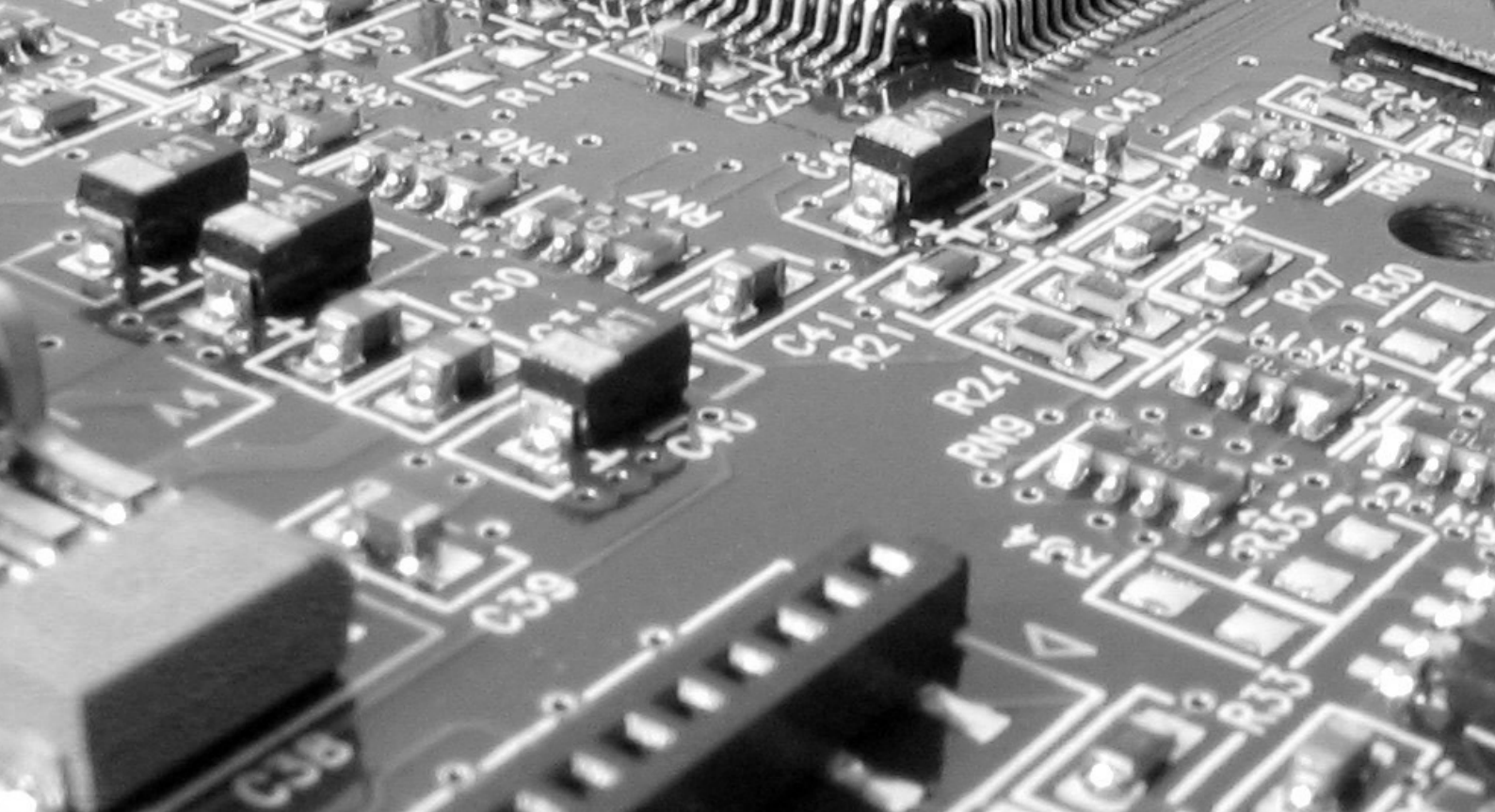
Forts de ce positionnement central, les professionnels de la réparation et de la maintenance de matériel électrique entendent bien jouer un rôle majeur, à l'avenir, dans l'accompagnement de leurs clients que ce soit pour optimiser leurs installations du point de vue financier (amélioration du coût du Maintien en Condition Opérationnelle), du point de vue environnemental (efficacité énergétique des installations) ou technique (réponse aux besoins spécifiques de chaque client).

Il s'agit là du défi majeur de cette profession qui voit désormais de nombreux marchés s'ouvrir devant elle. A l'heure où se dessine l'usine du futur, elle dispose de tous les atouts et de toutes les compétences pour le monde d'aujourd'hui et encore plus dans celui de demain !



Partie 1

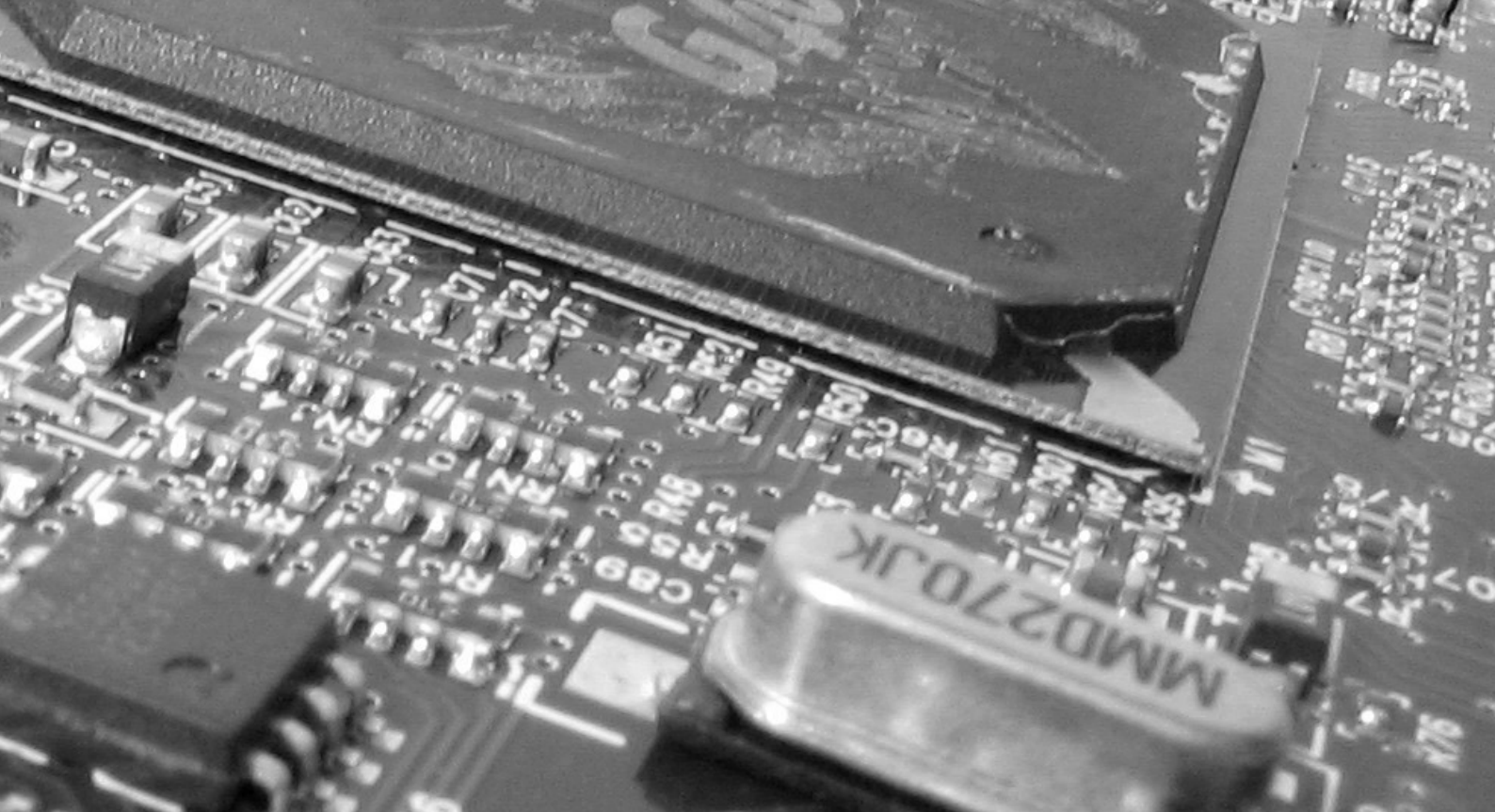
**Un métier au cœur
des enjeux du futur**



12 millions de moteurs

Sous l'effet combiné de l'électronique et du numérique, le centre de gravité du monde industriel se déplace vers le client dont les besoins changent. Ce dernier n'achète plus un produit ou un service : il veut un résultat. Au-delà de la réparation de matériels eux-mêmes évolutifs et nouveaux, il faudra demain fournir un résultat technique (atteindre tel objectif ou garantir d'un équipement qui fonctionne sans interruption) ou encore environnemental (optimiser la consommation d'énergie d'un système d'entraînement) voire financier (parvenir au moindre coût).

Notre profession, grâce la palette de ses compétences, de son savoir-faire et de sa proximité avec le client dispose de nombreux atouts pour relever ce défi. Elle affiche ainsi de nouvelles ambitions : devenir des intégrateurs-réparateurs qui conseillent et mettent en œuvre des solutions d'entraînement dans lesquelles l'électronique de puissance contrôle l'énergie et le mouvement pour répondre à des besoins nouveaux.

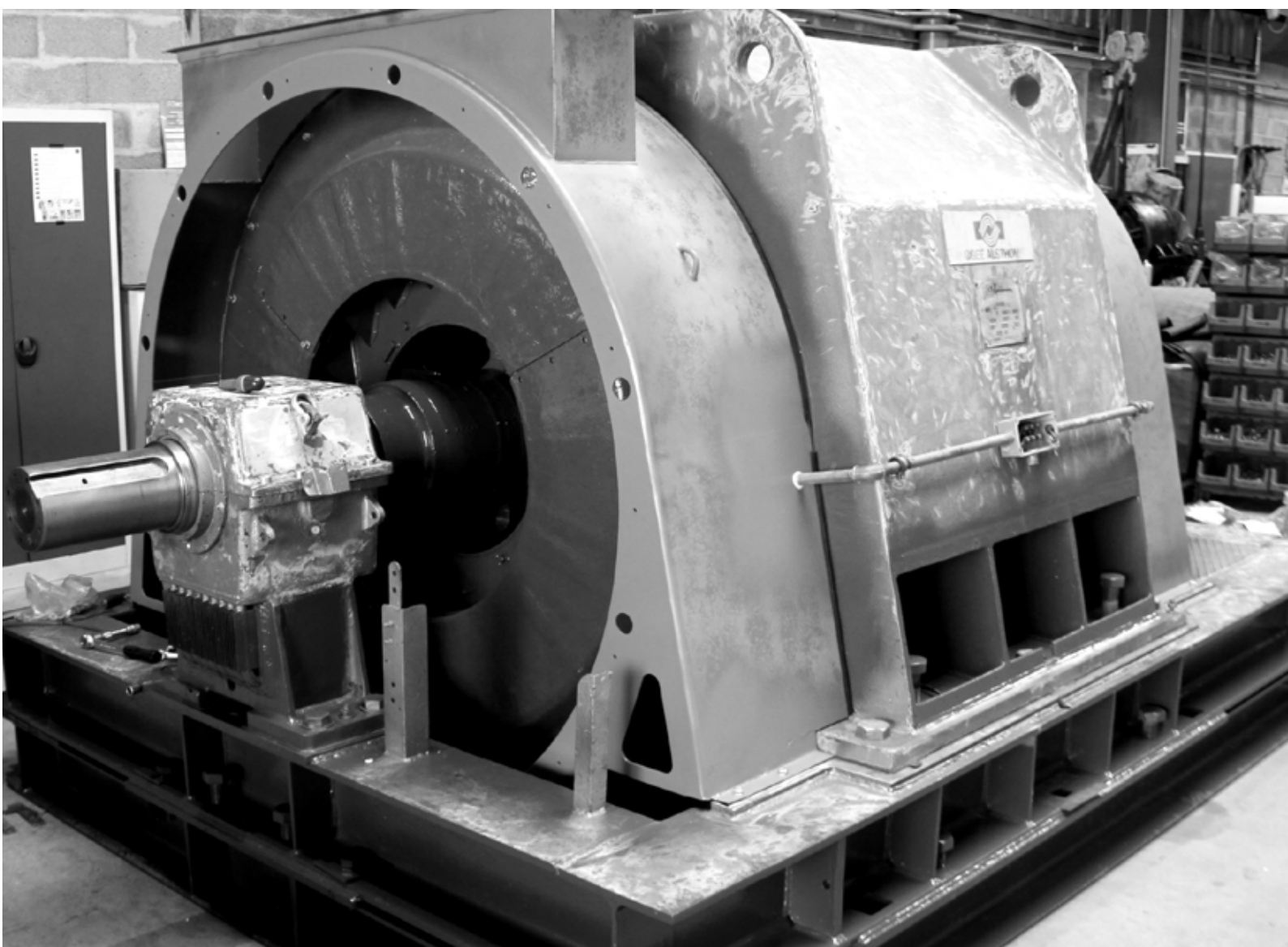


s'ouvrent au numérique

Sommaire de la partie 1 :

- > La maintenance comme outil de permanence technique
- > La maintenance comme outil d'innovation
- > La maintenance comme outil environnemental
- > La maintenance comme outil d'optimisation financière

La maintenance comme outil de permanence technique



Comme bon nombre de métiers industriels, ceux de la maintenance et de la réparation électrique vivent de profondes mutations dues à l'accélération des cycles de production et à l'évolution technologique des parcs installés. L'électronique de puissance, les capteurs, mais aussi le nombre de plus en plus important d'objets connectés dans le monde industriel dessine de nouveaux horizons et inscrit les métiers de la maintenance dans le grand mouvement de la numérisation et de l'usine du futur.

