

AFSCET

Res-Systemica

Revue Française de Systémique

Fondée par Evelyne Andreewsky

Volume 20, printemps 2020

Modélisation systémique
de systèmes cyber-physiques

Res-Systemica, volume 20, article 03

Facteur humain et systèmes cyberphysiques

Contribution du facteur humain aux accidents d'aéronefs
et d'astronefs dus aux ambiances électromagnétiques

Patrick Farfal

14 pages

contribution reçue le 14 mars 2020



Creative Commons

MODÉLISATION SYSTÉMIQUE DE SYSTÈMES CYBER-PHYSIQUES

FACTEUR HUMAIN & SYSTÈMES CYBER-PHYSIQUES

CONTRIBUTION DU FACTEUR HUMAIN AUX ACCIDENTS D'AÉRONEFS ET ASTRONEFS DUS AUX AMBIANCES ELECTROMAGNÉTIQUES

A PREPRINT

Patrick FARFAL

PatSys

25 rue Jean Leclaire

75017 Paris, France

`pfarfal.pat.sys@sfr.fr`

November 1, 2019

1 Résumé

Sur la base de l'analyse d'accidents d'aéronefs et d'astronefs en environnement électromagnétique sévère, l'article se propose de montrer la difficulté d'appréciation du risque électromagnétique dans la conception, la réalisation et surtout la mise en œuvre de ces systèmes artificiels, et de proposer des remèdes aux freins constatés dans l'acceptation des effets des ambiances électromagnétiques et des protections à mettre en œuvre. Cette difficulté d'appréciation est à ranger au nombre des facteurs humains contribuant aux accidents.

Après une présentation de la diversité des environnements électromagnétiques auxquels peuvent être exposés les systèmes (rayonnements radio-radar, champs électromagnétiques engendrés par la foudre, triboélectricité, ambiances électromagnétiques internes aux systèmes créées par leur fonctionnement même. . .) sont d'abord dégagés les phénomènes physiques (interférences inter-systèmes et intra-système) mis en jeu en matière de couplage entre ondes électromagnétiques et systèmes, puis les méthodes de protection, telles que blindages, filtres et limiteurs de surtension, mises à la masse, « durcissement » actif.

Les éléments décisionnels tels que compromis coût-efficacité sont abordés, notamment le compromis masse – efficacité des blindages.

La complexité des aéronefs et astronefs en tant que systèmes cyber-physiques (à titre d'exemple, entre autres, le fait que le système électrique et électronique de bord d'un avion d'aujourd'hui comporte plus de 100 calculateurs) les rend d'autant plus vulnérables aux environnements électromagnétiques.

Divers incidents ou accidents ont été relatés de façon circonstanciée, dans les domaines aéronautique et astronautique, il y a plusieurs années : citons les accidents d'hélicoptères Sikorsky UH-60 BlackHawk (1981-1987), les perturbations d'Apollo 12 (1969) en raison d'un foudroiement en vol, l'échec du lanceur Atlas Centaur 67, toujours par foudroiement (1987), la frappe du HMS Sheffield par un missile profitant d'une fenêtre d'opportunité due à des interférences électromagnétiques (1982), l'incendie du porte-avions américain Forrestal (1967) ; le risque de tels incidents, au reste de plus en plus faible, demeure cependant.

L'analyse des incidents et accidents permet de dégager la contribution du facteur humain à ces événements, à savoir les attitudes à l'origine des décisions ayant conduit aux phénomènes observés, et aussi les raisons pour lesquelles le retour d'expérience n'est pas toujours exploité : méconnaissance, négligence, défiance, préjugés, répulsion passive, déni.

Enfin, des éléments de solution sont proposés, permettant à chacun des acteurs, responsables de compatibilité électromagnétique, mécaniciens, aménageurs, managers, d'exercer ses responsabilités en connaissance de cause

Keywords Accidents · Aéronefs · Astronefs · Cyber-physique · Electromagnétisme · Facteur humain · Risque · Cloisonnement · Pédagogie

2 Introduction

L'environnement électromagnétique, d'origine naturelle ou artificielle, est parfois source de dysfonctionnements, d'accidents, ou simplement de gêne pour les systèmes artificiels et aussi pour l'homme : des accidents d'hélicoptères à proximité d'émetteurs radio, des lanceurs spatiaux perturbés voire détruits par les perturbations électromagnétiques engendrées par la foudre, ont été largement décrits dans la littérature, sans parler des effets électromagnétiques sur les véhicules automobiles ni de la question délicate de l'électro-sensibilité ; on se limitera ici à des accidents dont des aéronefs et véhicules spatiaux ont été les victimes.

La relative rareté des accidents et la méconnaissance des ambiances électromagnétiques et de leurs effets rendent souvent difficile l'appréciation du risque par les décideurs : les « ondes » ne sont pas toujours clairement acceptées comme sources de risques (« ElectroMagnetic Interference leaves no fingerprints »). A l'inverse, cette méconnaissance est source de crainte, souvent justifiée, parfois irraisonnée, et pas seulement dans le grand public.

La complexité des électroniques de bord, qui fait des aéronefs et astronefs des systèmes cyber-physiques, la complexité des mécanismes de couplage entre les ambiances électromagnétiques et les « victimes », ainsi que la diversité des effets induits renforcent ces difficultés ; plusieurs niveaux de couplage peuvent être identifiés : couplage de l'environnement avec le système, couplage externe-interne par pénétration des champs dans le système, couplage entre l'ambiance interne et les équipements et les câbles. . . Cette complexité et cette diversité pèsent même sur les analyses a posteriori au point qu'il est parfois hasardeux d'emporter la conviction que les incidents sont bien d'origine électromagnétique. Et dans certains cas, le retour d'expérience n'est pas exploité pour l'appréciation ultérieure des risques.

Le cloisonnement résiduel des disciplines, qui demeure malgré la diffusion des principes de l'ingénierie système, et la complexification sans cesse croissante des systèmes, font de la difficulté d'appréciation du risque électromagnétique une question toujours actuelle : on touche là à la contribution du facteur humain aux accidents.

3 Position du problème

3.1 Mise en œuvre d'un aéronef ou d'un astronef

La mise en œuvre d'un aéronef ou d'un astronef, qu'il soit civil ou militaire, doit prendre en compte diverses caractéristiques et contraintes :

- La complexité des systèmes embarqués électriques, électroniques et pour certains pyrotechniques : en ce sens les aéronefs et astronefs comportent des systèmes cyber-physiques
- -La complexité des environnements, souvent sévères : parmi ceux-ci, les environnements électromagnétiques, très divers (ambiances radio-radar, foudre. . .) peuvent engendrer des effets destructifs ou au moins perturber le fonctionnement des systèmes cyber-physiques embarqués.

