

Électrotechnique : du sens des évolutions technologiques aux problématiques d'enseignement

par Bernard CALMETTES
IUFM - avenue Henri Martin - 46000 Cahors

Les objectifs de cet article sont :

- d'abord de faire un point dans les domaines de la recherche et de l'industrie sur une partie d'un secteur important de l'économie française et européenne¹ : l'électrotechnique,
- ensuite de poser quelques questions relatives à l'enseignement de l'électrotechnique, à travers la physique appliquée, notamment au niveau de la classe de terminale.

L'électrotechnique concerne les dispositifs électriques permettant de produire et de transformer l'énergie électrique.

On s'intéresse plus spécialement aux machines électriques et aux ensembles techniques (domaine appelé anciennement électromécanique) dans lesquels elles se trouvent. Les grands domaines dans lesquels l'électrotechnique intervient sont actuellement :

- la production, le stockage, la mesure, le transport et la distribution de l'énergie électrique,
- le «traitement» de cette énergie par des dispositifs transformateurs, redresseurs, et les convertisseurs statiques (hacheurs, onduleurs, gradateurs) alimentant les moteurs,
- les machines elles-mêmes (machines à courant continu, machines sous tension alternatives),
- les ensembles techniques dans lesquels les machines et leurs alimentations sont intégrées.

1. SUR LE MARCHÉ DE L'EMPLOI, EN ÉLECTROTECHNIQUE

1990 : on est surpris du faible nombre d'ingénieurs (cinq cent quatre-vingts électrotechniciens sur quinze mille ingénieurs toutes

catégories) formés au vu de l'importance du domaine sur le plan industriel. Différents rapports remis au Ministère de l'Éducation Nationale (MEN) ou aux organismes professionnels relèvent que le système éducatif d'une façon générale n'accorde pas au domaine électrique l'importance qui lui revient en matière de compétitivité (commission Génie Électrique).

En 1991, les différentes études publiées par le MEN relatives au premier emploi stable, en fonction des diplômes, permet de faire apparaître l'influence des domaines de formation.

Dans chacun de ces domaines, on vérifie la hiérarchie des diplômes par rapport à l'embauche et à la stabilité du premier emploi.

Le domaine «électrotechnique, mécanique, électronique» est l'un des mieux situés, pour tous les diplômés, ingénieurs, techniciens supérieurs (DUT ou BTS), bacheliers («F1» mécanique et «F3» électrotechnique).

La situation globale de l'emploi ne s'est pas améliorée depuis 1990 ; on n'observe cependant pas des taux de chômage importants et contrairement à ce qui se passe dans de nombreux autres secteurs (informatique, aéronautique), il n'y a pas eu, et il n'est actuellement pas question qu'il y ait, de plan social dans le domaine du génie électrique (secteur industriel).

S'il n'y a pas, ou peu, de licenciements dans le secteur de l'électrotechnique, on relève cependant une certaine stagnation de l'emploi. Ce fait récent implique aujourd'hui des difficultés dans la recherche d'une première situation professionnelle. Une des conséquences est la poursuite d'études. Les ingénieurs, par exemple, demandent de plus en plus souvent à poursuivre en DEA (environ 20 % des effectifs des ingénieurs de l'École Nationale d'Électronique, d'Électrotechnique, d'Informatique et d'Hydraulique de Toulouse - ENSEEIHT - en 1992/1993, par exemple) puis en thèse et les étudiants titulaires d'un BTS ou d'un DUT poursuivent en licence (EEA ou génie électrique) voire en école d'ingénieurs. On retrouve un nombre non négligeable de ces étudiants dans les préparations aux concours d'enseignement en IUFM (Capet et Capet).

On peut également relever l'idée, développée à différents niveaux par les personnels engagés dans la formation, puisque des entretiens

formels ou informels l'ont souvent soulevée, de faire passer à trois ans la formation en IUT ou en STS et à six ans celle en école d'ingénieurs.

Cependant, si cette idée peut être mise en concordance avec les difficultés d'emploi, on peut également relever que les développements technologiques des ensembles techniques sur lesquels nous développons dans la partie suivante pourraient entraîner *a priori* la nécessité d'agrandir les champs de connaissances et les durées d'acquisitions.

2. ÉLECTROTECHNIQUE : RÉALISATIONS ET PRATIQUES

2.1. Objectifs

Il s'agit dans le cadre restreint de cette publication de mettre en évidence l'éventail des problèmes (recherche de ressources générales en termes de savoirs, de méthodes et de solutions à des problèmes plus ou moins particuliers) auquel s'est confronté et se confronte l'électrotechnique. Notre exposé ne peut être exhaustif et relève de choix.

Nous avons particulièrement été attentifs :

- à mettre en évidence et à expliciter les raisons (matérielles, intellectuelles) des évolutions de l'électrotechnique,
- à caractériser des ensembles électrotechniques actuels.

Cet ensemble est vital pour l'enseignement. Il correspond à une référence épistémologique forte au même titre que le savoir «savant» pour Y. CHEVALLARD (1991, p. 216), lorsqu'il écrit :

«La sphère de la recherche en un savoir savant : [...] Tout tend à remonter vers elle, parce que tout tend à rechercher l'investiture épistémologique et culturelle du savoir savant qui y est produit».

2.2. Méthodologie

Deux types de contenus ont été étudiés :

- des entretiens avec des chercheurs, maîtres de conférence ou professeurs de l'ENSEEIH, T,
- des articles de la RGE (Revue Générale de l'Électricité) et les actes des congrès EEA (Électronique, Électrotechnique, Automatisation) de 1985 à 1993.

