



Electronique

Alerte aux rayons cosmiques

C'est une menace venue du fin fond de l'Univers: des neutrons issus de rayons cosmiques perturbent les circuits électroniques. Ordinateurs, téléphones, voitures... aucun appareil n'échappe à ces particules insaisissables. D'autant que la miniaturisation des composants les rend plus fragiles.

Par Olivier James



> CONTEXTE

Dès le milieu des années 70, l'effet néfaste des radiations naturelles sur les composants électroniques des satellites est un fait avéré par nombre d'experts. Ce sont alors les rayonnements cosmiques, et notamment les ions lourds, qui sont mis en cause. Dans les années 80, c'est au tour du domaine de l'avionique d'être menacé par l'environnement radiatif naturel : cette fois, ce sont les neutrons atmosphériques qui sont susceptibles d'induire des basculements logiques dans l'électronique de bord. Mais depuis les années 2000, l'électronique grand public commence elle aussi à être concernée par le problème, du fait de la miniaturisation des transistors.

"Ils m'ont dit qu'un rayon cosmique, venu du fin fond de l'Univers, avait touché l'ordinateur et faussé le résultat des élections." C'est par cette détonante déclaration que Zoé Genot, jeune députée écologiste, rendit compte en pleine session de la Chambre des représentants de Belgique, le 30 septembre 2003, des conclusions auxquelles venaient d'aboutir des experts en informatique concernant une affaire peu commune. Les faits remontaient au 18 mai de la même année, dans la ville de Schaerbeek : lors du dépouillement des résultats des élections législatives, un écart de 4096 voix était apparu pour un même candidat entre le vote traditionnel et le vote électro-

nique mené en parallèle. Mais l'argument avancé par la jeune députée pour expliquer cette bizarrerie apparut sur l'instant si farfelu que le président de la Chambre la remercia ironiquement de "s'inquiéter de l'influence des Martiens sur les élections". De fait, comment imaginer qu'une particule cosmique puisse atterrir au beau milieu de la Belgique et désorganiser un scrutin ? Voilà qui faisait plus songer à une histoire belge. Et pourtant !

Loin d'être un cas isolé, cet "incident de Schaerbeek" est en fait révélateur d'une menace qui ne fait rire ni les chercheurs ni les industriels. Car le rôle joué par des particules cosmiques, et plus précisément des neutrons, →

→ dans les dysfonctionnements informatiques constatés au sol est bel et bien avéré. Et les choses devraient encore empirer. De fait, ces bogues relèvent d'un phénomène physique bien connu dans le milieu de l'aéronautique: celui de l'altération des composants électroniques par les neutrons atmosphériques, ces particules de seulement $1,68 \times 10^{-27}$ kg qui, avec les protons, forment les noyaux des atomes.

ILS TRAVERSENT LES MURS

Mais la nouveauté, c'est que les troubles provoqués par ces minuscules particules sont progressivement en train de faire irruption dans notre quotidien. "C'est toute l'électronique grand public qui est aujourd'hui menacée par les neutrons atmosphériques", prévient ainsi Rémi Gaillard, expert des effets des radiations sur l'électronique et consultant pour diverses sociétés de l'aéronautique et de la microélectronique. Preuve de cette récente prise de conscience: l'inauguration le 5 juillet dernier – notamment via un partenariat entre le

de tester ainsi leur fiabilité en accéléré. Car à cette hauteur, les neutrons sont dix fois plus nombreux, ces particules étant issues d'une seule et même pouponnière: la haute atmosphère terrestre. C'est là, à plusieurs dizaines de kilomètres d'altitude, que des rayons émis lors d'événements cosmiques particulièrement violents (explosions de supernovæ, éjections d'étoiles à neutrons) entrent violemment en interaction avec certains atomes de l'atmosphère, comme l'oxygène et l'azote. Or, à chacune de ces réactions nucléaires naissent, tel un feu d'artifice, des gerbes de milliers de particules élémentaires: protons, électrons, muons... et neutrons. Des neutrons qui inondent littéralement l'atmosphère. Car durant la dizaine de minutes que dure leur existence frénétique, ces neutrons atmosphériques se dispersent dans toutes les directions à des vitesses vertigineuses: entre un dixième et trois quarts de la vitesse de la lumière. Leur flux diminue à l'approche du niveau de la mer: de 10 000 particules/cm²/heure à 10 km