La complexité même des systèmes embarqués les rend d'autant plus vulnérables aux ambiances électromagnétiques.

De ce fait, la mise en œuvre des aéronefs et astronefs implique le respect d'un certain nombre de processus décisionnels, en particulier le respect de procédures : c'est l'essence même du fonctionnement des systèmes d'armes, des systèmes de commandement (aéronefs, missiles), des systèmes de conduite de tir (lanceurs spatiaux, missiles) : en ce sens, l'homme est une partie du système *au sens large*.

Dans la mise en œuvre de ces systèmes, mais aussi dans leur conception et leur réalisation, on constate, au travers d'incidents et d'accidents, la difficulté d'appréciation du risque électromagnétique. L'analyse de ces incidents et accidents permet de mettre en évidence la contribution du facteur humain à ces événements, à savoir les attitudes qui sont à l'origine des décisions ayant conduit aux phénomènes observés, attitudes qui peuvent perdurer malgré l'expérience.

3.2 Complexité des systèmes embarqués

A titre d'exemple, un système cyber-physique embarqué, comme le système électrique et électronique de bord d'un avion d'aujourd'hui, comporte plus de 100 calculateurs.

Plus généralement, on trouve à bord d'un aéronef ou d'un astronef un nombre élevé d'équipements électriques et électroniques complexes de navigation, pilotage, communications... , et, pour les astronefs (lanceurs ou missiles) un grand nombre d'équipements pyrotechniques – commandés par les équipements électriques et électroniques - pour l'exécution des événements discrets du vol : allumages et séparations d'étages, largage des charges utiles (satellites, sondes), passivation (sécurisation des étages avant leur séparation) ...

Précisons avec quelques chiffres :

- Airbus A380
 - Nombre élevé de calculateurs (ce nombre est en augmentation : 77 sur A310, 115 sur A340)
 - Plus de 500 km de câbles électriques
 - Plus de 40 000 connecteurs
 - 12 à 20 cuisines
 - 400 canaux TV dans l'In-Flight Entertainment System
- Ariane 5 « Générique » (l'Ariane de première génération, premier vol commercial en 1998) :
 - 40 équipements électriques ou électroniques, dont 14 calculateurs
 - Plusieurs dizaines de kilomètres de câbles
 - Plus de 400 connecteurs
 - 13 000 connexions
 - Plus de 80 fonctions pyrotechniques.

Tous ces systèmes cyber-physiques sont sensibles aux ambiances électromagnétiques.

4 Le couplage des environnements électromagnétiques avec les systèmes

4.1 Les environnements électromagnétiques et leurs effets sur les Systèmes [1]

Prenons à titre d'exemple l'environnement électromagnétique d'un lanceur spatial. Comme on le voit sur la figure 1, un lanceur type Ariane 5 est soumis :

- au sol, sur son pas de tir, aux effets électromagnétiques de la foudre (soit interceptée par les parafoudres – dans le cas d'une foudre intense -, soit tombant directement sur le lanceur – dans le cas d'un coup de foudre faible -), à l'ambiance électromagnétique engendrée par les radars du centre de lancement, aux effets électromagnétiques des systèmes avec lesquels il est en relation ; on lutte contre les effets de ces ambiances par les techniques de compatibilité électromagnétique inter-systèmes (l'environnement étant considéré comme un système)
- en vol, durant les premières minutes, à l'ambiance radar du centre de lancement, et, durant tout le vol atmosphérique, du fait du frottement de l'atmosphère (effet triboélectrique), à des charges et décharges électrostatiques, et enfin, pendant toute la durée de la mission, aux champs électromagnétiques engendrés par le fonctionnement même de ses équipements électriques et électroniques, contre lesquels on lutte par les techniques de compatibilité électromagnétique intra-système.

Ajoutons, pour mémoire, les effets électromagnétiques engendrés par une explosion nucléaire, auxquels sont soumis les missiles stratégiques.

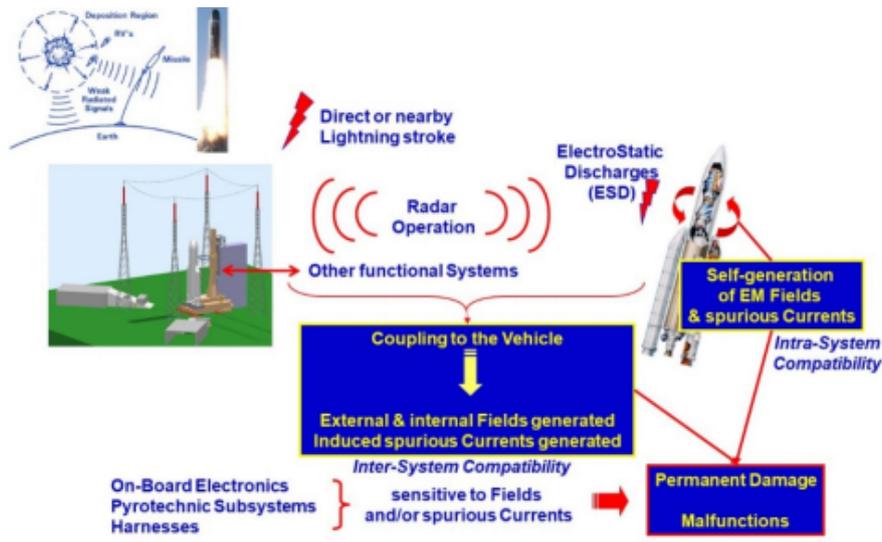


Fig. 1 : Environnements électromagnétiques et leurs effets

4.2 Le Système et son Environnement électromagnétique

Comme le montre la figure 2, plusieurs niveaux de couplage peuvent être identifiés : couplage de l'environnement avec le système (1) - circulation de courants de peau sur la structure -, couplage externe-interne par pénétration des champs (2) – via les courants de peau - dans le système (essentiellement par les défauts de la structure enveloppante : joints, trappes de visite...), couplage entre l'ambiance interne et les équipements et les câbles (3)...

Il en résulte *in fine* des champs parasites à l'intérieur des équipements, des tensions et courants parasites véhiculés par les câbles vers les entrées-sorties d'équipements (4), aux effets dominants par rapport aux champs parasites internes aux équipements tant que le spectre de fréquences des champs ne s'étend pas aux micro-ondes.

