

De l'électricité dans l'air

MICHEL SAGE, FRÉDÉRIC WOZNY^[1]

La réforme du BTS CPI (Conception de Produits Industriels) de 2004 a introduit une épreuve de certification E4 portant sur la motorisation des systèmes.

Celui que nous vous présentons ici permet, entre autres, de mener les activités relatives à cette unité du programme, nécessitant de mobiliser simultanément des compétences dans les domaines du génie électrique et du génie mécanique.

Le besoin de traçabilité des tôles dans les ateliers d'assemblage des éléments de carrosserie-ferrage a amené l'industrie automobile française à utiliser des unités de marquage de la société Robotic **1**. Elles permettent de marquer en relief les tôles destinées à la réalisation des éléments de carrosserie tels que les doublures d'ailes et de portes, les coffres et les pavillons.

L'empreinte doit être lisible et durable pour contribuer au suivi de fabrication et à la lutte contre les contrefaçons. La déformation par embossage est une opération faite, à froid, par une tête portant une roue

mots-clés
conception,
pédagogie

à 8 caractères. L'effort de marquage appliqué doit être constant sur une profondeur de 0,2 mm, quels que soient l'épaisseur de la tôle ou le passage de tôle, c'est-à-dire la distance entre marquage et bord de tôle **2**.

L'unité de marquage industrielle

La tôle est manipulée par un robot qui la pose sur l'enclume. Un vérin pneumatique déplace l'extrémité de deux biellettes portant des galets. Ces derniers viennent rouler sur une rampe (came fixe). L'ensemble forme une genouillère qui fait basculer le levier pour marquer la tôle.

Le profil des cames est essentiel. Il influe sur la vitesse d'accostage, qui doit être faible au moment du contact avec la tôle pour que l'effort de marquage soit constant durant les 4 derniers millimètres de dépla-

cement de la tête de marquage. Cela permet de compenser les déformations des pièces, les jeux et l'usure des organes de liaison ou encore les variations d'épaisseur des tôles au lieu de marquage. Un capteur inductif et une temporisation permettent de définir la fin du marquage.

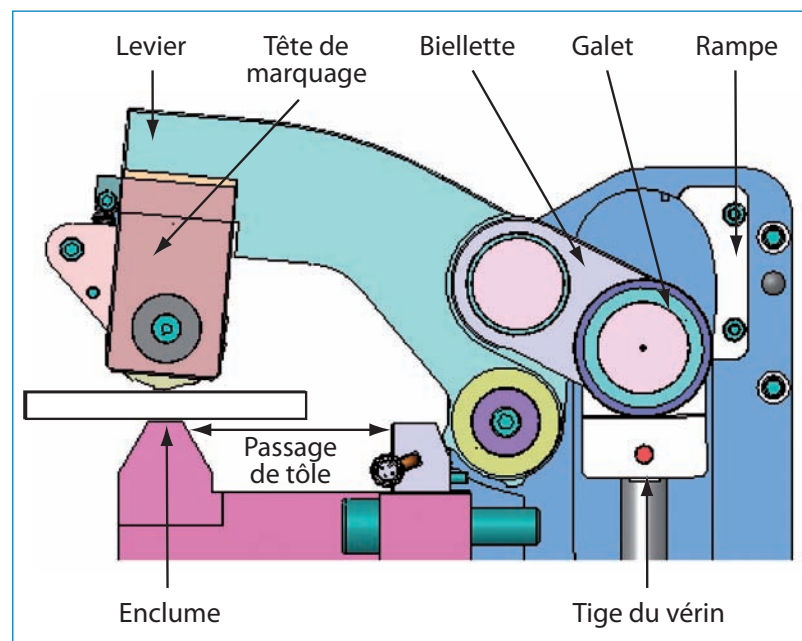
Selon la matière à marquer et le passage de tôle voulu, le fabricant de l'unité propose quatre vérins pneumatiques de courses et d'efforts développés différents ainsi que trois leviers et trois enclumes pouvant s'adapter sur l'unité.

Pneumatique ou électrique : les enjeux

Le programme européen Motor Challenge, soutenu par l'Ademe, a été lancé en 2006 pour favoriser l'amélioration de l'efficacité énergétique dans l'industrie. Sont concernés par ce programme les systèmes utilisant des moteurs électriques, représentant 70 % de la consommation industrielle française **3**, à des fins de production d'air comprimé ou de froid, de pompage de ventilation, d'entraînement de distribution électrique industrielle **4**.



