

Durcissement Spatial

Contraintes Electromagnétiques Induites par une Explosion Nucléaire sur un Satellite Géostationnaire.

Christian Carel (*) ; Hervé Zugaj (**)

(*) : Thales Communications, 160 bd de Valmy, 92720 Colombes
tél. : +33 1 41 30 46 29 ; email : christian.carel@fr.thalesgroup.com

(**) : Thales Alenia Space France 100 bd du midi, BP 99, 06156 Cannes La-Bocca
tél. : +33 4 92 926 146 ; email : herve.zugaj@thalesalieniaspace.com

Abstract

Cette communication a pour objet de présenter l'environnement spatial militaire, notamment les contraintes électromagnétiques SGEMP et ECEMP qui agressent un satellite géostationnaire et les processus de durcissement pour s'en prémunir.

L'environnement de rayonnements émis lors d'une explosion nucléaire, même de faible intensité rend vulnérable un satellite.

Cependant, dans certaines conditions, en particulier pour les satellites GEO, il est possible de s'en prémunir à partir de technologies et procédés industriels étendus du spatial naturel, qui permettent de minimiser le coût de possession.

L'acquisition nécessite par contre un processus de développement qui recouvre celui du spatial civil. Il doit être capable de prendre en compte les nouvelles contraintes spécifiques et doit permettre une démarche de justification à tous les niveaux pour éviter le sur-dimensionnement de la protection et les coûts excessifs et dans le pire cas le risque à tort d'abandon de la solution durcie pour cause de non-faisabilité.

Cet article témoigne que l'application de méthodologies issues du domaine militaire peuvent s'appliquer avec efficacité au domaine spatial.

1. Environnement spatial naturel (radiatif et DES) : conséquence sur l'architecture satellite

Quels que soient les types d'orbites GEO, MEO ou LEO, les satellites sont protégés contre les effets de l'environnement naturel et des perturbations électromagnétiques émises par les émetteurs de bord.

Les effets de l'environnement naturel ont pour origine l'environnement nucléaire des ceintures de radiation, des éruptions solaires et l'environnement galactique. Ils se composent d'électrons de basse énergie et d'ions lourds.

L'interaction des rayonnements se traduit par différents effets :

- Décharges électrostatiques (DES-ESD : Electrostatic Discharge)
- Dose cumulée de rayonnement dans les composants électroniques.
- Evènements singuliers SEE Single Event Effects exprimés en taux d'événement par unité de temps et par unité d'élément sensible. Les SEE comprennent les SEU Single Event Upset, SEL Single Event Latch-up, SEB Single Event Burn-Out, SEGR Single Event Gate Rupture.

Les protections mises en places s'appuient sur des techniques de blindage, de filtrage et d'équipotentialité de la plate-forme en ce qui concerne les ESD et l'EMC et des blindages « électrons » des équipements pour se prémunir des effets de dose et des ESD induits par les électrons de haute énergie des ceintures de Van-Allen.

2. Description de l'environnement spatial nucléaire

L'environnement nucléaire est consécutif à une explosion nucléaire en un point autour de la Terre au-dessus de l'atmosphère (figure 1).

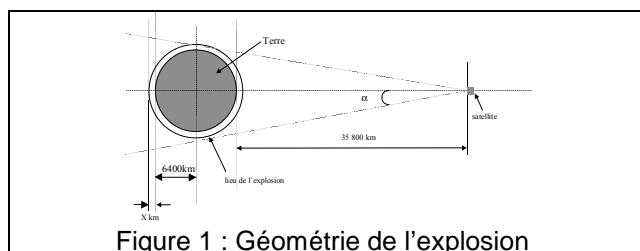


Figure 1 : Géométrie de l'explosion

Les rayonnements issus d'une explosion nucléaire agressent les satellites en vue directe. Ils se composent pour l'essentiel de :

- Photons X caractérisés par :
 - Un spectre de type spectre de Planck :

$$h\nu \cdot dN_x/dh\nu = [15/\pi^4] \cdot [u^3 / (\exp(u)-1)]$$

avec : $u = h\nu/kT$, $h\nu$ l'énergie du photon et kT la température de corps noir.