La RGE, organe de la SEE (Société des Électriciens et des Électroniciens) est publiée mensuellement.

Les auteurs d'articles sont essentiellement :

- des enseignants-chercheurs des Écoles d'ingénieurs,
- des ingénieurs impliqués dans les recherches dans les secteurs industriels privés et publics (SNCF, EDF).

Le contenu de la revue est souvent peu formalisé (au sens mathématique du terme ; il y a peu de démonstrations de lois physiques ou de calculs approfondis sur les modèles utilisés). Les articles présentent une actualité dans les secteurs concernés et exposent les nouveautés sous formes de textes agrémentés de relevés de mesures, courbes, données géométriques, schémas fonctionnels, etc.

C'est une revue qui est d'usage courant dans les écoles d'ingénieurs, d'usage un peu moins habituel dans les lycées techniques, plus utilisé cependant par les enseignants des classes supérieures (BTS ou IUT) que par ceux des classes du second degré.

Les congrès EEA sont souvent animés par les mêmes personnes que celles qui écrivent dans la RGE. Les congressistes sont en grande majorité des enseignants impliqués dans la formation en électrotechnique et en électronique en lycée technique (professeurs de physique appliquée ou de génie électrique, des classes de BTS, d'IUT ou de terminale). Les articles sont plus approfondis sur les aspects théoriques des matériels : on y trouve souvent des articles de synthèse se présentant sous forme de «cours écrit» magistral avec dessins et démonstrations, équations, etc.

2.3. Réalisations

Approche historique

L'intégration de l'électricité dans les ateliers des entreprises a amené un bouleversement dans la gestion de l'énergie nécessaire aux processus industriels, en permettant de la décentraliser au plus près du système transformant cette énergie.

De 1900 à 1939, l'électrotechnique s'est développée autour des théories des champs tournants, du moteur asynchrone.

Après guerre, les études ont d'abord porté sur les régulations de tension et de vitesse. On se tournait vers les «servo-mécanismes». Les électrotechniciens se «recyclaient» en automaticiens et constituaient des laboratoires importants à travers la France. Ce changement coïncidait

avec la montée générale de l'électronique. Mais l'électronique de puissance était mal comprise car on ne maîtrisait pas l'informatique et l'automatisme.

De 1945 à 1960/1965, il y a eu reconstitution des laboratoires démantelés pendant la guerre d'où un développement important pour l'enseignement et la recherche dans toutes les disciplines. Il a fallu cependant une quinzaine d'années pour reconstituer les projets et les compétences.

1966 fut une «année noire» en électrotechnique. On y considérait que plus rien ne pouvait y être fait. La branche industrielle semblait vouée à la stagnation, voire au déclin.

Les secteurs de génie électrique étaient relativement différenciés, en interaction relativement faible : l'électrotechnique se limitait à l'étude des machines électriques (et en fait il n'y avait pratiquement plus de recherche) ; l'électronique de puissance s'occupait des courants forts et ses préoccupations étaient essentiellement la distribution, des recherches commençaient cependant à porter sur les commutations électroniques ; les courants faibles s'appliquaient en communication.

En 1971, la filière électrotechnique, arrêtée en 1967 au niveau de la recherche universitaire, est reconstituée à Grenoble, Nancy et Toulouse. Les déséquilibres durent cependant quelques temps puisqu'en 1976, il n'y avait que trente-quatre chercheurs en France et que les industriels investissaient moins de 2 % de leurs bénéfices.

Le sens des évolutions

Les différents chocs pétroliers et les crises économiques qui les ont suivis ont profondément modifié la structure des dispositifs matériels et l'organisation même des entreprises :

- des recherches sur les ensembles électrotechniques ont commencé, touchant dans un premier temps les modules de commande et de récupération de l'énergie puis les machines elles-mêmes,
- des modifications au sein même de l'organisation globale des établissements industriels ont été entreprises : réduction des prix de revient, accroissement de la productivité, minimisation du coût global d'investissements, modernisation et gestion difficile d'ensembles plus riches (en matériel, en interactions humaines, sociales, politiques et stratégiques).

Dans une situation énergétique difficile, il devient en effet fondamental de posséder des ensembles de haut rendement. De telles visées ont servi de catalyse aux recherches en «génie électrique» qui ont débordé les objectifs initiaux.

De façon concrète, si l'on compare deux machines, à trente ans d'intervalle, on note un gain important des puissances admissibles (de l'ordre de dix) sans que les dimensions (géométrie et masse) n'aient subi de profonds changements !

Recherche

Le développement de l'électrotechnique et des disciplines associées impliquent des recherches théoriques en modélisation et en simulation numérique des phénomènes électromagnétiques et des recherches plus appliquées sur les matériaux (propriétés mécaniques, magnétiques et électriques), les structures des machines, les convertisseurs, les capteurs, les actionneurs, les dispositifs de commande.

La recherche est réalisée de façon complémentaire :

– dans les laboratoires universitaires où sont développées actuellement des études sur les champs, les matériaux, l'observation de variables physiques sans capteur (flux, couple, vitesse), l'influence des harmoniques, la commande en temps réel, les modélisations (CAO), les méthodes de résolution, les calculs de structures, les pertes dans les circuits, les morphologies des machines (notamment à aimant permanent), les «nouvelles» machines (à réluctance, à rotors discoïdes, à rotors massifs, cryogéniques), etc.

