

# Des cartes processeurs VME au top jusqu'en 2032... grâce à un pont PCIe-VME64x sur FPGA

Grâce à une passerelle PCIe-VME64x open source installée sur un FPGA, des cartes VME qui ont été développées par Men Mikro Elektronik et qui équipent les accélérateurs de particules existants du CERN, peuvent désormais être mises à niveau avec les performances des processeurs les plus récents. Il est prévu d'utiliser ces cartes VME jusqu'à la fin de vie du Grand collisionneur de hadrons LHC (Large Hadron Accelerator) planifiée pour 2032.

Le CERN (Organisation européenne pour la recherche nucléaire), dont les fondations remontent à 1954, est le plus grand centre de recherche au monde dans le domaine de la physique des particules. Aujourd'hui, plus de 2 500 employés et plus de 12 000 scientifiques invités provenant de 85 pays étudient les fondements de l'univers. L'élément le plus connu est probablement le Grand collisionneur de hadrons LHC (Large Hadron Collider) long de 27 km, entré en service en 2008. L'une des questions auxquelles il tente de répondre est de savoir pourquoi notre univers se compose principalement de matière, et non pas de matière et d'antimatière à parts égales. Les équipements les plus avancés sont utilisés à ces fins et des investissements énormes sont réalisés année après année. Et pour cette infrastructure de systèmes de calcul et d'acquisition de données unique au monde, il est essentiel, et vital, de s'intéresser à leur maintenance sur une durée de vie de plusieurs dizaines d'années.

## Des « crates » flexibles pour l'acquisition de données et le contrôle de l'accélérateur

Prenons par exemple les milliers de châssis ou boîtiers électroniques modulaires dénommés « crates » installés dans les nombreux accélérateurs de particules du CERN depuis des années. Déployés dans l'infrastructure

### AUTEUR



**Gunther Gräßner**, Product Line Manager chez MEN Mikro Elektronik (photo), **Grzegorz Daniluk**, chef de projet et ingénieur en électronique au CERN, et **Adam Wujek**, ingénieur logiciel au CERN.

de support de divers détecteurs de particules, ils sont généralement utilisés pour l'électronique de déclenchement et l'acquisition de données<sup>(1)</sup>. Les crates ont une configuration typique à base de slots avec des fonds de panier librement configurables. Ces systèmes électroniques modulaires sont destinés à être utilisés dans des institutions scientifiques telles que le CERN, car ils permettent de réutiliser des éléments individuels dans plusieurs systèmes et dans différentes configurations. Une fois qu'une expérimentation est terminée, les crates sont réutilisées pour de nouvelles expériences dans différentes configurations, ce qui sécurise l'investissement initial à long terme.

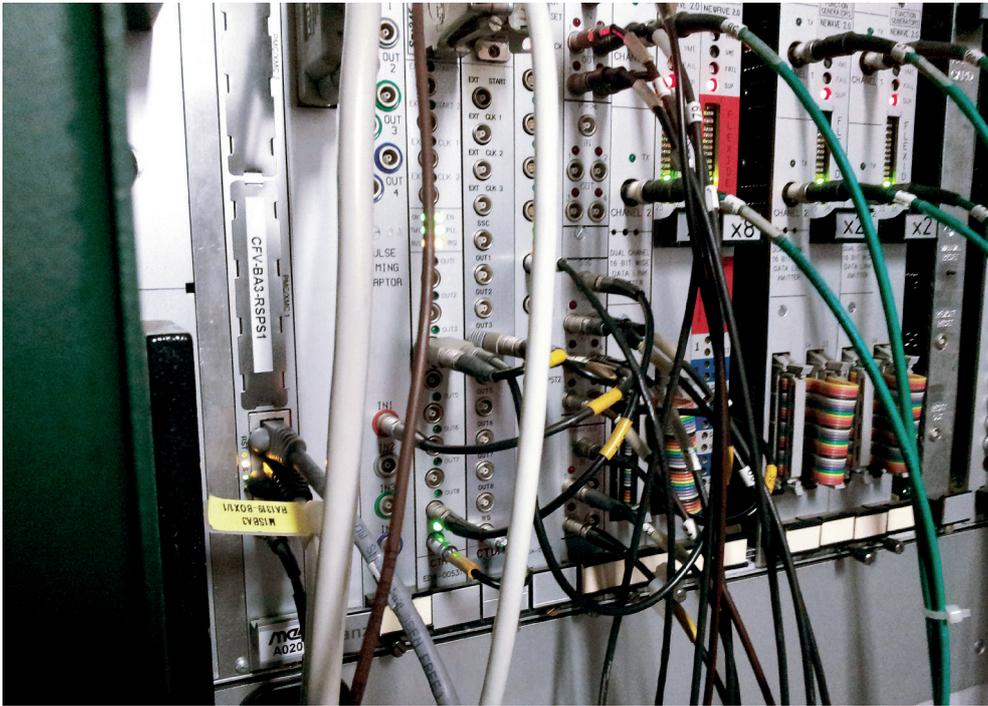
Un certain type de crate repose sur le bus VME, spécifié pour la première fois en 1981 et qui n'a cessé depuis de se développer. Actuellement, plus de 900 crates VME sont utilisés au CERN, principalement pour le contrôle des accélérateurs. Ils sont utilisés en différentes configurations pour l'acquisition de données dans les expériences et les détecteurs (photo A). Dans l'expérience LHCb (Large Hadron Collider beauty) par exemple, ils sont utilisés pour prétraiter une partie des données brutes d'environ un million de capteurs afin que les scientifiques ne reçoivent que les données pertinentes à leurs analyses. On trouve d'autres crates dans de nombreux autres détecteurs du CERN, tels que ATLAS, CMS, ALICE, ISOLDE et