- Une loi d'émission temporelle $f_x(t)$.
- Particules chargées composées d'ions et d'électrons durs.
- Neutrons et photons γ .

Les particules chargées contribuent au renforcement des ceintures de radiations et constituent l'environnement modifié. Elles conduisent à :

- Une diminution de la durée de vie du satellite en raison de la dose de radiation qu'ils déposent de façon différée dans les composants électroniques.
- Des phénomènes de décharges électrostatiques différés externes et internes au satellite et connus sous l'appellation ECEMP Electrons Caused ElectroMagnetic Pulse.

Les photons X se propagent sans interaction dans l'espace, leur densité par unité de surface décroît selon une loi en inverse carré de la distance ($1/(4.\pi.r^2)$). Ils engendrent lors d'interactions par effet photoélectrique avec le satellite, des effets immédiats ou différés :

- Effets radiatifs instantanés sur les composants électroniques : dose absorbée instantanée, débit de dose et latch-up.
- Effets électromagnétiques connus sous le nom d'effets SGEMP System Generated ElectroMagnetic Pulse instantanés et différés. Les champs électromagnétiques naissent de l'interaction des photons X avec le système spatial.

Les photons γ ont une contribution à la dose totale absorbée et aux phénomènes SGEMP internes aux équipements de la plate-forme.

L'exposé qui suit présente l'impact des phénomènes électromagnétiques SGEMP et ECEMP.

3. Environnement SGEMP

Les photons X ont un pouvoir de pénétration dans les matériaux.

L'atténuation de la fluence X incidente $\phi(h\nu,x)$ à la traversée d'un matériau d'épaisseur x est de type exponentiel :

$$\phi(h\nu,x) = \phi_0(h\nu,0) \cdot \exp(-\mu \cdot x)$$

avec :

- $\phi_0(h\nu,0)$ la fluence incidente,
- μ le coefficient d'atténuation.

Dans le cas de l'effet photoélectrique le coefficient varie fortement en fonction du numéro atomique Z et de l'énergie $h\nu$ du photon ($\mu \propto Z^3/h\nu^4$ – figure 2), ce qui conduit à utiliser des matériaux lourds pour atténuer le flux incident.

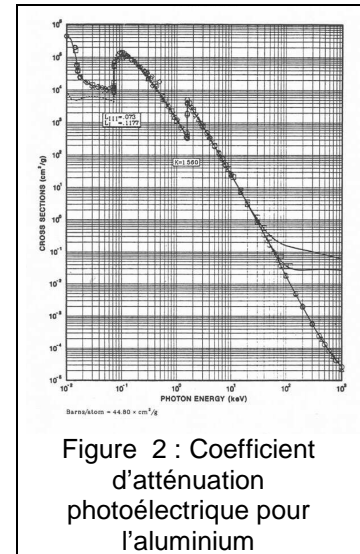


Figure 2 : Coefficient d'atténuation photoélectrique pour l'aluminium

Lors des interactions photoélectriques les électrons mis en mouvement donnent naissance aux photocourants puis aux champs électromagnétiques (figure 3) :

- A l'extérieur du satellite, c'est le SGEMP externe.
- A l'intérieur du satellite, c'est le SGEMP Interne ou IEMP Internal Electromagnetic Pulse.
- A l'intérieur des équipements, c'est le BOX-IEMP.
- Directement dans les câbles, c'est l'effet X/câble.
- Indirectement par couplage des champs par impédance de transfert.