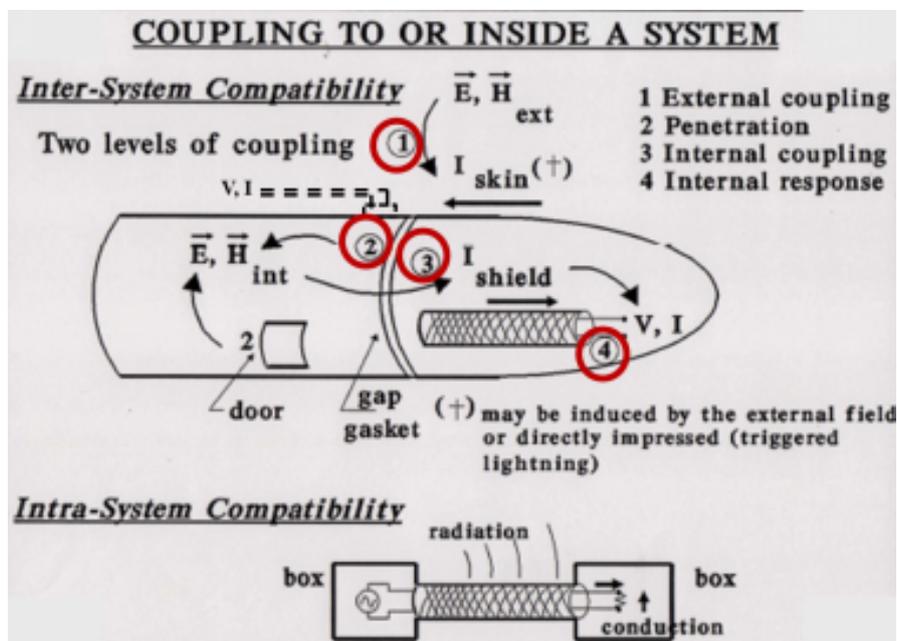


Fig. 2 : Couplages électromagnétiques sur et à l'intérieur un système

Les tensions parasites apparaissant alors aux entrées-sorties des équipements électriques et électroniques sont alors rapidement du même ordre de grandeur que les signaux utiles échangés par les équipements, et souvent bien supérieurs.

Il peut en résulter la destruction de composants électroniques, mais plus souvent seulement la perturbation des circuits, laquelle peut induire un comportement catastrophique du véhicule (dans certaines phases de vol, les lanceurs sont très instables aérodynamiquement et une perturbation du déroulé du programme de vol résultant en une absence de pilotage pendant 100 millisecondes entraîne la perte du véhicule, même si aucun composant n'a été détruit).

Parallèlement, la sensibilité des composants pyrotechniques à l'énergie électromagnétique reçue peut provoquer leur fonctionnement intempestif, nominal ou non.

4.3 Mécanismes d'interférence

On peut consulter [10], [11] pour une initiation aux questions d'interférences et de compatibilité électromagnétique. Considérons (Figures 3 et 4) la liaison entre un équipement 1 et un équipement 2 :

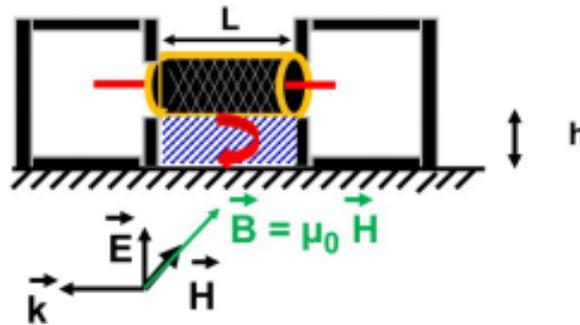


Fig. 3 : Configuration d'étude typique

le premier envoyant un signal V_S , reçu par le second (signal V , peu différent du signal V_S) ; cette liaison est par exemple un coaxial qui chemine à proximité d'un plan de masse G (la structure métallique du véhicule) ; le conducteur extérieur (blindage) de ce coaxial est relié à la masse à l'une de ses extrémités. Soumis à un champ électromagnétique convenablement orienté (ici est représenté le cas pire), l'ensemble est affecté, comme indiqué sur le schéma équivalent de droite, d'une force électromotrice parasite (f.é.m.) V_G (source fictive équivalente), qui détermine la circulation d'un courant dans la petite boucle et la grande boucle.

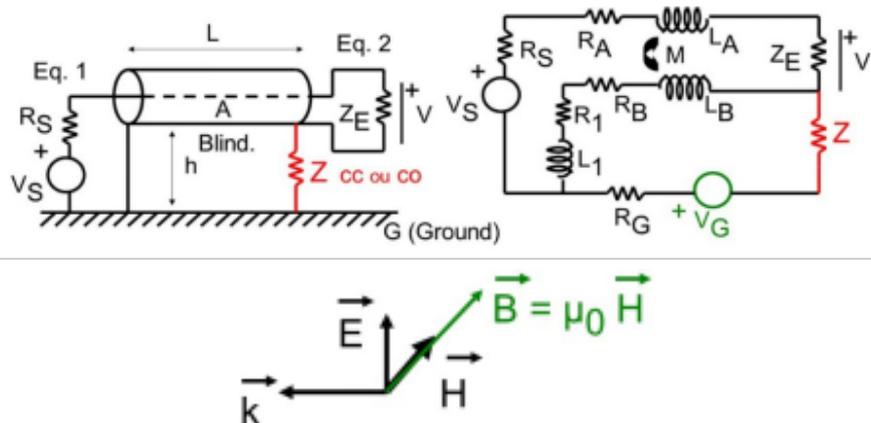


Fig. 4 : Modélisation de l'effet des champs électromagnétiques sur les câbles

La question se pose de savoir quoi faire à l'autre extrémité du conducteur extérieur du coaxial : quelle impédance Z ? Pour ce faire, il n'est pas inutile de donner quelques ordres de grandeur ; il est facile de se rappeler que, pour les valeurs suivantes du champ électrique E , de la longueur L de la liaison, de sa hauteur h par rapport à la masse, de la fréquence f du champ :

E V/m	L m	h cm	f MHz
10	10	10	10

Fig. 5 : Valeurs typiques rencontrées sur les systèmes

la valeur de V_G est d'environ 2 V. Notons que 10 V/m et 10 MHz sont des valeurs assez faibles de champ et de fréquence respectivement ; notons aussi que la force électromotrice V_G est proportionnelle à E, L, h, f. V_G apparaît ainsi du même ordre de grandeur que V_S ! Et il suffit de multiplier E, ou f, par 10 pour atteindre 20 V ; pour lutter contre cet effet, l'impédance Z doit être la plus faible possible (idéalement 0 ohm, mais il reste toujours une résistance et une inductance irréductibles) afin que, le courant passant préférentiellement dans la boucle la moins « impédante », le courant parasite circulant dans la grande boucle soit très réduit, développant alors une tension parasite très faible aux bornes de Z. Suivant la qualité des reprises de masses, la tension parasite aux entrées-sorties des équipements varie de 0 (théoriquement) à la valeur de la f.é.m. induite (2 V dans notre exemple).

