

Roulements et mécatronique

Un développement lié ?

Après l'automobile et ses roulements de roue instrumentés, l'industrie est de plus en plus friande de modèles intégrant des capteurs. Les applications sont plus variées, mais contraignent les fournisseurs à traiter parallèlement les aspects mécanique, électronique et logiciel, et bouleversent leurs habitudes.



Chez SKF, les roulements mécatroniques sont désormais déclinés en toute une gamme.

Any connection between rolling bearings and mecatronic developments ?



Automotive industry came first. Now any manufacturing industry use instrumented rolling bearings. Old habits become completely upset as applications become more diversified and suppliers are bound to manage any mechanical, electrical and software issues.

► Un jeu de billes ou de rouleaux, deux bagues et une cage métallique qui maintient les unes dans les autres. Voilà qui suffit à construire un roulement digne de ce nom. Mais de plus en plus souvent, ces constituants de base sont complétés de nouveaux amis un peu plus inattendus dans le monde de la mécanique : des capteurs, des connectiques, voire des circuits imprimés, placés contre ou au sein même du composant. Le résultat : des roulements dits instrumentés ou mécatroniques.

DES APPLICATIONS RECONNUES

Les applications reines de ces roulements ? On les retrouve dans les automobiles. Les dispositifs d'antiblocage de roues, désormais obligatoires, les systèmes anti patinage et les directions à assistance électrique, en particulier, nécessitent tous ces roulements associés à des capteurs de vitesse de rotation ou de position angulaire, utilisant majori-



Timken

Les Skidsteer A300 de Bobcat intègrent six roulements capteurs, de position et de vitesse de Timken pour améliorer leur motricité.

UN GROUPE DÉDIÉ À LA MÉCATRONIQUE AU SEIN D'ARTEMA

Le monde de la mécatronique est encore mal connu, même au sein de la maison de la mécanique. Afin de clarifier la place de cette nouvelle discipline, Artema vient de créer un groupe « Mécatronique ».

Ce 7ème groupe du syndicat professionnel comptera des acteurs des roulements mais aussi d'autres domaines, et traitera des aspects R&D, techniques et économiques liés à la mécatronique.

tairement des méthodes de mesure magnétiques. Et les chiffres donnent le vertige. « Depuis 1997, nous avons produit plus de 110 millions de roulements capteurs », annonce Hervé Lénon, responsable du département produits innovants et mécatronique de SNR Roulements (qui appartient désormais au Japonais NTN).

« L'automobile a été un gros moteur de la mécatronique au départ. Mais désormais, beaucoup de demandes viennent de l'industrie », commente Romain Parisot, Business Manager mécatronique chez SKF. Et dans ce domaine, les applications des roulements capteurs sont de plus en plus diverses. « La machine-outil est un secteur très friand en roulements instrumentés, par exemple pour l'indexation de tables de centres d'usinage », explique notamment Bruno Senger, responsable mécatronique industrie chez Schaeffler, en Allemagne. Le fabricant propose pour cela des couronnes de grande

dimension dotées de capteurs magnétiques intégrés. Diamètre des roulements : de 180 mm à... 700 mm !

DES DÉBOUCHÉS NOUVEAUX

Le machinisme, qu'il soit agricole, de travaux-publics ou industriel (les chariots de manutention en particulier) est maintenant également coutumier de la mécatronique. Chez SKF, un des derniers développements, baptisé Pin Encoder (voir encadré page 14), est ainsi destiné à être monté sur les bras articulés des pelles mécaniques. Sur ses Skidsteer A300, de petits engins de TP dont les roues droites et gauches se commandent



Le module roulement instrumenté AHE de SKF est une solution « plug and play », selon le Suédois.

indépendamment, l'Américain Bobcat utilise quant à lui pas moins de six roulements mécatroniques à capteur magnétique développés par Torrington (filiale de Timken) : deux à mesure de vitesse et quatre à mesure d'angle. Ces composants permettent à un contrôleur électronique de faire tourner les roues à des vitesses différentes en fonction de leur position angulaire, afin d'améliorer la motricité de l'engin.