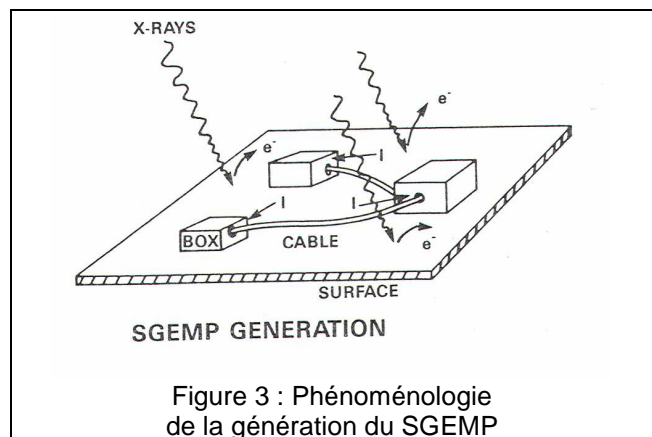


Figure 3 : Phénoménologie de la génération du SGEMP

L'émission électronique consécutive à l'effet photoélectrique est caractérisée par une émission électronique de rendement net Y_N qui se décompose en la superposition (figure 4) de :

- Rendement Y_F (F : forward) pour l'émission électronique vers l'avant.

- Rendement Y_B (B : backward) pour l'émission électronique rétrodiffusée.

$$Y_N = Y_F - Y_B$$

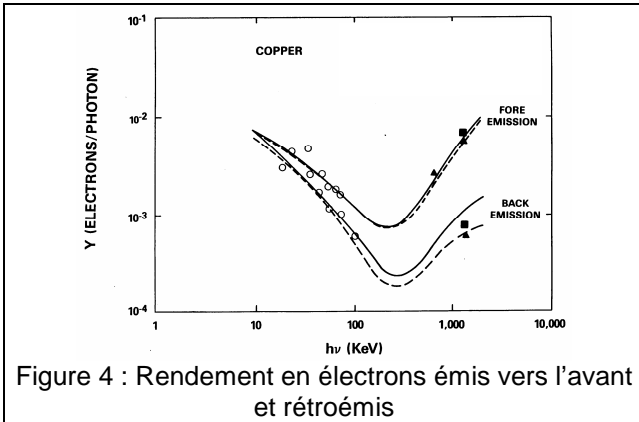


Figure 4 : Rendement en électrons émis vers l'avant et rétroémis

Le courant total émis J_N est lié au flux $d\phi/dt$ du faisceau de photons X. Il est la superposition du courant primaire J_P des photoélectrons directement émis lors d'interactions photoélectriques et du courant d'électrons secondaires J_S mis en mouvement lors du ralentissement des photoélectrons dans le matériau émissif.

$$J_N = J_P + J_S = -1.6 \cdot 10^{-19} \cdot d\phi/dt \cdot Y_N$$

Quel que soit le mode de diffusion vers l'avant ou rétrodiffusé, l'émission électronique est d'autant plus importante pour des matériaux lourds, de numéro atomique élevé.

Par exemple l'émission électronique de l'or est trente fois plus importante que celle de l'aluminium (figure 5), ce qui conduit à privilégier les revêtements constitués de matériaux légers comme absorbant d'électrons.

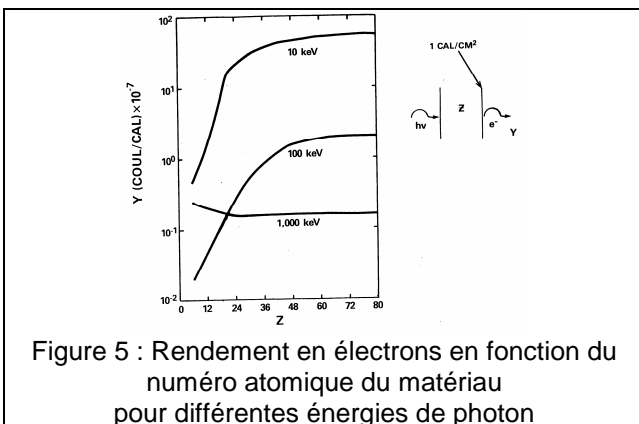


Figure 5 : Rendement en électrons en fonction du numéro atomique du matériau pour différentes énergies de photon

La rétrodiffusion des électrons est d'autant plus élevée que l'énergie des photons est faible et la transmission des photons X est d'autant plus élevée que l'énergie des photons X est élevée.