Il n'est pas rare de trouver des courants circulant dans la petite boucle de plusieurs dizaines d'ampères, ce qui conduit à considérer la situation suivante :

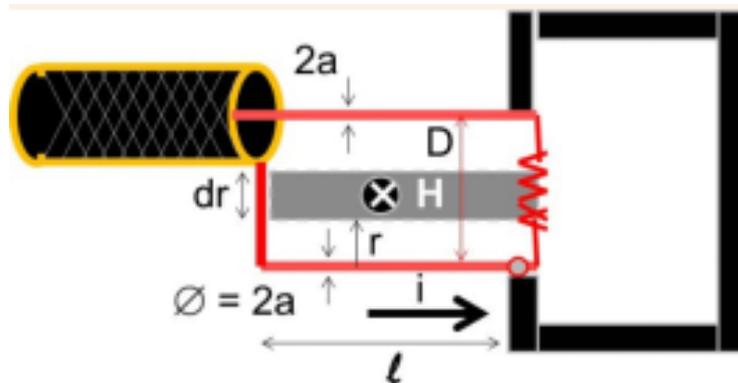


Fig. 6 : Effet de l'interruption d'un blindage

Considérons le cas où le conducteur extérieur du coaxial s'interrompt à quelques centimètres du boîtier de l'équipement, laissant à nu le conducteur intérieur ; un calcul simple permet d'évaluer la f.é.m. parasite induite dans la boucle constituée du conducteur extérieur nu et de la reprise de masse : pour une longueur dénudée de 5 cm, une distance D de 1 cm, un rayon a des conducteurs de 1 mm et une fréquence de 10 MHz, la f.é.m. rapportée à l'intensité i du courant circulant dans la petite boucle, au sens de la figure 4, est de 1,5 V/A ; soit si $i = 50$ A, une f.é.m. de 75 V !

Cela renforce la nécessité d'une liaison (reprise de masse) la moins « impédante » possible, donc la plus courte possible.

La figure suivante présente les différentes solutions de reprise de blindage, des meilleures (le connecteur « durci » - cher -, assurant la continuité de l'étanchéité électromagnétique entre le blindage et la structure de l'équipement, ou la « queue de cochon » (*pigtail*) externe courte) aux plus mauvaises (queues de cochon longues et/ou rentrant à l'intérieur de l'équipement, et qui font « rentrer le loup – voire la meute – dans la bergerie »).

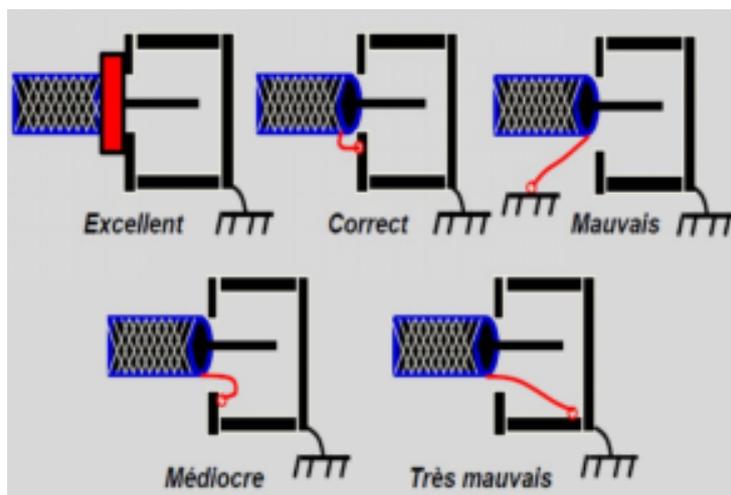


Fig. 7 : Divers types de raccordement de blindages aux boîtiers d'équipements

En détournant un ancien message publicitaire célèbre, on peut dire de la queue de cochon externe courte (le type de raccordement jugé correct) que « c'est facile, c'est pas cher, et ça peut éviter de perdre gros ».

4.4 Autres ordres de grandeur

Les puissances des radars de surveillance du contrôle aérien atteignent jusqu'à plusieurs MW en régime impulsif. Ces puissances, ainsi que les puissances d'émetteurs radio, sont sources de risques pour les systèmes pyrotechniques comme pour les équipements électroniques.

Les normes DRAM (Dommages dus aux Rayonnements électromagnétiques sur les Armes et les Munitions) définissent des niveaux de sévérité pour le champ électrique moyen de quelques dizaines à quelques centaines de V/m entre 2 MHz et 40 GHz, et jusqu'à une vingtaine de fois plus en valeur crête.

Une électronique nue commence à être perturbée par un champ électrique de 10 V/m (soit quelques centaines de mW par m²) à haute fréquence, c'est-à-dire de quelques MHz plusieurs centaines de MHz : c'est l'effet du couplage par pénétration des champs à travers les structures, couplage auquel il a été fait allusion au § 3.2 ; tant que l'on n'atteint pas les fréquences dites « micro-ondes » ou « hyperfréquences », à partir de 1 000 MHz, cet effet est assez faible par rapport à celui des parasites de conduction véhiculés par les câbles ; il justifie néanmoins que l'on se préoccupe de la qualité des blindages d'équipements (boîtiers).

La foudre au sol peut atteindre (dans 2% des cas) 200 kA, déterminant un champ électrique de plusieurs centaines de kV/m. La foudre déclenchée en vol (voir § 5.2 et 5.3) atteint couramment une intensité de 10 kA, courant qui circule sur la peau du véhicule ; tout défaut de structure entraînera la circulation de courants se chiffrant en kA à l'intérieur de la structure. Les courants de foudre, outre leurs effets électromagnétiques, engendrent des effets thermiques et mécaniques, dangereux pour les structures des véhicules (qu'elles soient métalliques ou composites) et pour les systèmes pyrotechniques.

4.5 Protections

- Structure du véhicule : comme indiqué ci-dessus, le blindage qu'elle constitue est loin d'être parfait : de très bonne cage de Faraday à très basse fréquence¹ elle est de plus en plus perméable aux ondes à mesure que la fréquence s'élève ; de plus, dans le cas d'un lanceur ou d'un missile, leur configuration évolutive (largage d'étages) rend illusoire l'idée de structure protectrice électromagnétiquement.
- Structure des équipements : sans aller jusqu'à une « cocotte-minute » électromagnétique – au sens de l'étanchéité –, on doit soigner les plans de joints :

¹Rappelons que l'emploi du terme « cage de Faraday » pour les hautes fréquences est impropre, la cage de Faraday s'entend en électrostatique ; en haute fréquence, on parle en instrumentation de cabines blindées, et plus généralement d'enceintes blindées, en anglais *shielded enclosures*.