1 L'unité de marquage pneumatique Robotic

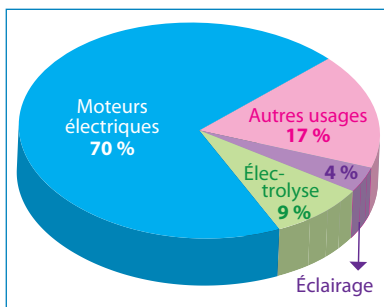


2 La tête de l'unité de marquage

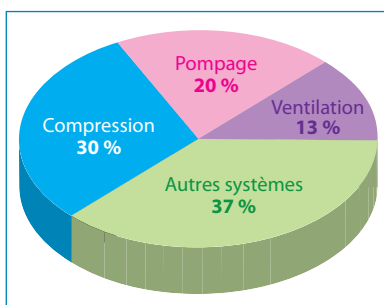
Le potentiel d'économies d'énergie serait en Europe de l'ordre de 30 % de l'électricité consommée par les industriels. Parmi les nombreuses solutions d'amélioration, l'une des plus performantes est, quand cela est possible, de supprimer un intermédiaire en substituant l'énergie pneumatique par l'énergie électrique. En effet, l'air comprimé, qui est un vecteur énergétique cher (de 0,6 à 3 centimes d'euros le Nm³), consomme environ 11 % de l'électricité industrielle française, soit quelque 12 TWh par an. Une étude du Cetim menée en 2003 va dans ce sens et montre qu'il est envisageable de remplacer 20 % du parc de machines du secteur automobile servant aux fonctions de serrage de pièces, de ferrage et de soudage, utilisant des sources d'énergie diverses, par des actionneurs électriques **5**.

l'histoire d'un projet

C'est donc en toute logique que la société Robotic et ses clients ont souhaité remplacer l'actionneur pneuma-



3 La répartition de la consommation d'électricité dans l'industrie en France



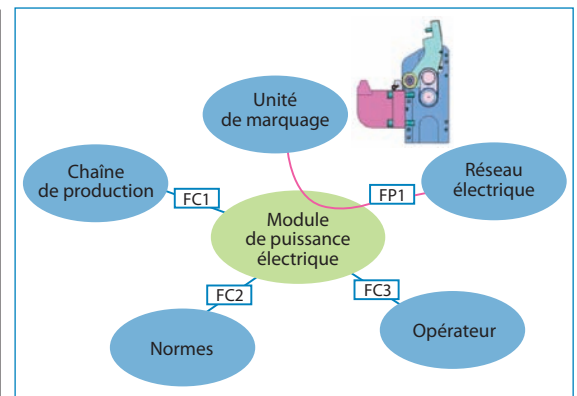
4 La répartition des consommations des systèmes motorisés

Marché	Enjeu économique en M€/an	Fonctions	% de substitution électrique à dix ans
Machines de conditionnement	35	Actionneurs, vérins	30 %
Industrie automobile	250	Centre d'usinage, serrage de pièces, ferrage et soudage	20 %
Machines d'emballage et machines spéciales	40	Actionneurs et certains vérins	4 %

5 Les possibilités de substitution des technologies « fluidiques »

tique par un actionneur électrique. En 2003, elle propose le projet industriel à un étudiant de 2^e année de CPI dans le cadre de son thème. À la demande de l'entreprise, les résultats obtenus seront ensuite retravaillés par l'équipe enseignante en vue de réaliser un prototype.

Le cahier des charges, présenté ici sous la forme de son diagramme des interacteurs **6** et de ses fonctions de service **7**, exige une solution simple (temps de réglage réduit), robuste (fréquence et durée de vie importantes)... et peu coûteuse (recherche de réduction des coûts dans l'automobile) :



