



JEUX, ENJEUX ET ERREURS « SYSTÈME » :

LEÇONS TIRÉES DES MANQUEMENTS AUX RÈGLES DE COMPATIBILITÉ ÉLECTROMAGNÉTIQUE

Jeux et enjeux : systèmes et modélisation

Andé, 9 & 10 juin 2012



Patrick FARFAL, *PatSys*

25 rue Jean Leclaire 75017 PARIS - France

Phone/Fax:+33 (0)1 42 52 89 60 - Mob.:+33 (0)6 72 14 82 40

Email: pfarfal.patsys@sfr.fr





Sommaire

- ❑ Enjeux ... et jeux : pourquoi la CEM ?
- ❑ Les Environnements électromagnétiques (EM) et leurs effets sur les Systèmes
- ❑ Le Système et son Environnement
- ❑ Détail des mécanismes d'interférence
- ❑ Nature of interactions in a System: moving and iterative feature of interactions
- ❑ Quelques erreurs
 - *PIONEER Remotely Controlled Vehicle (RPV)*
 - *Sikorsky UH-60 BlackHawk helicopter*
 - *HMS Sheffield*
 - *Atlas Centaur 67*
 - *USS Forrestal*
- ❑ *Lessons learned*
- ❑ Les difficultés inhérentes à l'Electromagnétisme
- ❑ Synthèse
- ❑ Conclusion

And God said:

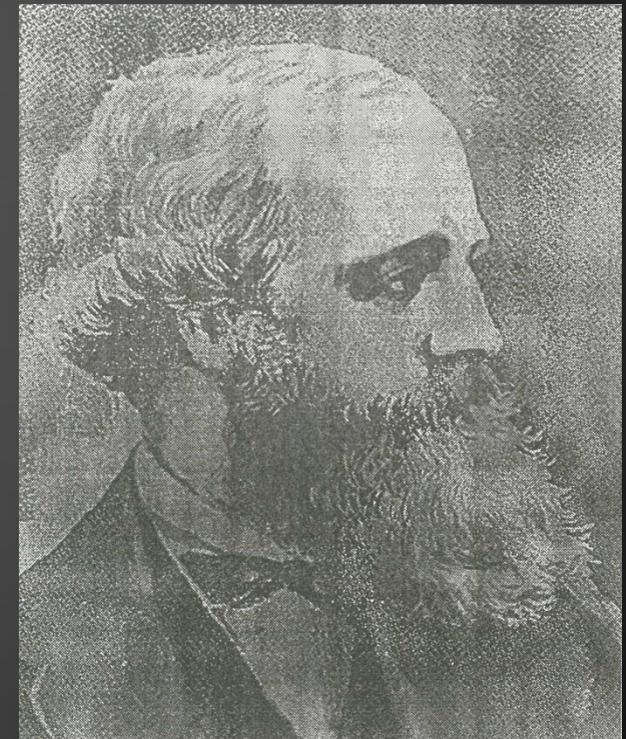
$$\ll \quad \nabla \cdot \vec{B} = 0$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho$$

$$\nabla \times \vec{E} + \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = 0, \text{ and}$$

$$\nabla \times \vec{H} - \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} = \vec{J} \quad \gg ,$$

and there was light.



James Clerk MAXWELL
(1831 – 1879)



Enjeux ... et jeux : pourquoi la CEM ?

□ Enjeux des systèmes « ingénierés » (*engineered systems*)

➤ Commerciaux

➤ Militaires

□ Jeux

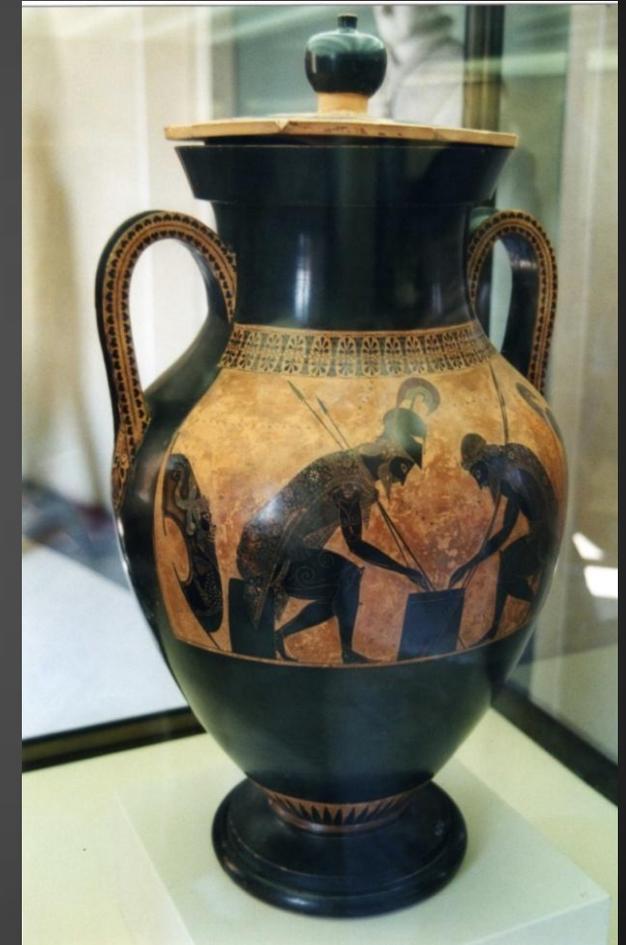
➤ Le jeu et la guerre (traditionnelle ou commerciale) sont indissociables

▪ « Alea jacta est »

César

▪ « Sa Majesté le Hasard »

Clausewitz



Achille et Ajax jouant leurs armes aux dés
Musée du Vatican

□ La CEM est une caractéristique fondamentale des systèmes militaires et spatiaux, où se côtoient « jeux » et enjeux



