

## **Nuclear environment and natural environment on a geostationary satellite Applications relative to electromagnetic effects**

### **Prise en compte du durcissement nucléaire et des contraintes d'environnement de satellite géostationnaire Cas des effets électromagnétiques**

**Christian Carel**

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

**Hervé Zugaj**

Alcatel Space  
100 bd du midi, BP 99, 06156 Cannes La-Bocca  
tél. +33 4 92 92 61 46 ; email :  
[herve.zugaj@space.alcatel.fr](mailto:herve.zugaj@space.alcatel.fr)

---

#### **Abstract**

This communication has for object to present the nuclear environment and its impact on a geostationary satellite and to focus on electromagnetic effects.

#### **1 Natural Space Environment (radiative and ESD) : Impact and satellite architecture**

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 cosites émises par le bord.

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

L'interaction des rayonnements se traduit par différents effets :

- Décharges électrostatiques (DES-ESD)
- Dose cumulée de rayonnement dans les composants électroniques (Gy/s).
- Evènements singuliers SEE Single Event Effects exprimés en taux d'évènement par unité de temps et par unité d'élément sensibles. 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 et d'équipotentialité de la plate-forme en ce qui concerne les ESD et des blindages électrons (omnidirectionnel) des équipements

#### **2 Nuclear Space Environment (radiative and electromagnetic) phenomenology**

L'émission de rayonnements issus d'une explosion nucléaire se composent pour l'essentiel de :

- Photons X \_ Rendement énergétique  $W_x/W \# 75\%$  de l'énergie totale  $W$  émise \_ Spectre de corps noir :  $h\nu \cdot dN/dh\nu = 15/\pi^4 \cdot x^3 / (\exp(x) - 1)$  ;  $x = h\nu / kT$  ;  $h\nu$  : énergie du photon ;  $kT$  : Température du spectre de Planck.
- Particules chargées (ions et électrons durs) de rendement  $W_i/W \# 25\%$  .

Les particules chargées contribuent au renforcement des ceintures de radiations et à la constitution de 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 dans l'espace atténués de la divergence sphérique ( $1/(4.\pi.r^2)$ ) et engendrent lors d'interactions par effet photoélectrique avec le satellite, des effets immédiats ou retardés :

- Effets radiatifs 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.

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

### 3 SGEMP environment

Les photons X ont un pouvoir de pénétration dans les matériaux caractérisé par un coefficient d'atténuation  $\mu \propto Z^3/hv^4$  ou Z est le numéro atomique et hv l'énergie du photon.

Ils mettent en mouvement des photocourants et par conséquent des champs électromagnétiques :

- à l'extérieur (SGEMP externe) du satellite,
- à l'intérieur du satellite (SGEMP Interne ou IEMP Internal Electromagnetic Pulse),
- à l'intérieur des équipements (BOX-IEMP),
- ainsi que des courants dans les câbles (J-SGEMP).

L'émission électronique consécutive à l'effet photoélectrique est caractérisée par une émission électronique de rendement  $Y_N = Y_F - Y_B$  qui se décomposent en la superposition d'un rendement d'électrons vers l'avant  $Y_F$  (F : forward) et d'un rendement rétrodiffusé  $Y_R$  (R : reverse).

Le courant total émis  $J_N$  est la superposition du courant des photoélectrons  $J_P$  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 :  $J_N = J_P + J_S$ .

Ce courant  $J_N$  est aussi lié à la flux  $d\phi/dt$  du faisceau de photons X :  $J_N = J_P + J_S = -e \cdot d\phi/dt \cdot Y_N$  ;  $e = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ .

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. En conséquence :

- Le SGEMP externe est d'autant plus intense que le spectre des photons X est mou : kT # 1 keV.
- Le SGEMP interne est d'autant plus intense que le spectre est dur : kT # 10 keV.
- Les pires cas de ces deux environnements sont antagonistes.

Quels que soient les modes d'émission (vers l'avant ou rétrodiffusé), l'émission électronique est d'autant plus importante que les revêtements sont de numéro atomique élevés ( $Y_{Or} \# 30 \cdot Y_{Aluminium}$ ), ce qui conduit à privilégier les revêtements constitués de matériaux légers.