6 Le diagramme des interacteurs de la motorisation

Fonction	Désignation des fonctions	Critère	Niveau	Flexibilité
FP1	FP11 : Fournir la puissance mécanique nécessaire au module de marquage à partir de l'énergie électrique disponible	Effort axial maxi nécessaire	8 600 N	0
		Effort radial maxi sur la tige en bout de course	80 N	
		Course maxi	125 mm	
		Temps de manœuvre	5 s	
		fermeture	2 s	
		maintien	1 s	
		ouverture	2 s	
FP1	FP12 : S'adapter au principe de fonctionnement et au mécanisme existant	Fréquence	1 coup toutes les 36 s soit 2 400 marquages/jour	
		Durée de vie	3 millions de cycles	
		Tension	400 V triphasée	
FC1	S'adapter à la chaîne de production	Dimensions de la zone de fixation sur la chaîne	0,3 mm	1
FC2	Respecter les normes en vigueur	Normes	EN 292 DE n° 98/37/CE	0
		Code du travail français	R 233-84	
FC3	Limiter au maximum les opérations de réglage	Temps de réglage	À définir	2

7 Le tableau de caractérisation des fonctions de service

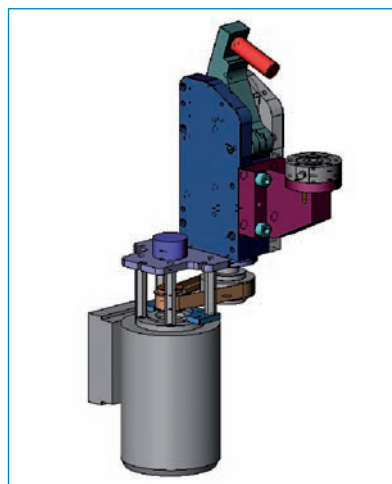
le prix d'un moteur *brushless* et de sa partie commande étant jugé trop élevé, un moteur asynchrone est imposé. De même, une transmission poulies-courroie **8** sera utilisée pour pouvoir placer le moteur dans différentes positions suivant la configuration de la chaîne.

Les solutions retenues sont détaillées dans le Fast partiel **9**.

Le produit n'existait pas, et la mise au point de la partie commande a été délicate. En effet, avec un système pneumatique, on peut maintenir un effort grâce à un bloqueur. Dans le cas d'une motorisation électrique, le marquage de la tôle impose d'exercer le couple nécessaire à vitesse de rotation nulle, ce qui entraîne sa surchauffe.

Une période d'essais sur des matériels conventionnels, utilisant un relais de surcharge électronique instantané à déclenchement pour un seuil de courant donné et un variateur de vitesse Altivar ATV 16, a mis en évidence des problèmes de mise au point, de fiabilité et de répétabilité, empêchant le bon fonctionnement du prototype. La solution est venue de l'usage d'un matériel nouveau, l'ATV 71, qui, par la multiplicité de ses réglages, a permis de résoudre ces difficultés techniques.

La mise au point n'aurait pas été possible sans la collaboration de techniciens de Schneider Electric, car la commande du moteur asynchrone pour cette application très particulière n'avait jamais été envisagée.



8 L'unité de marquage électrique Robotique

Mais, au final, un seul moteur asynchrone, commandé par un convertisseur d'énergie à flux vectoriel associé à un codeur rotatif incrémental, remplace la gamme des trois vérins double effet, le capteur inductif et la temporisation de la version pneumatique. On obtient ainsi une plus grande souplesse d'utilisation garantissant un marquage plus précis.