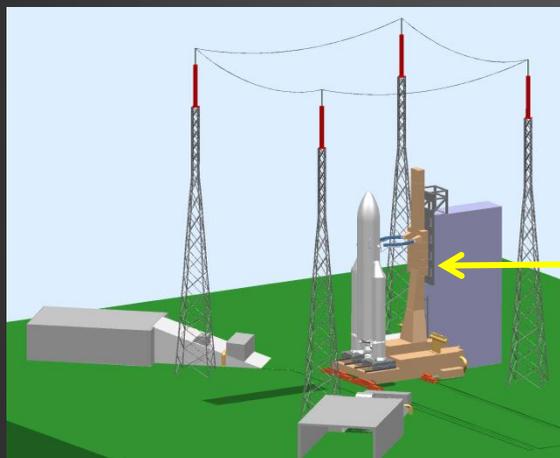
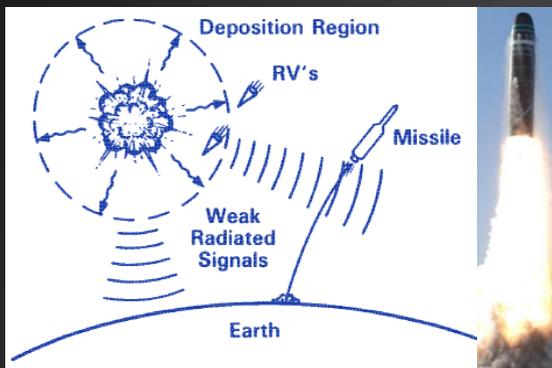
Enjeux ... et jeux : pourquoi la CEM ?

- ❑ « **Le loto**, c'est facile, c'est pas cher...
... et ça peut rapporter gros ! »
 - ❑ Mais pas souvent !!!
- ❑ **La CEM**, c'est pareil (enfin, presque) : ça n'est pas si facile, mais quelquefois les solutions ne sont pas chères...
... et ça contribue à garantir le succès de la mission du système,
 - ❑ Souvent
... mais l'oubli d'une solution pas chère peut coûter gros
 - ❑ Heureusement pas souvent
- ❑ **La différence** : au loto, quand on gagne, ça se voit ; en CEM, c'est quand on perd



Les environnements EM et leurs effets sur les Systèmes

Journées d'Andé - 9 & 10 juin 2012



Direct or nearby
Lightning stroke



Other functional Systems

ElectroStatic
Discharges
(ESD)



Self-generation
of EM Fields
& spurious Currents

Intra-System
Compatibility

Coupling to the Vehicle
↓
Internal & external Fields generated
Induced spurious Currents generated

Inter-System Compatibility

On-Board Electronics
Pyrotechnic Subsystems
Harnesses

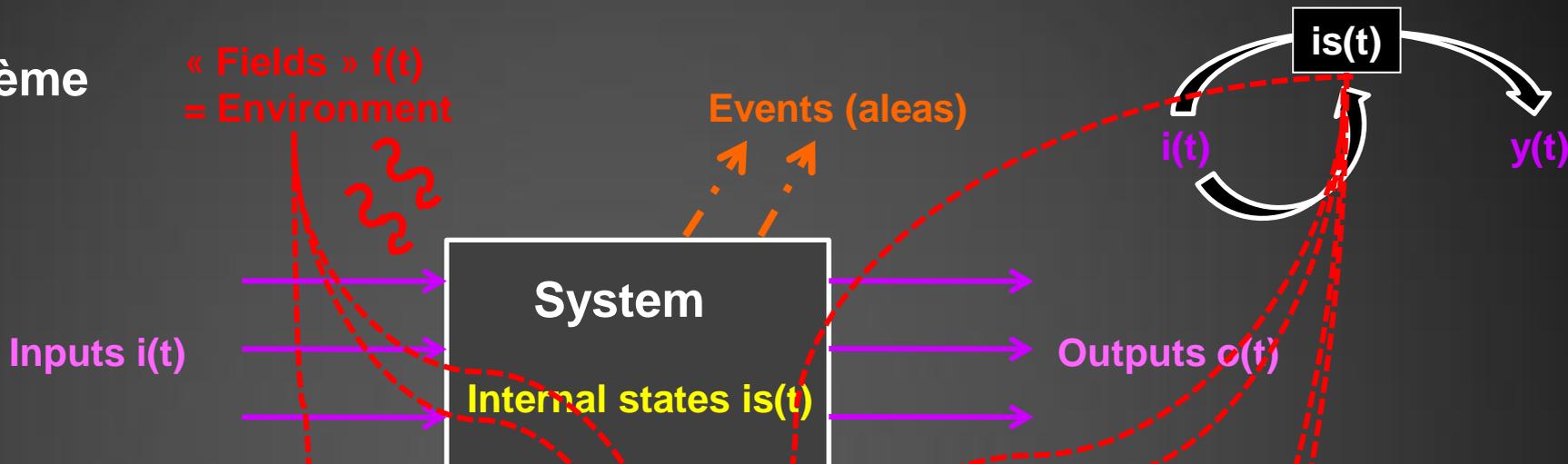
} sensitive to Fields
and/or spurious Currents