L'usine devient numérique et flexible : elle se caractérise par une communication continue et instantanée entre les différents outils et postes de travail intégrés notamment dans les chaînes de production. L'utilisation de capteurs communicants apporte à l'outil de production une capacité d'auto-diagnostic et permet ainsi son contrôle à distance. Cela peut permettre par exemple de déployer la maintenance prédictive qui consiste à anticiper un défaut machine avant qu'il ne survienne. Les machines étant interconnectées, les données issues des systèmes de surveillance sont analysées afin de déterminer tout facteur indiquant une probabilité de défaut. Cela fournit au réparateur des informations précieuses qui vont lui permettre un suivi et analyse fine du système, avec une planification de l'entretien pour éviter les arrêts de production imprévisibles.

De plus en plus, outre leur rôle dans l'optimisation des processus de production, les technologies numériques représentent également l'un des moteurs puissants d'évolution et de croissance durable de notre société, soucieuse de son impact sur l'environnement. Leur généralisation dans l'ensemble des processus (productifs, de contrôle, informationnels...) conduit à des innovations de rupture dans tous les secteurs, industriels et de services.

C'est particulièrement vrai pour les 12 millions de moteurs électriques industriels (à comparer au parc européen estimé à 90 millions de moteurs) constituant le parc français avec une part d'équipements neufs (machines intégrant des moteurs) correspondant à 400 000 moteurs par an, et une part de moteurs de remplacement (maintenance) de 200 000 moteurs par an. Déjà, les spécialistes en maintenance de systèmes électriques et électroniques de puissance travaillent à intégrer l'évolution des chaînes de traction et sur l'amélioration de leurs performances énergétiques... anticipant ainsi le métier de demain.

Nous assistons donc à une redéfinition du métier, sous l'effet, tant des nouveaux outils que des nouvelles demandes formulées par les clients. Ceux-ci s'orientent de plus en plus vers une exigence globale de fonctionnement, focalisée plus sur le résultat technique que sur les actes qui y conduisent. Les professionnels doivent donc faire preuve, outre leurs compétences techniques, d'une vision holistique du résultat souhaité par le client. Ainsi, la valeur ajoutée de la profession se compose donc de la phase de conseil en amont, de la mise en œuvre (installation / ajustement) et du suivi en aval (maintenance prédictive, curative, télé-suivi ...).

Des services clients de plus en plus globalisés

Depuis longtemps, le métier de bobinier-réparateur a largement diversifié ses activités traditionnelles en s'ouvrant au négoce de moteurs, de réducteurs et variateurs de vitesse électroniques. Cette première évolution s'est traduite par un accroissement des compétences vers des services de proximité adaptés aux besoins locaux et faisant la différence auprès des utilisateurs industriels.

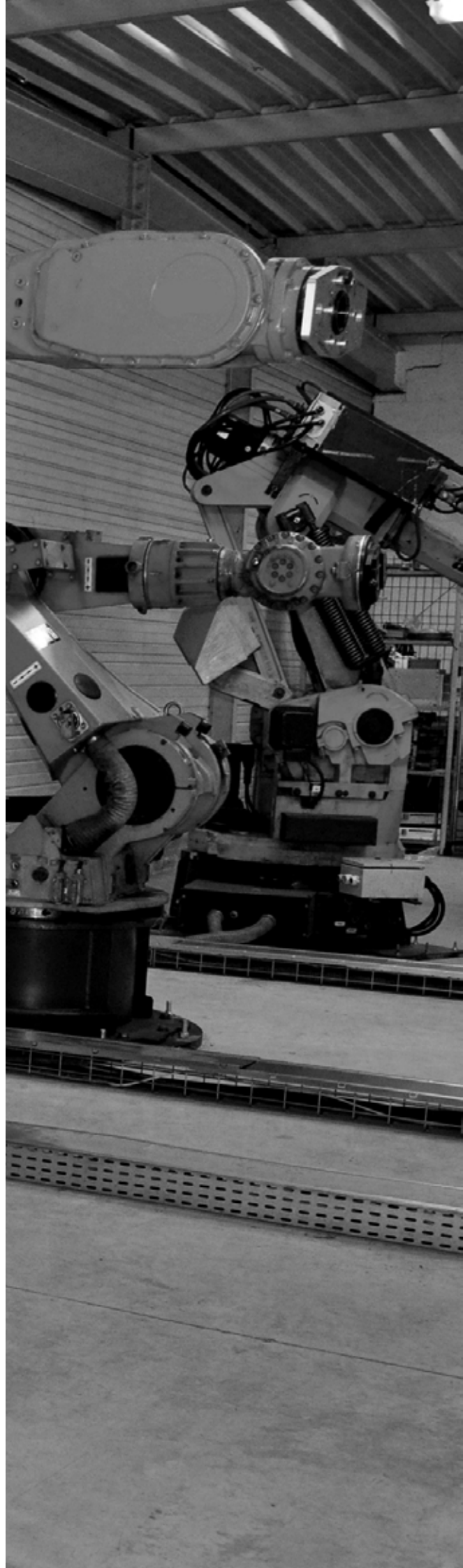
À présent, le métier de bobinier-réparateur consolide son savoir-faire par des applications de vitesse variable et de servomoteurs, les moteurs et alternateurs intégrant, par ailleurs, des solutions électroniques de contrôle-commande. Performantes et adaptées aux installations industrielles tertiaires et même aux équipements domestiques, elles génèrent de substantielles économies. Communicantes, via les principaux bus de terrain, elles s'intègrent dans les process industriels. Une ouverture vers les systèmes de supervision en mesure de garantir le parfait fonctionnement des moteurs.

La profession est donc largement engagée dans ce vaste mouvement qu'est l'usine du futur et contribue à un avenir numérique prometteur évoluant vers le métier d'intégrateur-réparateur de systèmes d'entraînement électriques et électroniques.

Le télédiagnostic, la maintenance préventive du 21^e siècle

Les fonctions de télémaintenance représentent un moyen rapide et efficace de placer le savoir-faire spécifique des réparateurs au cœur des attentes des clients. Elles permettent notamment d'analyser à distance les paramètres d'une machine tournante et, entre autres, de corriger d'éventuels défauts.

La maintenance préventive des moteurs et générateurs s'adapte ainsi au monde de la communication et du télédiagnostic. Problèmes de roulement, valeurs électromagnétiques anormales, contraintes susceptibles de dégrader la fiabilité ou la performance des machines,... autant de données collectées à distance permettant à la maintenance de planifier les interventions de façon opportune. En y combinant les mesures vibratoires, électriques (tension, courant) et thermiques, le tout analysé par une bibliothèque d'algorithmes « constructeurs » disponibles sur le *cloud*, il devient possible de détecter immédiatement l'origine des défauts... pour mieux les entretenir et les réparer.



La maintenance comme outil d'innovation



L'innovation est au cœur du métier de la réparation et de la maintenance de matériel électrique. Cette innovation s'applique au métier lui-même, le faisant évoluer vers une conception plus globale de son action, mais aussi et surtout aux objets sur lesquels le réparateur a à travailler. En ce sens, une des principales qualités de la profession est sa capacité d'adaptation aux demandes des clients qu'il faut croiser avec les possibilités nouvelles offertes par les évolutions techniques. De ce point de vue, la réparation/maintenance constitue le lien indispensable entre les fabricants de matériel et les clients industriels. Aux demandes spécifiques des clients, le réparateur doit répondre en intégrant les évolutions technologies des matériels proposés. Et elles sont nombreuses...

Disposer à terme, de « machines intelligentes » intégrant la conversion énergie électromécanique, électro-électronique ainsi que leur contrôle, tout en respectant la taille, les émissions, la fiabilité fonctionnelle et structurelle ainsi que l'éco-efficacité. Tel est l'objectif des travaux de recherche actuellement entrepris dans le domaine du génie électrique. Ces projets « tournent » essentiellement autour de l'efficacité énergétique, notamment celle des machines tournantes.

Le rapprochement de l'électronique de puissance et de la partie tournante induit des problèmes cruciaux de tenue thermique et de fiabilité. La minimisation des pertes des composants devient alors fondamentale, sans nuire à la tolérance aux pannes.

Par ailleurs, l'électronique de commande permet de donner les informations de pilotage aux moteurs de nouvelles générations, ainsi que les écrans ou Interface Homme Machines (IHM), qui font le lien final entre l'homme et le mouvement.

L'utilisation de nouveaux composants électroniques, assurant de faibles pertes, alliée à la conception de machines optimisées en termes de consommation d'énergie et de fiabilité, peut palier ces problèmes. Toutefois, cinq évolutions restent à résoudre :

- maîtriser les problèmes de compatibilité électromagnétique induits par l'utilisation des composants rapides à faibles pertes ;
- maîtriser l'évacuation de la chaleur produite dans cet environnement confiné tout en concevant des machines supportant des températures élevées ;
- maîtriser la variété des stratégies induites par l'utilisation de dispositifs disposant de plus de degrés de liberté que ceux strictement nécessaires à la réalisation de leur fonction élémentaire ;
- évaluer et maîtriser le vieillissement des structures ;
- définir la couche d'intelligence permettant à ces machines de coopérer en travaillant de façon interconnectée, avec une capacité de type « *Plug and Play* ».

Vers le « moteur vert » ?

À « deux pas de là », à Arras, au sein de l'Université d'Artois, une équipe de chercheurs, conduite par Jean-François Brudny, a mis au point un moteur électrique plus propre, offrant un meilleur rendement et moins bruyant que les modèles traditionnels. Par ailleurs, une analyse des cycles de vie du moteur détermine son impact écologique dans les sols, l'eau et l'air, depuis sa création jusqu'à son recyclage, en passant par sa phase de fonctionnement. Cette nouvelle machine (de 750 W à 300 kW) affiche des performances optimales notamment grâce à l'utilisation :

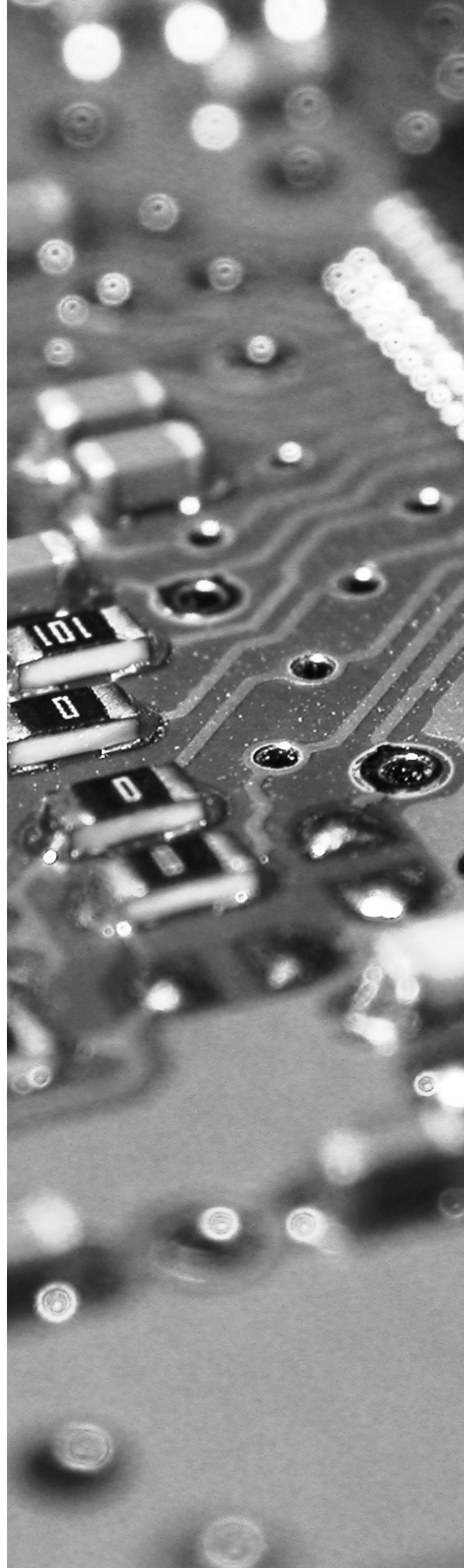
- de tôles à grains orientés dont l'assemblage judicieux
- réduit les pertes de la machine ;
- d'un fil écologique dont le vernis résulte non d'un processus chimique mais d'un nouveau procédé de fabrication sans solvant réagissant aux rayons UV ;
- de produits biosourcés, pour les plastiques, conçu à partir de matières organiques (déchets, végétaux) ;
- de roulements à faible consommation d'énergie
- constitués de billes recouvertes de céramique.