L'unité de marquage didactisée

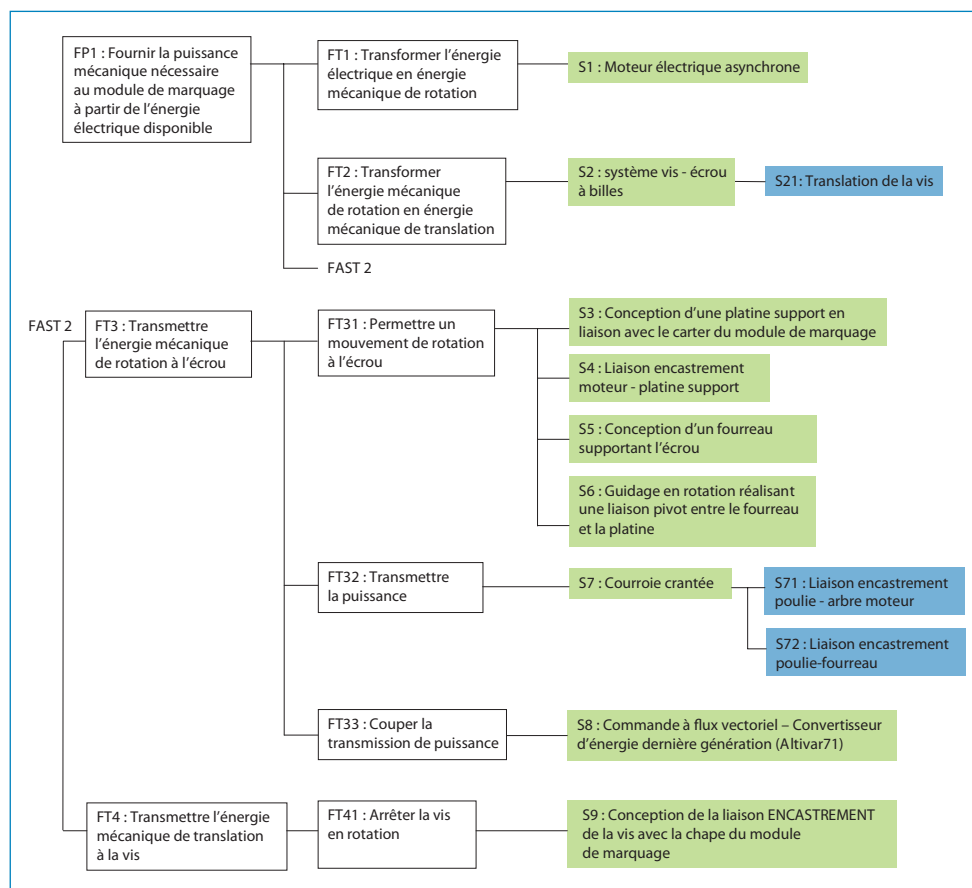
Le fonctionnement du système (travail à couple constant pour une vitesse nulle pendant la phase de marquage) présente une partie commande intéressante et à la pointe de la technologie actuelle. La partie opérative est robuste, les efforts dans les liaisons sont importants et demandent des études sur le comportement du système, qui utilise plusieurs composants standard à valider. Sa parfaite correspondance avec le programme de BTS CPI a donné l'idée à l'équipe pédagogique de développer entièrement le produit sous une forme didactisée.

Le système didactisé **9** est très proche du modèle industriel. Une différence cependant, la maquette fonctionne sous une tension de 230 V monophasée pour pouvoir être utilisée dans les salles de cours. La tête de marquage a été remplacée par un pointeau au logo du lycée, une cellule de force ajoutée. L'ensemble est monté sur un châssis en profilés et couvert par un capot protecteur équipé d'un capteur de sécurité TOR (Tout Ou Rien).

Les applications pédagogiques proposées s'adressent aux STS CPI. Elles ont pour objectif de faire découvrir aux étudiants, de manière intuitive et par la manipulation, une transmission mécanique actionnée par un moteur électrique (ici un Leroy Somer).

Outre les points de mesure pour l'exploitation du système, la maquette didactisée a été largement instrumentée :

- Une cellule de force de marque Scaime permet la mesure l'effort de la tête de marquage sur la tôle (5 000 daN).



9 Le Fast partiel du modèle industriel électrique

- Un capteur inductif détecte la position ouverte du bras de serrage qui est la position initiale de l'unité de marquage.
- Un capteur TOR coupe toute action sur l'unité de marquage en cas d'ouverture du capot de protection.
- Un capteur inductif détecte la fin de course.
- Un codeur incrémental Baumer associé au convertisseur ATV 71 et au moteur asynchrone permet, par la connaissance de la position de l'arbre moteur, le fonctionnement en contrôle vectoriel de flux (mode CVF). Ce fonctionnement en boucle fermée augmente les performances de l'entraînement, indépendamment de l'état de charge du moteur ; on obtient alors un couple à zéro de vitesse, une régulation de vitesse et de couple précise.

La partie commande fournie par Schneider Electric est gérée par l'automate programmable Twido, un dispositif électronique destiné à la commande de processus industriels par traitement séquentiel. Équipé d'un port Ethernet intégré, il permet l'échange de données avec le terminal graphique, un écran tactile couleur Magelis, qui assure également la communication avec le convertisseur donnant les consignes de fonctionnement au système. L'utilisation de composants communicants, Ethernet et Bluetooth,

variateur ATV 71 avec système Web embarqué, a été choisie parce que, dans le domaine industriel, l'intervention d'un technicien peut se faire à distance. L'application concerne le réglage des différents paramètres pour un marquage correct et le contrôle du bon fonctionnement.