Dans le ferroviaire, les roulements de boggies sont équipés de capteurs qui calculent la distance qu'ils parcourent et déclenchent une alarme à l'approche de la fin de vie du composant. Chez Schaeffler, « ces roulements intègrent

également des capteurs qui mesurent le taux d'huile dans la graisse afin de détecter une mauvaise lubrification », explique Bruno Senger. Il s'agit de petits capteurs chimiques qui réagissent à

la présence d'huile ou au contraire, à son absence. Le suivi des performances des roulements, surtout ceux qui sont inaccessibles (au fond de l'eau, au sommet d'une éolienne, dans une

machine d'imprimerie géante ou dans une cimenterie), est d'ailleurs devenu une fonction importante pour les industriels. Pour cela, les fournisseurs des roulements leur proposent des servi-

catronique, est appelé à s'imposer dans de nombreuses applications et notamment dans les « produits mécatroniques » (au sens de la norme NF E 01-010 Mécatronique-Vocabulaire) »,

LE PIN ENCODER DE SKF INSTRUMENTE LES PELLES MÉCANIQUES

Petit, précis, robuste. Ainsi pourrait-on résumer les qualités du Pin encoder de SKF, un roulement instrumenté destiné à la mesure d'angles sur des bras articulés de machines de chantier, pelleuses, chargeuses, etc. Son principe est tout simple : la bague intérieure-



Le Pin Encoder mesure moins de 60 millimètres de long. Cela lui permet de se monter sur les engins sans modification importante de la mécanique.

re du roulement est solidaire d'un cône aimanté qui vient se loger dans une des parties de l'articulation du bras ; la bague intérieure est solidaire d'un corps fixé à l'aide d'une plaque sur l'autre partie. Pin encoder mesure la variation d'angles entre les deux parties par effet Hall. L'information de position angulaire est traitée dans une carte électronique intégrée dans le corps, puis envoyée directement vers le système électronique par une liaison CAN sécurisée.

L'exploit de ce composant qui s'est vu décerner un Mechatronic Awards 2008 sur le salon SCS, en décembre dernier ? D'abord sa compacité – sa longueur totale ne dépasse pas 60 millimètres et son diamètre 18 millimètres - qui lui permet d'être inséré, sans modification importante du mécanisme receveur, au cœur

de l'articulation du bras instrumenté, et donc de garantir une grande précision de mesure et des temps de réactions courts. Pour gagner de la place, SKF a notamment fait appel à une technologie de carte électronique flexible, complètement intégrée dans le corps du composant.

Ensuite, sa robustesse. Le pin encoder est en effet étanche IP 67, supporte les forts niveaux de vibrations des machines de chantier et les contraintes électriques, et garantit sa précision sur une grande plage de températures. Le Pin encoder ne nécessite en outre aucune maintenance spécifique.



La bague extérieure est fixée à la partie fixe de l'articulation. C'est elle qui abrite l'électronique du système.

Développé depuis deux ans par l'Automotive Development Center de SKF, au sein du service Sensor Integration, le Pin Encoder est destinée en priorité aux engins de TP en tous genres (un grand constructeur a d'ailleurs participé à son développement), afin d'autoriser l'automatisation de leurs bras articulés. Mais il trouvera certainement des applications dans d'autres domaines, et sur d'autres véhicules...