Les pires cas des contraintes SGEMP externe et SGEMP interne correspondent à deux environnements nucléaires antagonistes :

- Le SGEMP externe à la plate-forme qui est d'autant plus intense que le spectre des photons X est mou.
- Le SGEMP interne qui est d'autant plus intense que le spectre est dur.

Les champs E et H du SGEMP obéissent aux équations de Maxwell :

$$\text{Rot } E = -dB/dt ; \quad \text{Rot } H = \epsilon \cdot dE/dt + J_N$$

Ils sont résolus à l'aide de codes fondés soit sur l'exploitation de formalismes analytiques soit de codes numériques en général fondé sur l'application des différences finies résolvant équations de Maxwell et équations des plasmas.

3.1 SGEMP externe avec et sans pré-charge du satellite

Le champ électrique est directement lié à l'extraction des charges électroniques. Plusieurs régimes caractérisent l'évolution temporelle :

- Aux premiers instants le champ électrique suit l'évolution du courant de déplacement, il est normal à la paroi : $E = E_{\perp} = \int J_N/\epsilon \cdot dt$.
- L'intensité maximale du champ est limitée par la densité et l'épaisseur (longueur de Debye) de la charge d'espace créé par l'émission du cortège d'électrons secondaires.
- La décroissance a une évolution de type sinus-amorti dépendant des fréquences de résonance f_R et du coefficient d'amortissement Q du satellite.
- Aux temps supérieurs à la milliseconde, les champs sont engendrés par les décharges différées sur la paroi du satellite.

Le champ magnétique $B = B_{//}$ est tangentiel aux parois. Il naît de la dissymétrie des rayonnements au voisinage ou aux limites géométriques des matériaux.

D'une manière générale l'impédance d'onde du SGEMP est toujours élevée : $E_{\perp} / H_{//} > 377 \Omega$

En externe, les champs et leurs dérivées temporelles sont capables de destructions et de perturbations d'équipements électroniques non protégés contre ce type d'agression. Les niveaux maximums des champs dépendent peu de la puissance d'arme en raison de leur limitation par la charge d'espace engendrée autour du satellite. Ceci milite pour la prise en compte des menaces

nucléaires si la surviabilité des systèmes spatiaux présente une importance même contre des explosions de faible puissance.

L'émission électronique peut être renforcée de façon notable au moment du flash si les matériaux sont préalablement chargés d'électrons provenant de l'environnement spatial naturel. La configuration « sortie d'éclipse » est la plus pénalisante. Les conséquences de la pré-charge se manifestent surtout par une augmentation des courants de surface (champs magnétiques).

Les champs se répartissent de façon dissymétrique (facteur de 1 à 10) autour du satellite en raison :

- De l'effet d'ombre entre la face Terre principalement agressée et la face anti-Terre, non soumise au rayonnement direct.
- D'effet de pointe due à la géométrie de la plateforme, des bras d'antennes...
- Du numéro atomique des revêtements : MLI, panneaux solaires, OSR...

Ces dissymétries ramènent à la jonction des panneaux solaires et du corps du satellite un courant de remplacement qui agresse directement le système d'alimentation du satellite. C'est une des pénétrations conduites les plus pénalisantes. Son calcul est particulièrement délicat. Il nécessite d'être approché à partir de codes appropriés car il résulte de la compensation de plusieurs effets du premier ordre.

Se superposent au courant de remplacement :

- Un courant de « Knock-On » dû à l'arrachage direct d'électrons des câbles des panneaux solaires qui ramène de fortes contraintes dérivatives.
- Un courant d'arrachage des cellules des panneaux solaires qui ramène de l'énergie.