Permanent Damage
Malfunctions

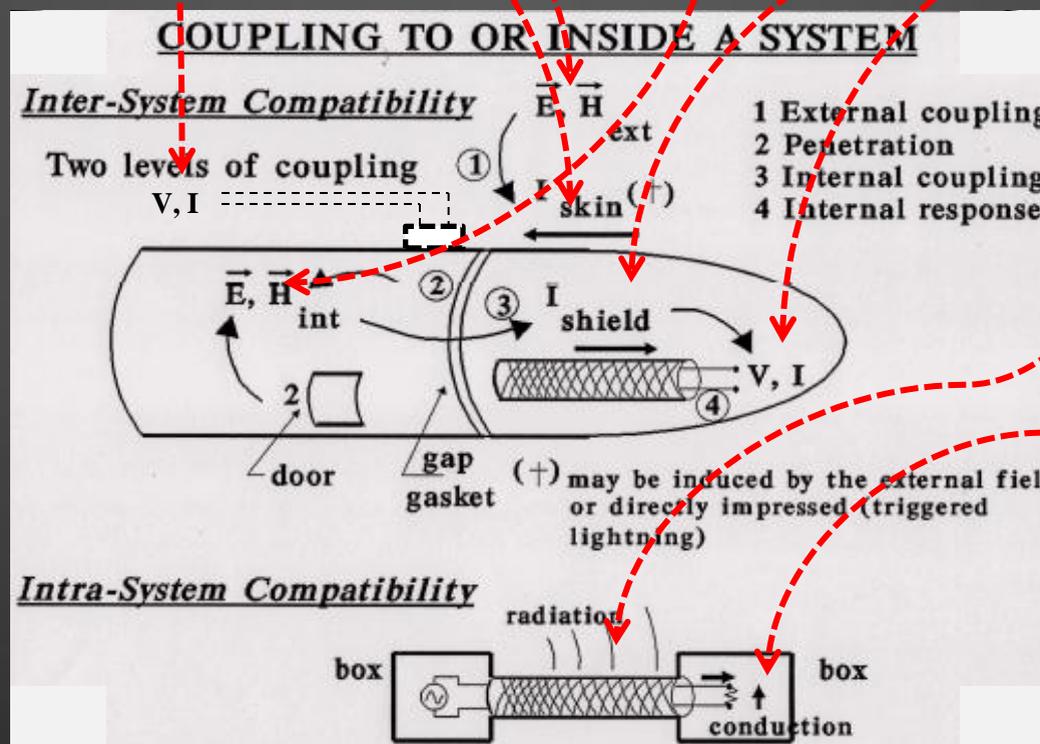


Le Système et son Environnement

Le Système



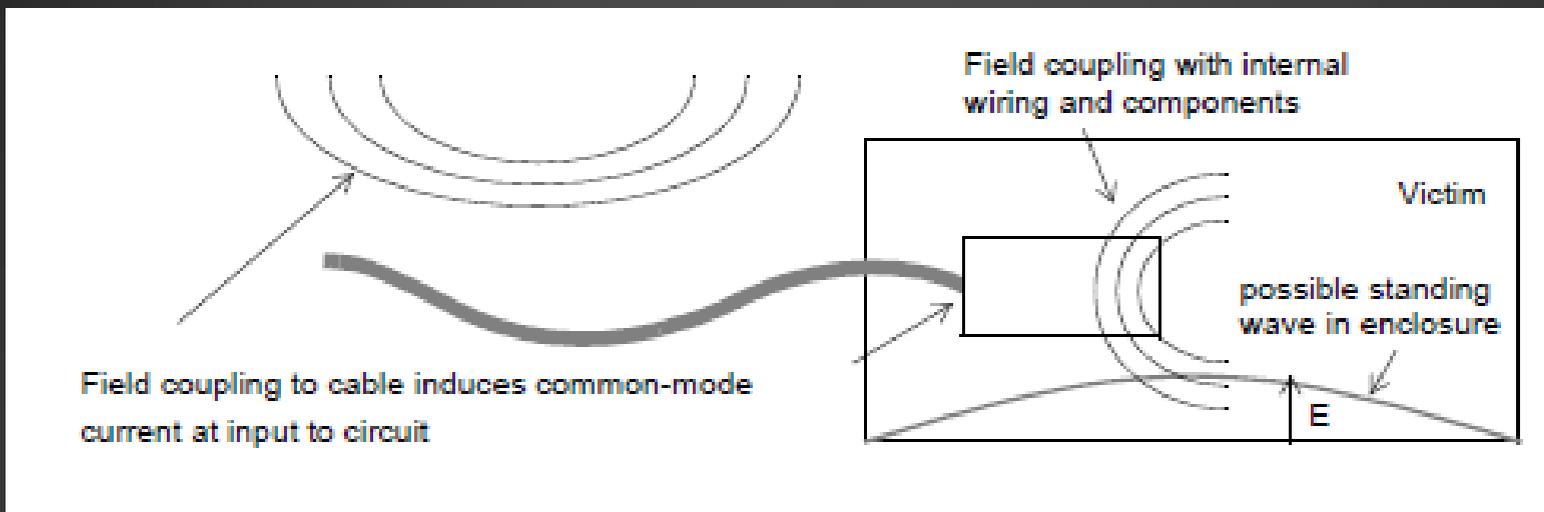
L'Environnement é.m. externe et interne : détail des mécanismes de couplage



