

De la Mécanique à la Mécatronique

Nous sommes entourés de produits mécatroniques : automobile moderne, avion de chasse, appareil photo, disque dur, roulement à billes instrumenté, etc.

Le terme de mécatronique est apparu au Japon en 1969. Presque quarante ans plus tard, la mécatronique est portée au rang de technologie majeure par l'Europe pour le 7^e programme cadre de recherche 2007-2013. Le Cetim la classe parmi les « Technologies Prioritaires 2010 en Mécanique ». Les grands donneurs d'ordre la placent au cœur de leurs nouvelles conceptions.

La mécatronique késaco ?

La mécatronique peut se définir comme l'utilisation simultanée des techniques du génie mécanique, de l'électronique, de l'automatisme, de l'informatique et de l'analyse système, en vue de concevoir et d'optimiser un produit, un équipement ou un procédé.

Nous sommes donc entourés de produits mécatroniques : automobile moderne, avion de chasse, appareil photo, disque dur, roulement à billes instrumenté, pèse-personne électronique... Et cet éventail à la Prévert pourrait se prolonger très longtemps. Reste que la conception d'un équipement mécatronique ne se résume pas à

l'adaptation d'un système de commande électronique piloté par ordinateur sur un mécanisme existant. Elle nécessite, dès le début de l'étude, l'intégration des différentes technologies répondant aux exigences fonctionnelles. La mécatronique repose finalement sur l'optimisation de couplages multiples : gérer le multi-domaine (méca-

nique, mécanique des fluides, électrotechnique, automatique...) gérer le multi-niveau de description (système, géométrique, technologique...), gérer la dimension organisationnelle (interne et étendue). D'où les démarches d'ingénierie simultanée, de co-ingénierie, de travail collaboratif... bref d'ingénierie intégrée pour

reprenre l'appellation de Thésame*. Bien souvent, la mise en œuvre de ce type de démarche modifie l'organisation des entreprises et ses méthodologies de travail (voir l'article de Guy Forax p.62). Dans cette perspective, les entreprises doivent adopter des processus d'élaboration de produit, permettant d'évaluer les solutions techniques à déployer pour répondre précisément à la demande du client et aux personnes concernées par le cycle de vie du produit. Reste que la complexification des produits, l'intégration croissante des métiers de l'ingénierie, de maintenance, et le mariage des technologies génèrent des problèmes de fiabilité, de sûreté de fonctionnement et de maîtrise des risques. Une préoccupation majeure pour les industriels.

Un passage obligé pour l'industrie

La mécatronique est l'une des technologies clé identifiée par le Cetim dans son ouvrage « Technologies Prioritaires 2010 en Mécanique ». Le centre technique a d'ailleurs décidé de créer un pôle Mécatronique dont l'implantation sera située en Haute-Savoie. Il y trouvera des partenaires complémentaires tels que Thésame, Polytech'Savoie, C4i, CTDec... afin de développer sa politique de promotion de l'innovation

par cette démarche. La mécatronique est également un sujet d'attention pour les instances européennes qui ont par exemple lancé le projet Eumecha-Pro. Sa mission est d'élaborer les feuilles de route pour l'industrie de la recherche. Les « roadmaps industrielles » vont fournir une vue structurée des attentes et des besoins de l'industrie et seront établies pour différents secteurs d'équipements de production. Les feuilles de route pour la recherche reflèteront de leur côté les visions et les capacités de la R&D européenne en mécatronique. A l'issue de ce travail, les roadmaps recherche et industrie seront intégrées dans une vision commune. Ce projet a pour ambition d'identifier et de diffuser les meilleures pratiques en matière de conception mécatronique à travers des « workshops » à vocation industrielle. Notons pour finir qu'Eumecha-Pro devrait permettre d'améliorer la coordination des différents mécanismes européens de financement de la R&D en particulier en insérant ses livrables dans la plate-

forme « Eureka-Factory » et l'initiative « Manufuture » de la commission européenne.