L'exploitation de l'unité est donc rendue plus souple tant du point de vue de la commande que du point de vue de la supervision. Elle peut se faire à distance par le réseau internet via une adresse IP **11**. L'unité peut de fait équiper un laboratoire et être utilisée simultanément par deux groupes d'étudiants.

Les grandeurs physiques issues du système sont exploitées à l'aide de PowerSuite **12**, un atelier logiciel convivial destiné à la mise en œuvre et à l'exploitation du convertisseur d'énergie ATV71 – configuration, mise en service, maintenance. La présentation des paramètres de l'appareil se fait sous forme de diagrammes ou de tableaux de mesures.

Les travaux pratiques

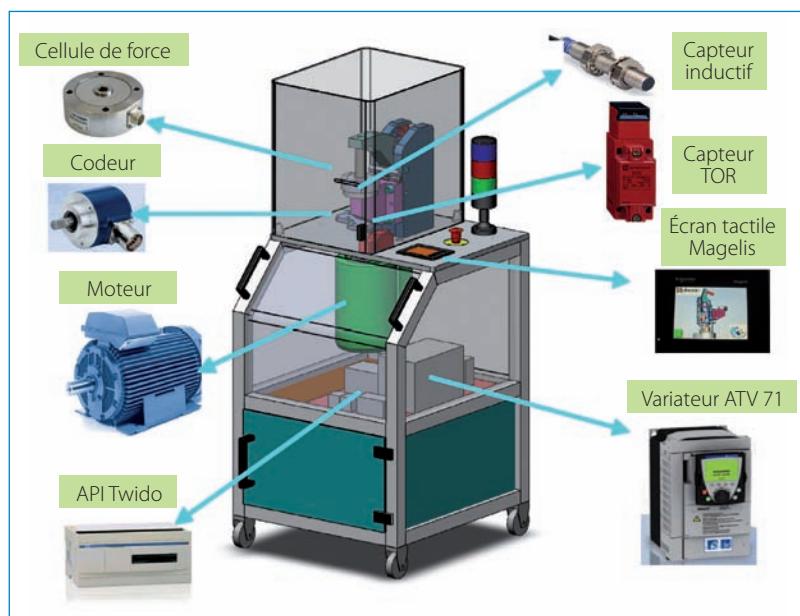
Les TP portent sur la comparaison des résultats obtenus sur les différents modèles avec les mesures faites sur le système réel. Outre l'intérêt de l'usage d'un modèle numérique, il s'agit de montrer l'influence d'un modèle sur les résultats obtenus et le

moyen de caler un modèle par des mesures réelles.

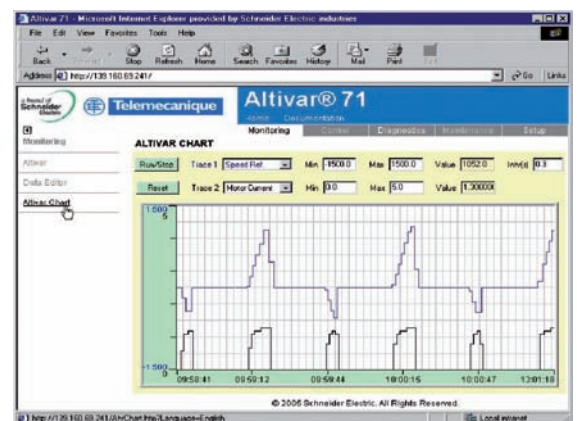
L'effort de marquage en fonction du couple moteur

Plusieurs modèles sont proposés dans le secteur industriel pour le marquage ou le serrage d'éléments de tôlerie. Les leviers portant la tête de marquage ou de serrage peuvent avoir trois longueurs différentes.