Les champs E et H qui en résultent obéissent aux équations de Maxwell :

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

#### 3.1 External SGEMP with and without satellite charging

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 suit un profil dévolution en sinus amorti :  $E \propto E_0 \cdot \exp(-\pi.f.t/Q) \cdot \sin(2.\pi.f.t)$  avec f la fréquence de résonance principale du satellite et Q le coefficient d'amortissement.

Une composante SGEMP différé qui prend en compte les décharges engendrées sur la paroi persiste au-delà de la milliseconde.

Le champ magnétique  $B = B_{//}$  naît de la dissymétrie des rayonnements aux limites géométriques des matériaux, ou à l'interface entre deux matériaux différents.

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

Pour des satellites en orbite géostationnaire :

- Les champs électriques maximums peuvent facilement dépasser des intensités supérieures à 50 kV/m en des temps inférieurs à 10 ns.
- Ils restent limités par la charge d'espace pour des spectres mous ( $kT = 1 \text{ keV}$ ) et de ce fait sont peu dépendant de façon sous linéaire la fluence incidente.
- L'émission électronique peut être renforcée de façon notable au moment du flash (plusieurs ordres de grandeurs) en cas de matériaux préchargés d'électrons par l'environnement spatial naturel. La configuration « éclipse » est la plus pénalisante : le satellite, la Terre, l'explosion et le soleil sont alignés. L'impact du renforcement est moindre sur le champ électrique.
- Les champs sont répartis de façon dissymétrique (facteur de répartition 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 plate-forme, des bras d'antennes...
  - Du numéro atomique des revêtements : MLI, panneaux solaires, OSR...

Ces dissymétries ramènent à la jonction des panneaux solaire 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 importantes. Son calcul, particulièrement délicat, nécessite d'être approché à partir de codes appropriés car résultant de la différence d'effets du premier ordre.

Se superposent au courant de remplacement :

- Un courant de « Knock-On » dû à l'arrachage direct d'électron des câbles des panneaux solaire qui ramène des parasites impulsionnels.
- Un courant d'arrachage des cellules des panneaux solaires qui ramène surtout de l'énergie.

### 3.2 Internal SGEMP inside plat-form

A l'intérieur de la plate-forme ou d'un équipement de longueur  $l$  et de largeur  $2r$ , les valeurs maximales des champs sont régies par la loi de Poisson et le théorème d'Ampère.

$$E = \rho \cdot l / 2 \cdot \epsilon ; \quad H = r \cdot J_N / 2 ; \quad \rho = J_N / v ; \quad v : \text{vitesse des électrons.}$$

Les champs sont proportionnels à la fluence  $X$  et dépendent directement de l'atténuation du faisceau. Ils peuvent être limités à des valeurs acceptables à partir d'un blindage anti-X approprié.

### 3.3 SGEMP on cables

Les photons  $X$  pénètrent à l'intérieur des blindages des câbles. Ils libèrent par effets photoélectriques des charges des diélectriques contigus aux métaux et créent des courants images directement sur l'âme des câbles.

Les générateurs de tensions et courants des conducteurs internes ont deux origines :

- la pénétration par impédance de transfert  $Z_t$  :  $dV/dl = Z_t \cdot I_B$  le courant de surblindage,
- le SGEMP Direct  $J_D$  dans les câbles :  $dI/dl = J_D \cdot d\phi/dt$ .

Le générateur de courant dépend de la réponse intrinsèque du câble au flash  $X$  (type de câble, dimension des interstices entre diélectriques et conducteurs), mais aussi du flux de photon incident au câble qui peut être atténué à de valeurs par des blindages anti-X.

La pénétration par impédance de transfert est maîtrisée notamment par la qualification en impédance de transfert des technologies des liaisons retenues.

Le SGEMP sur câble est maîtrisé d'une part par la qualification de la réponse intrinsèque à partir de codes de calcul et de mesures sous machine  $X$  (moyen MBS de la DGA/DCE/CEG).

### 3.4 SGEMP inside equipments and boxes

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

Les champs et transfert de charge ont un impact direct sur les circuits électroniques.

La protection ne peut se faire en jouant sur les interfaces comme le filtrage, mais par la maîtrise des émissions électroniques et du flux de photons.