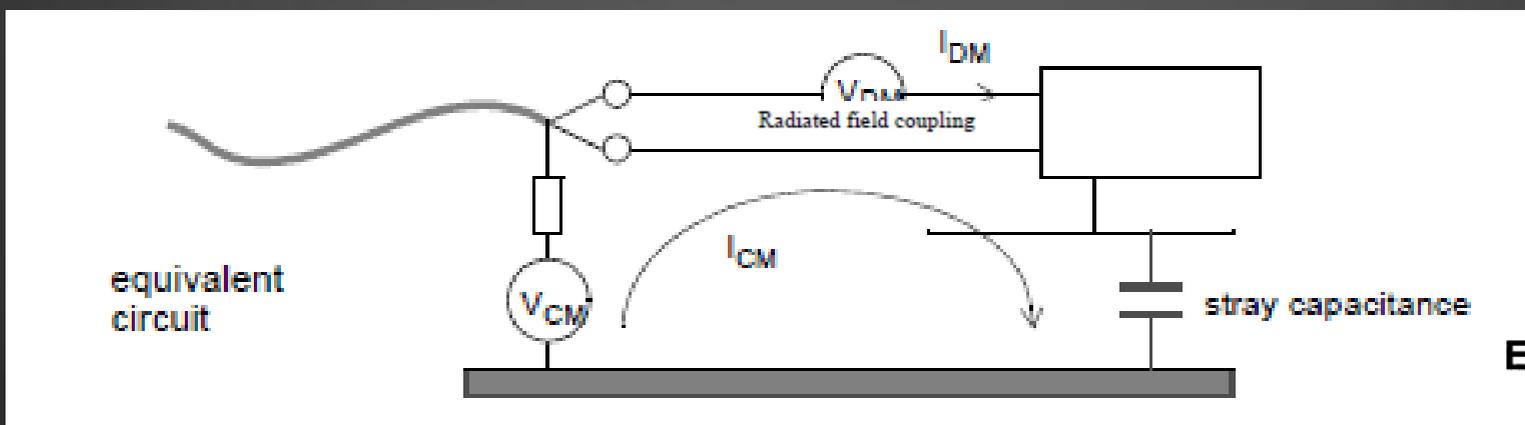
Les états internes peuvent être désirés ou subis



Détail des mécanismes d'interférence



❑ Importance des blindages et surblindages



❑ Importance des connexions d'extrémité

EMC for Product Designers

Third edition

Tim Williams

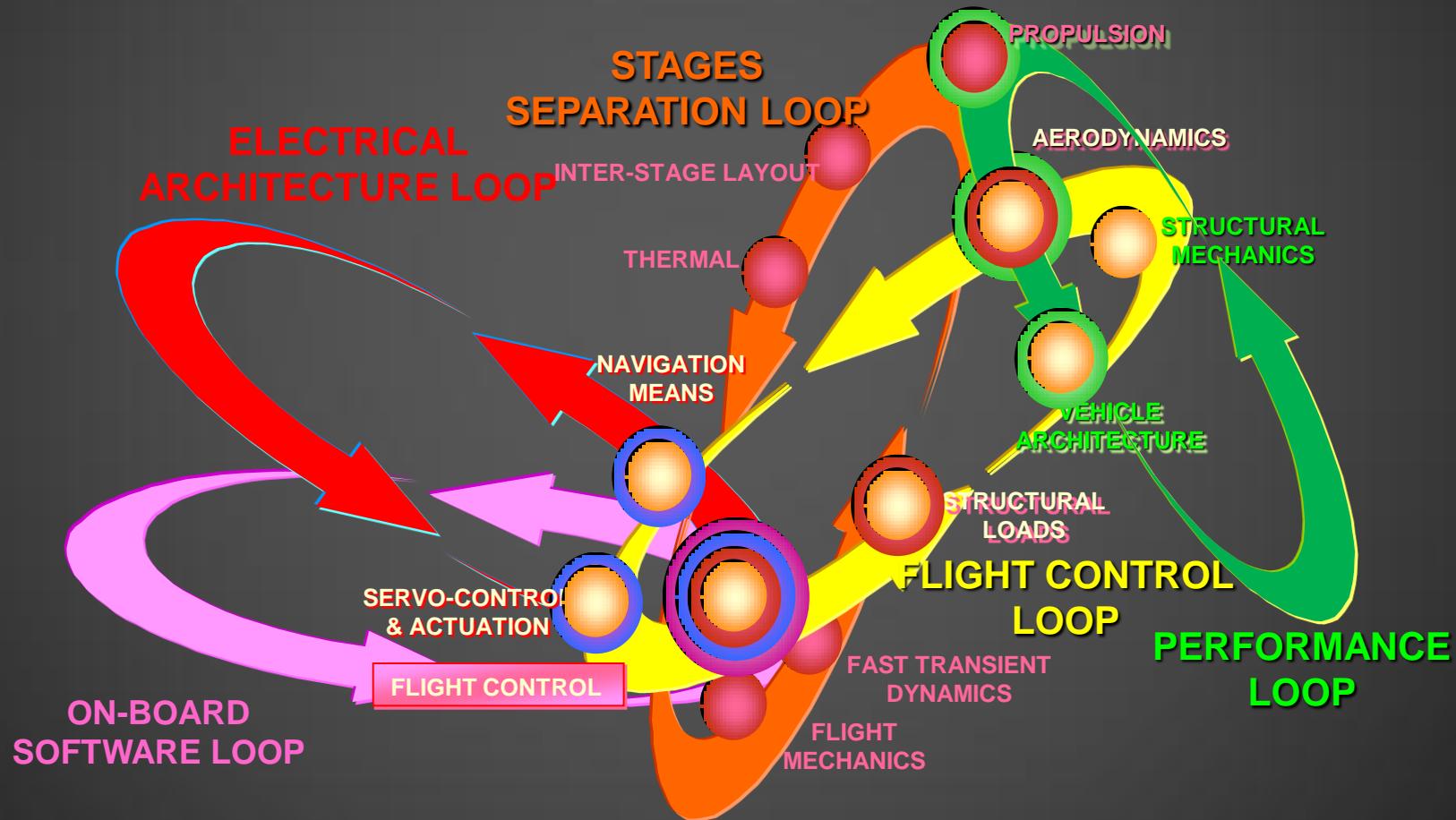
Third edition 2001



Nature of interactions in a System: moving and iterative feature of interactions

- « System Loops »: pluridisciplinary and collaborative activities
 - Iterations all along the Design, Development, Realization, Validation cycle