Fig. 8 : Importance des plans de joints

- Blindages et surblindages des câbles, filtres ou supprimeurs aux entrées-sorties des équipements : on l'aura compris, le « durcissement » électromagnétique d'un système passe par la mise en place de blindages et surblindages de câbles (qui participent, avec les blindages d'équipements, à l'effet « cage de Faraday »), de reprises de masse convenables, éventuellement de filtres ou de supprimeurs de parasites aux entrées-sorties des équipements (si l'on estime que les précautions prises sur les câbles sont insuffisantes : figure 9).

Le durcissement apparaît ainsi affaire de compromis coût-efficacité (cost effectiveness trade-off) entre la qualité des blindages et surblindages et leurs reprises, auquel cas les filtres et supprimeurs sont inutiles, et l'allègement de l'efficacité des blindages, moyennant l'emploi de filtres et/ou de supprimeurs.

Comme il a été vu, aux fréquences de quelques centaines de MHz, les effets des champs sur les câbles priment sur les effets directs des champs sur les électroniques ; en environnement « micro-ondes », en revanche, les effets sont équivalents.

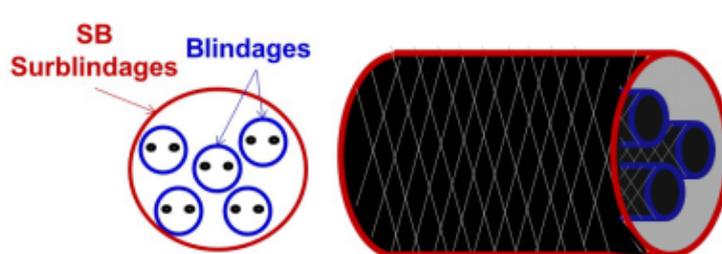


Fig. 9 : Blindages et surblindages

- « Durcissement » actif : il s'agit d'une technique de « contournement », d'« échappatoire », à base de sauvegardes et de réinitialisation des logiciels de bord.

5 Quelques accidents

5.1 Hélicoptère Sikorsky UH-60 BlackHawk [2], [9]

Le BlackHawk UH-60 est un hélicoptère de transport tactique de l'US Army, équipé de « fly-by-wire » (transmission des ordres de pilotage par voie électrique (numérique), en lieu et place des tringleries ou câbles mécaniques traditionnels) ; il a été victime de 5 « crashes » en volant à proximité d'émetteurs radio.

Dans un premier temps, après un premier accident qui a fait trois morts en 1986, l'Army a autorisé la reprise des vols au bout de 49 jours ; au total, après les autres accidents, 22 personnes ont trouvé la mort, d'autres ont été blessées.

Le système de stabilisation d'attitude a été affecté par des interférences créées par les HIRF (*High Intensity Radiated Fields*) ou champs forts. Les signaux numériques du fly-by-wire se sont révélés hautement susceptibles aux HIRF. Et le BlackHawk n'était pas censé accomplir des missions à proximité de gros émetteurs.

Facteur humain

On peut évoquer la malchance au premier accident, mais pas aux suivants. Il y a d'abord eu déni du problème, trois accidents ayant été attribués à des problèmes mécaniques : « *Electromagnetic interference leaves no fingerprints* » ;

puis, les explications se précisant, l'argument est devenu économique : « *[shielding] would be very costly* ». In fine, l'Army a ordonné une investigation poussée.

Notons que l'US Navy, utilisant des Blackhawks SH 90, « durcis » aux champs forts (car la Navy était consciente des ambiances électromagnétiques sévères régnant à bord des bâtiments de surface, voir § 4.5), a eu une approche très différente : elle a dans un premier temps interdit aux 14 premiers BlackHawks d'entraînement de s'approcher à moins de « *a significant number of miles* » (valeur classifiée) d'émetteurs, puis a mis en œuvre sur d'autres hélicoptères un durcissement renforcé aux environnements EM, et, en secours, une possibilité de réinitialiser (*resets*) le pilote.

5.2 Apollo 12 [3], [4], [5], [6]

A la sixième mission habitée et deuxième mission lunaire du programme Apollo, le 14 novembre 1969, le lanceur Saturn V a été frappé deux fois par la foudre, à 2 km et 4,2 km d'altitude, donc peu après le décollage, respectivement à 36,5 et 52 s ; les équipements de bord ont été perturbés plusieurs dizaines de secondes, certaines voies de télémétrie ont été perdues, à la 52e seconde l'inertialité a été perdue (le lanceur emporte dans ses centrales inertielles un trièdre de référence géographique à partir duquel il réalise sa navigation son guidage et son pilotage). L'équipage a réussi à réinitialiser les équipements de bord et la mission s'est déroulée ensuite jusqu'au bout.

C'est le lanceur qui a déclenché la foudre.

Un lanceur commercial est durci contre la foudre au sol (voir § 4.1, il est protégé par des parafoudres contre les coups forts et durci aux effets électromagnétiques induits, et durci à un impact direct de faible intensité), mais pas contre la foudre naturelle en vol (les protections coûteraient trop cher, notamment en masse) : simplement, on n'autorise par le lancement en situation orageuse.

Or un objet conducteur (donc un lanceur et son panache - ou jet propulsif ionisé -, ou tout véhicule conducteur, avion, missile. . .) déforme localement les équipotentielles du champ et donc renforce localement le champ électrique :

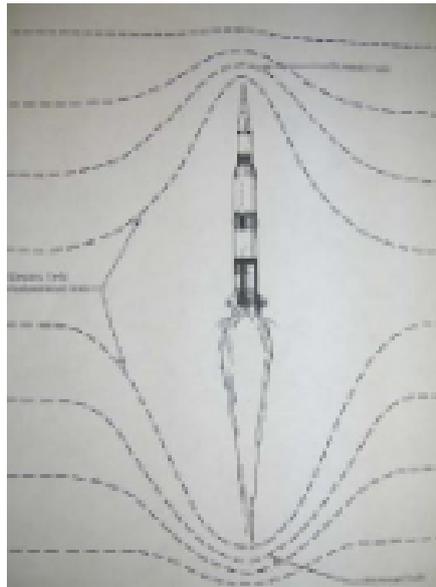


Fig. 10 : Amplification locale du champ par le système [4], [5]

Il en résulte une amplification locale du champ, typiquement d'un facteur 100 (voire plus) ; en conséquence, même en conditions seulement pré-orageuses (exemple : champ de 20 kV/m), la présence du véhicule fait monter le champ localement à 2 MV/m, valeur seuil de déclenchement de la foudre à 2 km d'altitude.