Deux effets important conditionnent le BOX-IEMP :

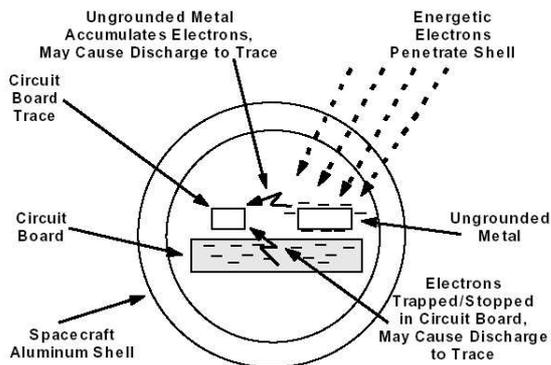
- Le transfert de charge entre les revêtements des parois du boîtier et des circuits.
- La polarisation des pistes des circuits.

Il peut se rajouter d'autres phénomènes dus à la pressurisation du boîtier.

Là encore, le BOX-IEMP est maîtrisé par la qualification des technologies (codes de calcul et essais sous machine MBS), mais aussi par le contrôle du flux pénétrant dans le boîtier, qui peut être considérablement atténué par un blindage anti-X approprié.

### 4 ECEMP environment and impact

Par ECEMP Electron Caused Electromagnetic Pulse on désigne les mécanismes de décharges électrostatiques internes aux équipements.



Ce phénomène est possible si les électrons de l'environnement spatial rentrent en flux suffisant dans les équipements pour ensuite s'implanter dans les diélectriques des cartes électroniques. Le niveau de charge électrostatique croît 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 donc au voisinage immédiat de composants internes pas nécessairement protégés au même niveau que les interfaces d'entrées /sorties des équipements.

La figure ci dessous schématise le mécanisme et le spectre des électrons de l'ECEMP.

Mécanisme et le spectre des électrons de l'ECEMP.

Pour l'environnement spatial naturel, il existe des spécifications d'environnement en électrons de haute énergie à prendre en compte pour se prémunir de ces effets.

La NASA définit un environnement "pire cas" pour l'orbite géostationnaire (doc NASA-HDBK-4002 :

Dans le cas de l'environnement militaire, l'effet retardé 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 Hardening : Synergy of natural and nuclear effects**

### **5.1 Introduction**

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

- Analyser le besoin de durcissement au regard des spécifications de maintien de performances imposées pendant et après agressions nucléaires.
- Rechercher des solutions de durcissement faisables techniquement, optimisées en fiabilité, coûts, contraintes d'allocation de masse et contraintes programmes.
- Justifier par analyses et tests que les solutions retenues satisfont aux exigences de client.

Le maintien des performances du satellite après agressions nucléaires se décline en spécifications de durée de maintien à performance nominale du satellite après agression, qui peut être modulée en fonction des dates de l'agression et celle de la mise en orbite du satellite.

### **5.2 Non destruction and non disruption**

Le durcissement nucléaire ne tolère aucune destruction d'équipements, des perturbations sont admises à condition que le système recouvre ses performances après la période d'indisponibilité du au phénomène de scintillation qui affecte les liaisons radio. Les dégradations sur la durée de vie par effet cumulatif doivent prendre en compte la dose de rayonnement des composants, déjà absorbée et liée à l'environnement spatial naturel.

La non destruction se traduit par une reconduction des procédés employés dans le cadre de l'environnement naturel : blindage, équipotentialité, choix de composant, blindage électron... Cependant, ces procédés doivent être caractérisées pour justifier la marge demandée pour le durcissement spatial militaire.

La méthode de gestion de la perturbation, qui consiste à empêcher les perturbations sur une partie minimale et vitale du satellite :

- S'applique au cas d'une solution re-use de plate-forme qui minimise les travaux de développement et les coûts.
- Est par ailleurs, plus simple à mettre en œuvre et surtout plus simple à justifier.

La chaîne fonctionnelle minimale des fonctions à préserver pendant l'agression comporte notamment : le contrôle thermique, le contrôle d'attitude et d'orbite, l'alimentation électrique des équipements, l'état de charge de la batterie, la liaison avec le sol...

Elle est maintenue dans un état sauvegarde par le calculateur de la plate-forme, qui reconfigure le satellite à partir d'un programme de gestion des défaillances FDIR (Failure Detection and Isolation and Recovery). En cas de panne, le logiciel reconfigure le satellite selon différents niveaux de priorité.

Les travaux de durcissement nucléaire à mener doivent montrer la reconfiguration de la FDIR aux perturbations multiples et généralisées au satellite consécutives à l'impact du flash nucléaire.