La durée de vie moyenne de ce moteur est estimée à 10 ans. Coûtant 10 % plus cher à l'achat, il serait amorti au bout d'un an environ. « Si tous les appareils électriques utilisés en France en étaient pourvus, on pourrait gagner jusqu'à 3 milliards d'euros par an », estime l'ADEME, le remplacement ne pouvant se faire que de façon progressive... ce qui représente un vaste marché pour les métiers de la maintenance.

Le PHARE de Lyon

À l'École Centrale de Lyon, est développé le projet PHARE (Plateforme machines tournantes pour la maîtrise des Risques Environnementaux) portant sur la conception des machines tournantes du futur intégrant la maîtrise des risques environnementaux. Ce projet se caractérise par l'étude de systèmes intelligents embarqués permettant de répondre aux critères d'ultra-compacité dans une gamme étendue de vitesses.

Le projet PHARE permet de développer des travaux de recherche originaux, menés par une équipe scientifique comportant des mécaniciens des structures, des matériaux et des fluides, des acousticiens et des physiciens. Grâce à cette équipe multidisciplinaire, la technologie des machines tournantes innove et progresse sur les thèmes suivants : performances, réduction des coûts et des nuisances sonores tout en continuant à maintenir la fiabilité, la pérennité et la sécurité des composants... et de la machine elle-même.



La maintenance comme outil environnemental



Grâce à son rôle central, la profession de la réparation et de la maintenance de matériel électrique s'affirme comme l'interlocuteur indispensable de tous les industriels en ce qui concerne l'efficacité énergétique. Afin de pouvoir assurer ce rôle nouveau de prescription et de mise en œuvre des solutions d'efficacité énergétique les plus adaptées aux spécificités de ses clients industriels, la profession s'est dotée d'outils d'aide à la décision tel qu'un éco-bilan comparatif entre la réparation d'une machine tournante ou son remplacement. L'objectif est là aussi de répondre à une demande globale des clients qui exigent un résultat final (ici d'efficacité énergétique) et non plus une série d'actions décorellées les unes des autres.

Une profession qui s'engage pour l'efficacité énergétique

Dans un contexte d'efficacité énergétique, la Directive Européenne ErP (*Energy related Products*) impose des moteurs de plus en plus performants et efficients. Qui mieux que celui qui s'occupe de leur maintenance peut conseiller sur leur optimisation... éco-bilan à l'appui ? Le SIRMELEC, en partenariat avec l'ADEME, a réalisé une étude portant sur l'éco-bilan de la réparation des moteurs⁽¹⁾ afin de doter la profession d'outils solides pour leur permettre de conseiller le plus efficacement leurs clients du point de vue de l'impact environnemental des différentes options (réparation, remplacement,...).

L'écobilan SIRMELEC / ADEME est une analyse du cycle de vie comparative sur deux types de matériels : des moteurs et des transformateurs électriques.

Cette étude vise un double objectif :

- d'une part, définir, pour le matériel étudié neuf ou reconditionné, les impacts significatifs portant sur l'environnement au cours des différentes phases du cycle de vie de la machine tournante ;
- d'autre part, comparer, suite à une panne, l'impact du remplacement par un matériel neuf par rapport à l'impact de la réparation de ce moteur.

A chaque phase du cycle de vie (fabrication, distribution, utilisation, fin de vie), 3 indicateurs de flux et 8 indicateurs d'impact environnemental ont été analysés, et ce pour un matériel neuf et reconditionné. Pour cela, chacune des phases a été décomposée et son impact sur l'environnement quantifié.

L'analyse du cycle de vie des moteurs neufs et des moteurs rebobinés (de 55 kW ou de 450 kW) fait ressortir un certain nombre de constantes. Ainsi, il apparaît que :

- L'étape d'utilisation est responsable de la majorité des impacts sur les 11 indicateurs (de 69 % à 99 %). La production de l'énergie électrique consommée par le moteur pendant la phase d'utilisation (due notamment aux pertes par effet joule) joue un rôle majeur.
- La phase de fabrication (ou de reconditionnement pour les moteurs réparés) contribue de manière significative à l'indicateur d'épuisement des ressources naturelles.
- Les phases de distribution et de fin de vie sont des contributeurs mineurs à tous les indicateurs.

Il en ressort que le rendement du moteur représente un élément décisif concernant l'impact environnemental : l'amélioration du rendement réduit donc significativement la consommation d'énergie, l'essentiel de sa consommation énergétique ayant lieu durant sa phase d'utilisation.

Aussi l'écobilan d'un moteur neuf n'est meilleur que celui d'un moteur réparé que lorsque le moteur neuf est de meilleure technologie que celui qu'il remplace et présente un meilleur rendement.

Néanmoins, le reconditionnement d'un moteur ne dégradant pas ce rendement, il présente, à technologie égale un meilleur éco-bilan qu'un moteur neuf (lié à un plus grand impact du moteur neuf lors des phases de fabrication et de transport, notamment).

L'objectif de cette étude réalisée par le SIRMELEC et l'ADEME est de donner les outils, aux professionnels du secteur, pour conseiller efficacement leurs clients.

En effet, au-delà des considérations techniques et financières qui doivent également être intégrées dans l'analyse, ce rapport fournit des indicateurs fiables pour déterminer de manière objective l'impact environnemental comparé de la réparation ou du remplacement d'un moteur.

Il s'agit là d'un aspect majeur du nouveau visage de notre profession qui se met en mesure d'apporter le meilleur conseil à ses clients industriels quant à l'optimisation de leur système d'entraînement, notamment du point de vue environnemental.

⁽¹⁾ Cette étude a été réalisée par la société CODDE-Bureau Veritas qui s'est appuyée sur le logiciel d'éco-conception EIME version 5 et sur des bases de données spécifiquement conçues pour les produits électriques et électroniques. La synthèse des résultats est disponible sur le site du SIRMELEC : www.sirmelec.fr.

**« Tordons le cou à un préjugé » :
le rebobinage ne fait pas perdre de rendement !!!**

Il est courant d'entendre que le fait de réparer un moteur lui ferait perdre du rendement... **Une étude menée par l'AEMT* et l'EASA* démontre, sur 20 moteurs différents, qu'un rebobinage fait selon les règles de l'art ne dégrade pas le rendement initial de la machine, voire peut l'améliorer.**

En conséquence, « tordre le cou » à ce préjugé est d'autant plus important que l'écobilan réalisé par le SIRMELEC démontre que le rendement est de très loin le levier majeur pour économiser de l'énergie avec un moteur...

**AEMT : Association of Electrical and Mechanical Trade*

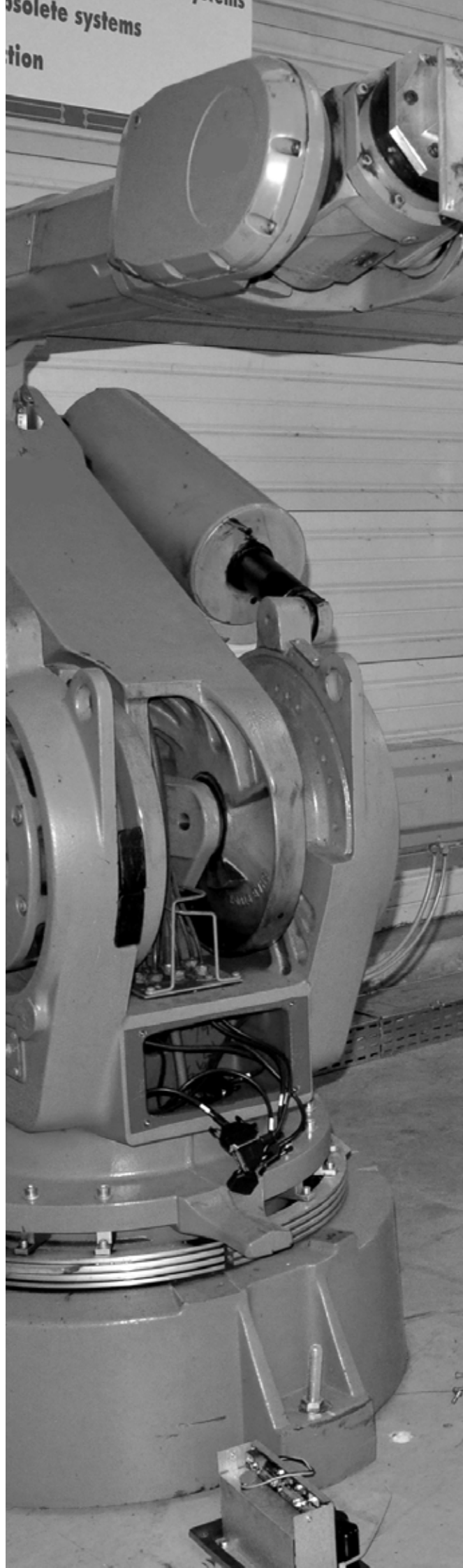
**EASA : Electrical Apparatus Service Association*

Une directive pour améliorer les rendements

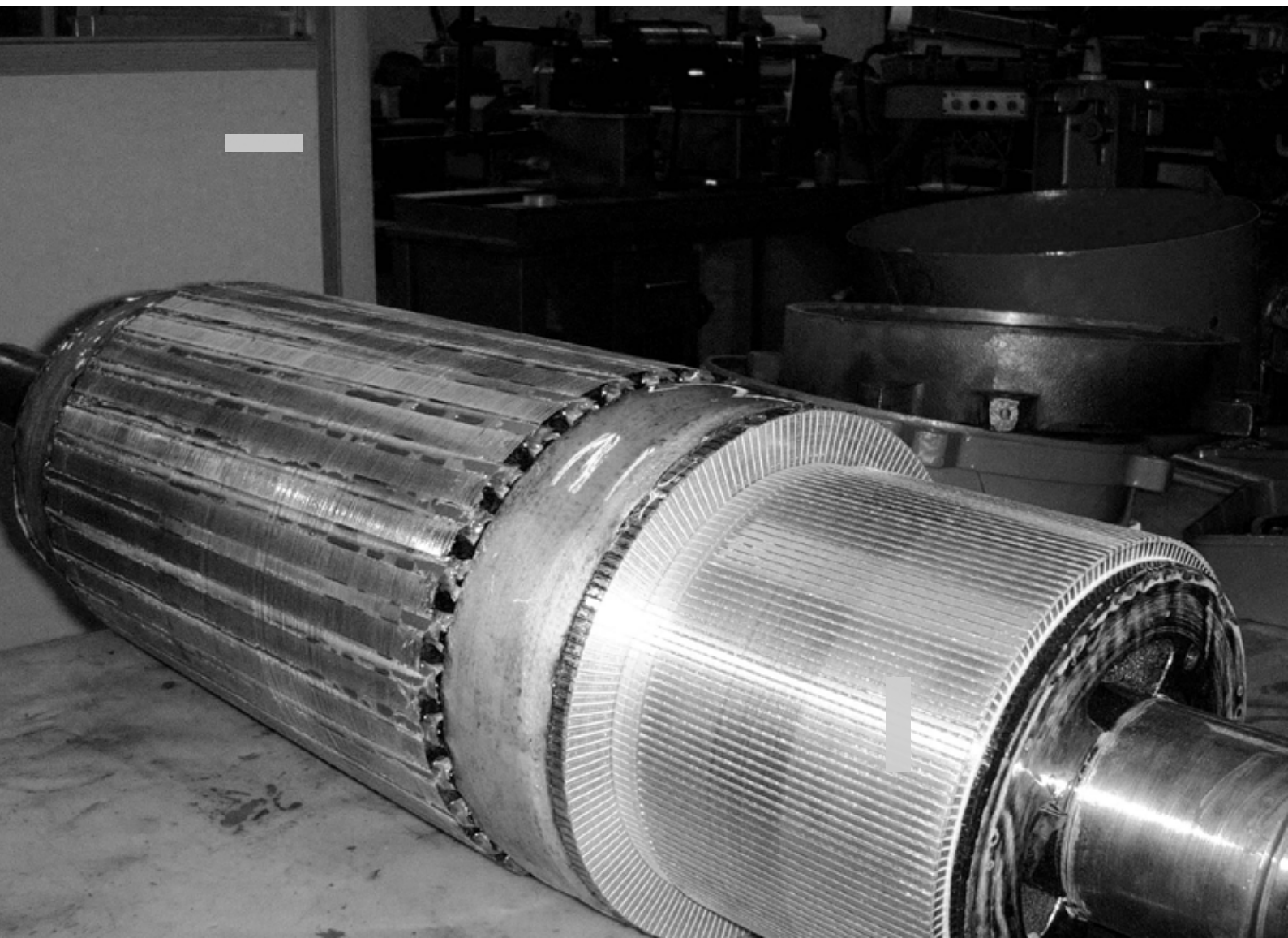
Les rendements des moteurs électriques, c'est-à-dire la part d'énergie électrique effectivement transformée en force mécanique, est une donnée majeure de l'efficacité énergétique. Une amélioration, même minime, de ces rendements entraîne des économies d'énergie très importantes à l'échelle de l'ensemble du parc de moteurs installés.

Le législateur européen s'est engagé dans cette voie en 2009, au moyen de la directive dite Eco-conception (*Energy related Products*). Un règlement concerne les moteurs électriques. Il interdit, depuis juin 2011, la mise sur le marché et la mise en service de moteurs dont les rendements sont inférieurs au niveau de rendement IE2. En 2015, ce sera IE3, ou IE2 accompagné d'un système de variation de vitesse, etc...