Journées d'Andé – 9 & 10 juin 2012



(Engineering and Validation on Space Transportation Avionics Systems, J.-C. MOREY, G. ABOUT - Complex and Safe Systems Engineering, 21-22 juin 2004 – Arcachon)

- w/ periodical checks of consistency between the reciprocal input data:

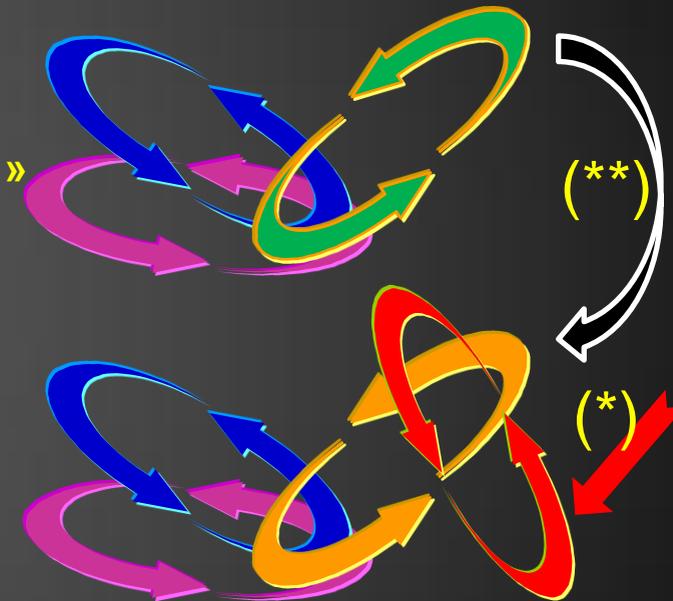




Nature of interactions in a System: moving and iterative feature of interactions

- Exchanges between components may be not properly characterized or in extreme cases not characterized at all and discovered (too) lately all along the Operational Life of the System

- May bring about new interactions to be characterized
- May need new* (or re-**) activation of « System Loops »



⇒ *In spite of widespread usage of methods, processes and tools of Systems Engineering invented and theorized to prevent some of those drawbacks*



Quelques exemples





PIONEER Remotely Controlled Vehicle (RPV)

COTS: Commercial Off-The-Shelf
 (composant ou équipement sur étagère)
NDI: Non Developmental Item
EMI: ElectroMagnetic Interference

❑ **PIONEER**

- **RPV (drone) équipé d'une caméra TV stabilisée et d'un désignateur laser ; domaine d'action : 110 miles ; autonomie : 8 h ; mis en œuvre à partir de porte-avions**

❑ **La situation**

- **Les télécommandes utilisent des COTS (ou NDI) de spécifications non militaires**
- **La Navy prend la précaution d'effectuer des essais en vol, redoutant des problèmes d'EMI**

❑ **Les faits (USS Iowa, janvier 1987)**

- **Série de transferts de commandes indésirables entre deux boîtiers de télécommande de pilotage (celui du pilote du drone et celui d'un élève stagiaire)**
- **Perte de contrôle et crash**

❑ **La cause**

- **Interférences EM entre les antennes du système de communication de l'Iowa et les boîtiers**
- **Blindages insuffisants et mauvaises connexions d'extrémité des câbles**

❑ **Le remède**

- **Amélioration des câbles et connecteurs, blindages convenables, implantation de filtres et modifications de la logique interne**
- **Durcissement de la spécification d'environnement de conduction : 12,75 V à 30 V (6 dB au-dessus du cas réputé pire !)**



PIONEER Remotely Controlled Vehicle (RPV)

COTS: Commercial Off-The-Shelf
(composant ou équipement sur étagère)
NDI: Non Developmental Item
EMI: ElectroMagnetic Interference

❑ PIONEER

- RPV (drone) équipé d'une caméra TV stabilisée et d'un désignateur laser ; domaine d'action : 110 miles ; autonomie : 8 h ; mis en œuvre à partir de porte-avions

❑ La situation

- Utilise des COTS (ou NDI) de spécifications non militaires
- La Navy prend la précaution d'effectuer des essais en vol, redoutant des problèmes d'EMI

❑ Les faits (USS Iowa, janvier 1987)

- Série de transferts de commandes indésirables entre deux boîtiers de télécommande de pilotage (celui du pilote du drone et celui d'un élève stagiaire)
- Perte de contrôle et crash

❑ La cause

- Interférences EM entre les antennes du système de communication de l'Iowa et les boîtiers
- Blindages insuffisants et mauvaises connexions d'extrémité des câbles

❑ Le remède

- Amélioration des câbles et connecteurs, blindages convenables, implantation de filtres et modifications de la logique interne
- Durcissement de la spécification d'environnement de conduction : 12,75 V à 30 V (6 dB au-dessus du cas réputé pire !)