La stratégie de reconfiguration d'un satellite est organisée en niveaux de priorités et sur chacun des niveaux sont implantés des mécanismes de filtrage et de validation des alarmes. Par ailleurs, sur un satellite géostationnaire, la contrainte de délai de réaction pour agir contre une panne n'est pas contraignante en temps. De telle sorte que la faisabilité d'une stratégie de reconfiguration fondée sur la FDIR, est envisageable au niveau système.

Avec cette méthode, le besoin de durcissement peut se décliner en une liste assez réduite d'équipements ou de fonctions ne devant pas être perturbées.

## 5.3 Hardening solutions

### 5.3.1 Hardening protection architecture

Les effets engendrés par l'explosion nucléaire sont nombreux. Il est important d'en dresser une hiérarchie de façon à ne s'occuper que des contraintes majeures en raison des synergies et des recouvrements ;

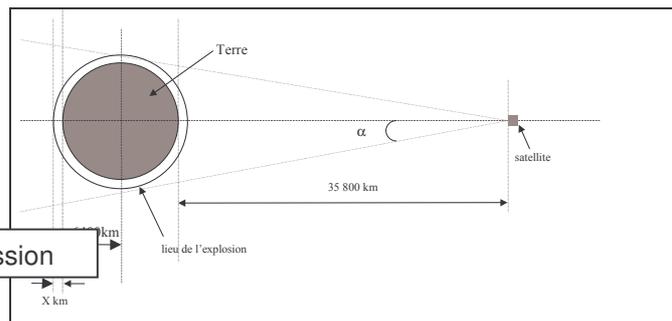
L'établissement de cette hiérarchie dépend des paramètres de l'agression : puissance d'arme, distance de l'explosion par rapport au satellite, les caractéristiques temporelles de l'agression, les spectres énergétiques des photons X et autres particules émises par l'arme.

Les effets TREE et SGEMP sont considérés comme prépondérants pour définir l'architecture de la solution.

En effet, le TREE et le SGEMP n'ont pas d'équivalent dans l'environnement naturel et nécessitent des principes de protection spécifiques. Et par ailleurs, les effets de dose cumulée et ECEMP peuvent être considéré dans un premier temps comme une prolongation des effets de dose due à l'environnement nature et des effets ESD.

Deux solutions de protection sont souvent mises en avant pour se prémunir des effet TREE :

- Une solution « active » : la circonvolution qui est fondée sur l'arrêt, suivi de la remise en marche des équipements pour se prémunir du latch-up au moment du flash. Cette solution demande la mise en place d'un système de détection, d'un circuit d'alarme nucléaire et d'un système de gestion et surtout de dispositifs de coupure d'alimentation à mettre en place sur les cartes électronique.
- Une solution dite « Passive » fondée sur un bouclier « anti-X » monodirectionnel (voir figure) conçu à partir de matériaux à numéro atomique élevé pour réduire le flux de photons transmis en deçà d'un seuil pour limiter ou supprimer des effets induits à l'intérieur du satellite : débit de dose, do



La solution du bouclier « 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 doit être complétée d'un système de gestion de la perturbation généralisée : FDIR.
- Elle conduit à un surcroît de masse et nécessite la maîtrise du dépointage.
- Le bouclier « anti-X » peut par contre être optimisé par des compléments de blindage locaux. On peut de cette manière et pour certaines applications particulières, maîtriser la perturbation.

La circonvolution minimise l'augmentation de la masse du satellite. Cependant, elle est inadaptée à un programme qui s'appuie sur le réemploi de l'existant (plate-forme et équipements), car elle impose la mise en place de circuit de coupure sur les circuits, c'est à dire une nouvelle qualification des équipements du satellite dans la configuration actuelle du domaine spatial).

Des solutions hybrides son envisageables.

### 5.3.2 SGEMP hardening feature

Le blindage TREE au niveau des structures du satellite apporte une atténuation du flux de photons X rentrant dans le satellite. Il a donc pour effet de réduire l'environnement électromagnétique SGEMP dans le satellite et les effets BOX\_IEMP dans les équipements.

Les contraintes du SGEMP externe se traduisent par des champs électromagnétiques et courant élevés.

Des protections spécifiques à cette contrainte reposent sur :

- Une faradisation suffisante et maîtrisée pour limiter la pénétration des champs externe à l'intérieur du satellite,
- La qualification en Zt et Js des liaisons blindées. Notamment les liaisons électriques cheminant à l'extérieur du satellite et celles connectées aux équipements dont on interdit la perturbation.
- Mise en place de protections locales comme des filtres. Cette solution est retenue en dernier ressort en raison de la perte de fiabilité qu'elle apporte.