Cependant la course au rendement sur les moteurs eux-mêmes ne peut être infinie. Aussi, notre profession est en mesure de proposer un nouveau relai d'économies d'énergie, notamment en envisageant le système d'entraînement pris dans sa globalité et en le dimensionnant et en l'adaptant précisément en rapport avec le besoin réel du client. À ce niveau, le savoir-faire du réparateur, son expertise et la connaissance des besoins du son client, font référence.



Le maintenance comme outil d'optimisation financière



La profession de service et de maintenance de matériel électrique, conçue comme un service global, comprend nécessairement une réponse aux attentes financières des clients. Au-delà de la nécessité de proposer des réponses sur les plans techniques et environnementaux au meilleur prix (ce qui est déjà un premier aspect d'amélioration financière), la profession joue un rôle majeur dans le maintien en condition opérationnelle des unités de production ce qui constitue un puissant levier d'optimisation financière. Cet aspect du service rendu, jusque là implicite, est de plus en plus mis en avant et plaide pour une vision de la maintenance dans une logique de long-terme.

Le maintien en condition opérationnelle dans la structure de coûts

De plus en plus, les entreprises scrutent leur matériel électrique à la lumière du coût total de possession (TCO : *Total Cost of Ownership*). Celui-ci se compose du coût d'acquisition (qui s'amortit sur la durée de vie du matériel), du coût lié au maintien en condition opérationnelle (MCO) qui intègre toutes les dépenses d'intervention sur ce matériel ainsi que les dépenses liées au stockage des pièces détachées (intégrées au Besoin en Fonds de Roulement - BFR). Cette analyse brute des coûts liés au matériel doit ensuite être mise en perspective avec la disponibilité / fiabilité du matériel. Chacune de ses sources de coûts, prise individuellement offre potentiellement un levier d'optimisation financière. Là aussi, l'apport essentiel des professionnels du secteur de la maintenance de matériel électrique sera de mettre leur expertise au service du client, de pondérer les différentes opportunités d'économies et d'apporter un conseil sur le bon ordonnancement des priorités et des actions de maintenance pour obtenir une optimisation financière maximale au regard du besoin.

Sur le coût d'acquisition

Le réparateur de matériel électrique dispose d'une expertise technique très importante, mais aussi d'une proximité et d'une connaissance approfondie de la réalité technique des besoins de son client industriel. Cette double compétence lui permet d'être l'interlocuteur le plus apte à proposer la solution adaptée à la demande. Cette expertise inclut en premier lieu l'impératif financier qui doit être optimisé au regard de l'ensemble de l'opération (et non seulement sur le coût d'acquisition).

Sur le maintien en condition opérationnelle

Là encore, l'expertise du professionnel de la maintenance sera de proposer la bonne formule et le bon mélange entre les différents types de maintenance (préventive, prédictive ou curative) de manière à obtenir un taux d'utilisation maximal de l'équipement, dans les meilleures conditions, notamment financières.

La maintenance préventive se compose en général d'opérations lourdes qui doivent être programmées durant les créneaux d'arrêt de la production. Cela implique une détermination de ces périodes dans une planification à long terme qui permet de limiter au maximum les effets financiers de l'indisponibilité du matériel.

La maintenance préventive est elle aussi prévue à l'avance mais se compose d'opérations plus légères avec des arrêts qui peuvent être intégrés dans des périodes de production. Cette forme de maintenance a pour objectif premier de maintenir l'outil de production à niveau et de limiter les arrêts non maîtrisés. En ce sens, la maintenance préventive se conçoit comme un outil de gestion de risque dans la politique de maintenance : il s'agit de prendre une option financière entre une dépense maîtrisée (arrêt à une date prévue et maintenance à un coût maîtrisé) ou le

risque d'une panne intempestive (panne potentiellement plus difficile et arrêt inopiné de la production à un moment qui peut être très préjudiciable). L'expertise du réparateur de matériel électrique sera d'utiliser la meilleure formule pour qu'au final la solution retenue soit financièrement la meilleure.

Enfin, la maintenance curative sera celle consécutive à une panne inopinée. La seule question qui se pose dans ce cas est la remise en marche la plus rapide du matériel électrique, dont le rôle dans le process de production est très fréquemment critique. Aussi, la principale qualité que pourra développer le réparateur pour optimiser la facture du client sera sa réactivité et son savoir-faire technique pour remettre la production en marche dans les meilleurs délais et réduire ainsi la perte financière liée à l'arrêt des machines. Il s'agit là de la compétence historique de la profession toutefois une analyse financière globale souligne à quel point il est important d'avoir sur ce sujet une vision globale pour éviter cette extrémité qui est souvent la plus coûteuse.

En somme, l'évolution du métier de la maintenance de matériel électrique liée aux progrès techniques

(possibilités technologiques de suivi à distance, etc.) confèrent un rôle considérable au réparateur. Son positionnement le conduit désormais à capitaliser sur ses compétences techniques pour les mettre au service d'une analyse financière de l'opération de production de son client. Cela s'inscrit parfaitement dans la logique de l'évolution de la pratique professionnelle de la maintenance qui n'est plus une série d'actes isolés (solution qui peut perdurer mais s'avère coûteuse) et qui évolue de plus en plus vers une conception globale de l'installation vue depuis son installation qui doit être adaptée, jusqu'à la gestion optimisée de sa maintenance durant toute sa durée de vie afin d'en optimiser les coûts et d'en maximiser la performance.

C'est avec l'ensemble de ces leviers que devra composer, de plus en plus, le réparateur de matériel électrique demain. C'est aussi cette compétence unique qui constituera, certainement, une partie importante de sa valeur ajoutée.



Partie 2

**Le métier
d'aujourd'hui**



De la noblesse aux systèmes numériques

A l'origine de la profession de réparateur, l'expertise unique du bobinier ! Ce métier, varié et rigoureux « ne connaît pas la crise ». Il y perdure l'amour du travail bien fait, travail manuel par excellence dont la perfection est comparable à celle de l'artiste.

Aujourd'hui, les entreprises de service et de maintenance de matériel électrique s'appuient largement sur ce savoir-faire et le complètent avec des compétences et des technologies nouvelles pour proposer à leur clients une réponse toujours plus adaptée à leurs besoins. L'expertise globale de leurs équipes couvre désormais l'ensemble des systèmes d'entraînement électromécaniques et même électroniques...



du cuivre d'entraînement

Sommaire de la partie 2 :

- > Bobinier : un savoir-faire unique
- > Réparateurs de machines tournantes : un savoir-faire associé à un savoir-être
- > L'alliance de la motorisation et de l'électronique de puissance

Bobinier : un savoir-faire unique



Intervenant généralement à l'occasion d'un dysfonctionnement, le bobinier, métier ouvert tant aux femmes qu'aux hommes, intervient sur tout ou partie d'une machine tournante électrique (moteur et/ou générateur). Cet électrotechnicien qualifié utilise principalement son expérience et son savoir-faire pour, après un diagnostic et un repérage rigoureux, réparer ou réhabiliter la machine qui lui est confiée, le plus souvent sans les plans d'origine ! Ce savoir-faire unique représente un engagement fort permettant d'assurer un ensemble de services (conseil, expertise, interventions sur site, maintenance préventive...) indispensables à la pérennité des systèmes d'entraînement.

« Bobinier est un métier où l'on ne s'ennuie jamais tellement est grande la variété des moteurs à réparer », se plaît à répéter Serge (Bobinier à Agen) en expliquant effectuer, en atelier, un ensemble d'opérations dont la première consiste au brûlage du moteur afin de durcir et rendre cassant le vieux vernis enduisant la bobine. « Ça permet d'en faciliter l'extraction car, ajoute Pascal (Pulnoy 54), l'important c'est de démonter correctement un moteur pour bien le réparer. »

Après le découpage des chignons et l'extraction des bobines insérées dans les encoches, l'état des paquets de tôles magnétiques est contrôlé ainsi que leur alignement, chaque encoche étant, ensuite, soigneusement nettoyée à la brosse. Ensuite, les encoches sont isolées en y insérant, avec précision, des cales isolantes dans chacune d'elles. Trapézoïdales au demi-rondes, elles sont réalisées en bois, en hêtre, en fibre de verre ou en polyester.

La perfection du geste

C'est à ce niveau que le bobinier se révèle être un artiste qui s'exprime avec le cuivre et joue de la perfection du geste. Suite à un repérage initial des anciennes bobines, il sélectionne le fil électrique et son pas (sa grosseur) en rapport avec le nombre de tours de fils à passer autour du noyau central. Il en règle la tension et se sert généralement d'un tour à bobiner pour enrouler le fil autour du noyau. Durant cette délicate opération, il veille à recouvrir la bobine d'une ou plusieurs couches d'isolant. « *La parfaite isolation des moteurs étant fondamentale, il convient de bien choisir les isolants appropriés* », précise Jérôme (Bordeaux). Dans l'ensemble, c'est au moins dix années d'expérience.

Ensuite, le tricotage et la fixation des bobines illustrent « *la concentration et la minutie qu'impose le métier* », considère Cédric (Agen), en confiant photographier ses bobinages « *tellement ils me paraissent beaux* ».

Après la soudure de toutes les connexions entre elles, les différentes connexions des bobines sont préparées avant la soudure à l'étain vers les conducteurs d'alimentation. Est ajoutée une gaine thermique permettant d'assurer l'isolation des conducteurs d'alimentation repartant, après tricotage, vers la plaque à bornes. Un vernis est imprégné sous vide dans le bobinage du moteur, ce dernier étant ensuite chauffé afin de fixer le vernis. Cette opération consiste, généralement, en une polymérisation en étuve (à 170°C pendant 2h). Enfin, différents tests sont effectués (principalement électriques) afin de s'assurer que le moteur a récupéré l'ensemble de ses performances pour retrouver un fonctionnement optimal... avant la fermeture du moteur dont la carcasse aura été, préalablement, nettoyée et repeinte, tandis que peuvent être changés les roulements.

« *Le moteur et le bobinage représentent le tronc commun de notre savoir-faire* », conclut Aldo (Le Meux-60). Au regard du parc installé, « *il nous faut le conserver et le développer pour apporter des solutions performantes aux prix du marché, accompagnées des services de proximité associés.* » Même si, bien souvent, les réponses à fournir relèvent des « *moutons à 5 pattes* ».

Les outils au service du bobinier 1/2

Pour exercer au mieux son métier, le bobinier dispose d'une panoplie d'outils dont les principaux sont rappelés ci-dessous.

- **le pousse-bobinage** presse le bobinage inséré dans le stator d'un moteur électrique afin de pouvoir glisser les fermetures et cales d'encoche.
- **le serre-bobinage** serre le bobinage inséré dans le stator afin de pouvoir glisser les fermetures et cales d'encoche.
- **le poussoir d'isolation et de fil** permet d'introduire les fils dans l'encoche afin de poser proprement les fermetures et cales d'encoche.
- **la pince à enfiler les fermetures d'encoche**, caractérisée par des mâchoires bombées et une surface de pincement striée, garantit un bon maintien des fermetures d'encoche lors de leur mise en place.
- **l'outil de mise en forme de bobines**, réalisé en nylon préformé, aide à la mise en place des fils dans les encoches ainsi qu'au façonnage et à l'enrubannage des têtes de bobines.
- **la cisaille à cales d'encoche** coupe proprement tous les profilés de cales d'encoche en bois.

Les outils au service du bobinier 2/2

- une série de **marteaux à bobinage** sont utiles à la réalisation de divers travaux lors de la mise en place et du façonnage des bobinages.
- une série de **scies manuelles** pour collecteurs permet de dégager l'isolation au mica logée entre les lames de collecteurs.

Et encore... les tassoirs d'encoche, les mortaiseurs d'encoche, les grattoirs et brosses de nettoyage d'encoches, les limes d'encoche, les chasse-cales d'encoche, les aiguilles à enrubanner, divers ciseaux manuels, des pinces à gratter le vernis, des tournevis à collet et, pour écrous à fente, une série de clés à douilles triangulaires et à douilles hexagonales, des pinces de préhension et d'arrachage, des pinces d'extraction et des extracteurs, des gabarits de bobinage...

Un nouvel outil : la tablette tactile

A partir des repérages et des relevés dimensionnels, le bobinier établit traditionnellement une fiche de suivi portant sur la réparation de chaque moteur. Meticuleusement, il consigne les informations recueillies dans une série de carnets qu'il conserve jalousement.

Alors que s'introduisent les PC et tablettes tactiles dans les ateliers, « ne serait-il pas envisageable de réunir l'ensemble de ces informations dans une banque de données sécurisée afin de mieux se les partager entre bobiniers ? » s'interrogent certains, avant d'ajouter que cela constituerait un outil intéressant de mutualisation et de préservation des connaissances au sein de la profession.