**COTS incompatibles avec l'Environnement
(Erreur humaine)
Défaut d'interopérabilité entre systèmes**



Sikorsky UH-60 BlackHawk helicopter



- ❑ **BlackHawk UH-60**
 - Hélicoptère de transport tactique (Army) ; coût d'un appareil : 6 M\$ (1987) ; *fly-by-wire*
- ❑ **La situation**
 - Vol à proximité d'émetteurs radio (1981-1987)
- ❑ **Les faits**
 - 5 crashes : 22 morts, des blessés
 - Maintien des appareils au sol par l'Army après un accident en Alabama (3 morts) en 1986, puis reprise des vols au bout de 49 jours ; déni du problème ; « *[shielding] would be very costly* »
- ❑ **La cause**
 - Système de stabilisation d'attitude affecté par des interférences créées par des HIRF
 - Signaux numériques du *fly-by-wire* hautement susceptibles aux HIRF
 - A la conception initiale du *BlackHawk*, l'appareil n'était pas censé accomplir des missions à proximité de gros émetteurs
- ❑ **Le remède**
 - Investigation poussée de l'Army
 - « *Far different approach* » de la Navy : Interdiction aux 14 premiers *BlackHawks* d'entraînement de s'approcher à moins de « *a significant number of miles* » (classifié) d'émetteurs
 - Durcissement aux environnements EM des futurs SH-60 *SeaHawk* (Navy) de lutte anti-sous-marine ; en secours, réinitialisations (*resets*) du pilote



Sikorsky UH-60 BlackHawk helicopter



❑ **BlackHawk UH-60**

- Hélicoptère de transport tactique (Army) ; coût d'un appareil : 6 M\$ (1981) ; fly-by-wire

❑ **La situation**

- Vol à proximité d'émetteurs radio (1981-1987)

❑ **Les faits**

- 5 crashes : 22 morts, des blessés
- Maintien des appareils au sol par l'Army après un accident en Alabama (3 morts) en 1986, puis reprise des vols au bout de 49 jours : déni du problème ; « [shielding] would be very costly »

❑ **La cause**

- Système de stabilisation d'attitude affecté par des interférences créées par des HIRF
- Signaux numériques du fly-by-wire hautement susceptibles aux HIRF

A la conception initiale du Blackhawk, l'appareil n'était pas censé accomplir des missions à proximité de gros émetteurs

❑ **Le remède**

- Investigation poussée de l'Army
- « Far different approach » de la Navy : Interdiction aux 14 premiers BlackHawks d'entraînement de s'approcher à moins de « a significant number of miles » (classifié) d'émetteurs
- Durcissement aux environnements EM des futurs SH-60 SeaHawk (Navy) de lutte anti-sous-marine ; en secours, réinitialisations (resets) du pilote

Utilisation du système hors Environnement spécifié
(Erreur humaine)
Défaut d'interopérabilité entre systèmes militaires et civils
EMI leaves no fingerprints



HMS Sheffield



❑ Type 42 HMS Sheffield D-80

- Destroyer de la Royal Navy

❑ La situation

- Déployé en Atlantique Sud pendant la guerre des Malouines , en mission de couverture radar
- Equipé du « *most sophisticated anti-missile defense available* », dont des missiles intercepteurs *Sea-Dart* et un radar type 965

❑ Les faits (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

❑ La cause

- Interférences entre le système de défense anti-missile du *Sheffield* et les communications avec et entre *Harriers*
- Désengagement du système du *Sheffield*, créant une fenêtre d'opportunité pour l'*Exocet*
- Détection des 2 *Harriers* par le *Glasgow*, détection de l'autodirecteur de l'*Exocet* par l'*ESM* du *Glasgow*
- Avertissement radio du *Glasgow* vers le coordinateur à bord de l'*Invincible*, interprété par le coordinateur comme une nouvelle fausse alarme (nombreuses FA reçues le matin)

❑ Le remède : ???



HMS Sheffield



6 ???!!!

Porte-avions HMS Invincible
A bord coordinateur « anti-air warfare »



Harriers



Super-Etendards

Journées d'Andé - 9 & 10 juin 2012



HMS Sheffield



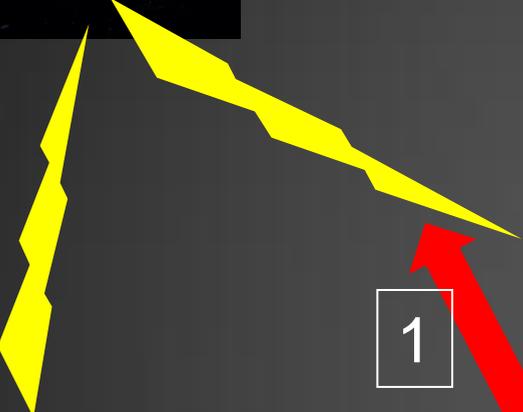
2

4

HMS Glasgow: Sheffield's « sister ship »,
équipé d'ESM (Electronic warfare Support Measures)



Exocet AM-39



1



5



7

3



HMS Sheffield



❑ Type 42 HMS Sheffield D-80

- Destroyer de la Royal Navy

❑ La situation

- Déployé en Atlantique Sud pendant la guerre des Malouines, en mission de couverture radar
- Equipé du « *most sophisticated anti-missile defense available* », dont des missiles intercepteurs *Sea-Dart* et un radar type 965

❑ Les faits (4 mai 1982)

- Un missile *Exocet 5*, tiré par un *Super Étendard* argentin, frappe le *Sheffield*
- 20 morts, 24 blessés sérieux, destruction du Centre des Opérations et de la salle des machines
- Le *Sheffield* coule le 19 mai pendant son remorquage pour la Géorgie du Sud

❑ La cause

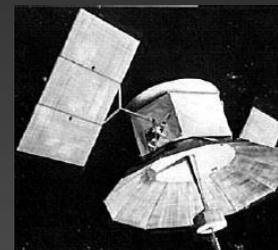
- Interférences entre le système de défense anti-missile du *Sheffield* et les communications avec et entre *Harriers*
- Désengagement du système du *Sheffield*, créant une fenêtre d'opportunité pour l'*Exocet*
- Détection des 2 *Harriers* par le *Glasgow*, détection de l'autodirecteur de l'*Exocet* par l'*ESM* du *Glasgow*
- Avertissement radio du *Glasgow* vers le coordinateur à bord de l'*Invincible*, interprété par le coordinateur comme une nouvelle fausse alarme (nombreuses FA reçues le matin)

❑ Le remède : ???

