

# Tester et valider des circuits intégrés durcis contre les rayonnements ionisants de l'espace

Les rayonnements ionisants présents dans l'espace posent de sérieux défis aux systèmes satellitaires et aux vols spatiaux et imposent un durcissement ad hoc des composants électroniques. Dans cet article, Intersil détaille les effets des rayonnements sur l'électronique et comment il est possible de simuler l'environnement spatial pour effectuer des tests approfondis de caractérisation et de validation des circuits intégrés destinés à voyager dans l'espace.

L'environnement de rayonnement spatial pose de sérieux défis aux systèmes embarqués dans les satellites et dans les missions spatiales lointaines. Pour appréhender les effets des radiations sur les systèmes électroniques et les circuits intégrés, il est en premier lieu nécessaire de comprendre l'origine du rayonnement dans l'espace. Celui-ci est presque entièrement constitué de particules comme les électrons, les protons et les ions énergétiques lourds. La plupart de ces particules proviennent du vent solaire ou des éruptions solaires. Superposés à ce flux de particules, on trouve des protons à très haute énergie et des ions lourds qui sont isotropes. Les particules d'énergie modérée telles que les électrons et les protons sont piégées dans les ceintures de Van Allen par le champ magnétique de la Terre, et en fonction de l'orbite du satellite, ces ceintures peuvent être à l'origine de la majorité des dommages causés par le rayonnement ionisant. Les protons à haute énergie et les ions lourds sont également affectés par la magnétosphère mais sont beaucoup plus difficiles à piéger.

Toutes ces particules interagissent avec les matériaux utilisés dans les systèmes électroniques car les électrons et les protons solaires sont abondants et provoquent une ionisation dans ces matériaux. Illustrons ce phénomène par un modèle simplifié où des particules chargées de faible ou moyenne énergie génèrent des paires d'électron-trou dans les

## AUTEURS



**Josh Broline**, directeur marketing, et **Nick Van Vonno**, ingénieur principal, pour l'activité Composants Mil/Aero d'Intersil.

oxydes thermiques utilisés dans les circuits intégrés. La mobilité des électrons dans ces oxydes est très élevée et tout champ électrique appliqué « balaie » les électrons de l'oxyde en quelques picosecondes. La mobilité des trous est nettement plus faible ce qui fait qu'une plus grande proportion de trous se retrouve piégée. Cette dynamique de piégeage asymétrique se traduit par une charge volumique positive des couches diélectriques et la dégradation à la fois des transistors bipolaires et MOS dans les circuits.

## Phénomènes destructifs et non destructifs

La figure page suivante montre que, lorsque l'énergie des particules augmente, leur abondance diminue, avec une courbe abondance/énergie couvrant 25 ordres de grandeur et aboutissant à de très faibles flux d'ions lourds TeV relativistes. Les effets des particules abondantes de plus faible énergie sont uniformes dans tout le volume du circuit intégré, mais les ions lourds de haute énergie provoquent des événements singuliers (Single Event Upset, SEU), définis comme l'interaction d'un ion énergétique unique avec le composant en silicium. Ces particules de haute énergie perdent de l'énergie lorsqu'elles traversent le dispositif semi-conducteur, générant une suite de paires électron-trou. La charge résultante accumulée peut modifier la tension sur les nœuds sensibles, ce qui peut affecter le fonctionnement du circuit.

Les effets des événements singuliers peuvent être divisés en phénomènes destructifs et non destructifs. Parmi les effets non destructifs on peut citer l'inversion de bits, les interruptions fonctionnelles des applications numériques et les transitoires sur les sorties des fonctions analogiques. Les effets destructifs incluent le latch-up (déclenchement par mise en conduction), la fusion d'une métallisation par effet thermique (burnout) et la rupture de l'oxyde des transistors MOS, qui se traduisent par des dommages définitifs irrémédiables. L'unité la plus couramment utilisée pour l'étude des effets des événements singuliers est le transfert d'énergie linéaire (Linear Energy Transfer, LET) de l'ion entrant, qui équivaut à la perte d'énergie par unité de longueur de piste ( $dE/dx$ ) pour une densité de matériau donnée. Il s'exprime en  $MeV.cm^2/mg$ . Leçon principale à tirer à ce niveau : le blindage est inefficace car il ne filtre que dans la partie basse énergie du spectre. Le flux d'ions à haute énergie n'est donc pas affecté et la parade doit être effectuée au niveau du circuit intégré et du système.