Réparateurs de machines tournantes : un savoir-faire associé à un savoir-être



Dans un contexte général d'exigences accrues de réactivité, de flexibilité et de productivité, la maîtrise de la fonction « maintenance » est devenue déterminante pour les réparateurs de machines tournantes. Associée à leur expertise, leur proximité des clients favorise cette indispensable réactivité consistant à leur répondre dans les meilleurs délais, d'autant plus que ces derniers disposent de moins en moins de services intégrés ! En s'appuyant sur leur savoir-faire, les réparateurs de machines tournantes sont donc de plus en plus des spécialistes du système d'entraînement dans son ensemble et déclinent, aujourd'hui, quatre expertises majeures (la réparation ; la maintenance ; le retrofit ; le service-conseil). Ils se forgent ainsi un nouveau savoir-être.

Au cœur des process industriels, les entreprises de service et de maintenance de matériel électrique disposent d'un savoir-faire reconnu, d'une expertise et d'une proximité créant un lien de confiance majeur avec leurs clients industriels. En effet, qui mieux que celui qui maintient et entretient les matériels électriques peut les conseiller sur leur optimisation, qu'elle soit énergétique, technique, voire économique. *« C'est pourquoi notre profession joue un rôle central dans l'efficacité énergétique industrielle »,* considèrent les réparateurs de matériels électriques pour lesquels *« l'électrotechnique représente un métier de « compagnons » ayant toujours à cœur de réaliser de la belle ouvrage ».*

Un vrai métier qui réunit, le soulignent-ils fièrement, *« à la fois un savoir-faire et un savoir-être »* appliqués tant à l'ensemble des moteurs électriques qu'à tous types de pompes ou ventilateurs et extracteurs, aux appareils de levage, aux groupes électrogènes... sans oublier certains équipements associés tels les armoires électriques de contrôle-commande dans lesquelles peuvent être également installés des automatismes et des systèmes de gestion et de supervision.

« Un métier indispensable puisque l'utilisation soutenue des machines tournantes électriques nécessite un besoin d'entretien régulier tout au long de l'année » poursuit la profession, d'où l'obligation de laisser opérationnels les ateliers même en période estivale.

Les systèmes d'entraînements sont le cœur de tout processus industriel. Aussi, être réactifs, savoir détecter la panne et la réparer dans toutes les circonstances et dans un délai le plus réduit possible constitue le savoir-faire et le savoir-être de la profession. Un métier de confiance puisqu'il est, de plus en plus, l'interlocuteur privilégié des entreprises souhaitant déléguer une partie ou la totalité de la gestion et de l'entretien de leur parc de machines tournantes ou assurer l'optimisation de leur système d'entraînement (estimé à 12 millions de moteurs en France).

Du bobinage à la maintenance globale

Si, au niveau de la maintenance curative des machines tournantes, l'expertise des réparateurs porte essentiellement sur le bobinage et les essais sur plateformes, leurs compétences sont plus larges en maintenance prédictive sur site. Parmi ces compétences, citons principalement : les mesures et analyses des isolements ; l'index de polarisation ; l'écart réduit à la loi d'ohm ; le contrôle vibratoire en mesure globale ou en analyse spectrale ; le choc des roulements ; la thermographie infrarouge ; le profil des collecteurs ; les tests d'ondes... le tout concrétisé par l'archivage informatique de données, la création d'historiques et les traces et courbes de tendances. *« Dans tous les cas, pour optimiser la durée de vie des machines, un entretien régulier est indispensable »*, rappellent les adhérents du SIRMELEC.

Rappelons que deux méthodes complémentaires permettent d'organiser les actions de maintenance :

- *la maintenance corrective* (ou curative), consistant à intervenir sur un équipement une fois que ce dernier est défaillant. Elle se décline en maintenance palliative (dépannage provisoire) et en maintenance curative (réparation durable) ;
- *la maintenance préventive* (ou prédictive), consistant à intervenir sur un équipement avant que celui-ci ne soit défaillant afin de prévenir la panne. Elle se décline en maintenance systématique périodique, en maintenance conditionnelle (mesures et contrôles) et en une maintenance prévisionnelle (analyse de l'évolution de l'état de dégradation). Rappelons que plus de la moitié des arrêts de production résultent de dysfonctionnements pouvant être supprimés par une maintenance préventive.

Même avec une conception évoluée et la meilleure qualité de fabrication possibles, la disponibilité maximale d'un système ne peut être atteinte que si l'installation est exploitée en conséquence et que les travaux de maintenance sont régulièrement effectués par un personnel qualifié. C'est le cas de celui œuvrant au sein des entreprises de maintenance et de service de matériel électrique.

Dans ce contexte, l'entretien programmé de tout parc installé permet de garantir la continuité des flux de production et de prolonger la durée de vie des équipements, tout en assurant un retour d'investissement correct. En effet, il convient de rappeler que les incidents de fonctionnement intervenant au niveau des process industriels, en particulier au niveau de ceux fonctionnant en continu (flux tendu, production de matières périssables...), peuvent avoir de graves conséquences. D'où la nécessité d'effectuer les justes diagnostics pour déterminer rapidement les solutions permettant le redémarrage.

Aborder une panne dans son intégralité

De plus en plus, les contrats de maintenance conclus portent sur l'entretien préventif des machines, le dépannage 24h/24, 7jours/7, l'astreinte, l'assistance téléphonique en dehors des heures ouvrables, ainsi que les week-ends et les jours fériés, le recours à une *hotline*, la télésurveillance. Au niveau logistique, outre la disponibilité de camions-plateaux permettant l'enlèvement des machines sur sites, les entreprises de maintenance disposent d'une flotte de véhicules-ateliers chargés de se rendre sur les chantiers d'installation, sur les sites industriels, dans les collectivités et même chez les particuliers.

Ces moyens permettent d'organiser les interventions selon les besoins et contraintes des clients pour aborder une panne dans son intégralité : diagnostic et résolution d'un défaut électrique; réaligement d'une machine; changement de roulements sur place.

Avant d'intervenir les conditions de travail et les risques sont analysés. Puis, sont étudiées les alternatives afin de choisir l'option la plus sûre pour le personnel, l'environnement et les résultats attendus. Enfin, les équipes et moyens logistiques qui représentent les atouts des entreprises de service et maintenance de matériels électriques leur permettent de réagir efficacement dans toutes circonstances et avec une grande réactivité.



L'alliance de la motorisation et de l'électronique de puissance



Dans le domaine des machines tournantes, l'expérience des entreprises de service et maintenance de matériel électrique leur permet d'évaluer les caractéristiques idéales de l'équipement les mieux appropriées à chacune des applications. C'est notamment le cas au niveau des variateurs de vitesse, ces professionnels apportant diagnostic, conseil, installation, mise en service, maintenance et dépannage.

Depuis l'invention du moteur, les variateurs de vitesse n'ont cessé d'évoluer. Les premiers utilisaient un système mécanique de poulie-courroie. Généralement, il y avait un variateur par atelier mais, très vite, les machines ont toutes été dotées de leur propre variateur à friction ou à engrenage. Par la suite, la maîtrise du courant continu a permis au variateur électrique de voir le jour. Quant aux variateurs électroniques, ils sont apparus dans les années 1950 avec l'avènement des composants électroniques... utilisant des tubes de gaz.

Aujourd'hui composés de convertisseurs statiques (onduleurs) et d'une électronique de commande pour la régulation et l'asservissement de la machine, les variateurs de vitesse électroniques sont omniprésents dans les bâtiments industriels et tertiaires. « Ils permettent de préserver la longévité et la qualité des machines et des équipements mais aussi d'optimiser les coûts d'exploitation, notamment en réduisant les consommations énergétiques », rappelle la profession.

Dans les bâtiments tertiaires (déjà plus de 30%) comme dans les bâtiments industriels ou les infrastructures (70%), une grande partie de l'énergie consommée "fait tourner" les moteurs. L'implantation de variateurs de vitesse permet de limiter la consommation d'énergie au juste besoin et de réguler précisément les fluides dans le process et dans le bâtiment. Par exemple, un variateur de vitesse peut réduire la consommation des ventilateurs de 50 % par rapport aux solutions classiques (variation du débit par dispositif mécanique) et celle des pompes de 20 à 30 % selon leurs caractéristiques.

Avec l'avènement de l'électronique de puissance

Le développement de la technologie des semi-conducteurs a permis à la variation électronique de vitesse des moteurs asynchrones de supplanter les solutions traditionnelles (démarreurs rhéostatiques ; variateurs mécaniques ; groupes tournants dont les fameux Ward Leonard). En apportant de la stabilité et de la précision, en évitant les à-coups de pression et en supprimant les « *coups de bélier* », les variateurs de vitesse diminuent les « *stress* » mécaniques et, ainsi, contribuent à l'allongement de la durée de vie des équipements ; ce qui représente un impact positif direct au niveau la réduction de l'impact carbone.

La variation de vitesse pour économiser l'énergie

Quand l'énergie était bon marché, un moteur à courant alternatif à vitesse fixe représentait un moindre investissement. De plus, il est toujours possible d'obtenir des paliers de vitesse, et même une certaine plage à vitesse variable, en dissipant de l'énergie (résistances électriques ; freins à courants de Foucault ; coupleurs à glissement...).

Aujourd'hui et encore plus demain, le coût de l'énergie et les impératifs environnementaux obligent à rechercher l'efficacité maximale et valorise la variation de vitesse des moteurs à courant alternatif. En effet, tout calcul économique démontre que l'investissement lié au dispositif de variation de vitesse s'amortit en 3 ans environ.

Ainsi, *« dès lors, qu'un moteur à courant alternatif, synchrone ou asynchrone, est installé et que l'on souhaite régler et contrôler sa vitesse pour moins consommer d'énergie, il est possible d'interfacer, entre le réseau et le moteur existant, un équipement électronique de réglage de vitesse »*, précisent les spécialistes de la maintenance électrique, en rappelant que seulement 10 % des moteurs utilisés dans le monde sont équipés d'un tel équipement. Ces spécialistes de la maintenance connaissent précisément les besoins de leurs clients. Aussi, forts de leur expertise reconnue, ils savent apporter le juste conseil aux solutions les plus efficaces en termes énergétique, technique et économique.

Cas pratique

En utilisant un variateur de vitesse sur un moteur de 30 kW tournant 5 000 heures par an pour contrôler le débit d'air d'un système de ventilation, il est possible d'économiser, chaque année, 76 500 kWh d'électricité par rapport à une solution de régulation de débit.





Partie 3

Machines tournantes et électromagnétisme



Machines tournantes :

Transformant l'énergie électrique en énergie mécanique, les moteurs électriques, couramment dénommés « machines tournantes », entraînent une charge en rotation autour d'un axe.

Trois principaux types de moteurs sont aujourd'hui omniprésents dans toutes les branches de l'industrie et des transports, mais aussi au niveau des applications tertiaires et domestiques.

En France, on en compte 12 millions (contre 90 millions en Europe) faisant fidèlement « tourner » notre quotidien.

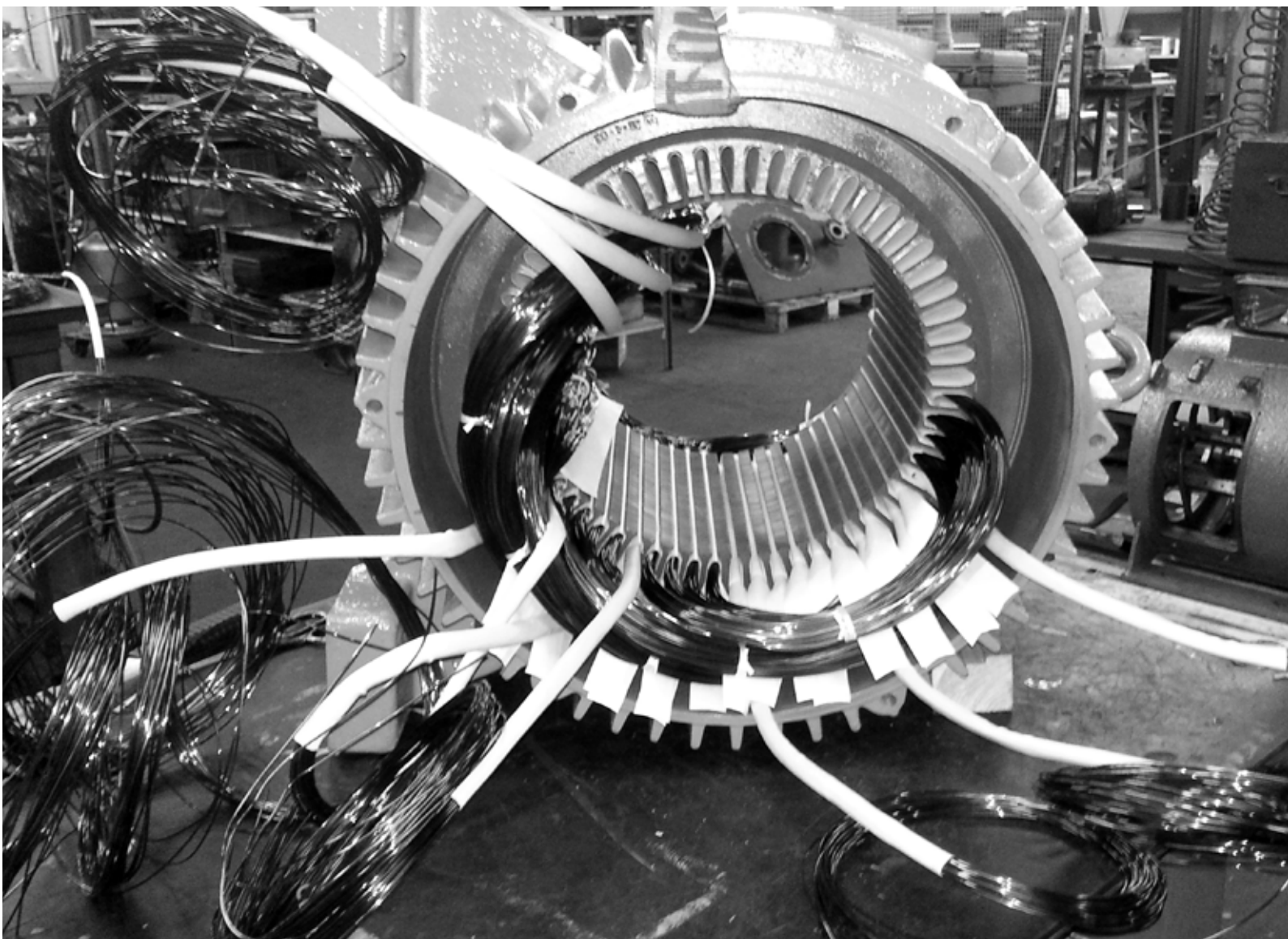


trois technologies dominant

Sommaire de la partie 3 :

- > L'asynchrone : le moteur industriel par excellence
- > Le synchrone : une évolution permanente au service de l'industrie
- > Moteur à courant continu

L'asynchrone : le moteur industriel par excellence



Le moteur asynchrone à courant alternatif représente la solution la plus répandue, son coût modéré et sa robustesse le rendant incontournable. De plus, de récents progrès menés dans les domaines de l'alimentation et du contrôle-commande en font une solution souvent retenue pour les machines à vitesse variable. Rappelons qu'il est constitué d'un enroulement bobiné réparti à l'intérieur d'une carcasse cylindrique faisant office de bâti. Cet enroulement est logé à l'intérieur d'un circuit magnétique supporté par la carcasse.

