



Les ingénieurs du CERN, l'Organisation européenne pour la recherche nucléaire, ne commandent pas l'exécution des mouvements et le positionnement des nombreux collimateurs du LHC en appliquant des techniques traditionnelles, mais grâce à des contrôleurs PAC et à des circuits FPGA. Les collimateurs sont des dispositifs de sécurité essentiels qui capturent les particules échappées, susceptibles d'endommager le plus puissant accélérateur de particules du monde.



photo: National Instruments

Le CERN, Centre Européen pour la Recherche Nucléaire, a récemment mis en service le Grand collisionneur de hadrons (LHC), qui est à ce jour le plus puissant accélérateur de particules au monde. Malheureusement, son fonctionnement a été de courte durée, car, quelques jours après son démarrage, la machine a été mise à l'arrêt en raison, selon des sources proches, d'une importante fuite d'hélium survenue dans l'un des tunnels. Néanmoins, lorsque le LHC sera de nouveau opérationnel - la prochaine tentative est prévue pour le début de l'année 2009 -, les chercheurs du CERN espèrent parvenir à répondre à des questions fondamentales sur la formation de l'Univers, en recréant les conditions dans lesquelles s'est produit le Big Bang. Les scientifiques du CERN utilisent des machines appelées "accélérateurs de particules", qui génèrent des collisions d'ions et de protons entre eux, ou bien dirigent ces particules vers une autre cible. Ces collisions libèrent de grandes quantités d'énergie, qui sont suffisantes pour reproduire les conditions de la formation de l'Univers. Les données collectées lors des collisions de particules provoquées dans le Grand collisionneur de hadrons fourniront de précieuses informations sur la façon dont s'est formé l'Univers et permettront de répondre à des questions telles que: "pourquoi les particules ont-elles une masse?" et "d'où provient la matière noire?". L'accélérateur de particules, d'une circonférence de 27 km, est installé entre 100 et 150 mètres sous la surface de la terre, à la frontière franco-suisse, et permet de provoquer des collisions de particules à une vitesse proche de celle de la lumière. Afin de réaliser ces collisions, l'accélérateur fait circuler dans le tunnel circulaire, en sens opposé, deux faisceaux de protons ou d'autres ions lourds chargés positivement. Des aimants supraconducteurs refroidis à l'hélium liquide jusqu'à 1,9 K (soit -271 °C) contrôlent la trajectoire des faisceaux. L'énergie totale de chaque faisceau circulant à pleine puissance s'élève à 350 MJ, soit à peu près l'énergie nécessaire pour lancer un train de 400 tonnes, comme le TGV, à une vitesse de 200 km/h ou bien pour faire fondre un bloc de cuivre de 500 kg. /Les aimants, quant à eux, concentrent une énergie 30 fois supérieure.

### Des exigences de sécurité draconiennes

En raison des niveaux d'énergie extrêmement élevés

## PROJET D'INGÉNIERIE: GRAND COLLISIONNEUR DE HADRONS

# Contrôle de la sécurité d'exécution des mouvements de l'accélérateur de particules du CERN

par Erik van Hilten, National Instruments / Adaptation: Bert Belmans, Control & Automation Magazine



des faisceaux de particules, les pièces de l'accélérateur ont été soumises à des normes de sécurité draconiennes et le système de commande doit garantir une fiabilité optimale. Toute particule qui s'échappe de la trajectoire définie peut occasionner des dégâts et endommager l'accélérateur. Afin d'éviter que des particules ne dévient de la trajectoire prévue, de nombreux dispositifs spécifiques, appelés collimateurs, ont été installés. Un collimateur absorbe les particules d'énergie qui sortent de la trajectoire normale du faisceau, grâce à des blocs de graphite ou de tout autre matériau lourd. Ces blocs sont positionnés avec précision autour des faisceaux de particules. Le réglage des collimateurs constitue donc une tâche nécessitant une grande précision, qui doit être extrêmement fiable et doit être exécutée de façon simultanée sur 100 emplacements répartis sur 27 km. Les collimateurs doivent être positionnés avec une précision de 20 µm, à 2 mm les uns des autres, tandis qu'un faisceau dont l'énergie est équivalente à celle d'un TGV les traverse à toute allure. Nous abordons ici un domaine particulier: la mécatronique ou le "contrôle d'exécution des mouvements", réparti sur plusieurs kilomètres et selon 500 degrés de liberté. Le choix d'un contrôleur embarqué, destiné à commander le réglage, a constitué une décision cruciale.