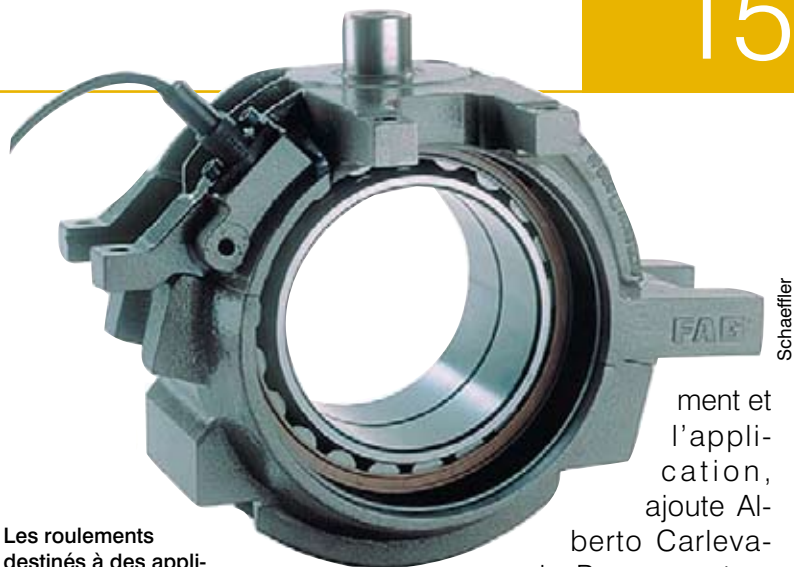
Cette variante du roulement capteurs de SNR Roulements est dédiée à des applications de direction « électrique ».

ces d'analyse de vibrations, éventuellement à distance, qui permettent de passer d'une maintenance curative onéreuse à une maintenance préventive.

UN DÉVELOPPEMENT SOUS CONTRAINTE

« Bien sûr des améliorations sont apportées aux roulements proprement dits, comme les billes en céramiques pour certaines applications où la résistance à la corrosion, des températures élevées, un fonctionnement à sec, un faible poids, le caractère amagnétique des céramiques, la rigidité, la fiabilité et les faibles coûts d'entretien sont un atout par rapport aux métaux. Mais inexorablement l'instrument fonctionnel intelligent que représente le roulement mé-

explique Alain Guillard, conseiller technique d'Artema. Cela complique d'autant le travail des développeurs. « Pour le marché des roulements, il s'agit de répondre aux besoins de compacité pour fonctionner dans un environnement réduit, tout en améliorant les performances dynamiques et la durée d'utilisation, avec des étanchéités efficaces pour des ambiances difficiles et une diminution de la consommation en énergie, mais aussi de les intégrer dans la surveillance et/ou la commande de produits mécatroniques », explique Alain Guillard. Et les contraintes sont nombreuses. « L'électronique n'aime pas la température, la connectique n'aime pas l'humidité », commente Hervé Lénon. Sans compter que



Les roulements destinés à des applications ferroviaires de Schaeffler intègrent des systèmes de mesure de la durée de fonctionnement du composant, ou encore de détection de présence d'huile, afin d'en optimiser la maintenance.

« à chaque application correspond des contraintes particulières », prévient Alberto Carlevaris directeur du centre Automotive Development, service Sensor Integration de SKF, qui travaille pour l'automobile, mais aussi pour l'industrie.

Les performances exigées par les utilisateurs sont également très différentes. « Une application sur une machine-outil requiert généralement des précisions plus importantes qu'une autre sur un chariot élévateur », explique Bruno Senger. Et « les technologies adoptées sont différentes selon la taille du roule-