## Impact du secteur spatial commercial

Depuis la fin du programme de la navette spatiale, on constate une forte tendance à l'augmentation de la participation du secteur commercial dans les lancements et les missions. Le marché des véhicules de lancement, d'abord soutenu par les programmes gérés par des gouverne-

ments et menés par des contracteurs privés, s'oriente désormais vers des programmes gérés par le secteur privé. On voit également croître l'intérêt pour le tourisme spatial et les spatioports commerciaux. Ces tendances, combinées aux pressions visant à réduire les coûts des programmes financés par les gouvernements, ont entraîné un engouement du marché pour des alternatives économiques aux circuits intégrés de haute fiabilité. Parmi ces alternatives figurent notamment des composants catégorie Q de qualité militaire, de classiques composants disponibles sur étagère (Commercial Off The Shelf, COTS) et même des dispositifs destinés au secteur automobile. Les lanceurs commerciaux sont à la pointe de cette tendance et ne font guère appel à des circuits intégrés de haute qualité en raison de la brève durée des missions et de l'accent mis sur le contrôle des coûts.

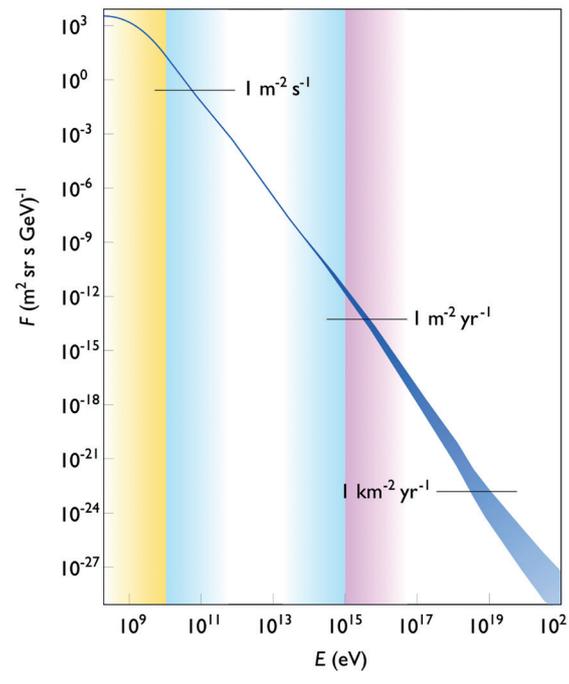
De fait, les objectifs de l'industrie privée sont de réduire le coût, d'augmenter la fiabilité de l'accès à l'espace et... de faire des bénéfices. Ce modèle exige simplicité, fiabilité et coûts fortement réduits aussi bien sur l'engin de lancement que sur la charge utile et l'infrastructure de lancement. Par ailleurs, les produits spatiaux commerciaux sont conçus pour assurer la compatibilité avec de multiples infrastructures aux capacités limitées, tant pour la production que pour le lancement et le support de la mission.

### Objectifs de la NASA

Dans ce cadre, le programme Orion, initiative clé de la NASA, porte sur le développement d'un vaisseau spatial habité pouvant être utilisé comme véhicule d'exploration pour un éventail de missions, y compris une mission habitée vers Mars (voir photo page suivante). Le programme Orion, en tant que tel, englobe aussi les procédures de lancement, d'abandon du lancement, de voyage vers l'objectif spécifique et de rentrée atmosphérique lors de la mission de retour sur la Terre. Lancé de Cap Canaveral le 5 décembre 2014, le vol Orion EFT-1 a ainsi permis d'effectuer une première mission de démonstration de quatre heures sur deux orbites. Ont alors pu être évalués les systèmes de lancement et de rentrée tels que l'avionique, le contrôle d'atti-

### LE SPECTRE D'ÉNERGIE DES RAYONS COSMIQUES GALACTIQUES

Lorsque l'énergie des particules augmente, leur abondance diminue, avec une courbe abondance/énergie couvrant 25 ordres de grandeur et aboutissant à de très faibles flux d'ions lourds TeV relativistes.



tude, les parachutes et le bouclier thermique nécessaire à une rentrée à haute vitesse. Orion constitue en fait un tremplin pour la future exploration humaine de Mars. Jusqu'à présent, Mars n'a en effet été exploré qu'à travers un programme intensif de « rovers », de sondes orbitales et d'imageurs, complétés par des recherches approfondies sur les aspects humains et médicaux associés à une mission de longue durée dans un environnement de rayonnement difficile.

La NASA a historiquement classé les composants pour applications spatiales selon différents niveaux d'assurance de fiabilité. Dans ce cadre, un composant de Grade-1 est considéré comme le plus fiable et convient aux missions critiques et aux applications de vols habités. Les composants de Grade-2 sont destinés à des applications génériques et ceux de Grade-3 conviennent pour des applications hors-mission à risque plus élevé. Ces grades sont respectivement corrélés avec la compatibilité aux normes MIL-PRF-38535 QML-V ou QML-S, aux normes de Classe B, Q ou H, et à la norme MIL-STD-883, et les coûts des composants suivent la même classification. Les principales différences entre les grades

sont les types et l'étendue des procédures de blindage électromagnétique et d'assurance produit utilisées en cours de production.