TOTEM, qui remplissent dans certains cas des tâches complètement différentes car, comme tout autre système à fond de panier modulaire, ils peuvent être utilisés avec une extrême souplesse.

## De nouvelles crates pour de nouveaux défis

Étant donné que les tâches changent à chaque expérience, de nouvelles configurations de crates sont constamment développées et doivent fournir les performances informatiques les plus avancées. En 2016, rien que pour les accélérateurs, environ 50 nouvelles crates ont été mises en service. En outre il est d'ores et déjà prévisible qu'environ 200 nouvelles crates seront installées au cours du « Long Shutdown » (fermeture prolongée) planifié entre 2019 et 2020, afin de réparer et réviser complètement les équipements.

Cependant, un problème avec les systèmes VME réside dans le fait que les processeurs ne supportent pas nativement la communication sur le bus VME. Les cartes processeurs doivent donc être dotées d'une passerelle PCIe vers VME64x pour assurer l'interface avec le bus VME. Cependant, ce type de composant n'était disponible que chez quelques rares fabricants, alors que le fabricant principal avait déjà annoncé la fin de vie du composant actuel (le TSI148 conçu par IDT racheté en septembre 2018 par Renesas). L'ampleur du problème apparaît



• A.- Au CERN, environ 900 crates à base de VME sont utilisés pour contrôler les accélérateurs des différentes expériences.

l'interfaçage avec un bus VME. C'est pourquoi, avec la dernière option de l'appel d'offres, le CERN espérait qu'au moins une de ces sociétés serait disposée à proposer une solution open source. Par ailleurs, pour garantir des conditions équitables à toute personne qui présentait une offre, le CERN n'a donné la préférence à aucune de ces options. La sélection finale s'est faite sur la base du coût des propositions soumises à l'appel d'offres. En définitive, la société offrant le meilleur coût pour remplir le contrat a été choisie.

### Une passerelle PCIe-VME64x en open source désormais disponible

Le résultat de cet appel d'offres a abouti à une solution reposant sur la technologie à base de FPGA. Par conséquent, toutes les sources VHDL de cette technologie de passerelle sont désormais disponibles sous licence GPL3 ou ultérieure, et le package de pilotes Linux sous licence GPL2 ou ultérieure est accessible sur la page de projet de passerelle PCIe-to-VME de l'Open Hardware Repository<sup>(2)</sup>. Une passerelle PCIe-to-VME en open source est donc une étape importante, non seulement pour le CERN, mais également pour toutes les autres institutions du monde où le VME est encore utilisé. Tout d'abord, les ingénieurs du CERN ne dépendent plus d'un fournisseur particulier. Même si la puce FPGA actuellement utilisée devenait obsolète

rapidement lorsque l'on considère le nombre de calculateurs intégrant une carte processeur (Single Board Computers, SBC) avec bus VME installés au CERN. A savoir plus de 900 SBC VME de MEN Mikro Elektronik architecturées autour de processeurs Intel Core Duo et Core 2 Duo. Bien qu'il s'agisse d'une quantité importante de cartes VME, ce volume à lui seul ne justifierait certainement pas la fabrication d'un composant de remplacement à cette seule fin. En conséquence, le Beams Department/Control Group (département des faisceaux et de leur contrôle) du CERN, en abrégé BE/CO, a cherché une alternative durable pour les années à venir et a publié un appel d'offres ad hoc.