photo: CERN

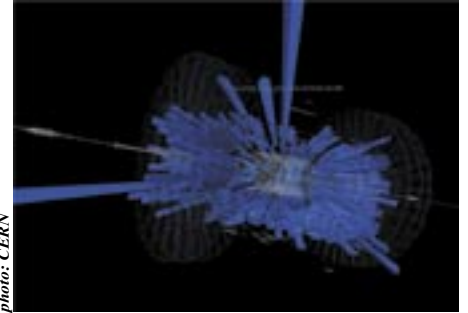


photo: CERN

*Le Grand collisionneur de hadrons pendant les opérations de montage. Attention aux aimants supraconducteurs refroidis à l'hélium liquide, à -271 °C !*

*L'un des premiers événements réels enregistrés après la mise en service: débris des particules captées par les calorimètres après l'envoi du faisceau dans le collimateur.*

## Une opération délicate

L'opération de positionnement des collimateurs peut donc, sans exagération, être qualifiée de "très délicate". Traditionnellement, les concepteurs disposent de trois solutions de systèmes de commande: les API, les PC ou le matériel personnalisé comme les systèmes VME. Toutefois, les ingénieurs du CERN ont opté pour une quatrième solution de commande du positionnement: les contrôleurs PAC (Programmable Automation Controller). "Ce qui nous a plu dans les contrôleurs PAC, c'est leur faible encombrement, leur grande robustesse et leur faible coût, comparés à des modèles traditionnels reposant sur des systèmes VME ou API", expliquent Alessandro Masi et Roberto Losito, qui sont tous deux membres du groupe de travail "LHC Collimation Working Group" du CERN. "Afin de répondre aux exigences élevées en matière de synchronisation, de précision et de fiabilité, nous avons sélectionné un système de contrôle d'exécution des mouvements et de rétroaction reposant sur du matériel reconfigurable. Il était important pour nous de disposer d'une plate-forme de développement dotée de toutes les fonctionnalités dont nous avons besoin, car cela nous permet d'éviter d'avoir à développer nos propres pilotes logiciels et de limiter la main d'œuvre travaillant à la construction du système."

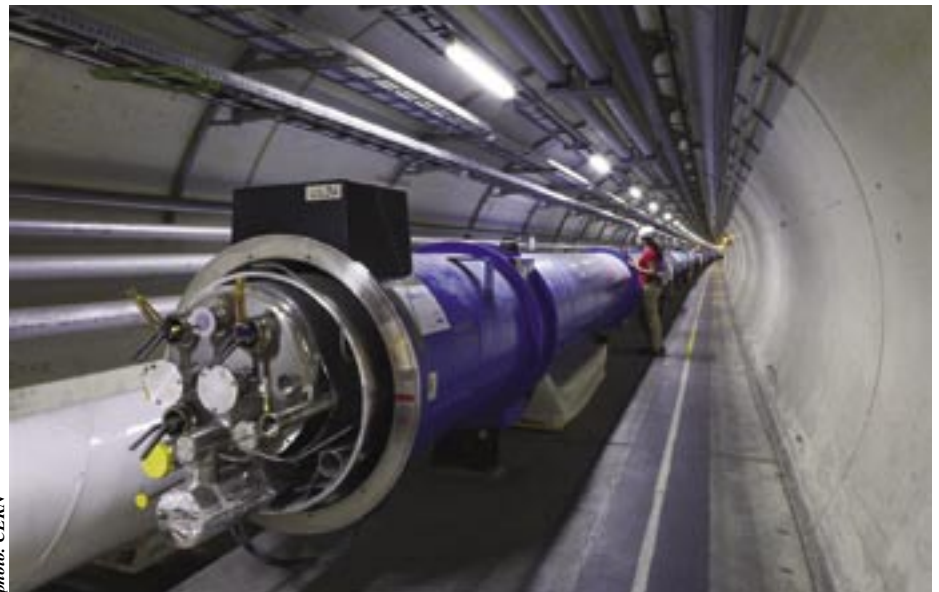


photo: CERN

*L'accélérateur de particules, d'une circonférence de 27 km, est installé entre 100 et 150 mètres sous la surface de la terre. Au total, 600 moteurs pas à pas, installés dans les tunnels, doivent être commandés de façon synchronisée.*