Facteur humain

Le « pouvoir des pointes » est connu depuis très longtemps, c'est la base du fonctionnement des parafoudres (faussement appelés paratonnerres). Et le phénomène de déclenchement de la foudre par un véhicule en vol avait été prédit en 1950 par Heinz-Wolfram Kasemir.

Ici, le renforcement du champ par le lanceur n'avait pas été pris en compte ; et ce qui devait arriver est arrivé.

Bien entendu, des mesures ont été prises, avec l'introduction dans les procédures de cinq *Launch Commit Criteria* relatifs à la foudre, dont un relatif à la foudre déclenchée.

5.3 Atlas Centaur 67 [3], [5], [7]

Le 26 mars 1987, l'Atlas Centaur AC 67 – l'Atlas Centaur est la version la plus puissante de la famille Atlas -, après trois quarts d'heure de discussion sur la dangerosité des conditions météorologiques, est lancé à Cape Canaveral (Eastern Test Range) avec 14 minutes de retard, emportant un satellite FleetSatCom FLT-6 (satellite de télécommunications Navy/Air Force), plus cher que le lanceur : 83 M\$ contre 78 (de 1987)...

Le lanceur déclenche la foudre à la 49e seconde, au passage dans les nuages, ce qui provoque sa rupture à la 51e seconde à l'altitude de 4,3 km.

Il s'agit du 7e échec d'un Atlas Centaur, sur plus de 60 tirs au cours des deux décennies passées. Le lanceur et bien entendu le satellite ont été perdus.

L'accident a été abondamment décrit dans la littérature, notamment dans [7]. Comme pour Apollo 12, les conditions étaient favorables à la foudre déclenchée. L'examen de la coiffe (qui assure l'aérodynamisme du lanceur et protège la charge utile pendant la traversée atmosphérique), après récupération, a révélé la trace de plusieurs impacts de foudre, ainsi que des claquages avec des parties métalliques internes. Le courant de foudre a pénétré à l'intérieur du lanceur et a circulé sur les câbles, induisant une perturbation du calculateur de bord (*Digital Computer Unit*) qui a alors commandé un braquage maximum en lacet ; l'effort excessif sur les structures du véhicule a conduit à sa rupture ; la destruction a été commandée 12 s plus tard.

Facteur humain

Le problème avait été mis en évidence 8 ans plus tôt avec Apollo 12. Mais les « *lessons learned* » d'Apollo 12 n'ont pas été prises en compte : « *launch officials and weather forecasters ignored liftoff rules and failed to use common sense* », en raison, il est vrai, d'une rédaction peu claire du *Launch Commit Criterion* (cf. [5]).

Par la suite, un usage systématique de paires (de conducteurs) torsadées et blindées a été fait, les blindages ont été reliés à la masse des blindages aux deux extrémités, les équipements sensibles ont été mis en « cage de Faraday », la coiffe a été rendue métallique (triboélectricité)...

Et l'on a adopté définitivement des *Launch Commit Criteria*.

5.4 HMS Sheffield [2], [8], [9]

Un destroyer de la Royal Navy, Type 42 HMS Sheffield D-80, était déployé en Atlantique Sud pendant la guerre des Malouines, en mission de couverture radar. Il était équipé de la « *most sophisticated anti-missile defense available* ». Le Sheffield était accompagné par le HMS Glasgow (*Sheffield's « sister ship »*), équipé d'ESM (*Electronic warfare Support Measures* – mesures d'appui pour guerre électronique), et par le porte-avions HMS Invincible, ayant à son bord le coordinateur « *anti-air warfare* ».

Le 4 mai 1982, un missile Exocet 5, tiré par un Super-Etendard argentin, frappe le Sheffield : 20 morts, 24 blessés sérieux, destruction du Centre des Opérations et de la salle des machines. Le Sheffield coule le 10 mai pendant son remorquage pour la Géorgie du Sud.

Par suite d'interférences entre le système de défense anti-missile du Sheffield et les communications avec et entre les avions Harriers britanniques, le Sheffield a désengagé son système de défense, créant une fenêtre d'opportunité pour l'Exocet. Les deux Harriers ont bien été détectés par le Glasgow, l'autodirecteur de l'Exocet a été détecté par l'ESM du Glasgow. On peut en conclure que le système d'appui du Glasgow fonctionnait parfaitement.

L'avertissement radio du Glasgow vers le coordinateur à bord de l'Invincible a été interprété par le coordinateur comme une nouvelle fausse alarme (de nombreuses fausses alarmes avaient été reçues le matin).

Facteur humain

L'accident provient des interférences multiples affectant les communications entre avions et bâtiments, et d'un défaut d'interopérabilité entre systèmes, par suite de deux erreurs : le désengagement du système de défense du Sheffield et l'ignorance par l'Invincible de l'alarme émise par le Glasgow. L'effet domino a fait le reste, ce qui devait arriver est arrivé.

5.5 USS Forrestal [2], [9]

Le 29 juillet 1967, le porte-avions USS Forrestal CV-59 se trouvait au large du Golfe du Tonkin, pendant la guerre du Vietnam.

Un avion atterrissant sur le pont lance intempestivement un missile air-sol Zuni qui va frapper un avion armé et ravitaillé, se préparant à décoller, en attente de catapultage. L'incendie de l'avion se communique aux munitions entreposées sur le pont, qui explosent : 17 heures d'incendie, 134 morts, 161 blessés, 21 avions de l'Attack Carrier Air Wing 17 détruits et jetés à la mer, 7 mois de réparations du Forrestal qui réussit à gagner par ses propres moyens, dans un premier temps, avec une forte gîte, une base navale dans les Philippines ; coût pour la Navy (hors coût des avions détruits) : 72 M\$ - de 1967.

Facteur humain

La succession de plusieurs événements en soi hautement improbables (sauf le stockage des munitions sur le pont au mépris des procédures de sécurité) conduit à invoquer le « pas de chance ». Mais il a été établi après investigations que l'avion qui atterrissait a été illuminé par les radars du Forrestal, créant des interférences électromagnétiques sur le câblage du système d'arme de l'avion. Le blindage d'un des câbles électriques de commande présentait une mise à la masse dégradée (négligence de fabrication ? détérioration par suite d'interventions de maintenance ?). L'effet domino a joué et l'accident a montré une fois de plus que « le diable est dans le(s) détail(s) » . . . le(s)quel(s) détail(s) ne sont pas suffisants, bien sûr, pour déclencher l'accident.