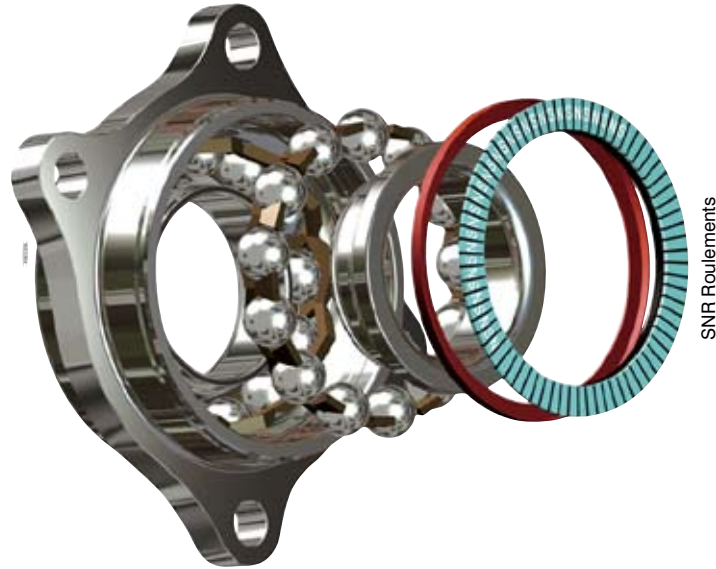
ment et l'application, ajoute Alberto Carlevaris. Pour un moteur

électrique, il faut ainsi un système qui permette à l'arbre moteur de passer au travers du capteur. Pour d'autres comme le Pin Encoder, le roulement capteur peut être placé en bout d'arbre ». La partie électronique des composants subit aussi des contraintes fortes. En particulier dans l'automobile, « l'électronique doit être plus robuste que celle destinée aux applications grand public, commente Hervé Lénon. Les dernières générations d'électronique, moins éprouvées, ne peuvent pas être mises en oeuvre sur des produits où un fort niveau de fiabilité est attendu ». Cela nécessite donc de trouver des fondeurs de semi-conducteurs qui s'engagent à fournir ces technologies



Les roulements de roues automobile, tel celui-ci proposé par Schaeffler, doivent intégrer l'électronique dans un encombrement dicté par la mécanique.

sur des périodes longues (plus de 10 ans quand l'on s'adresse à l'aéronautique). Le roulementier peut aussi s'adapter aux dernières technologies en date. Mais dans ce cas, « on gagne en performance mais on perd de l'énergie à tout requalifier car il faut reconcevoir la puce complètement », explique Hervé Lénon. Autre élément important, « il faut également prévoir un câblage approprié », ajoute-t-il.



Sur le roulement capteur ASB de SNR Roulements, la mesure de vitesse ou de position de la bague extérieure par rapport à la bague intérieure est réalisée à l'aide d'une couronne magnétique.

LE ROULEMENT QUI MESURE DES EFFORTS

SNR Roulements a fait figure de pionnier dans les roulements instrumentés pour l'automobile. Avec la troisième génération de son ASB, grand prix des Mechatronics Award 2008, le Français passe un nouveau cap : après la vitesse de rotation, ce roulement capteur mesure les efforts qu'il subit. Pour cela, des jauges extensométriques mesurent les microdéformations de la bague intérieure fixe du roulement. A partir de ces informations, un al-

au système de contrôle de trajectoire (type ESP) les informations relatives aux efforts appliqués sur chaque roue, et donc sur l'adhérence du véhicule, en complément des informations de roulis et de lacet fournis par des accéléromètres placés sur le véhicule, pour lui permettre de réagir encore plus rapidement. Fin 2008, SNR Roulements a d'ailleurs réalisé des tests grandeur nature sur une voiture modifiée pour l'occasion et embarquant



Cette troisième génération de roulement instrumenté ASB mesure les efforts mécaniques qu'il subit, tout en restant dans l'encombrement normal d'un roulement de roue d'automobile.

gorithme spécifique remonte jusqu'aux efforts réels (forces et moments) appliqués sur la roue elle-même.

Sur une automobile, l'utilisation de ce type de roulements permettrait de fournir

une batterie d'appareils d'acquisition et de traitement des informations. D'autres applications, dans les engins de construction, la robotique ou les éoliennes sont également envisagées.