3.2 SGEMP interne à la plate-forme

A l'intérieur de la plate-forme ou d'un équipement les valeurs maximales des champs sont approchées par la loi de Poisson et le théorème d'Ampère (figure 6) :

$$E = \rho \cdot l / 2 \cdot \epsilon ; \quad H = r \cdot J_N / 2$$

avec :

- l longueur et 2.r largeur de la cavité
- $\rho = J_N / v$; v la vitesse des électrons.

Les champs dépendent du courant total J_N , donc de la fluence X et par conséquent de l'atténuation du faisceau. Ils peuvent être limités à des valeurs acceptables, à partir d'un blindage « anti-X » approprié.

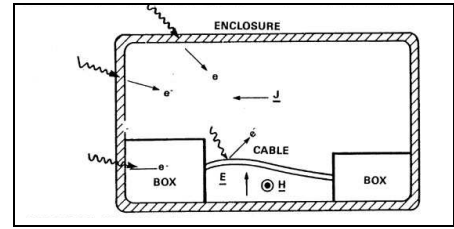


Figure 6 : Mécanisme du SGEMP interne

3.3 SGEMP dans les câbles

Les câbles sont agressés :

- Directement par les photons X. Les photons X pénètrent à l'intérieur des blindages des câbles. (figure 7). Ils libèrent par effets photoélectriques des charges dans les diélectriques contigus aux métaux et créent des courants images directement sur l'âme des câbles.

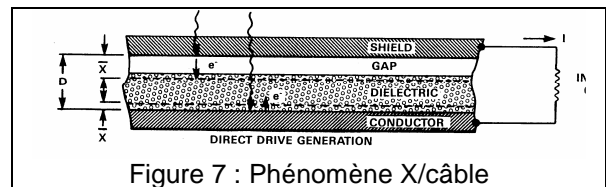


Figure 7 : Phénomène X/câble

Les courants par unité de longueur dI/dx engendrés sur les conducteurs internes sont la convolution du flux $d\phi/dt$ de photons X incident au câble à la réponse intrinsèque J_D des liaisons au flash X (type de câble, épaisseur des interstices entre diélectriques et conducteurs) :

$$dI/dx = J_D \cdot d\phi/dt$$

- Indirectement au travers du couplage champ à câble. Les champs SGEMP se couplent avec les câbles et torons et ramènent tensions et courants sur les conducteurs externes des câbles. Les tensions par unité de longueur dV/dx engendrées sur les conducteurs internes dépendent de l'impédance de transfert Z_t de la liaison, de l'intensité du courant I_B de surblindage :

$$dV/dx = Z_t \cdot I_B$$

Le SGEMP sur câble est maîtrisé d'une part par la caractérisation de :

- La réponse intrinsèque des câbles et connecteurs à partir de codes de calcul spécifiques et/ou de mesures sous moyen d'essais X appropriés.
- L'impédance de transfert des câbles et connecteurs.

3.4 BOX-IEMP : SGEMP internes aux équipements et boîtiers

Le BOX-IEMP est une forme particulière de SGEMP interne appliqué aux équipements.

Les champs et les émissions de charges agissent directement sur les circuits électroniques par :

- Transfert direct de charges entre les revêtements des parois du boîtier et les circuits.
- Capture d'électrons par polarisation des pistes des circuits.

Il peut se rajouter des phénomènes dus à la pressurisation du boîtier.

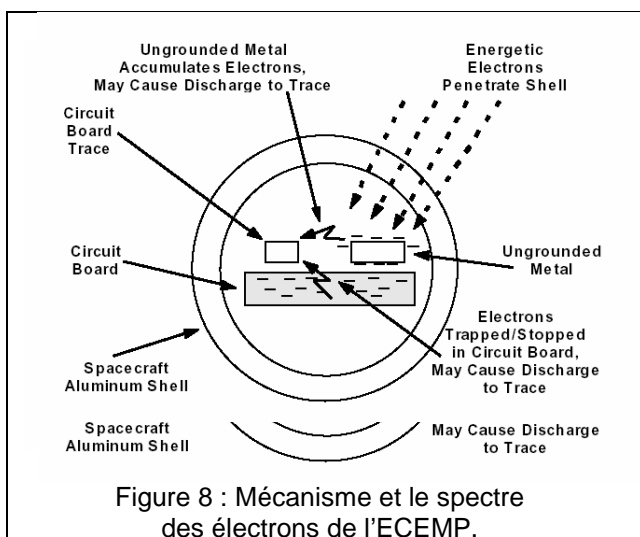
La protection ne peut se faire en jouant au niveau des interfaces comme dans le cas du filtrage. Elle nécessite la maîtrise des émissions électroniques, du flux de photons et la susceptibilité électrique des composants.