Les financements sont assurés pour deux tiers environ par des contrats avec les industriels (recherche finalisée à court terme de type thèse, avec des contraintes en terme de rentabilité) et pour un tiers par des contrats avec le Ministère de la Recherche ou le CNRS (projets plus «lourds» porteurs d'éventuelles évolutions à long terme) ;

– dans les laboratoires industriels qui possèdent notamment des dispositifs permettant la réalisation d'essais «lourds» (usure, tenue, environnement). Pour les chercheurs impliqués, il s'agit d'améliorer, d'essayer, de tester, de valider, de qualifier des machines ou des ensembles.

Les développements ont porté sur :

– les propriétés mécaniques des rotors et des conducteurs : augmentation des limites de rupture et de la résistance à la corrosion. Les progrès dans les logiciels de calcul de contraintes ont apporté des connaissances

plus fines sur les contraintes locales des parties sensibles des rotors (base des dents, frettes, cales d'encoches) ;

- les propriétés magnétiques : augmentation de la perméabilité magnétique (affinement des domaines et amélioration du degré d'orientation), réduction des pertes ;

- les propriétés conductrices des matériaux : accroissement de la densité de courant et de la charge linéique, amélioration des procédés de refroidissement (air, hydrogène, eau) et de la tenue en température ;

- l'augmentation des bandes passantes et des performances globales des composants de l'électronique de puissance et l'optimisation de leur intégration dans les convertisseurs (commande «douce»)² ;

- la commande rapprochée des convertisseurs (contrôle direct des signaux de commande des semi-conducteurs) permettant en imposant des profils de tension et de courant d'optimiser le fonctionnement de la machine, en éliminant les harmoniques de rang faible préjudiciables car provoquant des oscillations de couple et/ou de vitesse ;

- les techniques numériques, l'augmentation des capacités des mémoires et des vitesses de transmission de données, le développement des microprocesseurs embarqués permettant la mise en œuvre de commandes en temps réel (avènement du numérique) ;

- la détermination des conditions optimales d'association des composants d'un ensemble (source, convertisseur, machine, contrôle) ;

- le développement de systèmes d'assistance et d'analyse en temps réel par ordinateur dédié réalisant des fonctions de dessin graphique, de diagnostic, de maintenance, etc.

Relevons également la création de moteurs électriques originaux basée sur des principes connus mais dont le fonctionnement ne pût être effectivement assuré que par les performances obtenues par l'électronique de puissance, par l'automatisme et l'informatique.

Toutes ces connaissances ont été acquises par la conjugaison d'une expérimentation sophistiquée, d'une modélisation mathématique poussée, et par l'articulation des travaux, études et progrès des uns et des autres, de différentes disciplines-mères et de différents horizons (recherche universitaire, recherche industrielle, utilisateurs).

La connaissance scientifique évolue :

- par exploration de nouveaux champs d'expérience, rendue possible par la découverte de nouveaux documents ou la mise au point de nouveaux instruments,
- par confrontation de modèles multiples existant à un moment donné afin de les coordonner et de résoudre leurs contradictions,
- par mise au point de nouveaux corpus mathématiques qui permettent de reformuler des anciens modèles et de les synthétiser.

Synthèse

Parler d'électrotechnique n'a donc du sens aujourd'hui que si on lui associe l'électronique de puissance qui s'intéresse aux semi-conducteurs de puissance, à la structure des convertisseurs et l'automatisme/informatique industrielle qui permet la commande et la régulation des ensembles par des techniques numériques.

Il est incontestable que cet état de faits résulte de la conjonction des progrès importants réalisés dans chacun des domaines concernés.

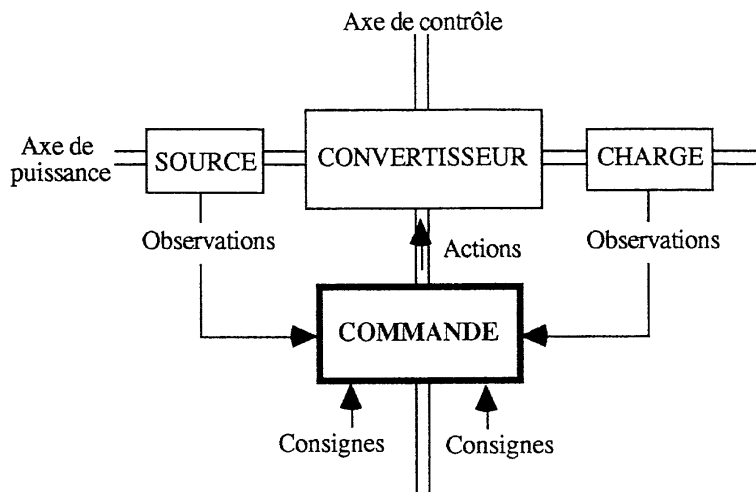
Sur deux plans, ceux des niveaux et des domaines de recherche, la définition de frontières s'avère difficile et devient arbitraire devant les liens étroits qui se constituent :

- l'ensemble des évolutions matérielles aboutit à un chevauchement des différents niveaux de la recherche, posés un peu artificiellement, (recherche fondamentale, recherche appliquée, recherche et développement, applications) et à un abandon du caractère séquentiel du processus recherche/développement ;
- la forme et l'intensité des relations interdisciplinaires sont loin d'être figées. Les disciplines «dominantes» de la productique qui ont longtemps été l'électronique et l'automatique, dans un cadre d'opérationnalité immédiat, sont plutôt maintenant l'informatique et les mathématiques très sollicitées au fur et à mesure de la complication des problèmes théoriques à résoudre. Les relations entre les «domaines» disciplinaires de recherche se multiplient.