Logiquement, les manifestations, colloques et publications sur le sujet se multiplient. Citons par exemple les Rencontres Européennes de Mécatroniques organisées depuis quatre années consécutives par Thésame. La mécatronique est en effet devenue un enjeu d'envergure supranationale. Entreprises, laboratoires de R&D, centres de formation multiplient les initiatives de partenariats

autour de cette technologie devenue source de développements industriels. Citons par exemple le pôle de compétitivité CIMEO (Cluster for Innovation In Mechatronics) qui lance le projet MIND. Il s'agit d'un centre franco-suisse mutualisant les travaux de R&D dans le domaine de l'intégration des techniques microtechnologies. Les partenaires sont C4i, Léti, CSM, le CNRS, ainsi que des industriels cotisants suisses et français.

Un vecteur d'innovation formidable

Comme le souligne Claude Wartelle du Cetim, « la plupart des composants mécaniques standard sont sur le marché depuis longtemps. Excepté des améliorations venant de calculs, des méthodes de fabrication, des matériaux



Si l'autofocus d'un objectif photo est un système hautement mécatronique, la mécatronique est davantage que la motorisation d'un dispositif mécanique existant.



Doc. Famuc.

« La mécatronique constitue un vecteur fort de différenciation, notamment dans le domaine de la mécanique, où les avancées spectaculaires ne sont pas légion... »

*Thésame est une structure à vocation locale et nationale créée en 1990 et labellisée par l'Europe comme Centre européen d'entreprise et d'innovation en 2000. C'est un réseau de ressources et d'acteurs autour de la mécatronique, gestion industrielle et management de l'innovation. Il axe son activité sur l'innovation industrielle : organisationnelle et technologique. Il informe, met en relation, conseille et accompagne les PMI et les grands groupes dans la gestion de leurs projets notamment autour de la mécatronique.



Doc. Baumer

Les éléments standards comme les roulements à billes ou les actionneurs embarquent désormais de l'électronique, voire des routines de contrôle/commande actifs.

ou des états de surface, ils n'ont pas fait d'avancée spectaculaire. Il faut savoir que de tous les secteurs industriels, les équipements mécanique, la métallurgie et la transformation des métaux sont, avec respectivement 39 % et 34 % d'entreprises innovantes, ceux qui contribuent le moins à l'innovation ! La mécatronique constitue un vecteur fort de différenciation. Toute occasion de progresser à l'aide d'une rupture technologique est bonne à saisir. Le moteur de la mécatronique, c'est la concurrence et la conquête de nouveaux marchés ! »

Pour introduire l'idée de la compétitivité par l'intégration mécatronique, Patrick Ranson du Cetim rappelle, lui, que le bon positionnement concurrentiel d'un

produit résulte de l'application de la stratégie des 4P :

- Produit : différenciation par rapport à la concurrence, adéquation aux besoins du client, innovation, intégration.

- Prix : accord avec le juste prix estimé par le client,

- Place : distribution

- Promotion : communication.

« Dans un projet mécatronique, la stratégie produit est cruciale, car la différenciation par rapport à la concurrence sera fortement dépendante du caractère innovant, de la profondeur d'intégration, des fonctions émergentes et du niveau de qualité/fiabilité du produit. »

Très souvent citée en exemple, la société SNR s'est illustrée à travers une

démarche mécatronique affirmée. Les roulements à billes que cette société fabrique sont bien loin de l'association de deux cages et d'une poignée de billes. Désormais, les roulements conjuguent mécanique, électronique et peuvent être instrumentés pour par exemple délivrer leur vitesse de rotation. René Mantua, responsable SNR Mechatronics, Direction du Produit : « Nous travaillons depuis plusieurs années sur la mesure des efforts subis par les roulements, notamment ceux utilisés dans les roues de véhicules. Notre objectif est de mesurer le torseur d'effort sur le pneumatique et d'avoir ainsi des informa-

tions précieuses pour améliorer la tenue de route du véhicule. Cette démarche purement mécatronique devrait aboutir d'ici la fin de la décennie. »