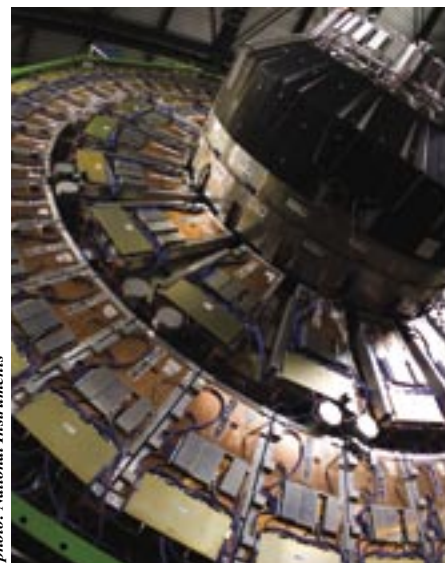


photo: National Instruments

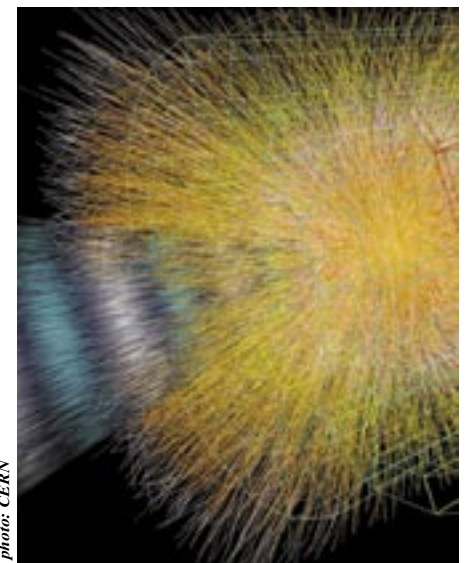


photo: CERN

## 600 moteurs pas à pas

En pratique, deux contrôleurs PAC redondants, équipés de circuits FPGA, commandent chaque collimateur. Chaque contrôleur PAC est constitué d'un châssis PXI modulaire intégrant un contrôleur embarqué et un module FPGA.

*Gauche: détecteur CMS. Les collimateurs absorbent les particules d'énergie qui sortent de la trajectoire normale du faisceau. Droite: simulation d'une collision d'ions.*

Dans la configuration standard, chaque châssis commande jusqu'à 15 moteurs pas à pas montés sur trois collimateurs distincts, via un

profil d'exécution de 20 minutes, afin d'aligner les blocs de graphite de façon précise et synchronisée. Un second châssis contrôle le



positionnement des collimateurs en temps réel. Alessandro Masi: "Au cours de la phase 2 du projet, nous envisageons d'ajouter 60 collimateurs, ce qui portera le nombre de systèmes PXI à environ 200. Les deux châssis PXI correspondant à chaque collimateur exécutent le Module NI LabVIEW Real-Time, qui garantit un haut niveau de fiabilité. Le circuit FPGA dont sont dotés les modules périphériques FPGA reconfigurables assure le contrôle du collimateur. Grâce au logiciel LabVIEW Real-Time, nous sommes en mesure de développer rapidement un contrôleur d'exécution standard, synchronisant à la milliseconde les quelque 600 moteurs pas à pas répartis sur les 27 km du LHC. Les circuits FPGA intégrés dans ces contrôleurs nous apportent la liberté et la fiabilité dont nous avons besoin".

## Pourquoi des contrôleurs PAC?

Comme nous l'avons dit, les ingénieurs du CERN ont préféré les contrôleurs PAC aux solutions traditionnelles, notamment en raison de leur plus grande flexibilité. En outre, dans les applications complexes, la rapidité de développement ou d'adaptation des modèles de commande peut avoir une influence considérable sur le coût du projet. En ce qui concerne la conception, les contrôleurs PAC associent la robustesse des API à l'ouverture des architectures PC. Parmi les solutions de commande possibles (contrôleurs PAC, API, PC ou matériel personnalisé), les contrôleurs PAC sont les plus récents. En effet, le concept des contrôleurs PAC n'a pu être réalisable qu'à partir du moment où des composants informatiques suffisamment rapides et se prêtant à une utilisation industrielle ont été disponibles. Sur le plan matériel, citons à titre d'exemple l'avènement des processeurs dont la gamme des températures de fonctionnement est comprise entre -40 et +85 °C et l'entreposage de données sans pièce mobile. Sur le plan logiciel, citons l'arrivée des systèmes d'exploitation en temps réel comme Phar Lap (autrefois Venturecom), édité par Ardence, ou VxWorks, édité par River Wind. Ces systèmes d'exploitation offrent la possibilité d'adapter/de personnaliser l'ensemble des aspects du système de commande: de la vitesse d'écriture et de lecture des E/S aux priorités affectées aux différentes tâches exécutées par le contrôleur. Bien souvent, les éditeurs ajoutent des bibliothèques de fonctions, qui, par exemple, facilitent la lecture et l'écriture des E/S. Il en résulte un environnement logiciel plus souple, adapté aux applications qui combinent les technologies d'E/S tout ou rien personnalisées, de commande de processus et de commande d'exécution, et dans lesquelles d'autres tâches sont dédiées au traitement du signal, à l'enregistrement de données et à la communication. Les contrôleurs PAC offrent la possibilité de configurer logiquement le matériel des circuits FPGA. Ces circuits intégrés peuvent être configurés par les programmeurs de façon à déterminer les fonctionnalités de l'appareil, c'est-à-dire du