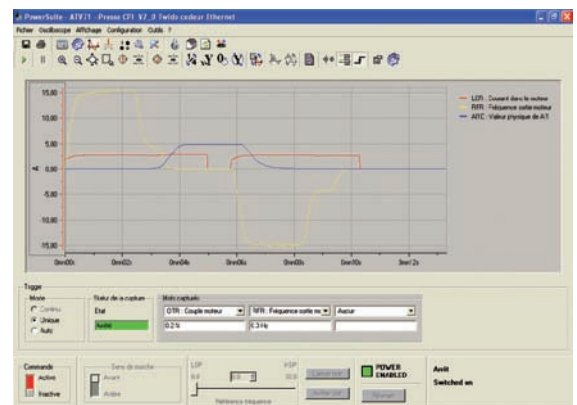
L'objectif est d'établir à partir du modèle numérique un abaque permettant au technicien de régler l'unité en fonction du type du levier et de la matière de la tôle à marquer ou serrer. Pour cela, l'étudiant devra effectuer des mesures sur le système réel afin d'établir la courbe effort en fonction du temps, et comparer les résultats avec ceux obtenus par le modèle numérique **13**. Le « recalage » du modèle numérique par rapport au réel **14** permettra d'établir des courbes effort/couple pour d'autres géométries de leviers et d'autres comportements de matériaux.



10 L'unité de marquage didactisée

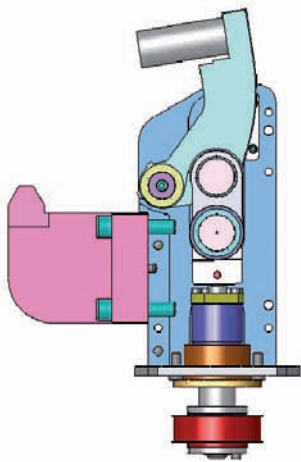


11 La commande à distance du système



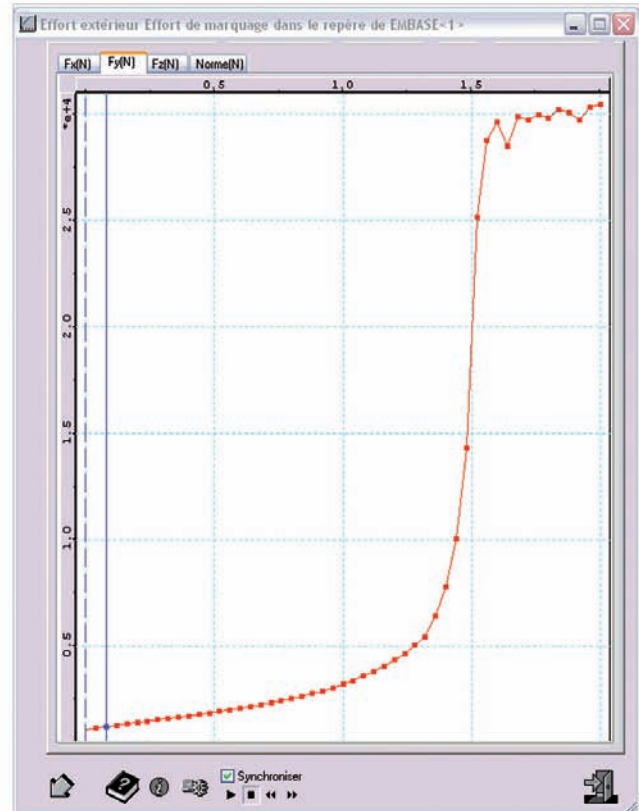
12 L'exploitation du convertisseur d'énergie par le logiciel PowerSuite

Mesure sur le système réel



Modélisation numérique

Courbe effort en fonction du temps du modèle recalé



13 La manipulation sur l'unité de marquage et le modèle numérique pour obtenir l'évolution de l'effort en fonction du temps

La motorisation

L'objectif de cette étude est d'optimiser le choix du couple moteur électrique - variateur. L'originalité de la démarche proposée réside dans l'interdépendance des parties mécanique et électrotechnique pour résoudre la problématique. Les questions s'enchaînent aussi bien dans le domaine de la mécanique que dans celui de l'électrotechnique et permettent, à l'issue, de calculer, vérifier et choisir correctement la partie commande. En utilisant la relation couple moteur C_m en fonction de l'effort de marquage F , on étudie la chaîne cinématique de l'unité de marquage 15 pour choisir le moteur le mieux adapté à nos contraintes.