Les composants commerciaux sont régulièrement « durcis » via l'implémentation de certaines ou de toutes les protections correspondant à un grade donné. Mais les coûts qui en résultent sont généralement égaux ou même supérieurs à ceux des composants durcis par le fabricant lui-même. Le durcissement contre le rayonnement est ici une question clé (une question où le choix d'un composant COTS peut s'avérer problématique) car il faut prendre notamment en compte les effets des rayonnements qui vont de la dégradation des paramètres de performances par une dose ionisante cumulée, ce qui peut causer une dégradation du système, aux effets destructeurs d'un événement singulier, qui peuvent conduire à l'échec de la mission.

### Utilisation de systèmes COTS « sur étagère »

Dans le domaine spatial, les systèmes COTS sont généralement des systèmes uniques bâtis avec de rigoureuses contraintes de coûts et issus d'un mélange de composants COTS et de composants à haute fiabilité. Les composants à haute fiabilité sont confinés aux zones critiques de la mission et les composants COTS sont utilisés dans le reste du système. Dans ce modèle, les composants COTS proviennent du marché commercial et sont généralement marqués par les classiques indicateurs de traçabilité, et ils sont acquis en quantités suffisantes pour les besoins de la mission entière. Ces composants sont ensuite qualifiés sur un principe d'échantillonnage par lots avec des lots acceptés et des lots refusés parce que défectueux. Certes cette méthode s'avère efficace au niveau coût, mais son risque et son imprévisibilité ne sont pas compatibles avec les missions aux enjeux importants telles que les satellites de communication ou les charges utiles relevant de la sécurité nationale. Du coup, les missions de télécommunications commerciales, qui ont des contraintes strictes de temps d'accès au marché et d'assurance de service, ont toujours fait appel aux composants ayant la meilleure qualité pos-

sible, et cette situation devrait perdurer. Il en est de même pour les missions relevant de la sécurité nationale.

Les effets du rayonnement spatial sont causés par des particules interagissant avec les matériaux utilisés dans les circuits électroniques, et des tests de rayonnement véritablement rigoureux devraient être capables de reproduire ces environnements de particules. Cependant, les tests avec électrons et protons sont peu adaptés et coûteux, aussi la communauté spatiale a historiquement utilisé des rayons gamma pour les tests au sol.

100 ergs par gramme. L'absorption d'énergie est spécifique à la matière irradiée, donc l'unité commune utilisée en technologie silicium devient le rad(Si).

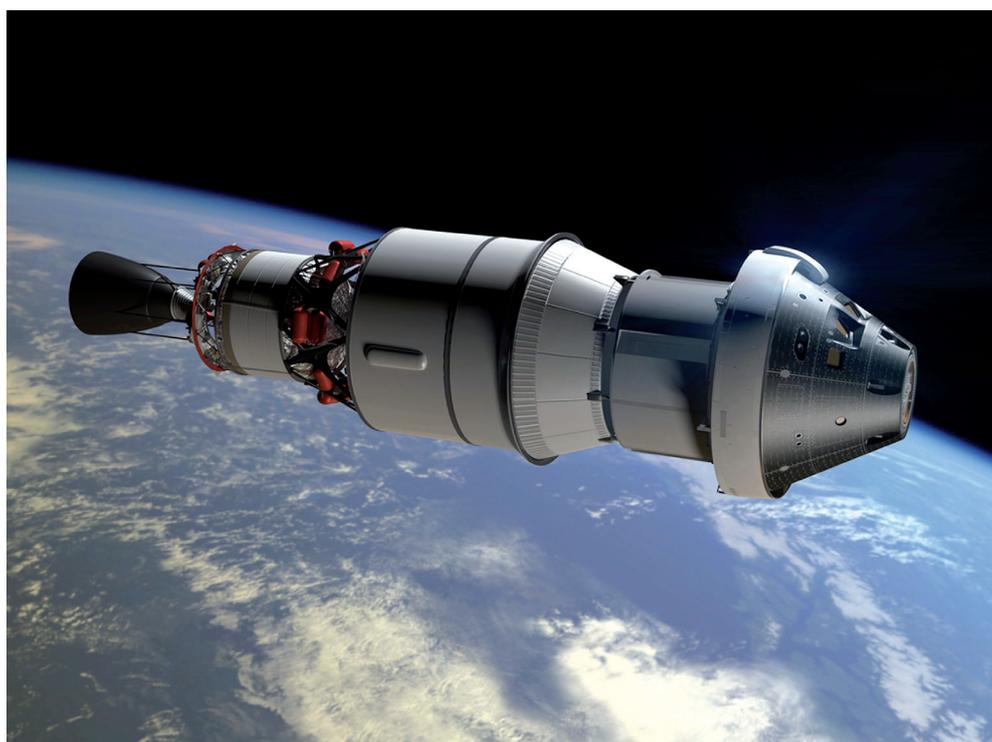
A l'origine, le test de dose cumulée était effectué à des débits de dose élevés situés dans la fourchette 50–300 rad(Si)/s, ce qui constitue une approche pratique puisque que le test ne prend que quelques minutes pour une exposition de 100 krad(Si). Des résultats de recherche publiés en 1992 ont néanmoins montré une aggravation de la vulnérabilité des composants analo-