Toujours dans le secteur des transports, SNR s'est penché sur le diagnostic embarqué par capteur abandonné. Celui-ci fonctionne en récupérant l'énergie accumulée par le roulement lui-même. Un exemple d'application de ce type de produit mécatronique : l'indication prédictive de défaillance d'un rotor d'hélicoptère. « Nous souhaitons passer du statut d'entreprise de mécanique à une entreprise mécatroni-

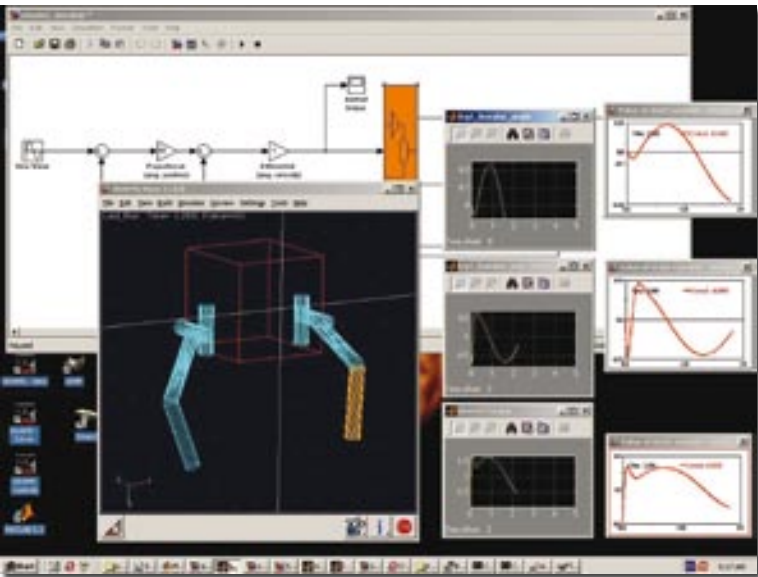
cienne, une véritable mutation. A la fin 2002, 12 % de notre CA provenaient de produits mécatroniques. En 2004, cette part s'est élevée à 24 %. La gageure à relever : 50 % de nos produits seront mécatroniques en 2009... » Cette intégration de la mécatronique dans ses produits a permis à SNR de prendre de nouvelles parts de marché, d'élargir son offre. Le fabricant est ainsi fournisseur potentiel d'électronique de mesure et devient un interlocuteur privilégié de ses clients en passant d'un rang n à un rang n-1. Il a également développé



Grâce à la mécatronique, Michelin introduit dans ses pneus des dispositifs de surveillance temps réel de la pression, mais également d'identification du modèle.

un réseau de partenaires tant dans le domaine de la R&D que dans le domaine industriel.

Autre exemple révélateur, celui de la petite société Alpes Deis, concepteur de produits électroniques et d'informatiques systèmes.



L'environnement logiciel Matlab permet le développement et la simulation de systèmes complexes multi-technologies.

Elle a permis à l'un de ses clients de retrouver un second souffle sur un marché très concurrentiel, celui du mobilier pour téléviseurs. Son idée : passer d'un meuble télé traditionnel à un support mural pour écran plat, motorisé et télécommandable à distance. Pas si simple de réunir mécanique et électronique dans un produit dont le prix de vente soit compatible avec le marché grand public, le tout made in France ! Pourtant le projet a abouti, grâce notamment à une complémentarité de savoir-faire et à une expérience acquise à travers plus d'une centaine de réalisations mécatroniques similaires.

On pourra encore citer Michelin qui, depuis plusieurs années, associe de l'électronique à ses pneus (notamment les modèles pour poids lourds), et souhaite désormais l'intégrer dans ses pneus. Les applications sont la surveillance de pression

bien sûr, mais également l'identification du modèle. Le fabricant français teste actuellement sur des gros véhicules de chantier son dispositif MEMS (Michelin Earthmover Management System). Celui-ci permet de contrôler en temps réel la pression et la température interne du pneu. Seconde application du dispositif, l'identification et la traçabilité du pneu pendant toute sa durée de vie. Une technique nettement plus efficace que l'étiquetage fragile et volatile.