Les protections spécifiques pour les effets SGEMP viennent en complément de protections déjà existantes contre les ESD engendrées par l'environnement spatial naturel.

On bénéficie d'un recouvrement des contraintes ramenées par le SGEMP par celles ramenées par les ESD.

Cependant, le durcissement spatial militaire, impose d'aller au delà des règles et de caractériser et de justifier les barrières de protection pour la maîtrise de la marge.

Les équipements et fonctions soumis aux contraintes SGEMP les plus élevés sont les senseurs externes au satellite (viseur d'étoiles, senseur terre) et l'équipement du satellite assurant le conditionnement de l'énergie électrique en provenance des panneaux solaires.

Pour des raisons évidentes de fonctionnalité, il n'est pas envisageable d'obturer par un blindage électromagnétique les ouvertures pratiquées dans les boîtiers métalliques des senseurs pour assurer le champ de vue des détecteurs.

Cependant, ces équipements présentent en général une robustesse élevée, car conçus pour résister aux contraintes sévères et directes de l'environnement spatial naturel (dose, ions lourds, ESD) et celles des tests EMC de susceptibilité en champs RF, plus sévères que celles imposées aux équipements internes au satellite.

Les principes conception de ces équipements (fonctions sensibles fortement cloisonnées) conduisent à ne pas entrevoir de difficultés majeures de durcissement.

Des analyses doivent être menées au cas par cas, particulièrement dans le cas de composants front-end.

En ce qui concerne le Générateur Solaire, la contrainte ramenée par le SGEMP des panneaux solaires est véhiculée sous forme de transitoire électrique dans le satellite via les liaisons "puissance électrique" entre générateurs solaires et équipement de conditionnement.

Les interfaces électriques sont d'une part fortement sollicitées, mais ce sont aussi interfaces de « forte puissance » donc aussi extrêmement robustes et conçues pour être insensibles aux stress électriques de type ESD sur les panneaux solaires et transitoires électriques de commutation induits par le fonctionnement même de ces interfaces.

Ces interfaces ne présentent donc pas un niveau de criticité potentiellement élevé et l'implantation d'éléments de filtrage/écrêtage peut altérer la performance et la fiabilité de la chaîne fonctionnelle d'alimentation.

La justification de la non perturbation du GS passe :

- Par des essais de perturbation des accès
- Un calcul le plus exact possible des courants ramenés par les panneaux solaire (courant de remplacement, courant de Knock-On et courant de d'arrachage des cellules).

Ces interfaces ne présentent donc pas un niveau de criticité potentiellement élevé. Il n'y a pas obligatoirement nécessité d'implanter des éléments ( filtrage/écrêtage) dont la principale difficulté est d'associer l'efficacité de protection sans altérer la performance de la chaîne fonctionnelle d'alimentation du satellite tout en respectant les règles imposées pour ne pas dégrader la fiabilité requise.

### 5.3.3 ECEMP feature

Les effets de dose cumulée et ECEMP existent naturellement dans le cadre de l'environnement naturel.

La protection, repose sur une adaptation de l'existant qui doit tenir compte :

- D'essais de qualification pour les débits et spectres du spatial militaire.
- Caractériser expérimentale des règles et usages pour se prémunir des décharges.

## **6 About space system qualification**

### **6.1 Synergy of modelling and testing**

La qualification repose sur dossier qui s'appuie sur des simulations et des essais partiels. La difficulté reposant sur l'impossibilité de tests réels.

Le calcul de l'environnement X externe et interne au satellite nécessite des codes de transport et de filtrage de photons (analytique, Monte-Carlo). Des codes existent sur le marché.

Les rendements en électrons de matériaux ont été calculés de différentes méthodes : méthodes analytiques, Monte Carlo. Des tabulations et codes existent sur le marché. Cependant, aucun ne restitue correctement le spectre émis. Leur emploi comme terme source de codes de calculs de champ rend les résultats de ces derniers incertains. La DGA a travaillé dans ce domaine pour combler les manques.