DES ASPECTS NOUVEAUX À TRAITER

Le point le plus important dans la conception de roulements mécatroniques ? « Le traitement du signal », répond selon Bruno Senger. Selon le spécialiste, rien ne sert de disposer d'un capteur au plus près du roulement si le signal qu'il transmet est mauvais. En revanche, un bon traitement du signal peut compenser des imperfections du capteur lui-même. Pour Alberto Carlevaris, « le grand enjeu de la mécatronique par rapport à la méca-

la mécatronique, nous avons appris à maîtriser de nouveaux domaines comme le magnétisme et les ASICS », témoigne Hervé Lénon, de SNR Roulements. Pour maîtriser l'ensemble de la chaîne, le français a embauché des experts et s'appuie sur des partenaires spécialisés dans différents domaines. Chez SKF, « les compétences étaient là, dans nos usines, nos centres de recherches et dans les sociétés rachetées par le groupe », commente Romain Parisot. Chez S2M, spécialiste des paliers magnétiques désormais filiale de SKF, deux façons de procéder sont possibles : « Pour les séries importantes, des équipes projets transverses qui intègrent toutes les compétences travaillent sur la conception. Pour des volumes plus restreints, des équipes de mécanique et d'électronique séparées travaillent parallèlement », explique Eric Hélène, directeur Business Development. Enfin, « une bonne conception d'un système mécatro-

« Le point le plus important dans la conception de roulements mécatroniques ? Le traitement du signal »

que, c'est de bien comprendre l'application finale. Il faut comprendre le niveau système global, et pas seulement celui son composant ». Ces contraintes fortes impliquent des compétences nouvelles en électronique, dans les logiciels, mais aussi dans l'électronique de puissance, et l'analyse système. « Avec

nique passe par une méthodologie adaptée », prévient Alain Guillard, conseiller technique d'Artema. Le syndicat, déjà à l'origine d'une norme de vocabulaire mécatronique, travaille d'ailleurs sur l'élaboration d'une méthode de conception. L'enquête probatoire devrait être faite pour l'automne.

DES CONSÉQUENCES SUR LES OUTILS DE CONCEPTION ET DE FABRICATION

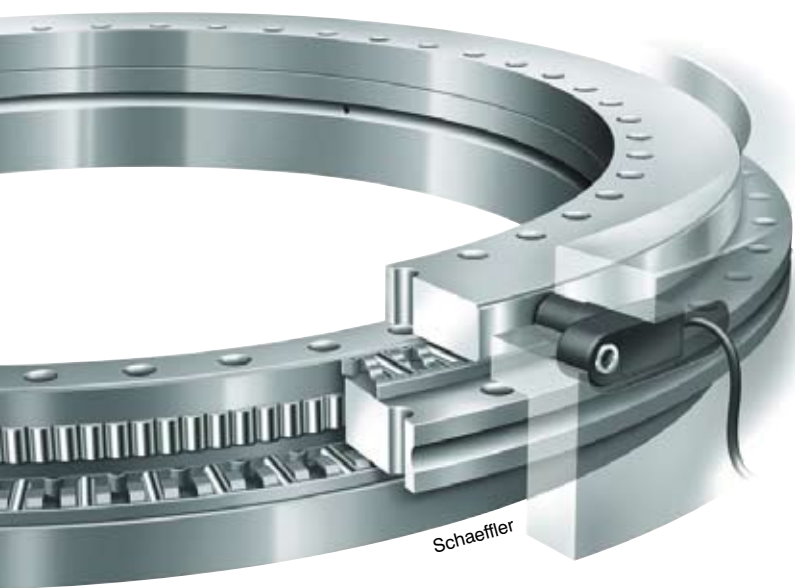
La mécatronique a également des conséquences sur les outils utilisés pour bâtir ces nouveaux roulements. Comme les connaissances des ingénieurs, les logiciels de conception doivent être pluridisciplinaires. A Vernon, S2M utilise les logiciels de modélisation et de simulation Simulink et Matlab de The Mathworks pour anticiper le comportement des futurs paliers, mais aussi de leur contrôleur avant de valider leurs choix, sans construire de prototype physique. De même, dans un roulement instrumenté, la distribution