Pour illustrer le poids économique de l'électronique automobile, Thierry Dujardin du cabinet Décision, fait état d'un taux de croissance global de l'industrie électronique de 6,5 %, avec pour la partie concernant l'automobile un taux de 6,7 %, soit un poids pour l'Union européenne de 25 milliards d'euros par an (le CA d'Airbus Industrie était de 22,3 milliards d'euros en 2005 !). Selon lui, les principaux « moteurs » de

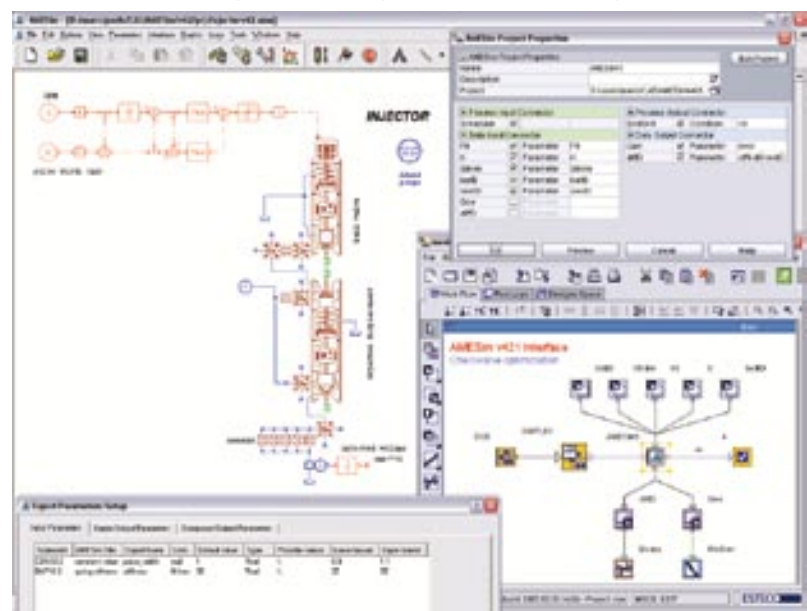
la mécatronique automobile sont la baisse des coûts, la satisfaction de fonctions innovantes, l'accroissement de la « prestation client » et l'amélioration des technologies traditionnelles (mécaniques, hydraulique...). C'est aussi l'apport d'une plus grande fiabilité et d'autodiagnostic puissants (remèdes aux pannes), l'observation de réglementations toujours plus contraignantes (pollution, consommation, sécurité passagers et piétons...) et la garantie d'une barrière face au pays « low cost ».

Thierry Dujardin estime que le marché européen de la mécatronique évalué à 32 milliards d'euros aujourd'hui devrait atteindre 39 milliards d'euros en 2015, soit une croissance de 3,5 % par an sur la période 2010-2015. L'électronique rentrant pour 25 % du coût d'une automobile en 2004, sera présente à hauteur de 30 % en 2010. Mais il y a un

obstacle à cette croissance, l'importance de la fiabilité, puisque aujourd'hui, 35 % des défaillances proviennent de l'électronique (chiffres ADAC). « Les constructeurs doivent donc faire évoluer leur organisation, historiquement très « mécanique », avec trois grandes approches : la mise en place d'une véritable culture mécatronique, le développement d'une réelle standardisation (est-il nécessaire qu'il existe un ABS Peugeot et un ABS Renault ?), enfin une approche globale de la conception à la mise sur le marché. »

Les outils numériques

Il n'existe pas d'outil complet, capable d'adresser tous les métiers de la mécatronique et les différentes phases de développement d'un produit. C'est-à-dire une plateforme de logiciels métiers capables de communiquer



AMESim est une plateforme virtuelle d'analyse de système 1D complet qui permet de concevoir des systèmes combinant plusieurs technologies et donc plusieurs physiques.