Les réponses dépendent du flux $d\phi/dt$ de photons X, des rendements en électrons des parois, pistes et support époxy des cartes ainsi que des géométries pistes/cartes et cartes/boîtier.

La maîtrise du BOX-IEMP nécessite des moyens d'analyses, des codes de calculs et moyens d'essais X appropriés.

4. Phénoménologie et impact de l'environnement ECEMP

Par ECEMP Electron Caused Electromagnetic Pulse on désigne les mécanismes de décharges électrostatiques internes aux équipements induits par les électrons de hautes énergies.



Ce phénomène est possible si les électrons de l'environnement spatial entrent en flux suffisant dans les équipements pour ensuite être piégés dans les cartes électroniques. Le niveau de charge

électrostatique croît alors, jusqu'à atteindre le seuil de tension suffisant pour déclencher une décharge électrostatique. Ce phénomène est redouté car la décharge électrostatique est localisée directement sur les cartes électroniques, au voisinage immédiat de composants internes non forcément protégés au même niveau que les interfaces d'entrées et sorties des équipements. Le mécanisme de l'ECEMP est présenté figure 8.

Pour l'environnement spatial naturel, le document NASA-HDBK-4002 de la NASA définit un environnement « pire cas » pour l'orbite géostationnaire pour se prémunir de ces effets.

Dans le cas de l'environnement militaire, l'effet d'une explosion nucléaire se traduit par un enrichissement des flux d'électrons de hautes énergies pendant une période de quelques mois.

L'analyse des effets ECEMP sur le satellite peut s'appuyer sur celle de l'environnement naturel en prenant en compte cet effet d'enrichissement variable dans la durée suivant la date de l'explosion nucléaire.

5. Durcissement spatial contre un environnement nucléaire

5.1 Introduction

Le processus de durcissement d'un satellite aux effets d'explosions nucléaires consiste à :

- Analyser le besoin de durcissement au regard des spécifications de maintien de performances imposées pendant et après l'agression nucléaire.
- Rechercher des solutions de durcissement faisables techniquement, optimisées en fiabilité, coûts, contraintes d'allocation de masse et contraintes programmes.
- Justifier en s'appuyant sur des méthodes de démonstration IADT (I : Inspection, A : analyse, D : démonstration, T : test) que les solutions satisfont aux exigences de client.

Le rebouclage est la base de la garantie de la justification et de la qualification. Les preuves sont fondées sur des essais au sol d'équipements et de caractérisation de matériaux et d'analyses détaillées s'appuyant sur des logiciels validés dans le domaine d'application.

Il permet de justifier la marge de durcissement différence entre la contrainte appliquée et la susceptibilité de l'équipement.

La marge (ou la probabilité de survie) permet de garantir le maintien des performances du satellite pendant et après l'agression nucléaire. Elle se décline au niveau des spécifications de durée de

maintien à performance nominale du satellite après agression, qui peuvent être modulées en fonction de la mission du satellite (date de mise en orbite du satellite, date de l'agression).

5.2 Non-destruction et non-perturbation des dispositifs électroniques

Le durcissement nucléaire ne tolère aucune destruction d'équipement, des perturbations peuvent être admises pour certaines fonctions à condition que le système recouvre ses performances après la période d'indisponibilité due au phénomène de scintillation qui affecte les liaisons radio.