SKF

Dès la conception des roulements mécatroniques, il est nécessaire de prévoir les moyens de contrôle à 100% de la production (ici chez SKF).

des efforts est par exemple intimement liée à celle de la température dans le composant. Pour tenir compte de ces couplages, les spécialistes utilisent notamment des outils de simulation qui s'appuient sur une modélisation mixte mécanique et électronique des futurs produits. En électronique, la nécessité de faire « très compact », pour prendre place dans des espaces mécaniques déjà définis, nécessite également d'intégrer les composants au mieux, mais aussi de minimiser leur nombre. Tous ces aspects sont de plus présents dans les outils de conception assistée par ordinateur plus classiques (voir encadré page 19).



Les roulements de Schaeffler destinés aux applications sur des machines-outils peuvent atteindre des diamètres de 700 millimètres.

Enfin, les méthodes de production doivent aussi s'adapter à l'insertion de modules électroniques dans les ensembles mécaniques. Pour les composants fabriqués en petites séries, le montage peut se faire sur des lignes dédiées. La production en masse, le montage des parties électroniques et de leur connectique est réalisée en fin de ligne (pour les codeurs par exemple), ou beaucoup plus tôt, pour les roulements dotés de capteurs d'efforts, notamment, qui sont placés au cœur même du roulement. Et le couplage induit de nouvelles contraintes. « Dès la conception du produit, il faut penser à l'intégration de tests et de procédures de calibration des parties électroniques directement dans les lignes », explique Hervé Lénon, de SNR Roulements. Un point critique car « la mécatronique augmente la complexité des systèmes ; il faut s'assurer de produire des composants sûrs », commente Alberto Carlevaris. Tout en préservant les cadences des lignes... En outre, l'ajout de ces fonctions implique de prendre des précautions supplémentaires dans la manipulation des composants en cours de montage.

TOUJOURS PLUS LOIN

Dans leurs développements, les roulementiers sont devenus très pragmatiques. « On a fini de se faire plaisir avec des roulements qui savent tout faire. Les produits actuels répondent à des demandes claires du marché », déclare Romain Parisot de SKF. Le suédois mène d'ailleurs beaucoup de nouveaux projets en partenariat avec des clients grands comptes. Schaeffler suit la même voie. « Il y a quelques années, Schaeffler a travaillé sur un roulement « intelligent » intégrant toutes les fonctions possibles : vitesse

position, forces, température, vibrations, etc. Le projet a finalement été abandonné mais il a été décliné en plusieurs petits projets ciblés », raconte Bruno Senger. A l'avenir, aussi, « il va falloir pousser la robustesse des produits pour mieux répondre à la diversité des usages et notamment à l'utilisation dans les nouveaux marchés comme les pays émergents », ajoute Hervé Lénon.

Parallèlement, les investigations continuent. « Dans l'automobile, il y a des développements intéressants dans le cadre de l'hybridation des véhicules. Les moteurs de traction électrique nécessitent roulements capteurs adaptés à l'électronique de puissance », explique Alberto Carlevaris. Les défis à relever ? « Les températures de fonctionnement y sont très élevées, autour de 150 degrés », explique le directeur du centre de recherche de Saint-Cyr-sur-Loire. Et surtout, l'électronique embarquée doit présenter une haute résolution et une vitesse de réaction suffisante pour permettre de limiter les variations de couples développés par le moteur, qui génèrent des vibrations gênantes pour le conducteur et les passagers du véhicule.