### A la recherche d'une nouvelle passerelle pour le bus VME64x

Trois options possibles ont été spécifiées pour la passerelle PCI/PCIe vers VME64x. Il fallait que l'entreprise postulante :

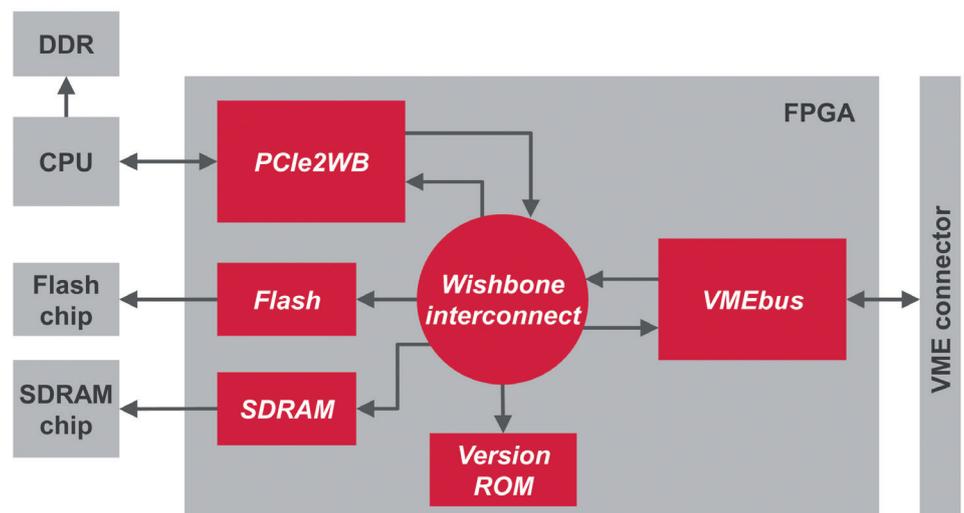
- dispose d'un stock suffisant de puces TS1148 pour pouvoir produire le nombre de cartes spécifié dans le contrat, ou
- utiliser le Tundra Universe II, prédécesseur du TS1148 conçu par le canadien Tundra Semiconductor (racheté en 2009 par IDT), ou
- utiliser une technologie à base de FPGA, cas de figure pour lequel le

CERN a demandé aux soumissionnaires de mettre à disposition les sources VHDL complètes pour la conception FPGA via une licence GPL3 ou ultérieure.

Outre les deux premiers choix évidents, le CERN savait qu'il existait des entreprises avec des implantations propriétaires de passerelles VME réalisées sur des FPGA. Par exemple, les générations précédentes de SBC utilisées au CERN (avant les cartes basées sur le TS1148) embarquaient un processeur PowerPC associé à un FPGA pour

#### 1 SCHÉMA DE LA PASSERELLE

Avec l'introduction et la version sous licence GPL de la passerelle PCIe-VME64x basée sur FPGA, MEN Mikro Elektronik assure une disponibilité sur le long terme des crates VME.



lète, l'accès à des sources VHDL complètes leur permet de porter la passerelle PCIe-to-VME sur un autre FPGA. Puisque la conception est open source, tout institut ou entreprise peut désormais non seulement acheter un produit à jour avec cette passerelle, mais également créer tout autre SBC VME utilisant la même passerelle VME. Ensuite, l'utilisation d'une même passerelle VME sur des SBC signifie également la mise à disposition des mêmes pilotes logiciels du noyau Linux et de la même API (Application Programming Interface) VME d'espace utilisateur pour tous les instituts et entreprises. Enfin, cette approche devrait permettre à tous les ingénieurs de collaborer plus efficacement dans le monde VME et de disposer d'une plus grande liberté pour partager et réutiliser les pilotes de noyau Linux pour les cartes esclaves VME, par exemple celles que les ingénieurs du CERN conçoivent eux-mêmes.