Défaut d'interopérabilité entre Systèmes
Erreurs humaines : 2
(désengagement du système et ignorance de l'alarme)
Effet domino



Atlas Centaur 67



FLT-6

Atlas Centaur A-C 67

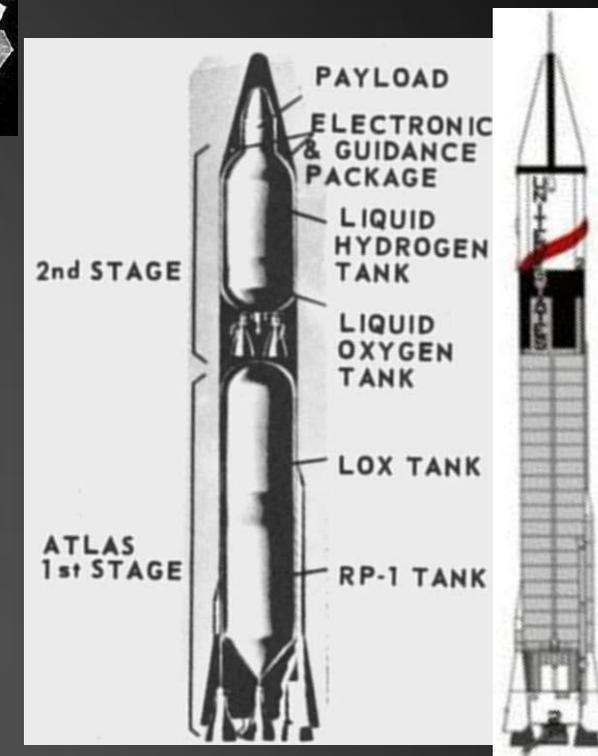
- **Atlas Centaur** : version la plus puissante de la famille **Atlas** ;
masse au décollage : 150 t – 78 M\$
- Charge utile de l'A-C 67 : **FleetSatCom FLT-6** (satellite de
télécommunications **Navy/Air Force**) – 83 M\$

La situation (26 mars 1987)

- **Cape Canaveral (Eastern Test Range)**
- A partir de H0 – 30 min, désaccord entre experts sur la
dangerosité des conditions météo
- Le tir est autorisé avec un retard de 14 min

Les faits

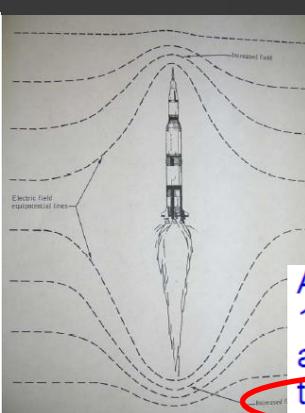
- Déclenchement de la foudre par le lanceur à la 49 seconde au
passage dans les nuages
- Rupture du lanceur à la 51e s à 14 000 ft (5^e échec depuis 1986,
7^e échec d'une **Atlas Centaur**, sur plus de 60 tirs au cours des 2
décennies passées)
- Perte du satellite





Atlas Centaur 67

Lightning can be triggered when an aerospace vehicle with a conductive surface and an ionized exhaust plume distorts the electrical field equipotential lines, thus increasing the potential gradient at the top of the vehicle and below the exhaust plume.
(NASA Analysis of Apollo 12 Lightning Incident; Feb 1970)



PatSys

DCU: Digital Computer Unit
ELV: Expandable Launch Vehicle
LCC: Launch Commit Criterion

Apollo 12 was struck twice by lightning on November 14, 1969, resulting review of applicable atmospheric science and adoption of five LCCs related to lightning, including one for triggered lightning.

La cause

- Idem Apollo 12 : conditions favorables à la foudre déclenchée
- Pénétration du courant de foudre à l'intérieur du lanceur et circulation sur les câbles
- Perturbation d'une mémoire du DCU, qui commande alors un braquage maximum en lacet
- Effort excessif sur les structures du véhicule et rupture ; destruction commandée 12 s plus tard
- « Lessons learned » d'Apollo 12 pas suffisamment prises en compte : « launch officials and weather forecasters ignored liftoff rules and failed to use common sense »



Journées d'Andé - 9 & 10 juin 2012

The Mid Level Cloud Rule (March '87)

...there was no convincing evidence that one of the criteria used to avoid potential electrical hazards [the mid level cloud rule] was met. (note: no waiver was processed)

Before the AC-67 launch, there were a significant number of indications that generally the weather was unfavorable and that specifically there was a lightning hazard. Yet the real import of these indications escaped the launch management team because of imprecise communications, lack of awareness, or both.

Although the Weather Officer did give a go-for-weather as late as lift-off minus three minutes, there was a belief among some members of the launch weather team that their function was only to provide data to the Launch Director for his analysis and that the Launch Director must decide if the weather criteria had been met.

Post Apollo 12 research and analysis resulted in triggered lightning launch commit criteria that applied to both manned and unmanned launch vehicles. By the time of AC-67, the following was the official version for ELVs:

The flight path of the vehicle should not be through mid level clouds 6,000 feet or greater in depth, when the freezing level is in the clouds.

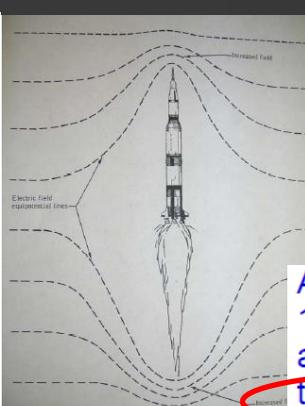
Le remède

- Utilisation systématique de paires torsadées et blindées, mises à la masse des blindages aux 2 extrémités, équipements sensibles en cage de Faraday, coiffe métallique (triboélectricité)...