Ce qui a permis le développement des objets de l'électrotechnique est donc un phénomène inverse à celui qui avait présidé à la différenciation, à la spécialisation et au cloisonnement disciplinaires ; c'est un mouvement d'aspiration à la conjugaison de données et de savoirs d'origines

variées. Les disciplines d'origine se chevauchent rendant mouvantes les frontières.

On peut aujourd'hui représenter le convertisseur électromécanique suivant le schéma suivant :



D'après M. GRANDPIERRE (N7).

Les matériels : cas des machines

- Jusqu'en 1980 environ, l'usage des moteurs industriels (de puissance supérieure à 10 kW) suit grossièrement la classification suivante : MCC (moteur à courant continu) pour la vitesse variable (alimentation par des convertisseurs statiques à thyristors depuis 1960), MS (moteur synchrone) pour les très grandes puissances (de l'ordre du MW) et MAS (moteur asynchrone) pour le reste (considéré comme moteur à tout faire !).

- Vers la moitié des années 80, la classification a changé : s'il n'y a pas de variation de vitesse, on utilise le MAS et le MS ; s'il y a variation de vitesse, on utilise de plus en plus le MS (TGV Atlantique équipé car en commutation naturelle, il y avait peu d'éléments passifs donc des pertes et des ennuis réduits).

Le moteur électrique se substitue parfois à d'autres dispositifs (turbines à gaz, moteurs hydrauliques). Le MCC a tendance à disparaître.

- A l'heure actuelle, le développement des composants (GTO notamment) rend compétitif les ensembles sur MAS qui peuvent de plus fonctionner sous des puissances élevées (nouveau TGV).

Le MAS représente, toutes puissances confondues, 85 % du marché dont plus de la moitié équipé en vitesse variable. Les MS fonctionnent de plus en plus avec des aimants permanents plutôt qu'avec des électro-aimants (pas de problèmes de commutation) mais le prix des aimants est élevé et ils restent fragiles. Les machines synchrones gardent un créneau dans les très grandes puissances et à petites vitesses (alternateurs des centrales de production électrique).

2.4. Exemples : vers les utilisations de modèles et de la simulation

Nous avons choisi de présenter quelques-uns des travaux que nous jugeons caractéristiques de certaines pratiques (recherche et développement, travaux de modélisation) en électrotechnique aujourd'hui.

Modèles et modélisations ; simulation

L'utilisation des modèles nécessite d'abord une analyse de la réalité et le choix d'éléments pertinents dans le cadre du problème posé, puis la construction du modèle et le traitement du problème par le modèle (simulation), enfin la transposition des résultats à la réalité.

Dans les simulations développées, on peut voir apparaître les solutions technologiques qui pourraient *a priori* (la vérification est toujours de mise) être les plus fructueuses.

Les modèles des machines ont été, avant le début des années 80, construits de façon plus ou moins indépendante au sein de chaque entreprise, sur des données empiriques. Ces modèles permettaient d'avoir une approche globale très correcte des performances des machines (flux, énergie, couples), mais ils ne pouvaient donner aucun résultat sur les données locales (saturation, échauffement, courants induits), empêchant toute extrapolation réaliste.

Modélisation électromagnétique des machines

La modélisation globale des machines (modélisation électromagnétique) permet la prédétermination des paramètres des schémas équivalents (réactances, impédances) et la prévision des points qui risquent de provoquer des perturbations en fonctionnement (échauffements, vibrations, etc.). Elle permet d'évaluer, avec une bonne approximation, le

comportement de la machine plongée dans un environnement de travail simple (régimes permanent et transitoire, contrôle et commande).

Les machines sont des convertisseurs à champ électromagnétique que l'on peut analyser, *a priori*, par les équations de Maxwell. Celles-ci permettent d'avoir des informations locales mais pour l'électrotechnique, ce sont des données macroscopiques qui sont nécessaires. Le calcul des champs est une préoccupation depuis vingt ans et le travail porte sur le développement des outils. Il est nécessaire de prendre en compte de nombreux phénomènes magnétiques et électriques, la perméabilité, la permittivité, la conductivité.

Les méthodes actuelles (analytique - type séries de Fourier - ou numériques) reposent toujours à un certain degré sur des approximations, des simplifications. On néglige par exemple les phénomènes de propagation³ (contraintes sur les dimensions) et la modélisation est en 2D⁴.

Les résultats permettent d'obtenir une connaissance des champs sous forme de graphiques (lignes de champ) et des grandeurs localisées caractéristiques de la machine (couples, flux, grandeurs électriques) dont certaines peuvent correspondre à des éléments d'un schéma équivalent.

D'autres approches sont faites sans que l'on sache vraiment quel est le meilleur modèle (ni même s'il existe !). L'objectif principal est d'atteindre un modèle et une méthode, c'est-à-dire un outil fonctionnel dans le maximum de cas.

La modélisation doit aller de pair avec la validation. C'est pourquoi, souvent des bancs d'essais, de mesures de couples sont utilisés pour vérifier expérimentalement ce que donnent les outils testés. Toutefois, les machines ne sont fabriquées que dans les cas où les simulations ont donné des résultats qui semblent intéressants. Les logiciels de modélisation et de simulation permettent de réduire, voire d'éliminer les phases de prototypage. Ceci est particulièrement intéressant dans le cas de machines de grandes puissances ou des gros systèmes.