Pour NKE, l'avenir semble passer par l'utilisation de technologies alternatives au magnétisme. « Les roulements instrumentés classiques, qui utilisent des techniques magnétiques, sont sensibles aux perturbations électromagnétiques et aux sources d'interférences », explique-t-on chez le roulementier. L'Autrichien a donc décidé de développer un roulement doté d'un système de mesure de la position angulaire et de la vitesse et

DIDIER SEPULCHRE, PRÉSIDENT DU GROUPE ROULEMENTS ET GUIDAGES LINÉAIRES D'ARTEMA



« Lorsque, il y a déjà plus de 20 ans, de géniaux créatifs dans nos bureaux d'études eurent l'idée du concept de roulement capteur, qui aurait pu imaginer l'impact phénoménal qu'aurait cette invention sur le destin des fabricants de roulements ? Qui aurait pu imaginer a priori, y compris en faisant appel à des concepts marketing bien établis, que cette innovation de rupture soit de nature à modifier la trajectoire de nos entreprises ? L'exercice « a posteriori » est plus facile, si l'on s'autorise une petite dose de « lucidité rétrospective » et force est de

constater que le roulement est devenu aujourd'hui le support de fonctions mécatroniques évoluées.

Le roulement est remarquable par l'universalité de son utilisation : dès qu'un mouvement de rotation est à assurer sous efforts, il constitue la solution privilégiée, que ce soit dans l'industrie, l'automobile ou l'aéronautique. Le roulement est également remarquable par sa pérennité technologique : on ne perçoit pas, à un horizon visible, l'avènement d'une solution alternative majeure, de nature à remettre en cause significativement le roulement.

Que ce composant mécanique basique, perçu par le commun des mortels comme faisant partie des objets parfaitement matures, dénués de toute possibilité d'activité innovante, puisse être l'objet de tant d'énergie créatrice, de tant de réflexion stratégique, de tant de Recherche et Développement, voilà le message essentiel qu'Artema souhaite faire passer. »

du sens de rotation insensible à ces perturbations. La solution : un roulement instrumenté employant des méthodes optiques. Ce modèle encore au stade de prototype pourrait trouver des applications dans les chariots de manutention, les technologies médicales, le positionnement de tables

dans l'industrie etc. La dernière grande nouveauté du domaine ? Associer au roulement une électronique capable de mesurer les efforts mécaniques qu'il subit. Chez SNR, la troisième génération de roulement ASB (voire encadré page 16) est ainsi doté de jauges de contraintes dont les

informations, traitées par un algorithme adapté, permettent de déduire les efforts mécaniques complets (moments et forces) au contact des roues d'un véhicule avec la route. Là encore, le défi est de taille car les résultats de mesure sont intimement liés à la variation perturbatrice des tempéra-



NIKE

Afin de palier les limites des technologies magnétiques, le dernier prototype de l'autrichien NIKE repose sur une technologie de mesure optique.

LES OUTILS DE CONCEPTION PROGRESSENT

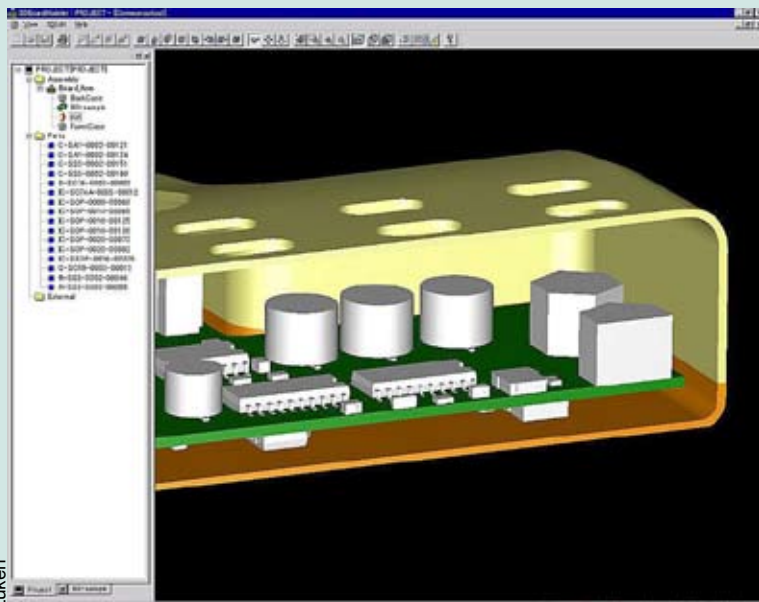
Pour concevoir efficacement des produits mécatroniques, il faut des outils permettant de mener tous les développements de front. C'est le cas de Matlab et Simulink, de The Mathworks, qui permettent de réaliser les conceptions des parties mécaniques et électroniques, voire logicielles dans un environnement commun, selon l'approche Model-based Design (conception concentrée sur le modèle). « La méthode classique consiste à réaliser des prototypes physiques mécanique et électronique séparément. Pour la partie électronique, il s'agit souvent de partir des algorithmes de calcul et de les intégrer dans un système embarqué. Les phases de tests interviennent alors as-