### Un contributeur à la logique du nouveau FPGA

MEN Mikro Elektronik a été la société prête à investir les plus gros efforts conjointement au CERN pour concevoir, tester et valider une passerelle PCIe Gen 3 adaptée aux systèmes VME 64 bits. La société a non seulement collaboré avec l'équipe du CERN pour la validation et les tests, mais également pour la publication en open source de la passe-

relle PCIe-to-VME traduisant les opérations de lecture et d'écriture dans l'espace d'adressage PCIe afin de lire et d'écrire des transactions sur le bus VME (figure 1). Celle-ci agit en tant que point d'extrémité PCIe d'un côté et maître du bus VME de l'autre. La passerelle peut ainsi générer des cycles VME simples et bloquer les transferts. Les types d'accès suivants sont actuellement pris en charge :

- Cycles VME simples: A16, A24, A32 avec l'une des largeurs de données D8, D16, D32.
- Transferts de blocs VME (BLT): A24D16, A24D32, A32D32, plus les transferts de blocs multiplexés A24D64 et A32D64 (MBLT).

### Accès à l'espace de configuration CR/CSR

Les transferts de blocs VME sont exécutés par un moteur DMA (Direct Memory Access) intégré, dans lequel les blocs de données sont transférés entre la mémoire système et le bus VME, en contournant le processeur. De plus, il est également possible d'utiliser le DMA avec des cycles simples, ce qui est particulièrement utile pour les cartes esclaves VME qui ne prennent pas en charge les modes d'accès BLT (Block Transfer). En général, il s'agit d'un moyen plus rapide et plus efficace d'échanger plusieurs mots de données, car le CPU est libre de poursuivre son fonctionnement normal jusqu'à ce que le moteur DMA en ait terminé avec une

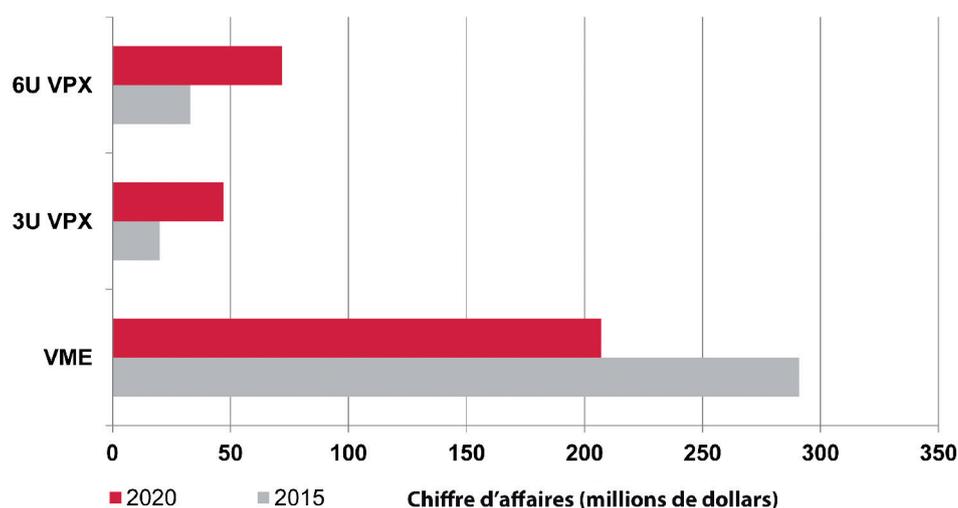
tâche programmée. La passerelle supporte également certaines fonctionnalités ajoutées dans les extensions VME64x. Elle est capable d'utiliser les broches d'adresse géographique et de générer un type d'accès A24 spécial pour lire et écrire dans l'espace de configuration CR/CSR des esclaves VME installés dans le même crate. Bien qu'aucun des modes de transfert rapides (2eVME, 2eSST) ne soit actuellement pris en charge, ceux-ci pourraient cependant être implémentés à l'avenir, car les futures cartes esclaves VME pourraient en avoir besoin; ce sujet est déjà en cours d'évaluation chez MEN. De plus, le module de bus VME implémenté par MEN peut indifféremment agir à la fois comme maître VME et comme esclave VME. Ce qui permet non seulement son utilisation dans les SBC VME qui fonctionnent en tant que maîtres, mais également d'en tirer parti dans les cartes d'entrées/sorties et autres cartes périphériques connectées en tant qu'esclaves. Cependant la configuration de l'application SBC VME se concentre uniquement sur la fonctionnalité de maître du VME. Actuellement, l'ensemble de la conception de la passerelle n'occupe que 30% environ des ressources du FPGA Cyclone IV d'Intel. Ce qui signifie qu'il y a encore beaucoup d'espace disponible pour implémenter de nouvelles fonctionnalités supplémentaires (telles que des transferts 2eVME et 2eSST).