La région d'Annecy dispose d'une forte culture mécatronicienne. Des entreprises comme Tefal ou Teraillon dans le domaine du pesage ont depuis plusieurs années ancré leur réussite sur l'élaboration de produits fortement mécatroniques. Sans doute l'unique voie de développement sur ce marché stable et fortement concurrentiel. Du côté des décolleteurs implantés en vallée de Cluses, c'est dès les années 80 que le tournant mécatronique avait été pris. Les démarches de progrès sont donc culturellement présentes chez les salariés de l'industrie locale. Les laboratoires locaux et l'Université de Savoie, ainsi que des acteurs locaux comme Thésame ont suivi le mouvement et participé à sa dynamique. Aujourd'hui, cette région a été choisie par un groupe d'industriels japonais comme centre de compétence européen dans le domaine de la mécatronique. L'objectif est d'établir des liens privilégiés à travers des échanges d'enseignants, d'étudiants mais également de développer des produits mécatroniques franco-japonais. Enfin, signalons que le CETIM a décidé d'implanter son pôle mécatronique dans la région.

autour d'un noyau central. Et susceptible de gérer l'aspect multi-niveaux de la description d'un produit. On pourra cependant citer l'offre de l'éditeur The Mathworks avec son portfolio de modules autour de Matlab. Cet environnement permet le développement et la simulation de systèmes complexes multi-technologies. Grâce aux partenariats avec des sociétés développant des solutions complémentaires en particulier pour les applications temps réel, l'environnement Matlab couvre toutes les phases de développement, du cahier des charges aux tests de validation en passant par la conception, la modélisation, la simulation, la génération de code et le prototypage rapide.

Citons également la solution AMESim développée par l'éditeur Imagine et destinée à l'analyse virtuelle de systèmes techniques. Fonctionnant de manière similaire à Matlab, les modèles AMESim sont obtenus en assemblant des « composants » représentant des fonctions du système. Leur comportement physique est décrit soit analytiquement au moyen d'équations différentielles ordinaires ou algébriques, soit numériquement au moyen d'abaques. Les composants sont connectés entre eux par un ensemble discret de connecteurs qui assurent la transmission de l'énergie. AMESim est une plateforme virtuelle d'analyse de système 1D complet qui permet de concevoir

des systèmes combinant plusieurs technologies et donc plusieurs physiques.

Pour Fabien Formosa, Maître de Conférences à Polytech'Savoie et spécialiste de la mécatronique, « les mécatroniciens sont également amenés à utiliser des logiciels de simulation numérique dotés de capacités multiphysiques comme ceux mis au point par Comsol ou Ansys. A

ressaisir bien souvent des informations d'un logiciel à l'autre avec des risques de perte de données. La maîtrise des modèles numériques mis en œuvre est une question capitale pour l'entreprise, et notamment pour les PME. Ces dernières ont du mal à réunir les compétences nécessaires pour par exemple gérer des erreurs numériques, paramétriques, développer des bibliothèques de compo-



Ce sont les secteurs de l'aéronautique et de l'automobile qui ont été les premiers à utiliser la co-conception à travers plusieurs disciplines métier.

un niveau plus avancé, ils s'appuieront sur les outils de CAO électrique, électronique et mécanique. Mais, même si des passerelles existent entre ces différentes solutions de conception/validation, il reste difficile de passer d'un niveau de modélisation à l'autre. Cela nécessite d'une part de maîtriser plusieurs outils, et d'autre part de

sants, et finalement garantir la cohérence du développement produit et de son optimisation. D'où l'importance du choix de ses partenaires et des méthodologies de co-engineering mises en place. Finalement la qualité du couplage entre les technologies, les partenaires et les logiciels est plus importante que la valeur intrinsèque des éléments séparés. »

Doc. Messier-Dowty



La mécatronique au cœur d'Annecy

Thésame organise chaque année des rencontres entre industriels et centre de R&D sur la mécatronique. L'occasion pour nous de rencontrer les deux dirigeants de Thésame, André Montaud et Olivier de Gabrieli.