D'une façon générale, la conception d'une machine ne peut être faite dans les meilleures conditions que si l'on connaît son environnement, en particulier le système de commande auquel elle va être

associée. A chaque type de convertisseur, à chaque type d'alimentation peut correspondre (à l'intérieur d'un même type de moteurs : MS, MCC, MAS) une machine particulière. Autrement dit, il peut y avoir inversion des processus de conceptions habituels jusqu'à aujourd'hui. En effet, avant, un convertisseur était créé pour une machine ; maintenant, on peut créer une machine à associer à un convertisseur.

Détermination des pertes

L'étude des pertes dans une machine peut être envisagée sous deux approches :

- pour le concepteur, il s'agit d'obtenir un rendement pour le système qu'il crée le plus élevé possible,
- pour l'utilisateur, il s'agit de localiser et de caractériser les pertes afin de déterminer les moyens appropriés d'évacuation et de minimisation de l'énergie dissipée.

Les machines électriques sont des systèmes de structure complexe englobant au sein d'un même appareil différents aspects, chacun à l'origine de pertes, qu'il convient de préciser et de connaître à chaque instant, ainsi que les échauffements associés : électromagnétiques (pertes fer), électriques (pertes Joule), mécaniques (pertes par glissements et frottements). Les coefficients d'échange sont établis par des essais systématiques sur la machine de série.

Exemple : le cas des pertes fer

Les tendances actuelles dans le domaine des moteurs électriques associés à des convertisseurs statiques conduisent à considérer les pertes dans les tôles magnétiques non plus comme un problème secondaire mais comme un phénomène qu'il est nécessaire d'estimer afin de ne pas dégrader les performances des moteurs.

Parmi les causes actuelles des pertes magnétiques, on peut citer une conséquence de l'utilisation systématique de l'électronique de puissance : les matériaux magnétiques travaillent à des fréquences élevées et avec des ondes d'induction non sinusoïdales, ce qui augmente les effets dégradant pour l'énergie, les pertes fer étant proportionnelles au carré de la fréquence.

L'analyse de ces pertes s'avère extrêmement délicate. Elles correspondent à l'énergie qu'il faut fournir au matériau pour faire varier son aimantation et sont donc liées aux processus d'aimantation.

Les évaluations de pertes sont réalisées depuis les années 80 par des études microscopiques des phénomènes magnétiques⁵ conduisant à des modèles (modèles linéaires, non linéaires, avec ou sans hystérésis, modèles 2D) associés à des méthodes de résolution des systèmes d'équation (méthodes de différences finies, méthodes des éléments finis, méthode des équations intégrales, couplage de méthodes).

L'estimation des pertes dans les tôles ne peut encore être envisagée de manière quantitative car les hypothèses simplificatrices qu'on est amené à prendre sont trop éloignées de la réalité physique (on néglige les contraintes mécaniques). La connaissance des mécanismes d'aimantation est très difficile à traduire en termes de modèle exploitable.

De nombreuses recherches sont en cours afin d'obtenir de nouvelles qualités de tôles par l'amélioration des matériaux, de mesurer les pertes dans les matériaux dans les conditions réelles de fonctionnement, de trouver des modèles permettant de les calculer, d'avoir une meilleure connaissance de leurs répartitions, d'optimiser les structures afin d'utiliser au mieux les matériaux magnétiques.

La simulation d'ensembles techniques

L'étude par voie analytique directe des systèmes comprenant des convertisseurs statiques est difficile et ne peut être menée à bien que grâce à des hypothèses très simplificatrices. C'est pourquoi la simulation analogique puis numérique est rapidement apparue comme un moyen privilégié d'étude de ces ensembles.

Deux difficultés surgissent immédiatement et se retrouvent aux différents moments de l'étude : mise en équations, résolutions, rapprochement avec la réalité, etc. :

- Comme dans le cas des machines, on se trouve confronté aux problèmes de non-linéarités dues à la nature même des matériaux employés ;
- La forte interdépendance des organes du système (source, convertisseur, charge, commande) rend la simulation de l'ensemble comme somme de simulations partielles de chacun des composants totalement déplacée et impossible.

D'un point de vue pratique, on modélise le fonctionnement de chaque composant en un instant donné par un groupe d'équations, une matrice. De même, on détermine des relations mathématiques traduisant les interactions entre les composants le constituant et on prend en compte également les interactions avec l'environnement. Il est ensuite nécessaire de traiter globalement tous les événements et de résoudre l'ensemble de toutes les équations qui régissent l'évolution de toutes les variables.

Les modèles les plus courants consistent à représenter la machine par un modèle électrique équivalent, composé d'un réseau d'inductances et de résistances calculées par les modèles statiques et d'introduire ce schéma à l'intérieur d'un modèle d'analyse des convertisseurs. Une approche récente consiste à coupler étroitement, au cours d'un cycle de fonctionnement du convertisseur, les équations électriques de ce dernier avec les équations de répartition du champ à l'intérieur de la machine en tenant compte de la vitesse du rotor de cette dernière.