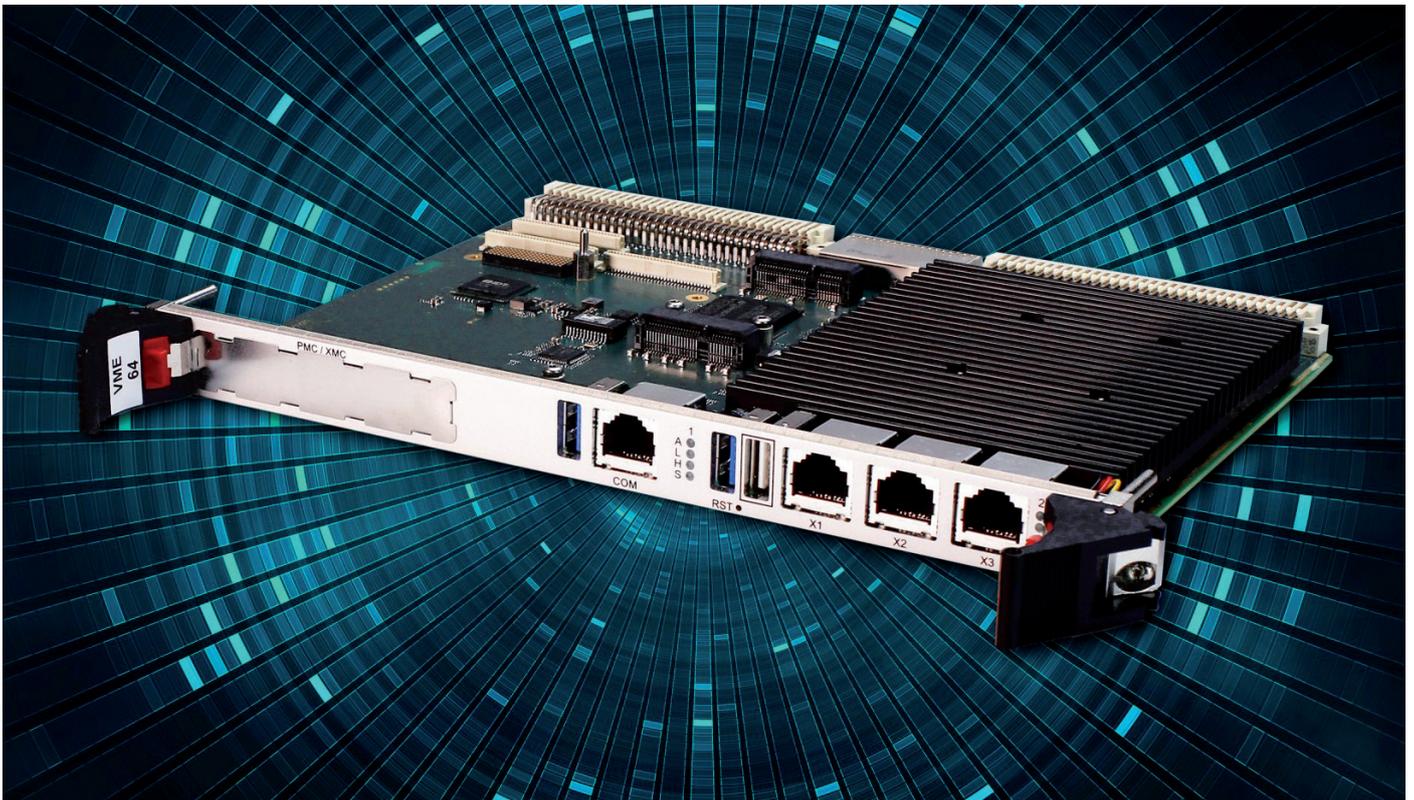
### Une disponibilité garantie sur le long terme

En publiant la spécification et en déployant des premières cartes avec la nouvelle passerelle PCIe-to-VME64x à base de FPGA, le CERN a franchi une étape importante en ce qui concerne la disponibilité à long terme de ses crates basés sur VME pour l'acquisition de données et le contrôle des accélérateurs. Cette nouvelle référence constitue également une étape importante pour tous les autres utilisateurs existants de systèmes basés sur VME, car la disponibilité d'une logique appropriée leur est également désormais garantie sur le long terme. Selon les estimations actuelles, le marché des nouvelles cartes représentera encore plus de 200 millions de dollars en 2020<sup>(3)</sup> (voir figure 2).