Pour les effets radiatifs la non-destruction repose sur des choix de technologies de composants qui résistent au cumul de dose de rayonnement absorbé dans le cadre de l'environnement spatial naturel et de l'environnement spatial militaire.

Pour les effets électromagnétiques, la non-destruction peut s'appuyer sur les techniques de blindage, d'équipotentialité, et de choix de composants employés contre les ESD et l'EMC, à condition de les caractériser pour qu'elles prennent en compte les besoins du spatial militaire. Cela peut conduire à des calculs/mesures de susceptibilité électrique de composants.

Gérer la perturbation consiste à maîtriser les conséquences des perturbations sur toute ou partie du satellite.

On peut soit s'en affranchir en étendant les performances des solutions technologiques retenues pour la destruction ou bien les gérer à partir de fonctions logiciels.

Les premières sont adaptées au niveau local. Les concepts sont simples. Cependant les contraintes de masse et de coût qu'elles ramènent limitent les solutions.

Les secondes sont adaptées au niveau système et dans une certaine mesure permettent le ré-emploi d'équipements.

Les fonctions à préserver pendant l'agression comportent notamment : le contrôle thermique, le contrôle d'attitude et d'orbite, l'alimentation électrique, l'état de charge de la batterie, la liaison avec le sol... Le calculateur de la plate-forme doit pouvoir restituer un état sauvegarde à partir d'un programme de gestion des défaillances FDIR (Failure Detection and Isolation and Recovery) selon différents niveaux de priorité.

On différencie les équipements qui ne peuvent pas être perturbés de ceux qui peuvent être réinitialisés.

5.3 Architecture de la protection contre les effets nucléaires

Les effets instantanés TREE et SGEMP sont considérés comme prépondérants pour définir l'architecture.

- Le TREE et le SGEMP n'ont pas d'équivalent dans l'environnement naturel et nécessitent des principes spécifiques.
- Les effets de dose cumulée et l'ECEMP peuvent être considérés dans un premier temps comme une prolongation des effets de dose due à l'environnement naturel et des effets ESD.

Deux architectures de protection asymptotiques sont souvent mises en avant pour se prémunir des effets TREE :

- Une solution « active » : la circonvolution qui est fondée sur l'arrêt, suivi de la remise en marche des équipements pour se prémunir du phénomène de latch-up au moment du flash
- Une solution dite « passive » fondée sur un blindage « anti-X » conçu pour réduire le flux de photons transmis en deçà d'un seuil pour limiter ou supprimer des effets de latch-up et de débit de dose à l'intérieur du satellite.

La solution du blindage « anti-X » permet de ramener les contraintes à des niveaux inférieurs aux seuils de destruction ou inférieurs au niveau de protection déjà imposés par l'environnement naturel (ESD par exemple) de façon à bénéficier d'une synergie dans la recherche de la protection. Elle conduit à un surcroît de masse, et participe à la réduction des effets internes du SGEMP.

La circonvolution minimise l'augmentation de la masse du satellite. Cependant, elle est peu adaptée à un programme qui s'appuie sur le réemploi de l'existant, car elle impose la mise en place de circuit de coupure sur les circuits dans les équipements, ce qui implique une nouvelle qualification.

5.4 Méthodologies de durcissement spatial

Les paragraphes précédents suggèrent que l'établissement d'une protection

- Doit d'une part s'appuyer sur les technologies, procédures et méthodes du durcissement spatial naturel pour profiter de la synergie avec la protection contre les effets ESD et EMC, sous peine de sur-dimensionnement des performances et de surcoût.
- Doit prendre en compte les effets spécifiques du nucléaire. Il faut traduire les contraintes ramenées en contraintes compatibles de celles de l'environnement spatial naturel. A cette condition, elles peuvent être prises en compte sans rupture technologique et sans rupture du processus de fabrication industriel. La non

compatibilité peut conduire à tort à un risque de non-faisabilité.