Conclusion

Nous voudrions relever :

- la multiplicité des modèles et des méthodes utilisés, et donc les tâtonnements multiples dans la recherche de la description d'une réalité dans laquelle les applications doivent s'intégrer,
- les interactions fortes qui existent entre les recherches sur les matériaux et les recherches applicatives dans le domaine de l'électrotechnique,
- le rôle important des processus de modélisation dans une perspective de simulation, permettant de confronter des théories et des données empiriques afin de favoriser l'organisation, la conduite et le contrôle de l'action amenant à une amélioration de systèmes matériels.

3. QUELQUES CONSÉQUENCES POUR L'ENSEIGNEMENT

3.1. L'évolution des programmes d'enseignement

Les développements des matériels de l'électrotechnique ont fortement contribué à l'évolution des programmes et des conditions d'enseignement de l'électrotechnique, sans pour cela en être les seules causes.

On sait que les finalités de l'enseignement technologique ont grandement changé depuis vingt-cinq ans. En 1967, à la création du

baccalauréat de technicien, il s'agissait essentiellement de former des techniciens opérationnels immédiatement à la sortie du second cycle des lycées. Aujourd'hui, plus de 85 % des élèves titulaires du bac «F3» poursuivent leurs études...

Si l'on compare les contenus d'électrotechnique enseignés en 1967 et en 1995 (B. CALMETTES et R. LEFÈVRE, 1993) dans le cadre de ce qui correspond aujourd'hui à la «Physique Appliquée», on observe d'importants changements.

On peut par exemple relever, de façon non exhaustive, au niveau de la classe de terminale :

- la disparition définitive de l'étude de certains éléments «techniques» des machines (type d'enroulements, composition détaillée des machines, etc.),
- la disparition des études physique et technologique des composants de l'électronique (une partie déplacée en classe de première, l'autre supprimée),
- la disparition d'une partie des notions relatives à l'électromagnétisme (travail avec les mutuelles inductances),
- la disparition d'une partie de l'étude et des utilisations du triphasé (reportée en STS ou IUT),
- la disparition de l'étude de la gestion globale de l'énergie électrique (production, distribution) maintenant réalisée dans le cadre des STI,
- l'entrée en force de tout ce qui se rapporte à l'électronique de puissance (hacheur, onduleur),
- une approche des couplages alimentation/machines et des systèmes commandés en chaîne fermée,
- l'utilisation plus soutenue de «modèles» (bien que non dénommés toujours ainsi : diagramme de Kapp, transformation de Thévenin, représentation de Fresnel, modèle du MAS),
- la place importante donnée aujourd'hui à l'expérience (plutôt qu'aux essais).

Les matériels dédiés à l'enseignement ont eux-mêmes fortement changé, même au niveau des machines avec, par exemple, l'utilisation de plus en plus courante des bancs informatisés d'acquisition de données.

On peut également relever que des modifications ont été apportées dans les programmes des autres disciplines :

- apparition de l'approche dite «système» par analyse descendante fonctionnelle en STI,
- apparition de la philosophie (et limitation du français à la classe de première) qui permet d'aborder d'autres problèmes liés à la technique tels que l'environnement social des ensembles techniques, les relations science et technique, l'idée de contrôle social des techniques, des éléments de l'histoire des techniques, etc.,
- orientation des contenus de «mécanique» vers plus de dynamique,
- nécessité d'une «formation scientifique», accentuations des travaux de type graphique au sein des pratiques en mathématiques.

Les différents points cités ci-dessus mettent en lumière les choix faits afin :

- de gérer les processus de continuité/discontinuité au sein des cycles d'études (rôles en particulier des STS et des IUT),
- de combattre un certain encyclopédisme qui aurait été marqué par des ajouts simples et non des restructurations,
- d'essayer de maintenir les savoirs au plus près des nouveautés matérielles, des pratiques de travail en électrotechnique (place des modèles et de l'expérience),
- de maintenir une certaine cohérence globale dans les contenus des disciplines (bien que sur ce point la dichotomie physique appliquée/STI pose questions),
- de répondre à la pression sociale liée aux mutations du tissu industriel⁶.

3.2. Quelques problématiques pour l'enseignement

Quelles connaissances pour le technicien ?

Le propos précédent nous permet d'aborder une première question, relative à la formation du technicien : quel devra être son degré de connaissance des phénomènes scientifiques, physiques, technologiques et techniques relatifs à l'ensemble technique en fonctionnement ?

G. MALGLAIVE (1990) relève les nouvelles difficultés de connaissances et de réflexions liées à l'évolution des objets techniques : «Avec les machines automatisées disparaît l'intimité avec la matière, la possibilité de réguler à chaque instant le processus de transformation

au seul moyen de la perception de l'objet en train de se transformer et des signes concrètement lisibles, tirant leurs sens de l'expérience accumulée sur les péripéties de sa transformation [...] L'objet et ses caractéristiques, la machine et ses actes perdent la richesse de leur variété concrète : ils deviennent abstraits, et doivent être manipulés dans le monde symbolique avant d'acquérir leur réalité matérielle [...] Pour l'homme, désormais, savoir faire, c'est savoir comment font les machines pour savoir comment les faire fonctionner. Il devient dès lors indispensable que l'abstrait et le concret, la théorie et la pratique, deviennent compatibles».

L'articulation science/technique

Il nous paraît dès lors possible de poser la question sous-jacente, celle des niveaux de connaissances à développer chez les élèves.

- *Au niveau des pratiques sociales de référence*, de nombreux auteurs se sont exprimés. On a pour habitude de déterminer des activités de création/conception, de réalisation, d'utilisation, de maintenance.