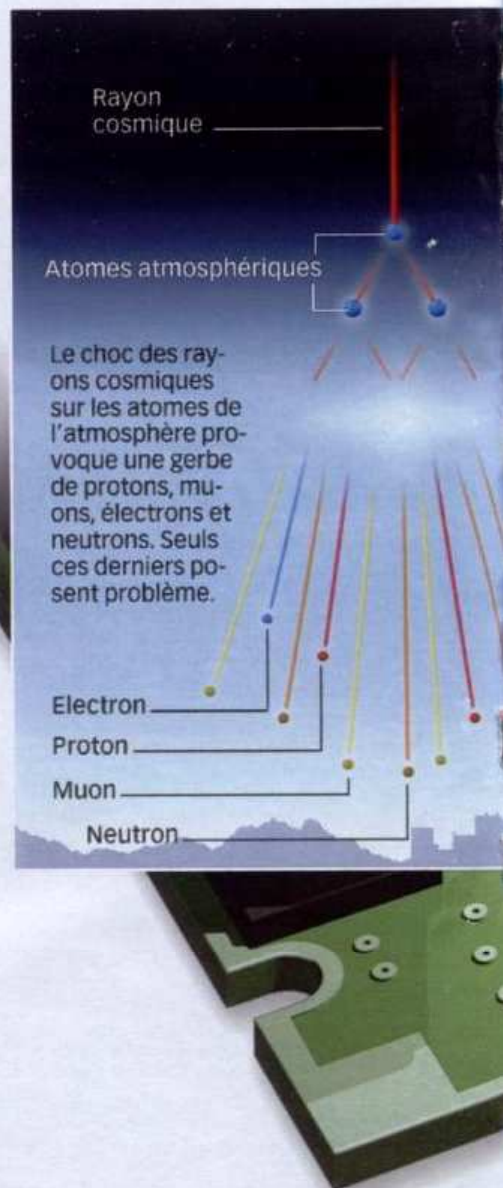
Ces neutrons sont responsables de 90 % de nos problèmes électroniques

CNRS et l'entreprise STMicroelectronics – d'un équipement de tests de la vulnérabilité des composants électroniques sur le pic de Bure, en Provence-Alpes-Côte d'Azur. "Une des rares installations permanentes au niveau mondial", précise Jean-Luc Autran, professeur à l'université de Provence et responsable scientifique du programme de recherche associé à ce nouvel équipement.

Ce n'est pas un hasard si les chercheurs ont décidé d'installer leur matériel à haute altitude: cela permet de confronter les circuits électroniques de téléphones portables ou d'ordinateurs à des flux neutroniques plus intenses que ceux du niveau de la mer et

d'altitude, il passe à seulement 10 particules/cm²/heure au niveau 0. Mais, dans leur course folle, les neutrons qui ont une énergie comprise entre 1 et 100 mégaelectronvolts (MeV), peuvent traverser les murs des bâtiments comme les parois des moyens de transport et... atteindre l'ensemble des dispositifs électroniques.

