



Saphir Faïd, professeur à l'école supérieure Groep T, était déjà une des forces motrices des deux courses d'automobiles entraînés par cellules photovoltaïques en Australie, auxquelles l'école supérieure de Louvain a participé les années précédentes. Il a également passé quelques mois aux Etats-Unis, où il a collaboré à la construction d'un grand nombre de voitures concepts. Il y a environ un an, il a appris l'existence du Championnat de Formule Zéro. Trop tard, pensait-il. Néanmoins, un peu plus tard, les organisateurs néerlandais de cette course ont fait savoir que l'équipe de Groep T pouvait encore s'inscrire. Finalement, le projet louvaniste de kart à l'hydrogène a démarré en mars 2008. "Et le défi était de taille" remarque Saphir Faïd. "Etant les derniers à entrer dans la course, nous devons concevoir le kart en l'espace de quelques mois seulement, alors que les autres y travaillaient déjà depuis de nombreux mois." Il a contacté plusieurs (anciens) étudiants de l'école supérieure qui souhaitaient participer au projet. L'équipe ainsi formée profitait du soutien financier de Solvay et d'Umicore. Ces sociétés avaient en effet créé en 2006 le joint-venture 'SolviCore', qui développe et fabrique des membranes pour les cellules à combustible (comme celles qui constituent le cœur du kart louvaniste).

### **Cellule à combustible avec électrolyte polymère**

Une cellule à combustible se compose d'une anode et d'une cathode poreuses, séparées par une couche d'électrolyte. L'anode est alimentée en continu par un combustible gazeux (l'hydrogène) tandis que l'oxydateur (en général de l'oxygène) est fourni à la cathode. A la suite de la réaction d'oxydation, le H<sub>2</sub> se divise en deux ions positifs d'hydrogène. La couche d'électrolyte facilite le transfert des ions, comme ceux de l'hydrogène, qui migrent ainsi à travers la couche vers l'oxygène. Le H<sup>+</sup> réagit avec l'O<sub>2</sub>, donnant naissance au 'déchet', à savoir l'eau. Cependant, lors du processus d'oxydation, les électrons de l'hydrogène restent sur l'anode, qui se charge ainsi négativement. Le surplus d'électrons passe par un conducteur qui relie l'anode (à charge négative) et la cathode (à charge positive), générant ainsi un courant électrique. Une cellule à combustible développe une tension de sortie d'environ 0,7 volt. Pour obtenir une tension supérieure, plusieurs cellules à combustible sont placées en série : on parle alors d'une 'pile'. Cela donne naissance à une tension électrique suffisamment élevée pour entraîner un moteur.

L'équipe belge composée de dix personnes utilise une cellule à combustible PEM-FC (Proton Exchange Membrane Fuel Cell ou Polymer Electrolyte Fuel Cell). Saphir Faïd en explique la raison: "Avec ce type, aucun liquide ne participe à la réaction: l'électrolyte est un polymère solide qui se trouve dans la cellule sous la forme d'une fine membrane perméable. L'état solide présente plusieurs avantages marquants: la cellule à combustible peut être

## **CHAMPIONNAT DE FORMULE ZERO** **Du high-tech belge** **dans un kart de** **compétition à H2**

*Est-il possible de démarrer un concours d'athlétisme dans lequel cinq concurrents ont déjà parcouru 9 des 14 kilomètres et de remporter malgré tout la médaille d'argent ? Non, me direz-vous. Pourtant, l'équipe de l'école supérieure industrielle de Louvain, Groep T, a réalisé une telle prestation, en collaboration entre autres avec la jeune entreprise d'ingénieurs Triphase. Une belle prouesse de high-tech belge intégré dans un kart de compétition.*