Cet accident a déclenché pour la première fois la prise de conscience de la dangerosité des MFP (Micro-ondes de Forte Puissance) ou HPM (High Power Microwaves), signaux hyperfréquences intenses type radar, champs forts. . . On touche là à l'ignorance, à l'époque, des effets dévastateurs potentiels des MFP.

Il s'est ensuivi la révision, au niveau système, des spécifications de compatibilité électromagnétique relatives aux dispositifs pyrotechniques, ainsi qu'une incitation forte au respect des procédures (stockage des munitions. . .) par les marins : « *Sailors, learn or burn* ».

6 Les leçons à tirer

6.1 Les insuffisances

6.1.1 Méconnaissance et/ou négligence

- méconnaissance des effets (méconnaissance de la phénoménologie, comportement des systèmes cyber-physiques) donc du risque (Blackhawk, Apollo 12, Forrestal), méconnaissance des risques associés au non-respect des procédures (Forrestal)
- négligence de réalisation (Forrestal : mise à la masse dégradée), des règles de fonctionnement – les « *lessons learned* » d'Apollo 12 (Atlas Centaur) -, de surveillance de l'application des consignes (Forrestal), non-acceptation des règles de conception
- ignorance des avertissements (Sheffield : interprétation d'un avertissement comme une fausse alarme), non-acceptation

6.1.2 Autres ingrédients classiques

- non-maîtrise des problèmes d'interfaces (Sheffield)
- défauts de logique collaborative (Sheffield, Forrestal)
- défauts de communication, (Atlas Centaur, Sheffield)
- « détail(s) qui tue(nt) » (Forrestal)

6.1.3 Importance du facteur humain et des influences associées

Ne pas oublier que l'homme est une partie du système (au niveau « organique ») : ce point fait l'objet du développement suivant.

6.2 Les difficultés inhérentes à l'électromagnétisme

6.2.1 La peur, la difficulté de croire

« Vous savez... les ondes... », a dit un jour à l'auteur, dans les années 90, un garagiste à propos de la sensibilité des systèmes de verrouillage de portières à distance, réputés à l'époque sensibles aux rayonnements des téléphones mobiles. A la décharge de ceux qui ont peur, les lois physiques ne sont pas triviales ; l'électromagnétisme s'approche uniquement par des lois physiques, gouvernées par les équations de Maxwell (qui sait ce qu'est une puissance rayonnée ? une puissance rayonnée équivalente ?) via des mesures non triviales : si la mesure d'une tension ou d'une intensité est simple, celle d'un champ l'est beaucoup moins. « *EM means ElectroMagnetic and not Electrical Mystery* » !

6.2.2 Le déni

« Ça n'existe pas » : méconnaissance, refus de, ou difficulté à accepter, la nouveauté ; ou bien les accidents ou incidents sont imputés à des problèmes mécaniques (Blackhawk).

Attitude d'autant moins étonnante, finalement, que les effets sont rarement signés : en cas de guerre électronique, qui accusera un avion, un bateau... , passant à proximité, d'avoir délibérément focalisé des micro-ondes de forte puissance sur une installation complexe, telle que plateforme de forage off-shore, dont on constate brusquement le dysfonctionnement et l'arrêt... ou pire ? Encore une fois, « *Electromagnetic interference leaves no fingerprints* ».

6.2.3 La répulsion massive

« Je n'y comprends rien, je prends ça comme un mal nécessaire » : c'est l'attitude du management... parfois

5.2.4. La difficulté de légiférer (du fait de la défiance, du cloisonnement des disciplines)

L'électromagnéticien doit parfois faire face à une exigence de renversement de la preuve : « Prouve-moi que ça ne marchera pas si je n'applique pas les règles de conception que tu imposes. » (authentique déclaration d'un responsable de bureau d'études mécanique à un ingénieur électromagnéticien). A rapprocher de l'argument : « *Prouvez-moi que les joints ne sont pas fiables !* » (cf. l'accident de la navette Challenger).

Or, on est là dans le management du risque : il n'y a pas de preuve que cela ne fonctionnera pas si l'on n'applique pas les règles de conception, seulement une forte présomption que cela fonctionnera si on les applique.

Seule une pédagogie bien pensée contribuera au décroisement (voir § 7). On peut remarquer qu'il y a une nuance entre « *En cas d'incendie, ne pas utiliser l'ascenseur* » et « *En cas d'incendie, il est interdit, parce que dangereux, d'utiliser l'ascenseur* » !

7 Les leçons vues par certains auteurs

Divers auteurs ont tiré les leçons des accidents, certains sans insister sur le facteur humain :

- Pour Charles Perrow [12], l'accident est inévitable, il finira par se produire ; l'accident est « normal » ; « *L'accident n'est que la fin de l'histoire de la dégradation de la sécurité du système.* » [13]
- Barry Turner [14] et Dave Woods [15] utilisent une analogie médicale : le premier parle d'incubation (les choses vont se révéler, parfois tardivement) et de terrain préparé (le « virus » peut entrer, d'où émergence de l'accident), le second parle de la précondition de faiblesse², qui relativise le poids d'une cause (approche multicausale).

D'autres mettent l'accent sur le facteur humain :

- Karl Weick [16] insiste sur l'organisation et la complexité des facteurs HRO (*High Reliability Organization*): « *organization that has succeeded in avoiding catastrophes in an environment where normal accidents can be expected due to risk factors and complexity* ».
- Diane Vaughan [17] attire l'attention sur le poids du subjectif à propos de l'accident de Challenger ; les ingénieurs de terrain estimaient la probabilité d'échec à 10-2, les managers entre 10-5 et 10-4 ; d'ailleurs, 24 tirs avaient été couronnés de succès... Elle parle de « normalisation de la déviance » à propos d'« enchaînement de causes lointaines et diverses » et de « périodes assez longues de persévérance dans l'erreur », expressions de Christian Morel [18].

²Cf. la grippe espagnole qui a fait tant de ravages au sortir de la première guerre mondiale.

8 Pistes de progrès

8.1 Faut-il d'avantage de moyens ?

Dans ce domaine, on fait déjà beaucoup (formation, ressources financières. . .). Et d'ailleurs plus l'événement est rare, plus sa survenue est insupportable³ : le cercle vicieux guette. . .

8.2 Pédagogie et décloisonnement

Face à l'ignorance, à la négligence, à la défiance, au déni, la seule méthode est de mettre en œuvre une pédagogie efficace afin que le cloisonnement inévitable entre les disciplines puisse se réduire. Il ne s'agit pas seulement de former, mais de *sensibiliser de façon continue* ; pour cela plus de retranchement dans un laboratoire d'électromagnétisme ou auprès d'un moyen d'essais : plus de « *Pour vivre heureux, vivons cachés* » [19]. Il convient de convaincre que les ondes, ce n'est ni intrinsèquement inoffensif ni intrinsèquement dangereux, d'expliquer de quoi l'on parle : champ, puissance rayonnée, densité de puissance... Vaste programme. . .