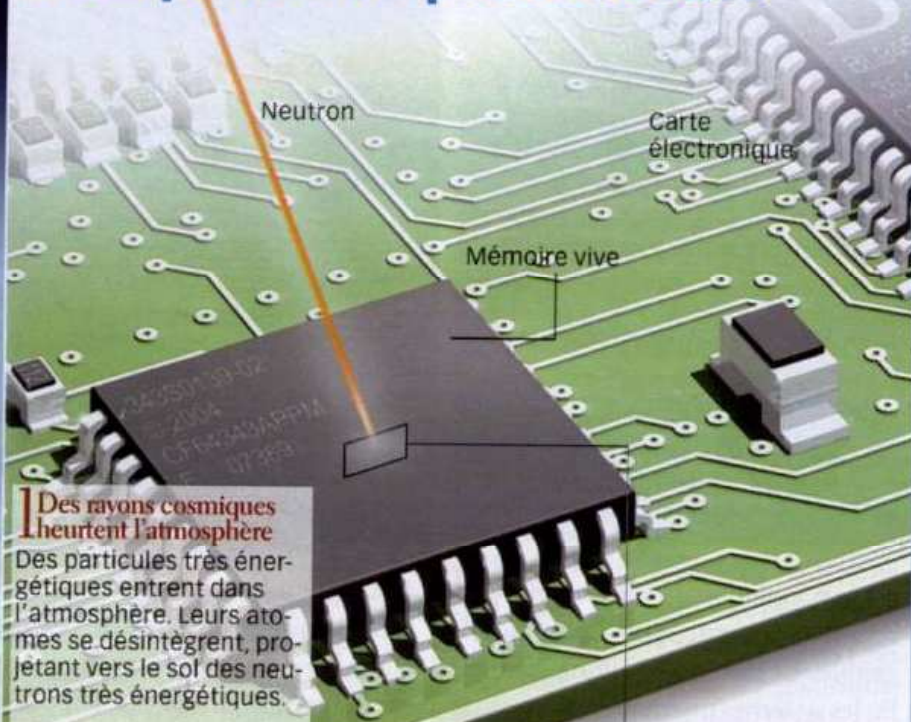
Mais comment diable en est-on venu à imputer à ces particules des problèmes informatiques constatés alors qu'elles ne laissent, sauf en cas de destruction du composant, aucune trace physique de leur passage dans la matière? A cause de la corrélation quasi parfaite, suivant l'altitude, entre l'évolution du flux de neutrons et le taux



d'erreurs informatiques. C'est d'ailleurs en allant se balader dans la montagne avec son PC que Jim Ziegler, véritable pionnier dans ce domaine, a pu estimer que ces neutrons, parmi la multitude de particules liées à l'environnement radiatif naturel, étaient responsables de 90 % des problèmes sur l'électronique terrestre (voir "Retour sur image"). Aujourd'hui, plus aucun doute n'est permis: "A la question de savoir si un unique neutron peut perturber un composant aussi complexe qu'un microprocesseur ou une mémoire d'ordinateur, la réponse est oui", explique sans ambages Rémi Gaillard.