COMBARNOUS (1984) distingue les connaissances «coutumière» (familiarité avec l'objet), «fonctionnelle» (compréhension de la fonction de l'objet, place de l'objet dans un système), «technologique» (relatives aux éléments de l'objet, elle permet la mise en relation des organes et atteint la structure de l'objet), «raisonnée» (rationnelle et globale, elle réunit alors des informations sur le but, la fonction, la place de l'objet matériel, des réflexions sur son impact dans la société...).

P. ROQUEPLO (1983) différencie le langage «fonctionnel» (technologique) qui est celui de la stratégie, le langage «analytique» (scientifique) qui est celui de la mise en œuvre. A chaque niveau de négociation et de décision, on se trouve face à une double structure langagière. «De ce point de vue, nul n'a, me semble-t-il, à tout savoir : ce qui compte c'est que chacun ait, en son propre lieu, une connaissance fonctionnellement pertinente, c'est-à-dire adaptée à la maîtrise qu'il est censé exercer sur les phénomènes qu'il est, précisément, chargé de maîtriser».

- *L'approche par les registres de technicité* pourrait permettre de cibler encore davantage les finalités de l'enseignement.

La technicité s'explique selon J.-L. MARTINAND (1994) autour :

«- d'une pensée propre, non obligatoirement explicitée en savoir savant [...] ;

- des outils, instruments, “engins” spécifiques, matériels ou symboliques,
- la spécialisation des acteurs, que ce soient des individus (rôles sociotechniques) ou des entreprises (le “métier”).

On peut envisager au moins quatre registres, repérés et identifiés par des compétences, des représentations et des valeurs :

- celui de la «participation», qui correspond à la capacité de s'immerger dans une pratique sans y être autonome mais actif,
- celui de la «maîtrise» qui correspond à la capacité d'intervention autonome,
- celui de la «lecture» qui correspond à la capacité d'identifier les composantes de la pratique de référence,
- celui de la «transformation» de la pratique de référence elle-même.

• *Au niveau de l'enseignement*

Les registres de technicité peuvent être utilisés pour cibler les objectifs généraux de formation et définir les compétences attendues chez le futur professionnel. Ils sont alors fixés.

Ils peuvent également fournir, dans une perspective d'enseignement, des indications pour la construction des situations de classe. Ils fonctionnent alors comme une grille pour l'enseignant, lui permettant de choisir matériels, savoirs en jeu, rôles des élèves, etc. Ils évoluent au gré du professeur en fonction des connaissances à développer, des prérequis des élèves, etc.

Les problèmes liés à la didactisation des productions industrielles

De nouveaux matériels créés et commercialisés entrent dans les programmes d'enseignement de façon plus ou moins implicite, au niveau des classes de STS. Ce sont par exemple les commandes vectorielles avec capteurs et demain à estimation...

La mise en œuvre d'une «didactisation» de ces produits n'est pas sans poser de sérieux problèmes :

- d'un point de vue intellectuel, jusqu'où peut-on raisonnablement aller (compte tenu en particulier du niveau des élèves et des objectifs que l'on fixe à la formation) dans l'explicitation des fonctionnements internes du dispositif ? Quelles transpositions faire (si on le juge nécessaire) des concepts physico-mathématiques sous-jacents : transformation triphasé/diphasé, équations de Park ? ;

– d'un point de vue matériel, est-il possible de réaliser le vœu idéaliste d'un physicien qui désirerait suivre les signaux électriques au long de leurs transformations ? Quels seraient les effets secondaires d'une telle réalisation ?

On sait que la multiplication de points de prise de mesures implique une fabrication particulière de produits, allant à l'encontre des effets habituellement recherchés par les industriels. Ceux-ci essaient en effet de faire le produit le plus petit possible, avec des liaisons électriques courtes de façon en particulier à limiter les parasitages et les interférences dans les circuits eux-mêmes.

La solution du numérique peut-être envisagée, elle permet de lire, de modifier les valeurs de certains paramètres, mais où est alors la physique ?

La didactisation des matériels implique, semble-t-il, une déformation des caractéristiques industrielles des ensembles techniques. Il convient alors, avec les élèves, de fixer l'utilisation des outils didactiques dans les strictes limites de leur validité : investigation de la forme d'une caractéristique, interprétation d'un type de fonctionnement par exemple.

4. CONCLUSIONS

Les études en parallèle des évolutions des matériels de l'électrotechnique et des contenus enseignés au niveau de la classe de terminale montrent :

- une restructuration quasi-permanente de ces derniers nécessitant les effacements de certains thèmes jugés obsolètes, des aménagements pour d'autres, parfois difficiles à appréhender, des transferts entre les niveaux ou les disciplines de formation, etc.,
- que les curriculums disciplinaires expriment la volonté d'une convergence entre produits industriels et produits-sujets d'enseignement mais aussi entre les méthodes et démarches générales d'investigation dans la recherche et celles utilisées dans les activités de classe en physique appliquée : rôles de l'expérience et de la modélisation.

La complication des ensembles techniques a également rendu nécessaire l'étalement des formations. On peut considérer que la continuité baccalauréat-STS ou DUT s'avère indispensable pour qui désire être

aujourd'hui un technicien en électrotechnique... et ceci se retrouve dans l'étude des programmes d'enseignement en STI.