Connu également sous le terme anglo-saxon de machine à induction, le moteur asynchrone à courant alternatif, monophasé et triphasé est sans connexion entre le stator et le rotor. Comme toute machine d'entraînement, son fonctionnement repose sur le principe du champ tournant. En découlent plusieurs types de machines, mais, dans tous les cas, le principe du stator reste le même quelle que soit la machine.

Le seul moteur asynchrone d'usage pratique est celui dans lequel le circuit magnétique est associé à des circuits électriques se déplaçant l'un par rapport à l'autre et dans lequel l'énergie est transférée de la partie fixe à la partie mobile ou inversement, par l'induction électromagnétique. Représenté par son symbole normalisé général (figure 2.1) ou par deux autres symboles précisant s'il s'agit d'un moteur à cage d'écureuil (figure 2.2) ou d'un moteur à rotor bobiné (figure 2.3), le moteur asynchrone est constitué d'un stator et d'un rotor.

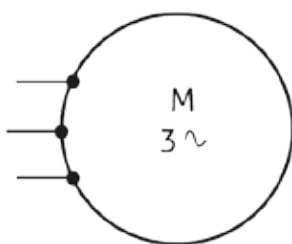


figure 2.1

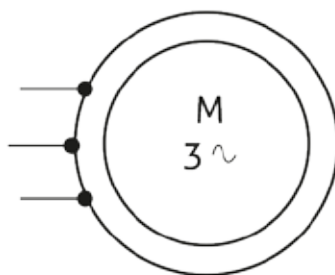


figure 2.2

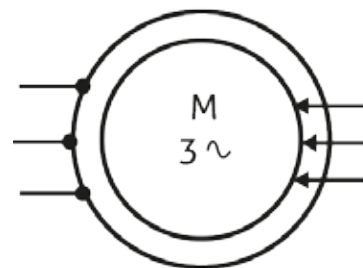


figure 2.3

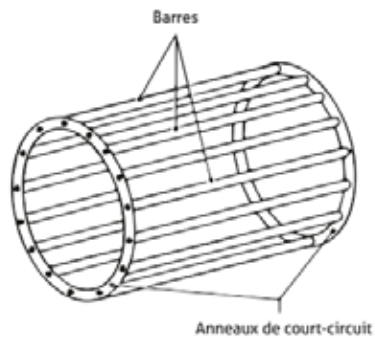


figure 2.4

Le *stator* est une carcasse en fonte ou en tôles d'acier dans laquelle est inséré un circuit magnétique formé d'un empilage de tôles. Le stator d'un moteur asynchrone triphasé porte un bobinage triphasé réparti dans des encoches du circuit magnétique et généralement couplé en étoile.

Le *rotor* singularise deux types de moteurs asynchrones. Dans les deux cas, le circuit magnétique du rotor est formé d'un assemblage de fines tôles ferromagnétiques, munies d'encoches, évitant la circulation de courants de Foucault. Le *rotor à cage d'écureuil* représente, de loin, la solution la plus courante. Les encoches contiennent des barres reliées aux deux extrémités par des anneaux de court-circuit, l'ensemble formant une cage, dite « d'écureuil » (figure 2.4), non accessible de l'extérieur, qui, en fait, est un bobinage de grosse section et de très faible résistance. Les barres sont réalisées en alliage d'aluminium, pour les machines de petites et moyennes puissances, et en cuivre pour les moteurs de forte puissance. Le *rotor bobiné* représente une solution réservée à des applications spécifiques. Les encoches présentes à la périphérie du rotor contiennent un bobinage similaire à celui du stator, toujours couplé en étoile. Il est accessible de l'extérieur grâce à un système de bagues et de balais.

Termes utilisés pour la réalisation de schéma de bobinages de moteurs asynchrones alternatifs

Présentation d'un moteur asynchrone : le rotor et le stator.

- **Sur le stator (fixe)** sont positionnés les enroulements alimentés en alternatif, monophasés ou triphasés. Ces enroulements permettent la génération d'un champ magnétique tournant. Les fils sont placés dans des encoches prévues à cet effet. A un instant donné, le passage du courant dans les fils est tel qu'il induit un magnétisme caractérisé, par la présence de pôles « Nord » et « Sud ». Les pôles doivent être régulièrement espacés sur le stator.
- **Le rotor (mobile)** est constitué d'une « cage d'écureuil » en aluminium en court-circuit et noyé dans un circuit magnétique feuilleté, pour les moteurs de puissance utile d'environ 10 chevaux. Il n'est pas pris en compte pour la réalisation d'un schéma. Pour une puissance utile plus importante, le moteur est surtout triphasé et le rotor est bobiné avec trois enroulements montés en « étoile ». Les extrémités des bobines sont raccordées à trois bagues conductrices. Les enroulements sont placés, eux aussi dans des encoches présentes sur le rotor ; la disposition des bobines est généralement la même que celles du stator.

Principaux termes utilisés

- **Brins actifs** : conducteurs insérés dans une encoche;
- **Faisceaux** : ensemble des brins actifs dans une encoche;
- **Spire** : deux brins actifs reliés d'une encoche à l'autre;
- **Bobine** (ou petite bobine, ou section) : ensemble de spires;
- **Groupe de bobines** : ensemble de bobines réalisées les une à la suite des autres sur un gabarit concentrique et reliées de fait en série;
- **Connexion** : liaison des groupe de bobines entre elles , en série ou parallèle;
- **Enroulement** (ou phase) : ensemble de groupes de bobines.

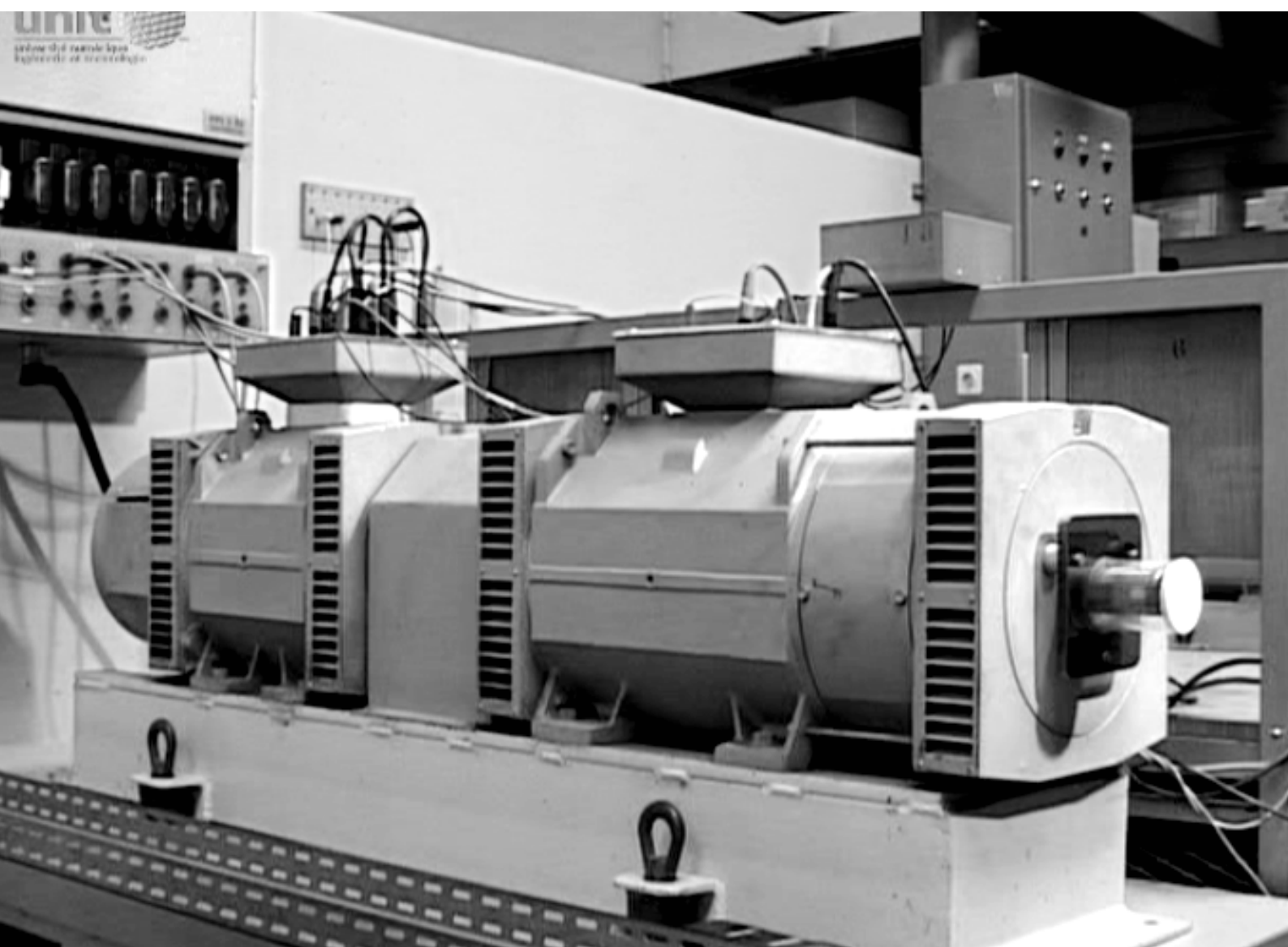
Les asynchrones pour quoi faire ?

Les moteurs asynchrones triphasés les plus utilisés pour l'entraînement des machines, s'imposent dans un grand nombre d'applications en raison des avantages qu'ils présentent : normalisés, robustes, simples d'entretien, faciles à mettre en œuvre et de faible coût.

Les moteurs asynchrones monophasés, bien que moins utilisés dans l'industrie que leurs homologues triphasés, représentent une part d'applications non négligeable dans les petites puissances et dans les applications du bâtiment qui utilisent le réseau monophasé 230 V. A puissance égale, ils sont plus volumineux que les moteurs triphasés. Par ailleurs, leur rendement et leur cosinus sont beaucoup plus faibles que dans le cas des triphasés et ils varient considérablement en fonction, d'une part de la puissance, d'autre part du constructeur.



Le synchrone : une évolution permanente au service de l'industrie



Le moteur synchrone est une machine à courant alternatif surtout appréciée pour ses applications en générateur (alternateur) où elle est presque sans concurrent. Cette technologie sert également de moteur dans un certain nombre de domaines où, ces dernières années, elle connaît un retour en force parallèlement au développement des variateurs de vitesse.

Depuis longtemps, les moteurs synchrones sont utilisés dans des applications de forte puissance à vitesse fixe ; mais les progrès réalisés dans le domaine de l'alimentation et de la commande leur permettent d'être aujourd'hui présents en vitesse variable. L'arrivée d'aimants performants a également conduit à développer des moteurs synchrones de petite et moyenne puissance. Associés à l'électronique, ils présentent des qualités analogues à celles des moteurs à courant continu... sans en avoir les inconvénients.