*par Ing. Koen Vandepopuliere, Control & Automation Magazine*



*Saphir Faïd, professeur Groep T (au milieu): "En l'espace de deux à trois semaines, la commande des moteurs, la coordination des transferts d'énergie de et vers la cellule à hydrogène ainsi que l'interface pour le pilote, étaient entièrement prêtes. Avec un tout grand merci à Triphase."*



basculée, elle résiste mieux aux chocs et elle est plus compacte. Les liquides des autres cellules comprennent souvent des substances corrosives comme l'acide phosphorique. Par ailleurs, la température de service que cet appareil électrochimique doit atteindre s'élève à quelque 80°C – assez faible par rapport à celle d'autres modèles –, ce qui induit un temps de démarrage rapide. C'est précisément pour cette raison que cette cellule à combustible PEM-FC est quasiment toujours utilisée lors du développement des voitures commercialisables, entraînées par du H2. Malheureusement, la réaction de réduction exige du platine comme catalyseur. Ce métal très coûteux se trouve des deux côtés de la membrane. En outre, il perd rapidement sa force d'action lorsqu'il entre en contact avec du CO. Raison pour laquelle l'hydrogène et l'oxygène ajoutés doivent être très purs."

## Moteurs électriques pilotés en couple

Le véhicule est entraîné par des moteurs CC à ux axial, un modèle présentant une grande densité de puissance (jusqu'à 30 kW chacun) et fréquemment utilisé dans le monde des karts électriques. Il y en a deux, un pour chaque roue. Il s'agit de moteurs électriques pilotés en couple, ce qui rend tout différentiel super u. Cela présente plusieurs avantages. Les pertes d'énergie par frottement entre les différents composants mécaniques sont évitées. Vu le poids (relativement) important du kart (262 kilos), cela constitue aussi un meilleur choix que l'utilisation d'un essieu rigide qu'on retrouve dans les karts à essence. Et finalement, il est possible d'optimiser davantage encore la tenue de route au moyen de corrections électroniques. Ce choix a également été fait en vue du futur : les organisateurs du Championnat de Formule Zéro espèrent en effet que les véhicules participants deviennent plus grands et plus performants avec l'évolution commerciale des piles à combustible, afin d'aboutir au bout du compte à un véritable pendant (entraîné par hydrogène) des actuelles voitures de Formule 1. En optant pour deux moteurs, l'équipe belge s'assure que le kart puisse être équipé dans les années à venir d'un système d'ESP (Electronic Stability Program) qui améliorera la stabilité et réduira les risques de dérapage.

## Développement intense

Lorsque le pilote appuie sur la pédale des gaz, la transmission doit être parfaitement conçue, afin qu'il puisse entièrement se concentrer sur les tours à effectuer. Cette problématique a été prise en charge par Triphase, une spin-off de la K.U.Leuven créée en 2006 et qui compte actuellement cinq personnes. Dr. Ir Piet Vanassche, COO de l'entreprise, nous en dit plus. "Habituellement, les transmissions électriques sont d'abord modélisées et simulées dans des environnements logiciels comme Matlab/Simulink, MATRIXx/SystemBuilder ou Spice. Ensuite, il faut compter plusieurs mois de tra-

vail pour convertir tout cela en un matériel qui fonctionne efficacement. Des techniques plus sophistiquées utilisent le 'hardware in a loop' ou tout simplement des simulations HIL." Celles-ci se caractérisent par le fait que l'électronique de commande, qui sera finalement utilisée, est testée à l'aide d'une 'voiture virtuelle'. Les DSP et microprocesseurs sont reliés à un ordinateur qui imite les amortisseurs de choc, les boîtes à engrenages... Ils tiennent également compte de l'éventuel comportement routier (position des roues, type de pneu et comportement de la suspension), des valeurs d'émission, de la consommation de combustible, de la puissance du moteur, de la boîte de vitesse et du style de conduite. Les tests réalisés de la sorte ne nécessitent pas la construction d'un prototype, ce qui économise du temps et de l'argent. Et de poursuivre: "De telles simulations HIL