C'est pour aborder cette problématique que cad.magazine s'est rendu à la manifestation « Découvrir la Mécatronique » organisée par Thésame et le Cetim. Ce symposium s'est déroulé à Annecy et a réuni quelque 230 personnes fin janvier. Au programme : conférences, témoignages d'industriels, de laboratoires, de centres techniques et présentations des différentes actions régionales, nationales et européennes autour de la mécatronique. Nous y avons rencontré André Montaud et Olivier de Gabrieli, respectivement directeur et directeur associé de Thésame.

Cad-magazine : Pourquoi un tel engouement depuis trois ou quatre années pour la mécatronique ? Est-ce un effet de mode ou les enjeux ont-ils changé pour que les institutions et les industriels européens s'y intéressent à ce point ?

A. Montaud et O. de Gabrieli : Il ne s'agit pas d'un effet de mode, mais d'une réelle opportunité pour l'industrie. Désormais, la mécatronique constitue une valeur ajoutée indispensable aux entreprises manufacturières qui souhaitent diminuer leurs coûts sur des produits toujours plus complexes. La mécatronique constitue en plus un véritable vecteur d'innovation permettant soit de répondre plus complètement à un cahier des charges, soit de découvrir de nouveaux marchés. Il n'y a d'ailleurs pas d'autres issues pour la majorité des PME/PMI, si elles souhaitent maintenir leur activité face à des conditions de marché terriblement concurrentielles et mondiales. C'est d'ailleurs une des technologies clef identifiée par la communauté européenne dans son 7^e programme de R&D.

Cad-magazine : Qu'est-ce qui pousse les entreprises vers la mécatronique ?

A. Montaud et O. de Gabrieli : Principalement le marché et ses exigences : produits plus complexes, moins chers et forte convergence technologique. Les entreprises disposent également d'incitations supplémentaires, les composants électroniques sont moins chers, plus performants, les ingénieurs sont davantage formés à cette démarche, et puis tous souhaitent diminuer les coûts de maintenance de leur produits en améliorant leur fiabilité.

Cad-magazine : Les entreprises françaises sont-elles prêtes ?

A. Montaud et O. de Gabrieli : C'est très variable. Dans leur grande majorité elles sont conscientes des enjeux et convaincues de l'intérêt de la démarche, mais ne savent pas vraiment comment s'y prendre. Plusieurs barrières sont identifiées : les méthodes de conception faiblement coopératives, les capacités d'industrialisation des produits (l'utilisation de process différents de leurs cœurs de métier), et n'oublions pas la difficulté pour elles de faire admettre à leurs clients leurs nouvelles capacités mécatroniciennes. Les secteurs les plus en avance sur le sujet sont l'aéronautique et l'automobile. Le premier à travers une politique de redondance des systèmes notamment, car l'aspect sécurité est primordial sur les autres facteurs technico-économiques. Le développement du Mirage III par Dassault Aviation est l'un des premiers exemples de démarche mécatronique dans cette industrie. Cet avion a été conçu avec un comportement aérodynamique instable afin de répondre à une demande de taux de virage très élevé. Son pilotage a nécessité le développement de servocommandes, une nouveauté en aéronautique. Pour ce projet, les ingénieurs ont abandonné les techniques d'optimisation locales pour adopter une démarche mécatronique globale, seule capable d'apporter la réponse convenable au cahier des charges.

Cad-magazine : Le concept de mécatronique a-t-il évolué depuis 1970 ?

A. Montaud et O. de Gabrieli : Si la mécatronique n'est pas nouvelle en soit, nous avons assisté à une forte évolution du concept dans les années 80, avec le Japon en chef de file notamment dans les process industriels. Puis, il y a eu une rupture technologique forte au tournant de l'année 2000. D'une manière grossière, on peut dire qu'avant cette période, la mécatronique consistait à compiler simplement des technologies. L'industrie automobile, avec sa politique drastique de réduction des coûts, a engendré cette rupture et impulsé un nouveau schéma : l'optimisation globale des systèmes. On peut décrire quatre étapes successives suivies par l'industrie confrontée à une démarche mécatronique :

– **Phase 1** : repenser le système pour répondre au cahier des charges fonctionnel. Optimisation technologique et économique. Exemple, la société Tefal qui propose un pèse-personne moins coûteux et plus précis en utilisant un capteur moins performant, mais en lui associant une compensation logicielle efficace. On passe à ce stade de la phase d'assembleur à celui d'ensambleur.