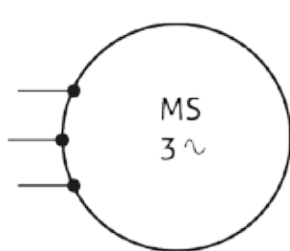


figure 2.5

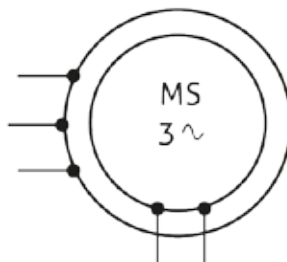


figure 2.6

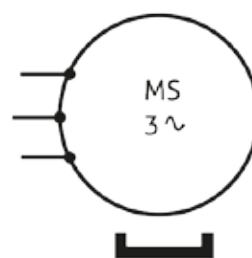


figure 2.7

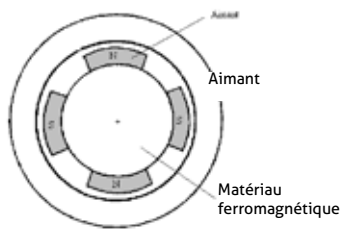


figure 2.8

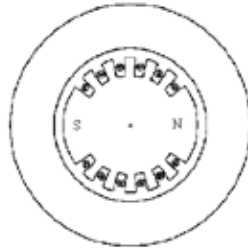


figure 2.9

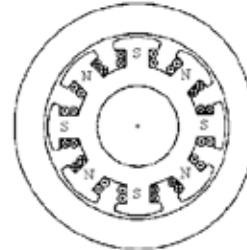


figure 2.10

Le moteur synchrone, représenté par son symbole général (figure 2.5) ou par un symbole précisant s'il possède un inducteur bobiné (figure 2.6) ou un inducteur à aimants permanents (figure 2.7), est constitué :

- d'un stator identique à celui du moteur asynchrone. Il comprend un circuit magnétique feuilleté portant un bobinage triphasé réparti dans des encoches ;
- d'un rotor pouvant prendre diverses formes car l'excitation peut être produite soit par des aimants permanents, soit par un bobinage réparti dans des encoches ou concentré sur des pôles saillants. Deux types de rotors existent : d'une part, le rotor à aimants dans lequel le rotor est feuilleté et comporte des aimants permanents, soit montés en surface (figure 2.8), soit intégrés ; d'autre part, le rotor bobiné qui peut être à entrefer constant (figure 2.9) ou à pôles saillants (figure 2.10), les encoches du stator n'étant pas représentées sur ces schémas simplifiés. Les rotors à pôles saillants sont adaptés aux machines multipolaires destinées aux vitesses de rotation basses ou moyennes.

Pas de lois de Laplace pour les moteurs synchrones

Dans la mesure où il n'y a pas, pour les moteurs synchrones, d'interactions de champ magnétique et d'intensité, les lois de Laplace ne s'appliquent pas.

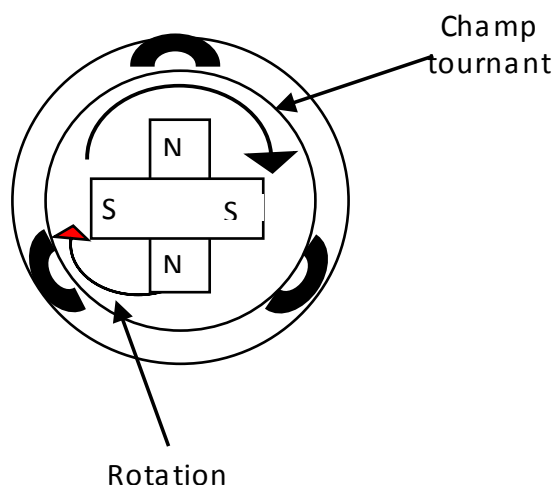
Il y a bien création de champ magnétique tournant, mais au lieu d'un rotor « à cage d'écureuil », il y a une série, soit d'électro-aimants, soit d'aimants permanents. Le rotor prend alors le nom de « roue polaire ».

Lorsque le champ tournant présente un pôle opposé face à un des aimants de la roue polaire, il y a attraction de celle-ci (éventuellement répulsion s'il y a présentation de pôles identiques). Le rotor va être entraîné à la même vitesse.

Généralement, ces types de machines sont des alternateurs (générateurs alternatifs), dont on utilise la réversibilité en les alimentant.

A noter : Il convient que ce type de moteur soit « lancé » pour qu'il y ait accrochage de la roue polaire.

Exemple : moteur triphasé synchrone.



Le cas particulier des moteurs *brushless*

Le défaut principal des moteurs à courant continu est la présence de balais qui engendrent des frottements et des parasites tout en limitant la durée de vie des moteurs à cause de leur usure. D'où le développement des moteurs *brushless* (ou moteurs sans balais) dans lesquels, à l'inverse des machines traditionnelles, le rotor est composé d'un ou plusieurs aimants permanents, tandis que le stator compte plusieurs bobinages. Il présente donc l'avantage de ne posséder ni collecteur, ni balais... source d'usure. Par ailleurs, léger, souple et fiable, il permet de réaliser de l'asservissement de vitesse et de position... la commutation électronique se substituant à la mécanique.

Caractérisés par des durées de vie pouvant atteindre plusieurs dizaines de milliers d'heures, par une forte constance de couple, par une puissance importante et une vitesse de fonctionnement pouvant atteindre jusqu'à 50 000 tours par minute, deux types de moteur *brushless* dominant :

- *moteurs brushless outrunner* dans lesquels le rotor est construit autour du stator. Ils sont principalement utilisés dans les ventilateurs et disques durs... ainsi que dans les moyeux de vélos électriques ;
- *moteurs brushless inrunner*, le rotor étant situé, à l'inverse des machines précédentes, à l'intérieur du stator. Ce type de moteur *brushless* est largement utilisé dans l'industrie car il est similaire à un moteur à courant continu équipé de balais et d'un collecteur.

Ces moteurs sont notamment utilisés dans le métier de la robotique, pour transmettre les mouvements de chaque axe des robots. Ils sont pilotés par des codeurs, ce qui leur permet une très grande précision et donc d'être utilisés par les centres d'usinage. Leur fort couple à basse vitesse les rend également utiles dans les moyens de transport comme moteur de traction.

Les synchrones pour quoi faire ?

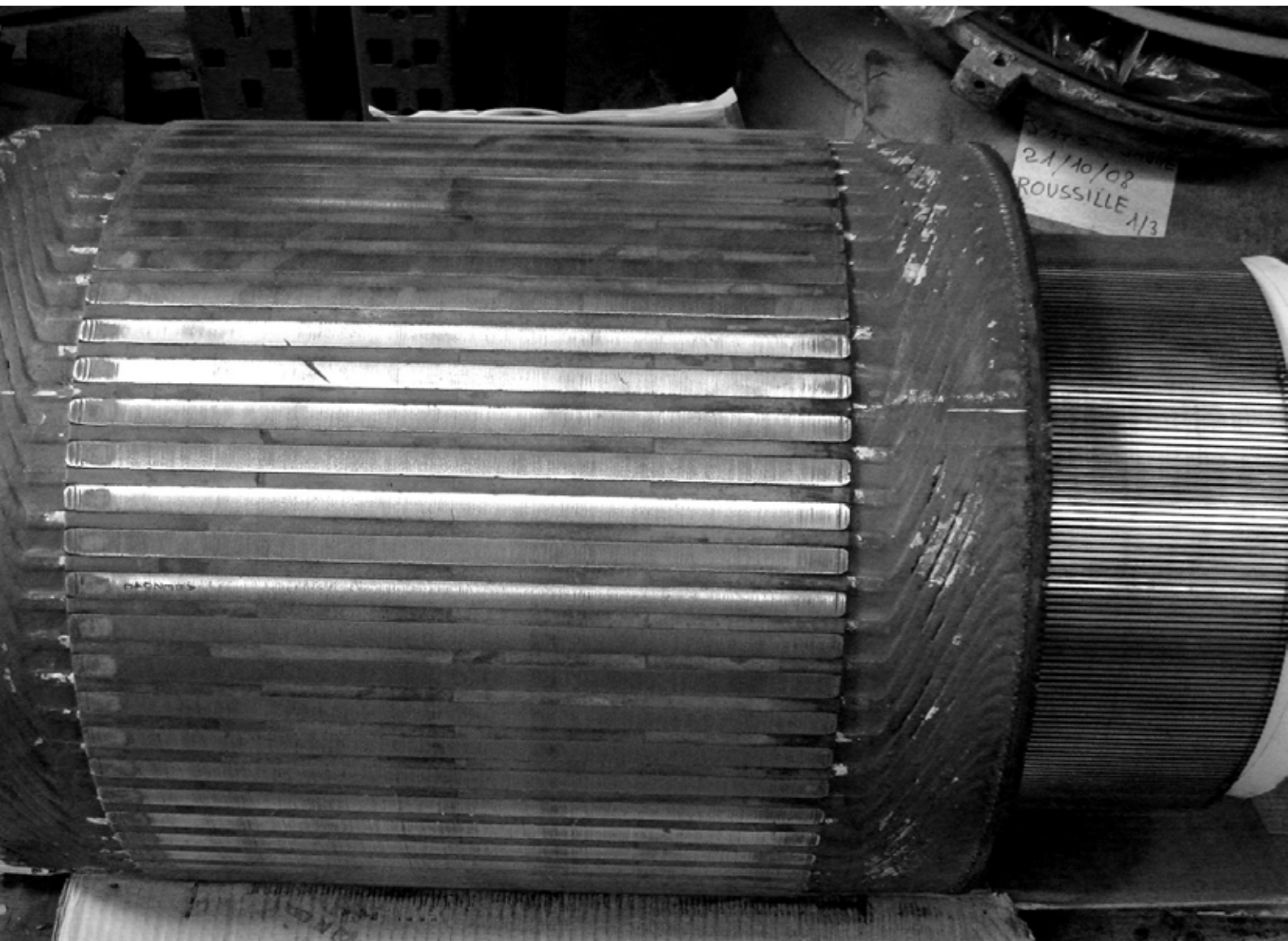
Pendant longtemps, les machines synchrones ont surtout été utilisées en alternateurs. Leur usage en moteur était pratiquement confiné aux applications nécessitant d'entraîner des charges à vitesse fixe en dépit des variations relativement importantes de leur couple résistant.

Le développement des convertisseurs de fréquence directs ou indirects, fonctionnant en commutation naturelle grâce à l'aptitude des machines synchrones à fournir de la puissance réactive, a permis la réalisation d'entraînements électriques à vitesse variable performants, fiables et particulièrement compétitifs par rapport aux solutions concurrentes lorsque la puissance dépasse le mégawatt.

Bien que l'on puisse trouver des moteurs synchrones utilisés industriellement dans la gamme de puissance de 150 kW à 5 MW, c'est au-delà de 5 MW que les entraînements électriques utilisant des moteurs synchrones se sont pratiquement imposés, majoritairement associés à des variateurs de vitesse.



Moteur à courant continu



Longtemps, le moteur à courant continu a représenté la principale solution pour obtenir une vitesse variable, au regard de la simplicité de sa commande, et malgré son coût élevé ainsi que la maintenance nécessitée par les balais frottant sur le collecteur. Aujourd'hui, même si les moteurs à courant alternatif sont préférés dans la plupart des applications, nous ne pouvons passer sous silence cette machine encore présente dans un certain nombre d'équipements.

Représenté par son symbole normalisé (figure 2.11), un moteur à courant continu est constitué, d'un stator et d'un rotor séparés par un entrefer, deux dispositifs particuliers étant toutefois nécessaires à son fonctionnement : le collecteur et les balais (figure 2.12).

Le *stator* est, dans ce cas, muni de pôles saillants portant un enroulement d'excitation (ou inducteur), alimenté en continu (voir encadré ci-dessous). Il peut aussi être muni de pôles de commutation disposés entre les pôles inducteurs. Pour les petites machines, l'enroulement d'excitation peut être remplacé par des aimants permanents.

Le *rotor* est formé d'un circuit magnétique feuilleté comportant des encoches dans lesquelles sont placés des conducteurs pour former l'enroulement d'induit, ce dernier étant relié au collecteur constitué de lames conductrices isolées. Enfin, les connexions avec le générateur alimentant le moteur se font par l'intermédiaire de contacts mobiles : les balais, solidaires du stator, frottant sur le collecteur lié au rotor.

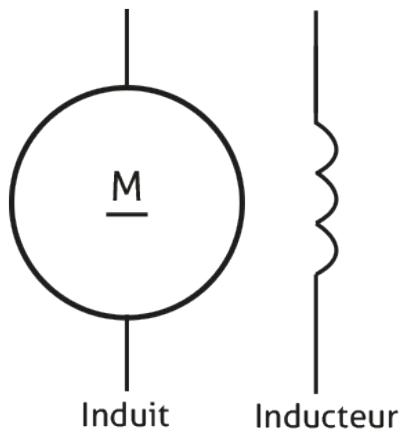


figure 2.11

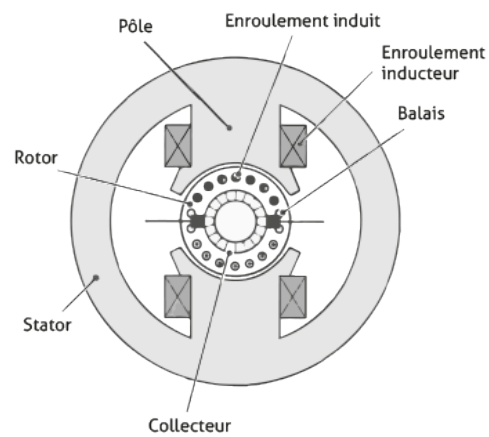


figure 2.12

Longtemps, le moteur à courant continu a représenté la machine à vitesse variable par excellence. De plus en plus remplacé par des moteurs à courant alternatif dans les applications industrielles, il demeure toutefois encore présent dans certaines réalisations. Et il le restera encore pendant de nombreuses années compte tenu de la durée de vie parfois assez longue des installations.