Le problème aujourd'hui, "c'est que la donne a complètement changé à

Comment les neutrons attaquent les processeurs

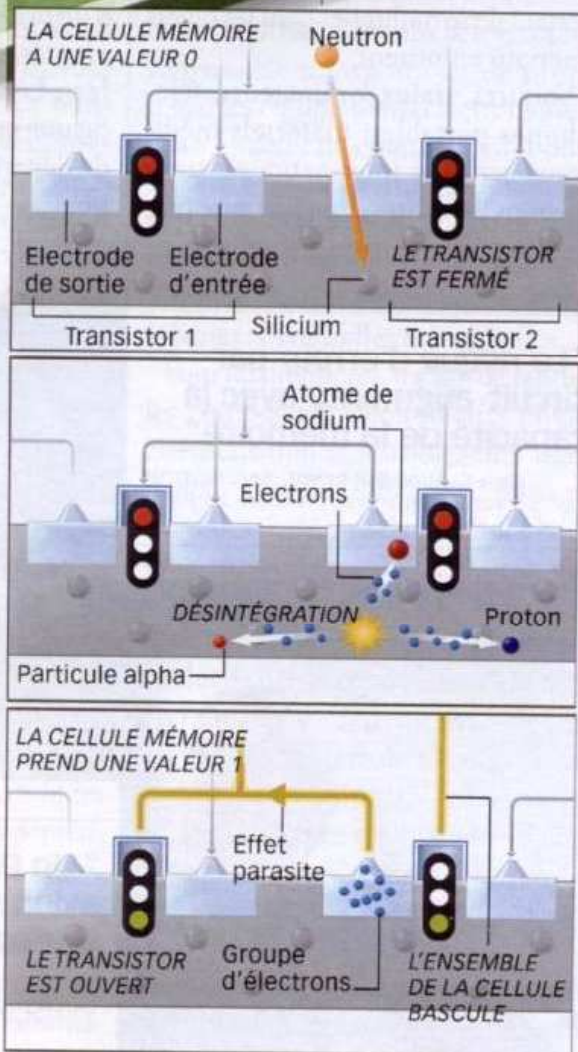


1 Des rayons cosmiques heurtent l'atmosphère
Des particules très énergétiques entrent dans l'atmosphère. Leurs atomes se désintègrent, projetant vers le sol des neutrons très énergétiques.

2 Un neutron pénètre une puce électronique...
Le circuit électronique d'un téléphone ou d'un ordinateur reçoit l'un de ces neutrons qui heurte au passage les atomes de silicium de la cellule mémoire.

3...où il désintègre le silicium
La désintégration du silicium émet des éléments chargés (atome de sodium, proton, particule alpha) qui arrachent des électrons à la matière. Si la trajectoire de ces éléments traverse l'électrode de l'un des transistors, les électrons vont s'y ruer.

4 Le circuit est altéré
Le groupe d'électrons crée un effet parasite qui transforme l'état du transistor voisin (ici, il passe de "fermé" à "ouvert") et, par effet domino, modifie les autres transistors de la cellule mémoire. Sa valeur passe de 0 à 1 : les données sont faussées.



partir des années 2000, précise Jean-Luc Leray, directeur de recherche au Commissariat à l'énergie atomique (CEA). Depuis cette date, chaque neutron qui heurte un transistor peut potentiellement faire basculer un bit d'information", c'est-à-dire la quantité élémentaire d'information représentée par un 0 ou un 1. En effet, comme le résume Marc Derby, cofondateur et président du directoire d'Iroc Technologies, une PME grenobloise spécialisée dans les tests de circuits électroniques confrontés aux neutrons atmosphériques, "avec la miniaturisation, les transistors sont devenus de plus en plus petits, leur consommation en énergie de plus en plus faible et le transfert des charges électriques de plus en plus rapide".

EN CAUSE, LA MINIATURISATION

Conséquence de cette miniaturisation : l'énergie associée à la transformation d'une information élémentaire dans un transistor étant toujours plus faible – elle se situe actuellement à quelques dizaines de femto Coulomb, soit 10 fois moins qu'il y a dix ans – un seul neutron peut déposer dans le silicium une énergie suffisante pour la perturber (voir infographie). Et, dans le pire des cas, provoquer des courts-circuits transitoires et faire fondre littéralement un composant. Résultat : un accroissement récent du nombre de défaillances et du taux de fautes de logique dans les circuits électroniques, devenant de plus en plus inacceptables. Et ce, principalement dans les composants mémoire, puisqu'ils comprennent pléthore de transistors.

Pourtant, la miniaturisation de chaque composant électronique entraîne du même coup une baisse de la probabilité d'impact entre un neutron et un transistor. "Au final, bien que l'énergie de basculement d'un point mémoire se réduise, le taux →

LES AVIONS, CIBLE FAVORITE DES PARTICULES ATMOSPHERIQUES

L'avionique a été le premier secteur technologique touché par les neutrons atmosphériques. Et pour cause : le flux de neutrons est 1 000 fois plus important à l'altitude de vol des avions qu'au niveau de la mer. Ce moyen de transport fait donc l'objet de nombreuses recherches et de normes de sécurité, édictées notamment par

des organismes comme l'International Electrotechnical Commission (IEC), qui préconisent un taux inférieur à 10^{-7} défaillance par composant et par heure. L'enjeu économique lié à l'action des neutrons est ainsi de premier ordre. D'abord parce que cela conduit les avionneurs à doubler, voire à tripler, les systèmes électroniques à bord.