La démonstration de la dangerosité des ondes électromagnétiques peut être faite sur des modèles simples, en faisant appel à des notions élémentaires d'électromagnétisme connues de tous (ou presque), cf. § 4.2 et 4.3. Pour emporter la conviction, une démonstration sur des modèles plus élaborés mais accessibles au moins à la compréhension de chacun peut être nécessaire : c'est ainsi que la maquette numérique, outil maintenant répandu chez les grands systémiers, constituant une définition du système commune et partagée à tout moment du cycle de vie du système, peut servir avantageusement la pédagogie que les électromagnéticiens doivent mettre en œuvre. Notons que la sensibilisation du grand public est beaucoup plus difficile.

Pour faire admettre la « noblesse » de l'électromagnétisme, même dans les entreprises dont ce n'est pas la culture dominante, il convient de développer la communication (physique), formelle et informelle entre les membres des équipes (sensibilisation continue, afin d'éviter que le « soufflé » ne retombe).

8.3 Définition claire des responsabilités

Il convient de définir clairement les rôles et responsabilités de chacun : managers, personnel de terrain. . ., en désignant un chef d'orchestre (normalement, c'est le responsable d'affaire, ou le chef de programme, ou un de ses délégués. . .). Et « *Chacun son métier* »⁴ [20].

Il convient aussi de ne pas disséminer les responsabilités : s'il existe dans une entreprise une direction des essais, ne pas confier les essais électromagnétiques aux seuls « essayeurs », mais leur associer des électromagnéticiens qui seuls sauront interpréter les résultats.

8.4 Mise en œuvre continue du *Plan-Do-Check-Act*

L'Ingénierie Système est « *un processus coopératif et interdisciplinaire de résolution de problèmes s'appuyant sur les connaissances, méthodes et techniques issues de la science et de l'expérience* »⁵. L'Ingénierie Système s'enrichit de ses succès et de ses erreurs, en actionnant la roue de Deming : *Plan-Do-Check-Act* (Planifier - Réaliser, Exécuter – Vérifier - (Ré)Agir, Corriger) :



Fig. 11 : La Roue de Deming

³De même que la tolérance vis-à-vis de l'inégalité diminue avec les progrès de l'égalité (Tocqueville, De la démocratie en Amérique).

⁴Cf. les Managers à un Directeur des Etudes la veille du tir de Challenger : « *Take off your engineering hat and put on your management cap!* »

⁵AFIS, Association Française d'Ingénierie Système

9 En conclusion

Il s'agit bien de mettre en place *une logique du ET : de même qu'il faut une conjonction de causes pour que l'accident se produise, il faut explorer simultanément toutes les pistes de progrès pour tenter de l'éviter.*

En ce qui concerne l'électromagnétisme (mais on élargira avec profit à d'autres spécialités), l'une de ces pistes consiste à décloisonner les disciplines, par la mise en place d'une pédagogie, ce qui contribue à donner à chacun la possibilité d'exercer ses responsabilités en connaissance de cause.

Références

La nécessité de mettre en œuvre une pédagogie pour décloisonner les disciplines est démontrée à travers des témoignages industriels récents, ainsi que par diverses références, telles que :

- [1] Trade-offs between EM hardening and general design of Launch Vehicles, Patrick Farfal, André Schaffar, EADS SPACE Transportation - EUCASS, Moskow 4-7 July 2005
- [2] Failures and Anomalies attributed to Electromagnetic Interference, Richard D. Leach, Computer Sciences Corporation, Huntsville, Alabama - AIAA 95-3654, AIAA 1995 Space Programmes Technologies Conference, September 26-28, 1995/ Huntsville, AL
- [3] Electronic Systems Failures and Anomalies attributed to Electromagnetic Interference, R.D. Leach and M.B. Alexander, Editor – NASA Reference Publication 1374, July 1995
- [4] NASA Analysis of Apollo 12 incident, Feb. 1970
- [5] Atlas Centaur (AC-67) Lightning Strike Mishap 1987, Brian O'Connor, Chief, Safety and Mission Assurance – Leadership VITS Meeting, March 5, 2007
- [6] The Incredible Journey of Apollo 12, <https://youtu.be/FBhIDjWaByg>
- [7] The Atlas-Centaur 67 Incident, H.J. Christian, K. Crouch, B. Fisher, V. Mazur, R.A. Perala, and L. Ruhnke - AIAA-88-0389, AIAA 26th Aerospace Sciences Meeting, January 11-14, 1988/Reno, Nevada
- [8] Electronic Svsterns Failures and Anomalies Attributed to Electromagnetic Interference, R.D. Leach and M.B. Alexander, Editor, Marshall Space Flight Center MSFC, Alabama
- [9] An Approach to Addressing Spectrum Management Issues for Radar Systems, Dr Randy J. Jost, Space Dynamics Laboratory - TC-6 Spectrum Management Meeting, August 17, 2009
- [10] Professional Development Short Course on: Introduction to EMI, Instructor: Dr. William G. Duff, Applied Technolgy Institute, Riva, Maryland
- [11] EMC for Product Designers, Third edition, Tim Williams, Newnes, 2001

Les réflexions sur le risque font l'objet (liste non limitative) des références suivantes :

- [12] Perrow, C. (1984), Normal Accidents. Living with High-Risk Technology, Basic Books
- [13] Yves Dien, Entretiens du risque, 3 novembre 2015
- [14] Weick, K. E., Sutcliffe, K. M., & Obstfeld, D. (1999): Organizing for High Reliability: Processes of Collective Mindfulness. In B. M. Staw & L. L. Cummings (Eds.), Research in Organizational Behavior (Vol. 21, pp. 81-123). Greenwich, CT: JAI Press, Inc.
- [15] Turner, B., Pidgeon, N. (1997), Man-Made Disasters, 2nd edition, Butterworth Heinemann, Oxford
- [16] David D. Woods: Behind human error: cognitive systems, computers, and hindsight
- [17] Vaughan, D. (1996), The Challenger Launch Decision. Risky Technology, Culture, and Deviance at NASA, The Chicago University Press, Chicago
- [18] Christian Morel, Les Décisions absurdes
- [19] Jean-Pierre Claris de Florian, Le Grillon
- [20] Jean-Pierre Claris de Florian, Le vacher et le garde-chasse.