La résistance du levier

Le levier de marquage 16 est fortement sollicité en effort et soumis à une sollicitation fréquente pendant au moins 3 millions de cycles. Cette

pièce présente donc un fort intérêt pour une analyse par éléments finis et une ouverture vers un calcul à la fatigue. À nouveau, la comparaison des résultats issus du modèle avec les mesures sur le système réel est mise en avant.

En effet, le levier peut être équipé de jauges permettant d'obtenir une mesure de ses déformations lors de la phase de marquage. Ce dernier ayant lieu à vitesse de déplacement nulle, il est possible d'appliquer la théorie de l'élasticité par le biais d'un modèle de calcul par éléments finis. Cela permettra d'ouvrir les investigations liées à un choix de matériau, une optimisation de forme, en utilisant des données issues d'un cahier des charges pouvant évoluer selon les besoins du client. Le modèle numérique prend alors tout son sens par rapport à de coûteuses mesures faites sur une pièce réelle. Les modèles fournis mettent parfaitement en évidence les deux zones

critiques de cette forme de levier, un résultat corroboré par les zones de défaillance des pièces réelles.

D'autres activités sont possibles. Par exemple, une mallette mettant à disposition l'ensemble de transmission vis - écrou à billes permettra l'étude d'un montage de roulements non conventionnel, en le démontant, par une analyse des jeux, qui conduit à de la cotation fonctionnelle, et des surfaces, menant à de la spécification. L'automatisme n'est pas en reste, puisque l'utilisation du module Iris 3D dans Automgen, pour le pilotage du process, permet une simulation en toute sécurité du programme à implanter dans la partie opérative.

Des TP pluridisciplinaires

Ce thème de CPI est dans sa phase d'industrialisation ; il fera l'objet d'une publication sur le site du CNR-CMAO.

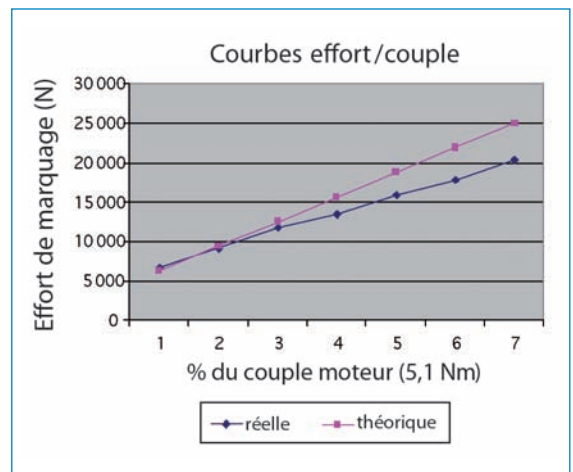
Toutes les démarches d'un concepteur de bureaux d'études ont été suivies

et seront mises à disposition : le premier cahier des charges, l'analyse du besoin, l'analyse fonctionnelle, la recherche de solutions, la conception d'un prototype, la mise au point, l'industrialisation, et même la mise en conformité avec la norme CE. Tous ces points représentent le travail de nos futurs étudiants en collaboration avec des spécialistes de différentes disciplines, mécanique, électrotechnique, productique...

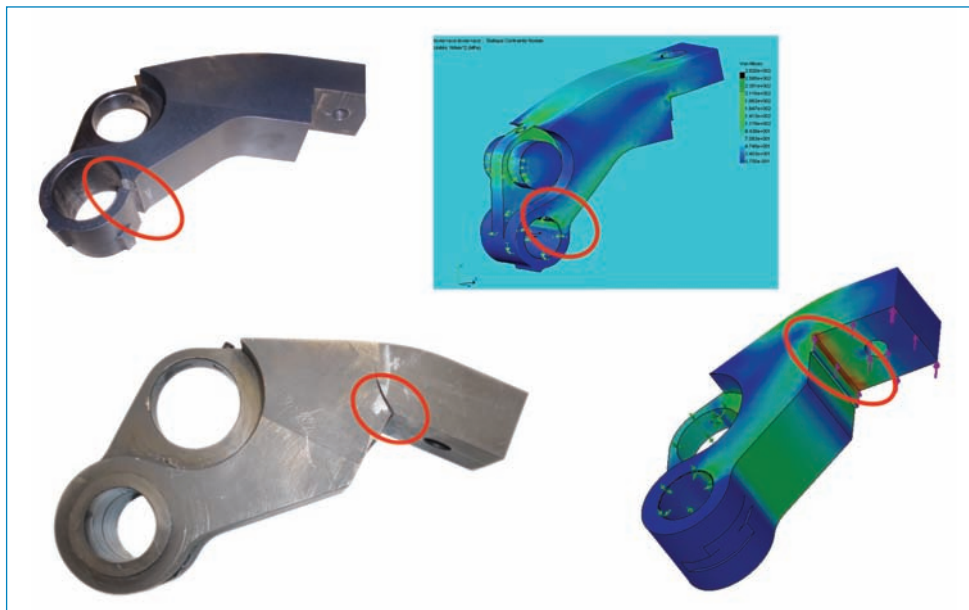
Des TP communs de mécanique et de motorisation permettent d'associer deux disciplines dans le même objectif de formation. Nos étudiants de provenances différentes, bac pro, bac STI,