Mais surtout, en cas de problème, ils doivent débarquer le matériel fautif pour analyse. Et faute d'observer la moindre trace du passage des neutrons et donc de prouver l'origine de la défaillance, ils sont contraints d'entreposer des tonnes de matériels inutilisables mais bien souvent... en parfait état de fonctionnement !

→ *d'erreur par bit reste à peu près le même*, confirme Jean-Claude Boudenot, responsable des activités de recherche en nanotechnologies au sein de Thales Research & Technology et enseignant à l'Institut supérieur d'électronique de Paris (ISEP). *En revanche, ce qui est problématique, ce sont les capacités grandissantes des mémoires. A surface égale, il y a toujours plus de transistors, ce qui fait augmenter la probabilité de rencontre entre ce type de composant et un neutron. Le taux d'erreur par circuit augmente donc bel et bien.* De quoi provoquer statistiquement de plus en plus de défaillances à l'échelle des équipements électroniques. Car le calcul est rapide : *"si l'on estime qu'un neutron n'a environ qu'une chance sur 100 millions de toucher un transistor par heure et qu'une chance sur 10 000 de l'altérer, cela revient seulement à une chance sur mille milliards, souligne Jean-Luc Leray. Mais lorsqu'on sait qu'un seul composant mémoire peut être composé d'un milliard de transistors, on peut alors vite arriver au niveau d'un appareil tout entier à la probabilité d'un défaut par jour..."* Multipliée par le nombre de dispositifs électroniques utilisés chaque jour

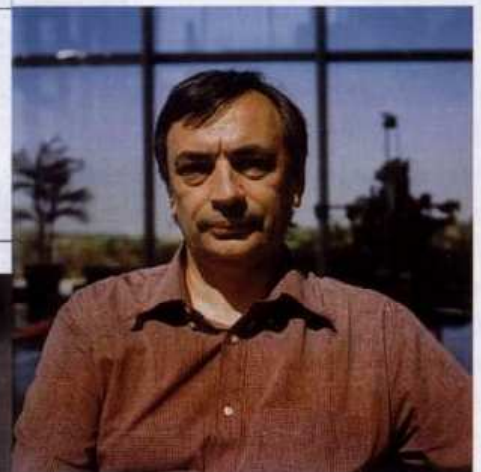
par la population mondiale, cette probabilité devient loin d'être négligeable. Et tout le problème est bien là : les systèmes microélectroniques ne cessent de se multiplier dans les objets qui nous entourent...

Voitures, trains, ordinateurs, téléphones portables, matériels médicaux, serveurs informatiques, transactions bancaires... aucun appareil, aucune application ne peut plus

échapper à la menace neutronique. Des exemples ? Le flux de neutrons étant bien plus élevé en haute altitude, *"un PC utilisé par le passager d'un avion a actuellement un risque de planter toutes les cinq heures, assure Jean-Luc Autran, membre de l'Institut universitaire de France et directeur du département "micro et nano-électronique" au sein du L2MP, une unité mixte de recherche du CNRS. Et si*

"Le risque d'erreur par circuit augmente avec la capacité de la mémoire"

JEAN-CLAUDE BOUDENOT, DE L'INSTITUT SUPÉRIEUR D'ÉLECTRONIQUE DE PARIS



"Un PC utilisé dans un avion risque de planter toutes les cinq heures"

JEAN-LUC AUTRAN, DE L'INSTITUT UNIVERSITAIRE DE FRANCE ET DU L2MP (CNRS)



▲ Depuis juillet dernier, la vulnérabilité des composants électroniques est testée sur le pic de Bure (Hautes-Alpes). Les neutrons sont en effet plus nombreux en altitude.



l'on ne fait rien, dans les dix ans à venir, cela pourrait arriver toutes les vingt minutes ! Et les systèmes au sol suivent la même évolution... ” Egalement dans la ligne de mire : les transports ferroviaires. Parce qu'ils sont équipés de composants dits "de puissance" qui sont encore plus sensibles aux neutrons que les composants mémoire, car plus volumineux et devant supporter des tensions et des courants extrêmement élevés. Il a d'ailleurs été prouvé, depuis une dizaine d'années, que leur destruction par des neutrons a mis sur le banc de touche nombre de motrices de TGV !