## Mécatronique complexe: quelles sont les solutions possibles en matière de commande?

**Dans une installation complexe comme un accélérateur de particules, une association de solutions techniques est naturellement envisagée. Dans le domaine des commandes, on trouve les systèmes classiques, tels que les API, les PC et le matériel personnalisé, ainsi que les contrôleurs PAC. Chaque solution correspond à un domaine d'application, avec ses avantages et ses inconvénients pour le CERN.**

### • Méthode 1: les API

Les automates programmables industriels (API) sont des dispositifs électroniques spécialisés, programmés à l'aide d'un modèle d'exécution logiciel prédéfini, qui est construit autour d'une architecture fiable et simple à utiliser. Il suffit aux ingénieurs de se concentrer sur le code de règles, car les cycles d'entrée et de sortie, ainsi que d'autres aspects, sont automatisés. À ce titre, les API présentent un intérêt considérable pour les applications dans lesquelles des non-programmeurs

(comme le personnel de maintenance d'un utilisateur final, qui doit apporter des modifications aux commandes) doivent disposer d'un accès aux contrôleurs. Toutefois, leur architecture logicielle présente des limites et manque de flexibilité dès lors qu'il s'agit d'applications sur mesure impliquant, par exemple, l'enregistrement de données et la communication, comme dans les algorithmes de synchronisation personnalisés développés par le CERN.

### • • Méthode 2: les PC

Les PC sont des ordinateurs universels initialement conçus pour le traitement de nombreuses applications ne fonctionnant pas en temps réel. Contrairement aux systèmes PLC, un PC standard utilise un support de stockage rotatif et n'est pas conçu pour une utilisation industrielle intensive. Les PC reposent sur des normes qui facilitent leur évolution et leur mise à niveau. Comparé à un système PLC, un PC est doté d'une unité de calcul en virgule flottante plus puissante et d'une mémoire plus importante, ce qui en fait la solution idéale pour le traitement intensif de données. Afin de répondre aux exigences de fiabilité, un système d'exploitation en temps réel spécifique est néces-

saire, car un système d'exploitation général comme Microsoft Windows ne garantit qu'une faible stabilité. L'absence d'une architecture logicielle précise et le manque de robustesse du matériel font de la plupart des PC des solutions inadéquates pour les applications de commande « standard ». Toutefois, en raison de leur capacité de traitement accrue, de leurs fonctionnalités réseau, de leur évolutivité et de leurs interfaces graphiques, les PC jouent un rôle fondamental dans de nombreuses applications de supervision, dans les commandes de pointe, d'interface homme-machine et d'enregistrement de données.

### • • • Méthode 3: matériel personnalisé

Le CERN a, par le passé, beaucoup travaillé avec du matériel personnalisé à base de VME. Par définition, le matériel personnalisé est un circuit développé sur mesure, qui répond à un besoin spécifique. Dans la mesure où il est spécialement conçu pour une application déterminée, il peut reposer sur toute architecture matérielle. L'inconvénient du matériel personnalisé réside dans ses coûts de maintenance à long terme et ses coûts de développement élevés. Parmi les applications du matériel personnalisé, citons le traitement d'un signal spécifique à un capteur, l'exécution de tâches

de commandes haut débit ou bien les commandes complètes de systèmes pour lesquels des quantités de production importantes sont nécessaires, comme pour les unités de commande électronique (UCE) utilisées dans l'industrie automobile. Même si, en théorie, ces équipements peuvent être programmés dans presque n'importe quel langage informatique, la plupart des développeurs utilisent des outils de bas niveau et codent les applications directement en C ANSI ou en VHDL.

### • • • • Méthode 4: contrôleurs PAC et circuits FPGA

La technologie FPGA a été développée par des concepteurs de matériel versés dans les langages de programmation de bas niveau tels que le VHDL. Il existe aujourd'hui des logiciels adaptés permettant de développer des règles sur mesure pouvant être téléchargées sur le circuit FPGA du contrôleur PAC. Dans le cas du CERN, il s'agit du logiciel NI LabVIEW. L'avantage de cette solution réside dans

le fait que les techniciens sont en mesure d'exécuter le traitement du signal au niveau du capteur et d'implémenter des réglages synchrones et des protocoles de communication spécifiques. Dans la mesure où le code est directement exécuté dans le silicium, il est possible de développer des applications extrêmement rapides... et c'est exactement ce que les ingénieurs du CERN recherchent.

niveau matériel. Les FPGA sont constitués de plusieurs blocs logiques configurables et combinables, qui peuvent exécuter diverses tâches. Les ingénieurs utilisent des logiciels pour définir la fonction des blocs logiques configurables, leurs

interrelations et leurs relations avec les E/S. Les FPGA sont comparables à des ordinateurs dont on recâblerait le circuit interne en vue d'une application spécifique. <<