Les différentes contraintes du SGEMP externe, internes, sur les câbles peuvent être estimées à partir de banques de données ou de formalismes que l'on trouve dans la littérature à condition de les corriger des effets de spectre mentionnés plus haut. Ou bien à partir de logiciels spécifiques qui résolvent simultanément les équations de Maxwell (différences finies), le transport des charges (méthodes PIC Particle In Cell, modèles de fluides).

Des corrélations avec l'expérience peuvent être réalisées à partir de machine X comme le moyen MBS de la DGA/DCE/CEG.

Ces logiciels fournissent les termes source pour la modélisation du transport des parasites sur les faisceaux de câbles fait appel aux logiciels et codes plus classiques fondés sur les lignes de transmission alimentées de termes sources issus des codes énoncés ci-dessus.

Des codes de couplages 3D classique de type différences finies (GORF) peuvent être largement utilisés dans des cas de faible charge d'espace et pour apprécier les performances de blindage, et à condition que les opérations de post traitement prévoient l'adaptation à la fonction d'onde du SGEMP.

L'évaluation représentative des contraintes induites sur le satellite nécessite de prendre en considération l'ensemble du satellite :

- Effets TREE, dose cumulée, ECEMP : pour tenir compte des épaisseurs de blindage effectives de chaque équipement dépendant de la position de l'équipement dans le satellite
- Effets SGEMP : pour tenir compte des effets différentiels d'émissions électroniques sur les différentes parties du satellite, des effets de résonance et de renforcements locaux des champs électromagnétiques externes et de l'influence relative des voies de pénétration de champs SGEMP dans le satellite.

Les simulations numériques sont incontournables à ce niveau car elles permettent d'analyser des configurations impossibles à reproduire expérimentalement et donnent la possibilité d'études paramétriques visant à caractériser les contraintes sans sur dimensionnement excessif.

Sur la base des résultats de simulations, il est alors possible d'identifier les essais nécessaires et suffisants à réaliser aux niveaux de fonctions ou d'équipements.

On peut par exemple au travers de simulations du couplage SGEMP définir la complémentarité par rapport aux essais de qualification ESD.

Les tests seront généralement mis en œuvre pour :

- Valider la non perturbation fonctionnelle d'un équipement par les contraintes transitoires induites par le SGEMP ou le TREE.
- Caractériser la tenue d'un composant et sa réponse électrique transitoire (cellules solaires sous flash X).

La synergie simulation/essai est également utilisée pour ne pas faire de test sur du matériel de vol où les limiter à quelques mesures (étanchéité électromagnétique locale de la structure du satellite).

## 6.2 Difference between nuclear hardening methodology and natural space methodology

Le durcissement contre l'environnement spatial naturel repose sur des analyses pires cas, des essais partiels 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.

Le durcissement spatial contre l'environnement nucléaire 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, charge électrostatique).

Pour les effets SGEMP, les outils spécifiques au durcissement nucléaire traitent principalement de l'interaction des photons X avec la matière. Les sorties de ces outils sont des champs électromagnétiques et des courants électriques induits par le flash X. Ils sont ensuite traités avec les outils standards utilisés pour la CEM et les effets des ESD sur les électroniques.

L'avantage de la méthode du spatial naturel résulte dans la confiance et la fiabilité des solutions proposées en raison du retour d'expérience. Cependant, la marge est acquise mais n'est pas vraiment gérée. Les difficultés surviennent quant il s'agit d'adapter la protection à une configuration d'environnement ou d'emploi différent.

Dans le cas du militaire, la marge est gérée à tous les niveaux, ce qui permet de répartir l'effort de façon plus judicieuse, d'éviter un durcissement local et de permettre le réemploi de la solution pour d'autre configuration d'environnement. Elle impose un effort initial de caractérisation des technologies à amortir de programme en programme.

La méthodologie du durcissement nucléaire impose de démontrer des marges de sécurité globalement supérieures à celles appliquées dans le domaine de la CEM. Ces marges sont déclinées sur chaque niveau d'interaction avec le satellite, pour les aspects SGEMP :

- interaction des photons X avec le satellite ;
- couplage des champs électromagnétiques avec les structures et le câblage satellite ;
- seuils de susceptibilité et de vulnérabilité des composants.

La caractérisation de chaque mécanisme d'interaction doit être aussi précise possible pour ne pas empiler par défaut de précision des marges de sécurité trop lourdes aboutissant à des solutions de durcissement trop contraignantes et pouvant avoir un impact négatif sur la fiabilité fonctionnelle requise pour le satellite.