sez tard dans le processus de développement du système et lorsqu'on découvre des erreurs, leur correction coûte cher. Le Model-based design permet au contraire de réaliser des tests à chaque étape et de tester des variantes de conception. », explique l'éditeur britannique.

Les outils traditionnels de la CAO électronique évoluent aussi dans le sens de la mécatronique. Chez Zuken, par exemple, le nouveau logiciel collaboratif Board Modeler permet aux concepteurs mécaniques et « circuits imprimés » (PCB) de travailler en collaboration plus étroite et de façon synchronisée dès la phase de planification. Pour cela, l'application prend en charge la forme 3D réelle

des composants des cartes électroniques insérées dans les modules mécaniques. Il est alors possible de mener à bien le placement, de réaliser les tests de collision entre les boîtiers de cartes électroniques, les composants ou d'autres cartes. Les modèles de cartes peuvent ensuite être exportés directement vers des outils de simulation pour la vérification mécanique, électrique ou thermique.

Le monde de la CAO mécanique suit aussi le même chemin. Dans le cadre des pôles de compétitivité Mov'éo et System@matic, en particulier, 33 partenaires dont Dassault Systèmes – l'éditeur de Catia – et Valéo (le coordinateur) se sont regroupés au sein du projet Outil de conception et de Modélisation Mécatronique (O2M), qui vise à développer une plateforme commune multi-métiers pour la conception mécatronique, grâce à un référentiel unique. En particulier, il doit développer « un seul modèle intégrant tous les paramètres métiers et utilisé à tous les stades », expliquent les responsables du projet. O2M vise une augmentation de l'efficacité des ingénieurs de 30 à 50%, une accélération générale des cycles de conception des produits et une amélioration de la qualité des produits mécatroniques d'un facteur 5 à 10 !



Zuken

Afin de s'adapter à la fusion de la mécanique et de l'électronique, le Board Modeler de Zuken permet de modéliser les circuits imprimés en 3D.

res dans le composant, entre autres.

Le français n'est pas le seul à travailler sur ce sujet. Chez Schaeffler, « nous avons réalisé des prototypes de roulements avec des capteurs piézoélectriques intégrés (des accéléromètres) pour analyser les forces et réaliser des analyses vibratoires », annonce Bruno Senger. Et chez SKF « la technologie est prête, nous avons des véhicules de démonstration qui tournent », annonce Alberto Carlevaris. Mais ce genre de développement induit de nouvelles contraintes. « Pour remonter au niveau du contact pneu-route, il est nécessaire d'utiliser un modèle de l'ensemble du train roulant qui ne peut être fourni que par le constructeur et le fournisseur de pneu », explique-t-il. Or, le moindre changement sur la voiture ou même sur les pneus qui l'équipent peut fausser ce modèle... De quoi faire encore phosphorer les ingénieurs... Mais surtout, le directeur du centre de recherche du groupe suédois se pose une autre question, d'une simplicité biblique et qui prend tout son sens en période de crise : « Le marché en a-t-il besoin ? ». ■

Jean-Sébastien SCANDELLA