"Le secteur de l'automobile connaît lui aussi une montée en puissance de la prise en compte de ce phénomène", ajoute Marc Derby. Déclenchement inopiné d'airbag, dysfonctionnement du système de freinage... La liste est longue des défaillances pouvant intervenir dans des voitures toujours plus équipées de systèmes électroniques embarqués. Discrets, les équipementiers et constructeurs automobiles comme Renault n'en sont pas moins sur la brèche. Même chose pour les téléphones portables, les serveurs Internet et autres grands réseaux informatiques. Dans certains cas, les dé-

faillances liées aux neutrons sont même clairement inquiétantes : des cas avérés aux Etats-Unis de *pacemakers* et de défibrillateurs altérés par ces particules ont conclu à la vulnérabilité de ces appareils... Bref : c'est l'alerte générale pour tous les systèmes électroniques du monde moderne.

DES SOLUTIONS COÛTEUSES

Cependant, pas de panique : *"Les problèmes liés aux neutrons atmosphériques sont bien identifiés et des solutions ont d'ores et déjà été mises au point"*, tempère Frédéric Saigné, membre du Centre d'électronique et de micro-optoélectronique de Montpellier, une unité mixte de recherche du CNRS. Puisque l'eau et le béton, truffés d'atomes d'hydrogène, sont les meilleurs remparts contre les assauts neutroniques, la solution la plus efficace serait de couler du béton sur les moyens de transports ou de noyer d'eau les équipements électroniques. Mais forcément, comme dirait Bourvil, ils vont beaucoup moins bien marcher... Il existe cependant des moyens plus sérieux de remédier au problème, qui se divisent en deux catégories : matérielles et logicielles.

Pour les premières, il s'agit de rendre les composants électroniques physiquement moins sensibles aux neutrons. *Design* différent, dopage d'atomes... Autant de procédés opérants mais extrêmement coûteux. La deuxième catégorie de solutions repose sur l'utilisation de logiciels capables de détecter un certain nombre d'erreurs et de les corriger directement. Reste à connaître le degré d'efficacité de ces solutions et à savoir ce que les industriels seront prêts à mettre en œuvre, et donc à dépenser, pour assurer le bon fonctionnement de leurs produits... *"Il faudra également surveiller le comportement des composants qui utiliseront de nouveaux matériaux, autres que le silicium, pour le moment*

seul incriminé, rajoute Frédéric Saigné. *Quoi qu'il en soit, le problème des défaillances liées aux neutrons atmosphériques est à surveiller."* Et promet d'être un sujet de plus en plus brûlant pour des chercheurs et ingénieurs en perpétuelle quête du zéro défaut. Face au désarroi du vice-Premier ministre sur "l'incident de Schaerbeek", la députée Zoé Genot, elle, a décidé de faire preuve de philosophie : *"J'espère que l'on trouvera le logiciel adéquat... à moins que le rayon cosmique n'influence positivement notre liste!"* ■

> RETOUR SUR IMAGE

Il est considéré comme le pionnier : dans les années 80, avec son équipe d'IBM, Jim Ziegler est le premier à avoir identifié et décrit les effets des neutrons sur l'électronique civile au sol. Et cet Américain aurait fait cette découverte à bord de son camping-car ! Selon la légende, c'est en effet en crapahutant dans les Rocheuses avec son PC qu'il a pu montrer que le nombre d'erreurs observées dans un ordinateur était corrélé à l'altitude. Et était donc imputable aux neutrons. Cependant, en raison du caractère confidentiel du sujet et de la difficulté à analyser finement le phénomène, il a fallu attendre le 1^{er} janvier 1996 pour qu'il publie ses conclusions sur la dangerosité des neutrons. Depuis, nombre d'industriels ont pris en compte ce phénomène dans la conception de leurs circuits, au même titre que les problèmes électromagnétiques, thermiques ou mécaniques.