Les évolutions actuelles (sans préjuger des futures) du domaine de l'électrotechnique continuent,

- sans aucun doute, à nécessiter des choix et de sérieux aménagements dans les savoirs à enseigner aux élèves (rôle des transpositions) et dans les matériels didactisés,
- peut-être à réorienter les finalités mêmes de la discipline «physique appliquée» entre «physique» et «application».

NOTES

1. 40 % des exportations électriques mondiales sont européennes. En France, en 1987, le secteur de l'électrotechnique présentait une balance commerciale excédentaire de 9,2 milliards de Francs (sixième rang après l'agroalimentaire, l'armement, l'aéronautique, les transports terrestres et la construction mécanique).
2. En électronique de puissance, les évolutions ont également été importantes. Les années 70 ont été marquées par des progrès dans les techniques d'analyse et de compréhension des circuits de base. Les années 80 ont permis le développement de composants qui ont permis d'augmenter la tenue en puissance et en fréquence. Les années 90 se distinguent par une recherche de l'environnement optimal pour les composants en commutation. La structure du convertisseur découle des mécanismes de commutation des interrupteurs alors que, jusque là, l'interrupteur subissait les contraintes imposées par le circuit.
3. Phénomènes que l'on ne peut négliger dans les fonctionnements à THF. Il faut alors étudier les capacités parasites, et les phénomènes eux-mêmes.
4. Contrairement à ce qui se fait en mécanique ou en thermique, le 3D n'est pas opérationnel encore en calcul de champ électromagnétisme. L'étape suivante sera la résolution de problèmes couplés : thermique, mécanique, électromagnétisme débouchant sur les meilleures conditions d'optimisation des matériels.
5. A l'échelle microscopique, le matériau est subdivisé en domaines élémentaires appelés domaines séparés par une frontière. Sous l'action d'un champ, les moments magnétiques «cherchent» à s'aligner. La paroi se déplace entraînant localement une variation

d'aimantation qui induit des courants de Foucault. Ces courants s'opposent au déplacement et entraînent par effet Joule un échauffement local. La prédétermination des pertes est rendue difficile d'une part par l'intégration à l'échelle macroscopique des phénomènes microscopiques, et d'autre part par la complexité des mécanismes concourant à la subdivision en domaines et aux déplacements des parois : domaines irréguliers, parois non rigides, déplacements parfois non réversibles. Le passage de la discontinuité des phénomènes à l'échelle microscopique à la continuité à l'échelle macroscopique reste à l'état de recherche.

6. G.-G. GRANGER (1993) relève que les mutations des machines elles-mêmes (passage d'une machine à modifier le mouvement à une machine à traiter les flux d'informations et les flux énergétiques) a fait apparaître des tensions dans la société «entre une exigence de spécialisation technique due au raffinement toujours plus poussé des machines, et une exigence apparemment contraire de polyvalence, de compétence généralisée, ou plutôt de capacité d'adaptation des exécutants techniciens, conséquence de la rapidité d'évolution des techniques existantes et de la création de techniques nouvelles».

BIBLIOGRAPHIE

- Actes des journées E.E.A. (de 1985 à 1993).
- B. CALMETTES et R. LEFÈVRE (1993) : Étude des évolutions curriculaires en Physique Appliquée (section électrotechnique) in Actes du troisième séminaire national de recherches en didactique des sciences physiques. Toulouse : LEMME/UPS. pp. 51/66.
- B. CALMETTES (1996) : Contribution à l'étude des curriculums. Le cas de l'enseignement de l'électrotechnique dans les classes du second degré des Lycées d'Enseignement Général et Technologique. Thèse de doctorat. Toulouse : LEMME/Université Paul Sabatier.
- Y. CHEVALLARD (1991) : La transposition didactique. Du savoir savant au savoir enseigné. La Pensée Sauvage Éditions.
- M. COMBARNOUS (1984) : Les techniques et la technicité. Paris : Messidor. Éditions sociales.
- G.-G. GRANGER (1993) : La science et les sciences. Paris : PUF. Que sais-je ? n° 2710.
- G. MALGLAIVE (1990) : Enseigner à des adultes. Paris : PUF. Pédagogie d'aujourd'hui.

- J.-L. MARTINAND (1986) : Connaître et transformer la matière. Berne : Peter Lang.
- J.-L. MARTINAND (1994) : Didactique des sciences et formation des enseignants, note d'actualité. Les Sciences de l'Éducation n° 1. Université de Caen : CERSE. pp. 9/24.
- M. MARTY (1992) : Formation des ingénieurs en électronique. Texte de la Conférence Stafford pour la EAEEIE (European Association for Education in Electrical and Information Engineering).
- RGE : Revue Générale de l'Électricité. Revue de la Société des Électriciens et des Électroniciens.
- F. Russo (1986) : Introduction à l'histoire des techniques. Paris : Librairie scientifique et technique.

Bernard CALMETTES a soutenu le 19 janvier 1996 au LEMME - Université Paul Sabatier à Toulouse - une thèse de Doctorat, nouveau régime, en Didactique des Sciences, sous la direction de Richard LEFÈVRE, Professeur d'Université à l'Université Paul Sabatier de Toulouse. Cette thèse a pour titre :

CONTRIBUTION À L'ÉTUDE DES CURRICULUMS
Le cas de l'enseignement de l'électrotechnique
dans les classes du second degré
des Lycées d'Enseignement Général et Technologique

Ce document (300 pages) est disponible au :
LEMME - Université Paul Sabatier -
118, route de Narbonne - 31062 TOULOUSE Cedex