**Ir Piet Vanassche (Triphase): "Nos algorithmes de commande pour les simulations Hardware in a Loop sont pour ainsi dire composés de manière visuelle."**

permettent de tester le DSP et d'autres logiciels sans construire des prototypes matériels. Mais, travaillant toujours de manière virtuelle dans cette phase, nous n'avons encore aucune idée du comportement effectif du logiciel sur la voiture/le kart réel – le 'véritable' matériel. Pour cela, nous avons construit une plate-forme qui permet d'implémenter des idées beaucoup plus vite que les entreprises qui adoptent une approche plus traditionnelle. Nos algorithmes de commande sont composés de manière visuelle, comme des schémas de blocs, à l'aide du Matlab/Simulink intuitif et interactif. Ces schémas sont ensuite convertis en code C par un générateur de codes, comme Real-time Workshop, et compilés en un fichier exécutable qui pilote le matériel du kart. Ce matériel, qui fait partie de notre plate-forme, comprend entre autres des convertisseurs de puissance, des détecteurs de tension et de courant, de même que divers actionneurs. Le test des algorithmes ne dure par conséquent que quelques minutes. Grâce à cela, nous avons gagné un temps précieux lors du développement de la transmission. Les faits parlent d'eux-mêmes : en deux à trois

semaines de temps, la commande des moteurs, la coordination des transferts d'énergie de et vers la cellule à hydrogène et l'interface avec le pilote était entièrement prêtes alors que les méthodes classiques réclament plusieurs mois d'élaboration. Nous avons démarré neuf mois après les autres équipes mais nous étions les premiers prêts pour la course, après contrôle par l'organisation." Et Frederik Loeckx, CEO de la PME louvaniste, de poursuivre: "Nous voulions prouver que notre technologie et philosophie de développement permet aux gens de construire en très peu de temps des systèmes électriques très performants."

## Linux dans le kart

La conversion de puissance dans le cadre de la méthode de développement de la commande, de la coordination et de l'interface, n'était pas la seule innovation. Traditionnellement, la logique de commande est répartie sur différents processeurs, comme les DSP et les PLC. L'interface utilisateurs se trouve alors sur le PC. Celui-ci donne des instructions aux PLC qui contrôlent chacun à leur tour plusieurs DSP. Plusieurs constructeurs ont entre-temps intégré (ou plutôt émulé) le logiciel PLC dans un ordinateur central. De tels PLC logiciellement émulés sont appelés des soft-PLC. Cependant, Triphase a implémenté dans le kart une technologie qui est (pour l'heure) unique. "Nous avons également émulé la logique DSP dans l'ordinateur central, afin que le kart soit le premier véhicule qui puisse s'attribuer notre primauté mondiale du soft-DSP" précise Piet Vanassche. "La commande du convertisseur DC/DC est d'ailleurs également intégrée dans l'ordinateur. Nous avons choisi comme processeur central un PC embarqué dans le kart. Attention, il s'agit d'un ordinateur plus compact et plus robuste que les PC traditionnels. Cet appareil tourne sous le système d'exploitation Linux/Xenomai, qui permet de combiner des fonctionnalités qui ne sont pas temps réel, comme les interfaces utilisateurs, la surveillance et l'analyse de données, avec des algorithmes temps réel qui pilotent les moteurs. La communication avec le PC passe par Ethernet. Cette centralisation des PLC, DSP et autres microprocesseurs dans un PC central offre plusieurs avantages. Elle économise pas mal de matériel, ce qui comprime le coût. Le câblage est également simplifié, tout comme la gestion de stock, puisqu'il faut tenir moins de composants en stock. Par ailleurs, la centralisation de tout le logiciel sur cet ordinateur central contribue à un développement plus rapide et se traduit par un système particulièrement convivial en termes de maintenance. Il n'est en effet plus nécessaire, en cas de modifications, de reprogrammer séparément tous les différents PLC, DSP et autres microprocesseurs. Dès que le travail est terminé sur le PC, tout est fait."

*L'équipe de Groep T a finalement remporté la médaille d'argent au Championnat de Formule Zéro, après une équipe néerlandaise. << (photos: Groep T et Triphase)*