## 2 MARCHÉ DES CARTES VME

Le marché des cartes VME est en déclin. Toutefois, le cabinet d'études IHS estime qu'il continuera à générer plus de 200 millions de dollars de ventes de cartes par an, ce qui correspond à une production de plus d'un quart de million de cartes, en supposant un prix moyen de 750 dollars par carte.





● B.- La carte processeur A25 VME de MEN Mikro Elektronik, dotée d'une passerelle PCIe-VME64x à base de FPGA, est équipée du processeur Intel Xeon D-1500 avec un riche ensemble de fonctionnalités.

MEN Mikro Elektronik, spécialiste de l'informatique embarquée, a démontré ici son expertise des FPGA dans les systèmes embarqués. Avec cette passerelle PCIe-to-VME, les utilisateurs bénéficient d'une garantie de la disponibilité à long terme des installations existantes. MEN Mikro Elektronik peut également proposer des solutions comparables sur demande du client, par exemple des passerelles PCIe vers PCI ou même des passerelles PCIe vers ISA, ce qui permet d'accroître la disponibilité du matériel existant des constructeurs OEM sur le long terme, offrant ainsi un retour sur investissement sur une durée plus longue. Outre des solutions de passerelle pour les bus internes historiques afin de garantir une disponibilité à long terme, la société propose également des passerelles basées sur des FPGA vers des interfaces externes et des bus tels que l'UART, le bus CAN ou les contrôleurs QSPI utilisant SPI. Ce scénario d'application permet aux développeurs OEM de créer des variantes de manière extrêmement rentable. Par exemple, une même conception de carte CPU peut être utilisée pour des applications complètement différentes. Même pour de faibles quantités, il est possible de desservir

diverses applications, telles que des solutions système avec différents bus de terrain ou des variantes d'Ethernet industriel, ou plus particulièrement des solutions nécessitant une migration, par exemple dans les domaines de l'ingénierie ferroviaire ou de la construction aéronautique. Les OEM peuvent dès lors utiliser une plateforme matérielle unique dans toutes les variantes, ce qui simplifie considérablement le service, la documentation et la certification.

### Une première carte avec la nouvelle passerelle

La première carte dotée de la passerelle FPGA vers le bus VME et utilisée au CERN est le modèle A25 de MEN Mikro Elektronik (photo B) équipée du processeur de serveur Xeon D-1500 d'Intel. L'A25 qui fonctionne sans refroidissement par air forcé procure sur une carte unique deux ports USB 3.0, jusqu'à trois ports Ethernet Gigabit et deux COM RS232 accessibles en face avant. La carte offre les bases essentielles d'un calculateur industriel polyvalent en accueillant jusqu'à 8Go de mémoire SDRAM DDR4 avec ECC accompagnée de flash, le besoin d'extensions de stockage de masse flexibles étant satisfait par des logements pour

microSD et mSATA. En outre, l'A25 peut être équipé d'une carte mezzanine XMC/PMC et d'une carte mini PCI Express, fournissant des entrées/sorties frontales supplémentaires pour des fonctions telles que les affichages graphiques, le stockage de masse ou des ports Ethernet supplémentaires. L'emplacement PMC prend en charge les modules PCI-X jusqu'à 64 bits/133 MHz, tandis que l'emplacement XMC est contrôlé par une liaison PCI Express x8. L'extension modulaire avec des mezzanines d'entrées/sorties sur une carte processeur permet de configurer des systèmes sur mesure à partir de composants standard, réduisant ainsi le temps et les coûts d'intégration. La carte A25 est fonctionnelle dans une plage de température allant de -40°C à +60°C et résiste aux chocs et aux vibrations car tous les composants de la carte sont soudés, ce qui est une condition requise pour un fonctionnement fiable et une durée de vie plus longue du produit. ■

(1) [https://en.wikipedia.org/wiki/Modular\\_crate\\_electronics](https://en.wikipedia.org/wiki/Modular_crate_electronics)  
 (2) <https://www.ohwr.org/projects/pci-e-vme-bridge>  
 (3) [http://embeddedtechtrends.com/2017/PDF\\_Presentations/M06%20-%20IHS%20Markit.pdf](http://embeddedtechtrends.com/2017/PDF_Presentations/M06%20-%20IHS%20Markit.pdf)