Dans les applications industrielles, c'est le moteur à excitation séparée qui est le plus utilisé : on le rencontre dans des domaines tels que le levage, le pompage, etc. L'application principale du moteur à excitation série est la traction ferroviaire. En France, la grande majorité des locomotives a longtemps utilisé cette solution (jusqu'au TGV sud-est).

Modes d'excitation

L'inducteur d'un moteur à courant continu peut être connecté de diverses façons. La machine est à excitation séparée (ou indépendante) quand l'inducteur et l'induit sont reliés à des sources différentes. La machine est à excitation liée lorsque l'inducteur et l'induit sont alimentés à partir de la même source. Trois possibilités existent alors : l'excitation parallèle (inducteur et induit sont branchés en parallèle), l'excitation série (inducteur et induit sont branchés en série) et l'excitation composée (un premier inducteur est en série avec l'induit et un second inducteur est en parallèle).

En pratique, seules deux solutions sont habituellement retenues : l'excitation séparée pour la plupart des applications industrielles de puissance modérée et l'excitation série dans des cas particuliers comme autrefois la traction ferroviaire.

Les « courant continu » pour quoi faire ?

Les moteurs à courant continu à excitation séparée sont encore quelquefois utilisés pour l'entraînement à vitesse variable des machines. Très faciles à miniaturiser, ils s'imposent dans les très faibles puissances et les faibles tensions. Ils se prêtent également fort bien, jusqu'à des puissances importantes (plusieurs mégawatts), à la variation de vitesse avec des technologies électroniques simples et peu onéreuses pour des performances élevées (plage de variation couramment exploitée de 1 à 100).

Leurs caractéristiques permettent également une régulation précise du couple, en moteur ou en générateur. Leur vitesse de rotation nominale, indépendante de la fréquence du réseau, est aisément adaptable par construction à toutes les applications. Ils sont en revanche moins robustes que les moteurs asynchrones et beaucoup plus chers, tant en coût matériel qu'en maintenance, car ils nécessitent un entretien régulier du collecteur et des balais.

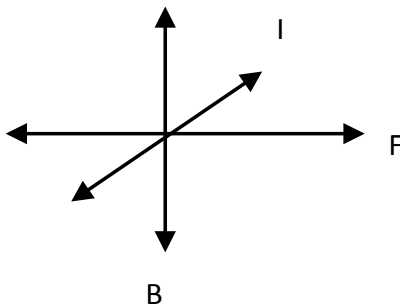


**Postface :
un peu d'histoire**

En physique, l'électromagnétisme est à la base de l'électrotechnique. C'est au cours de la moitié du 18^{ème} siècle que le rythme des découvertes expérimentales portant sur l'électricité s'est accéléré, notamment en électromagnétisme qui est à la base de l'électrotechnique. En particulier, elle est à l'origine des moteurs électriques, les grandes évolutions s'étant échelonnées durant la première moitié du XIX^e siècle. Petit historique...

« Il était une fois... », en 1784, le marquis Pierre-Simon de **Laplace** introduisait le principe du potentiel électrique. Ensuite, ses travaux déterminèrent **que la conversion de l'énergie électrique en énergie mécanique des machines tournantes repose sur une force (dite de Laplace) subie par un conducteur parcouru par un courant et placé dans un champ magnétique.**

Loi de Laplace : Règle des « 3 doigts »



Il est possible de connaître le sens des effets par la règle des trois doigts disposés à 90° l'un des autres :

Pouce = champ magnétique
Index = intensité
Majeur = force

De la main gauche pour les moteurs
De la main droite pour les générateurs

> Si deux éléments sont imposés, il y aura induction et création du troisième :

B, I imposées → F générée → Moteur

B, F imposées → I induite → Génératrice

F, I imposées → B générée → Non utilisé

En 1819, le physicien danois Hans Christian Oersted découvre **l'effet magnétique du courant électrique** en observant qu'une aiguille aimantée, placée à proximité d'un conducteur, dévie quand on branche ce dernier sur une pile. Un peu plus tard, en 1831, le physicien britannique Michael Faraday établit les lois qui régissent

les phénomènes **d'induction**. Par la suite, le physicien écossais James Clerk Maxwell formalise les lois de **l'électromagnétisme** en mathématisant les résultats obtenus plus tôt par Faraday. En 1864, il publie les équations qui portent aujourd'hui son nom.

Si les historiens ont quelques incertitudes sur la paternité des premières réalisations de machines électriques, citons néanmoins quelques noms et quelques dates de cette aventure industrielle :

1821 Michael Faraday réalise un premier **moteur électromagnétique** ;

1822 Peter Barlow invente un dispositif portant aujourd'hui son nom, **la roue de Barlow** ;

1834 le physicien prussien Moritz Hermann von Jacobi réalise **un moteur à inducteur bobiné** et à commutateur mécanique commençant à ressembler aux machines actuelles. Professeur en Russie, il fait circuler un canot à hélice, équipé de son moteur, sur la Neva, à Saint-Pétersbourg ;

1856 l'industriel allemand Werner von Siemens construit une **magnéto** ;

1859 l'Italien Antonio Pacinotti introduit une machine munie d'un **rotor en forme d'anneau**. Cinq ans plus tard, il publie la description d'une machine pouvant être utilisée en moteur ou en générateur. Ses travaux passent alors inaperçus ;

1868 l'inventeur belge, installé en France, Zénobe Gramme, construit sa célèbre **dynamo**. La réversibilité de la dynamo est découverte en 1873 ;

1872 Werner von Siemens dépose un brevet pour son induit en tambour tandis que Nikola Tesla, alors étudiant, propose une machine sans commutateur. Devenu employé de la Continental Edison Company, en France, il construit le premier **moteur asynchrone** en 1883 alors qu'il séjourne à Strasbourg et dépose un brevet en 1884.

Les moteurs traditionnels utilisés aujourd'hui étaient donc déjà connus à la fin de XIX^e siècle, la connaissance théorique du fonctionnement de ces machines continuant toutefois à progresser.

Des moteurs de toutes puissances

La puissance des moteurs électriques peut aller de quelques fractions de watts à quelques centaines de mégawatts :

- les très petites puissances correspondent à des machines où la transmission d'information prime sur la conversion d'énergie ;
- les petites puissances se rencontrent principalement dans les applications domestiques, notamment au niveau de nos indispensables appareils ménagers ;
- au niveau des applications industrielles (y compris les transports), existe un large éventail de machines permettant, quel que soit l'usage, d'atteindre des niveaux de rendement toujours plus performants tout en améliorant la consommation énergétique ; ce, même dans les conditions les plus exigeantes.

Si les moteurs électriques utilisés dans l'industrie sont essentiellement des machines à courant alternatif, les moteurs à courant continu ont longtemps été utilisés dans les applications à vitesse variable. Étant impossible, en quelques pages, de décrire l'ensemble des types de moteurs existants, nous nous limiterons donc aux trois principales technologies (asynchrones ; synchrones ; courant continu) en comparant les avantages et les inconvénients de chacune.

Soulignons enfin que les machines tournantes électriques sont réversibles. Elles peuvent, également, fonctionner en générateur ; c'est-à-dire transformer l'énergie mécanique en énergie électrique.



CONCLUSION

Un métier d'hier, d'aujourd'hui et encore plus de demain !

Tous les jours chacun de nous peut constater, dans son quotidien et au-delà, à quel point les technologies de l'énergie, de l'électronique et du numérique bouleversent toutes nos activités et ouvrent le champ des possibles.

Cela est particulièrement vrai dans le monde économique où ce que les observateurs nomment déjà la troisième révolution industrielle est à l'œuvre dans toutes les activités professionnelles sans exception.

Dans ce contexte, les professionnels du service et de la maintenance de matériel électrique se sont lancés dans une grande démarche à la fois introspective puis prospective afin de se positionner dans ce mouvement et de tenter d'anticiper les grandes évolutions à venir. Cette réflexion, issue de nombreuses interviews de dirigeants et de salariés de la profession comprend plusieurs moments forts.

En premier lieu, il convient de souligner quelques notions qui peuvent caractériser notre métier. Il s'agit d'une profession qui se fonde sur un héritage ancien et noble et qui reproduit, cultive

et enrichit un véritable savoir-faire ainsi que l'amour du travail bien fait et un certain savoir-être renforcé par le sens de la proximité et du service clients.

Ces principes constituent le patrimoine commun des entreprises de service et de maintenance de matériel électrique et plus particulièrement des adhérents du SIRMELEC. C'est en quelque sorte notre ADN : nous en sommes collectivement très fiers et nous sommes particulièrement attachés à la préservation de cet acquis.

Pour autant, notre profession vit également pleinement ancrée dans le présent et a le regard tourné vers l'avenir. Ainsi, les évolutions des besoins des clients nous conduisent à ajuster en permanence notre fonctionnement pour apporter la réponse la plus adaptée. Désormais, le client ne veut plus seulement un service, il réclame la satisfaction d'un besoin... Il a besoin d'une installation répondant à tels impératifs techniques, ou de réduire la consommation énergétique de son système d'entraînement, ou de limiter ses coûts, ou plus généralement un mix de toutes ces thématiques.

Un seul interlocuteur réunit toutes les compétences nécessaires pour apporter une réponse adéquate à ce besoin : l'entreprise de service et de maintenance. Il a une connaissance approfondie du besoin du client, grâce à sa proximité, il a une expertise technique incontestable sur les systèmes d'entraînements, sur les aspects électriques et de plus en plus dans les domaines connexes de l'électronique et de l'automatisme. Enfin, il a également une conscience accrue des enjeux sociétaux et notamment environnementaux et est en mesure de proposer au client la solution la plus adaptée qui répond à son besoin au coût le plus ajusté possible.

C'est pour cette raison que les professionnels du service et de la maintenance se positionnent comme les acteurs incontournables de la prescription, du conseil et de l'optimisation des systèmes d'entraînements et de pilotage de leurs clients industriels. Ils sont à ce titre des acteurs incontournables de l'usine du futur.

Faire fructifier notre héritage fondé sur un savoir-faire et une réactivité uniques, se former aux outils électroniques et

numériques de demain et les intégrer dans notre champ d'action, conserver notre proximité avec nos clients et la confiance accumulée au fil des ans et être force de propositions pour innover et conseiller au mieux nos clients : tels sont les défis auxquels nous devons faire face.

Cet ouvrage, fruit d'un an de travail avec les acteurs majeurs du métier, membres du SIRMELEC, livre les réflexions d'une profession sur son présent et son avenir. Notre avenir est entre nos mains. Les machines tournantes, la transformation de l'énergie, les systèmes d'entraînements et de pilotage sont le cœur de notre économie et nous sommes en charge de toujours mieux les maintenir et les optimiser. Notre profession est consciente de son rôle et saura s'appuyer sur ses valeurs et son expertise pour y parvenir.

REMERCIEMENTS

Le présent ouvrage n'aurait pu être réalisé sans la participation active de nombreux intervenants.

Nos remerciements vont plus particulièrement à Monsieur Jacques DARMON qui a su mener à bien les entretiens réalisés auprès de nombreuses entreprises du SIRMELEC et a puisé dans l'ancrage historique fort de la profession pour broser les grands traits qui la caractérisent dans sa réalité et dans ses aspirations pour l'avenir.

Nous tenons également à souligner l'apport décisif de l'ensemble des membres adhérents du SIRMELEC qui grâce à leur implication et leur action collective ont permis à cette réflexion stratégique de se développer et s'épanouir pour aboutir à ce document, et notamment :

Son Président, Jérôme SIAT (Groupe ALPHITAN)
et son Délégué Général, Yoann KASSIANIDES.

Les membres de son Conseil d'Administration :

- Ludovic CARDOT,	Groupe LUVICA
- Marie-France CHARLES,	CONTIREP
- Dominique COURTILLE,	CRB
- Christophe DEBENDERE,	Flipo-Richir
- Jean-Louis PERRIN,	JST Transformateurs
- Georges REDREGOO,	RMEI
- François SIMON,	TSV

Les adhérents et membres associés:

- Stephane ANDRE,	SEDEMA
- Patrick BOUCHE,	Electric Service
- Jacques BUREAU,	QUIRION
- Jean-Bernard CHOMBART,	SNT Duriez
- Paul DUCASSE,	Pôle MEDEE
- Agnès FERRET,	Ets Pierre MEIJE
- Jean-Marie HACQUET,	Hacquet SAS
- Frédéric LACAMBRA,	Transfo Services
- Pascal LASVERGNAS,	Ribiere SA
- Catherine MOLLE-EPAIN,	Laboratoire Oksman-Seraphin
- Eric MOREAU,	ESO (Leroy-Somer)
- Alain PELLETIER,	Ets LESCURE
- Laurent PLESANT,	Synflex
- Michel RAVEY,	Ravey SAS
- Gilles SORIN,	ABS
- Stéphane WALKIEVICZ,	Dossot SA

Entreprise membre du SIRMELEC



SIRMELEC

SERVICE & MAINTENANCE
DE MATÉRIEL ÉLECTRIQUE

www.sirmelec.fr