– **Phase 2.1** : Surgissent les problèmes de fiabilité des systèmes mécatroniques dont les composants ne présentent pas les mêmes courbes de vieillissement.

– **Phase 2.2** : Prise en compte de cette sûreté de fonctionnement avec parfois une réponse de type « sur-qualité ».

– **Phase 3** : Utilisation d'outils mécatroniques adaptés permettant d'améliorer la fiabilité des systèmes. La phase à atteindre idéalement.

Cad-magazine : Y a-t-il une recette pour réussir le développement d'un produit mécatronique ?

A. Montaud et O. de Gabrieli : On ne peut pas donner de recettes, mais l'expérience de Thésame en la matière nous a permis de détecter les pièges à éviter (voir encadré). Nous avons également quantité d'entreprises qui ont réussi leurs projets et qui peuvent constituer des exemples à suivre. D'une manière générale, celles qui réussissent le mieux ont su revoir leurs méthodologies et leur organisation. On peut cependant citer quatre points fondamentaux pour réussir un projet mécatronique :

– co-conception mécanique + électronique donc décloisonnement des équipes,

– mise en œuvre d'équipes transverses aux business units, – s'appuyer sur des profils mécatroniciens, ni spécialistes ni généralistes, mais chef d'orchestre des projets avec une réelle indépendance des choix technologiques,

– volonté du top management d'aller dans le même sens.

Signalons par ailleurs qu'il est impossible pour une entreprise d'intégrer toutes les technologies propres à satisfaire pleinement un projet complexe de mécatronique. Trop de technologies mais également trop cher à maîtriser. D'où l'importance de développer des partenariats forts. Avec pour corollaire le partage des savoir-faire, et le partage des risques industriels, notamment pour les PME.

La clef de la mécatronique est finalement dans l'optimisation du couplage des technologies, mais également des savoir-faire qui s'y rapportent, des outils employés et finalement des partenaires d'un projet.

Le jeu des 7 erreurs... à éviter

■ Ne pas engager résolument l'entreprise dans une démarche mécatronique : la mécatronique exige de penser les produits et les process de manière transverse. Elle fait éclater les murs. Le pilotage du projet doit être assuré au plus haut niveau de l'entreprise.

■ Oublier la finalité de la mécatronique, qui n'est pas l'électronisation de fonctions. Ce choix techniques répond à des questions précises : cherche-t-on la réduction des coûts ? le développement de nouvelles fonctions clients ? Ou encore des moyens de se protéger de la contrefaçon ?

■ Négliger la phase d'avant-projet : une étape plus importante que dans un projet classique car le nombre de possibilités offerte est infini. L'écoute du besoin client (présent et futur) est tout aussi importante que la technologie employée.

■ Concevoir de manière séquentielle : la démarche mécatronique nécessite de penser le produit dans son ensemble et non en séparant la partie mécanique, puis l'électronique, puis les capteurs-actionneurs, puis l'informatique au risque d'atteindre des surcoûts rédhitoires.

■ Choisir un chef de projet expert d'une des technologies mécatroniques. Il faut éviter de regarder le projet avec un œil « acquis » à une technologie. Le pilotage est ici, plus qu'ailleurs, le rôle d'un chef d'orchestre et non d'un virtuose. Les compromis sont permanents pour arriver au meilleur équilibre !

■ Ne pas préparer les ateliers à intégrer du montage électronique dans un atelier dédié à la mécanique (ou réciproquement) ne se fait pas sans douleur.

■ Ne pas former les forces de vente : un produit mécatronique a des potentialités importantes de par son « intelligence embarquée ». La création d'options peut se faire à coût marginal. Autant en profiter pour gagner de nouveaux marchés, sous réserve d'avoir bien informé les commerciaux sur ces produits d'un nouveau genre.