Même si chaque effet élémentaire semble simple et facilement maîtrisable, la difficulté vient de la complexité à gérer simultanément :

- La multitude des effets à prendre en compte : SGEMP externe, SGEMP interne, BOX-IEMP, X/Câble, couplage champ à câble, EMC, ESD, blindage « électrons », blindage « anti-X », blindage électromagnétique...
- La multitude des domaines d'applications : équipements et câblages externes et internes, types de câblage et harnais, senseurs exposés.
- La multitude des disciplines à prendre en compte simultanément au sein d'une équipe : physique atomique, électromagnétisme, architecture électrique, EMC/ESD, électronique...

Les méthodes existantes soutenues par l'administration dans le domaine du durcissement militaire s'adaptent aux méthodologies du spatial et lui permettent d'aller au-delà.

Les processus et méthodes existants ont fait leur preuve dans le cadre du durcissement de systèmes sensibles et exposés comme les systèmes stratégiques, les systèmes de communications et aéronautiques, mais aussi pour l'appréciation de la vulnérabilité de systèmes militaires et civils (cf : article (Articles C. Carel et coll. ETTC 2001 et REE 2002).

Le processus s'appuie sur des phases de faisabilité, de développement, de conception et de qualification qui reposent sur les tâches du cycle en V de développement d'un produit. Il est souvent partagé par les grands industriels y compris ceux du spatial, mais dans ce dernier cas il diffère au niveau du processus de qualification et la nature de la justification à apporter.

Le durcissement contre l'environnement spatial naturel repose sur des analyses pires cas, des essais et sur le retour d'expérience en vol pour la validation des technologies. L'analyse du comportement des satellites en vol contribue à la validation du durcissement à l'environnement naturel et à la CEM, mais contribue aussi indirectement à la validation des méthodes employées pour y parvenir.

L'avantage de la méthode du spatial naturel résulte dans la confiance et la fiabilité des solutions proposées en raison du retour d'expérience. La marge EMC/ESD est acquise globalement sans pour autant être nécessairement détaillée jusqu'au composant de base. Les difficultés surviennent

quant il s'agit d'adapter la protection à une configuration d'environnement ou d'emploi différent.

Le durcissement spatial militaire repose pour sa part sur des analyses et essais comme dans le cas du spatial naturel, mais repose la validation sur la caractérisation des technologies au sol : l'expérimentation grandeur nature n'étant pas possible.

Le durcissement nucléaire impose l'emploi d'outils (simulations numériques, essais) spécifiques en plus de ceux plus standards utilisés pour la CEM et le durcissement du satellite à l'environnement spatial naturel (radiations et DES).

Dans le cas du spatial militaire, la marge est gérée à tous les niveaux, ce qui permet de répartir l'effort de façon judicieuse, d'éviter une sur-protection locale et de permettre le réemploi de la solution.

Elle impose un effort initial de caractérisation des technologies et des outils spécifiques. Ces derniers doivent être les plus précis possibles, pour ne pas empiler par défaut de précision des marges de sécurité trop lourdes aboutissant à des solutions de durcissement trop contraignantes ou pouvant avoir un impact négatif sur la fiabilité du satellite.

6. Conclusion

Le retour d'expérience de durcissement spatial de satellite montre :

- Qu'un satellite GEO non durci est vulnérable contre les effets d'un tir exo-atmosphérique même de faible puissance !
- Qu'un satellite GEO (ou MEO) peut être durci sans rupture technologique à partir des technologies et procédés utilisés dans le cadre du spatial naturel !
- Mais que ces technologies demandent à être caractérisées à partir d'essais spécifiques corrélés avec des résultats numériques issus de logiciels validés.
- Qu'une adaptation ou un soutien sont nécessaires aux industriels du spatial civil, pour qu'ils aient la capacité de justifier de solution à moindre coût prenant en compte des contraintes militaires.

La démarche de qualification adoptée par les experts français permet d'optimiser le coût du durcissement et ainsi le situer à un niveau très raisonnable par rapport au coût d'acquisition global d'un satellite.

Elle permet de garantir la surviabilité des satellites en orbites contre ce genre d'événement.