l'espace est devenu un défi en termes d'assurance durcissement aux radiations (RHA), de nombreux utilisateurs mettant désormais l'accent sur les tests à faible débit de dose pour la caractérisation et l'acceptation de composants et négligeant complètement les tests à débit de dose élevé.

### Un programme de test et qualification depuis 2012

Pour répondre à cette demande, Intersil a mis en place un programme d'assurance durcissement aux radiations à faible débit de dose qui effectue des tests de validation tranche de silicium par tranche de silicium (wafer), tant pour des débits de dose faibles qu'élevés, et ce en s'appuyant sur des irradiateurs implantés sur les sites de production. Ce programme est opérationnel depuis 2012. Il ajoute un suffixe distinctif (EH) à la référence du composant pour indiquer que ce dernier a satisfait aux tests d'acceptation pour les deux débits de dose de radiation, sachant que la plupart des circuits intégrés durcis contre les rayonnements d'Intersil sont maintenant disponibles avec cette option. Ce programme, qui élimine le recours à des tests indépendants de validation à faible débit de dose, est aujourd'hui largement accepté par les clients.

Lors des diverses étapes du développement de ce programme, Intersil avait envisagé d'utiliser des tests avec débit de dose accéléré, au cours desquels les irradiations sont réalisées à température élevée ou dans un environnement à atmosphère riche en hydrogène modifié. Bien que ces méthodes aient produit des résultats encourageants dans un environnement de R&D, elles se sont révélées incompatibles avec la production limitée de composants QML-V. Une étude de corrélation détaillée aurait en effet été nécessaire pour chaque référence de composant, avec une vérification périodique de la précision de corrélation, et il a été constaté que l'exécution toute simple desdits tests s'avérait l'approche la moins coûteuse. Dans la pratique, les composants EH d'Intersil sont testés pour des faibles débits de dose de radiation (en mode polarisé ou non) jusqu'à 50 krad(Si), avec en parallèle un test à débit de dose élevée (en mode polarisé uniquement), tel que spécifié sur la note d'application. ■



● Le véhicule de test Orion Module Crew EFT-1, qui a effectué une première mission en 2014, est représentatif des nouveaux besoins en composants électroniques durcis (source: NASA).

Ce n'est certes qu'une simulation, mais 50 ans de pratique dans l'utilisation de photons à haute énergie permettent aujourd'hui de prédire avec une quasi-certitude la réponse des composants à des particules chargées. Dans la pratique, l'isotope synthétique de cobalt  $^{60}\text{Co}$  est utilisé comme une source de rayons gamma peu coûteuse avec deux niveaux d'énergie des photons à 1,17 MeV et 1,33 MeV. Cette source est largement utilisée pour les tests de « dose cumulée » sur les composants électroniques, dans lesquels on a montré que la dose réelle de radiation pendant l'irradiation joue un rôle majeur. A noter que l'unité de dose ionisante cumulée est la dose de rayonnement absorbée (rad), ce qui équivaut à

giques bipolaires à des débits de dose aussi faibles que 0,01 rad(Si)/s. Et ce alors que le débit de dose dans l'espace est encore plus faible que cela. Conséquence: les tests à débit de dose élevé sont désormais reconnus comme des méthodes d'accélération excessives pour de nombreuses technologies. Le problème est qu'un test à faible débit de dose de radiation à 0,01 rad(Si)/s pour atteindre une dose cumulée de 50 krad(Si) comme stipulé par la méthode de test 1019 de la norme MIL-STD-883, va durer... 10 semaines, ce qui augmente le coût des tests de conformité. Du coup, le durcissement des composants aux faibles débits de dose ionisante tels que ceux rencontrés dans