bac S, peuvent, avec l'unité de marquage, manipuler, commander une machine industrielle, et s'intéresser aux différents organes mécaniques ou électrotechniques qui la composent. Le travail sur le système réel les stimule. Celui sur les modèles numériques, avec la manipulation de logiciels de simulation virtuelle donnant des résultats proches des mesures réelles, formalise l'intérêt de l'étude.

Enfin, les systèmes communicants sont utilisés aujourd'hui pour la maintenance à distance dans le domaine industriel, et il est important de familiariser nos futurs concepteurs à cette télémaintenance. ■



14 La comparaison du modèle numérique et du système réel



En ligne

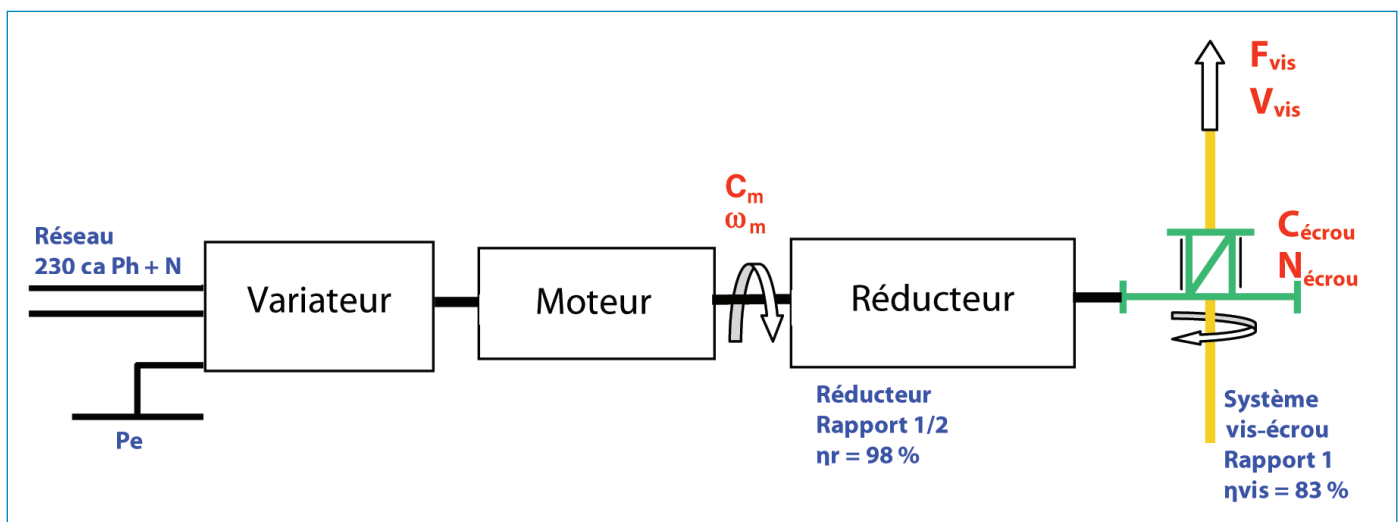
Le programme Motor Challenge sur le site de l'Ademe :

www2.ademe.fr/servlet/KBaseShow?sort=-1&cid=17184&m=3&catid=23813

Robotics :

www.robotic.fr

16 Des leviers réels rompus et les modèles par éléments finis correspondants



15 La chaîne cinématique de l'unité de marquage