Atlas Centaur 67

Lightning can be triggered when an aerospace vehicle with a conductive surface and an ionized exhaust plume distorts the electrical field equipotential lines, thus increasing the potential gradient at the top of the vehicle and below the exhaust plume.
(NASA Analysis of Apollo 12 Lightning Incident; Feb 1970)



PatSys

DCU: Digital Computer Unit
ELV: Expandable Launch Vehicle
LCC: Launch Commit Criterion

Apollo 12 was struck twice by lightning on November 14, 1969, resulting review of applicable atmospheric science and adoption of five LCCs related to lightning, including one for triggered lightning.

La cause

- Idem Apollo 12 : conditions favorables à la foudre déclenchée
- Pénétration du courant de foudre à l'intérieur du lanceur et circulation sur les câbles
- Perturbation d'une mémoire du DCU, qui commande alors un braquage maximum en lacet
- Effort excessif sur les structures du véhicule et rupture ; destruction commandée 12 s plus tard
- « *Lessons learned* » d'Apollo 12 pas suffisamment prises en compte : « *launch officials and weather forecasters ignored liftoff rules and failed to use common sense* »



The Mid Level Cloud Rule (March '87)

...there was no convincing evidence that one of the criteria used to avoid potential electrical hazards [the mid level cloud rule] was met. (note: no waiver was processed)

Before the AC-67 launch, there were a significant number of indications that generally the weather was unfavorable and that specifically there was a lightning hazard. But the real import of these indications escaped the launch management team because of imprecise communications, lack of awareness, or both.

Although the Weather Officer did give a go-for-weather as late as lift-off minus three minutes, there was a belief among some members of the launch weather team that their function was only to provide data to the Launch Director for his analysis and that the Launch Director must decide if the weather criteria had been met.

Post Apollo 12 research and analysis resulted in triggered lightning launch commit criteria that applied to both manned and unmanned launch vehicles. By the time of AC-67, the following was the official version for ELVs:

The flight path of the vehicle should not be through mid level clouds 6,000 feet or greater in depth, when the freezing level is in the clouds.

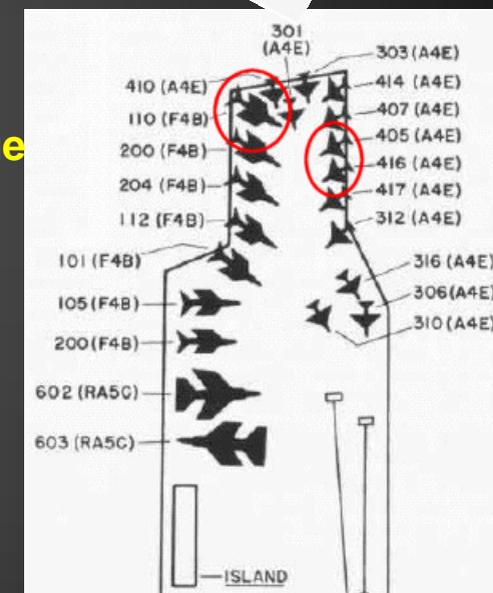
Le remède

- Utilisation systématique de paires torsadées et blindées, mises à la masse des blindages aux 2 extrémités, équipements sensibles en cage de Faraday, coiffe métallique (triboélectricité)...

Journées d'Andé - 9 & 10 juin 2012



USS Forrestal



USS Forrestal CV-59

➤ Porte-avions

La situation (29 juillet 1967)

➤ Guerre du Vietnam, au large du Golfe du Tonkin

Les faits

- Lancement d'un missile *Zuni* par un avion atterrissant sur le pont
- Impact du missile sur un avion* armé et ravitaillé en attente de catapultage
- Incendie de l'avion et explosion des munitions stockées sur le pont
- 134 morts, 161 blessés, 17 heures d'incendie
- 21 avions de l'Attack Carrier Air Wing 17 détruits et jetés à la mer
- 7 mois de réparations
- Coût pour la Navy : 72 M\$

La cause

- Illumination de l'avion par le radar du *Forrestal*
- Interférences EM sur le câblage du système d'arme de l'avion
- Mise à la masse dégradée du blindage d'un câble électrique de commande
- Stockage de munitions sur le pont au mépris des procédures

*pilote par John Mc Cain



USS Forrestal

HPM: High Power Microwaves
MFP: Microondes de Forte Puissance

□ Le remède

- Première prise de conscience de la dangerosité des *HPM* (ou *MFP*), signaux hyperfréquences intenses type radar, champs forts...
- Révision, au niveau système, des spécifications de compatibilité électromagnétique relatives aux dispositifs pyrotechniques
- Incitation forte au respect des procédures (stockage des munitions...) : « **Sailors, learn or burn** »

Journées d'Andé – 9 & 10 juin 2012



Premières explosions

Photo of the fire aboard the U.S. Navy aircraft carrier *USS Forrestal* (CVA-59) on 29 July 1967 off Vietnam.

Source: *USS Forrestal* 1967 cruise book



USS Forrestal

HPM: High Power Microwaves
MFP: Microondes de Forte Puissance

□ Le remède

- Première prise de conscience de la dangerosité des HPM (ou MFP), signaux hyperfréquences intenses type radar, champs forts...
- Révision, au niveau système, des spécifications de compatibilité électromagnétique relatives aux dispositifs pyrotechniques
- Incitation forte au respect des procédures (stockage des munitions...) : « **Sailors, learn or burn** »

Erreurs humaines :
 Ignorance des effets de l'environnement
 Défaut de réalisation
 Non-application des procédures de sécurité
 Défaut de logique collaborative
 Effet domino
 Le diable est dans le détail



Premières explosions

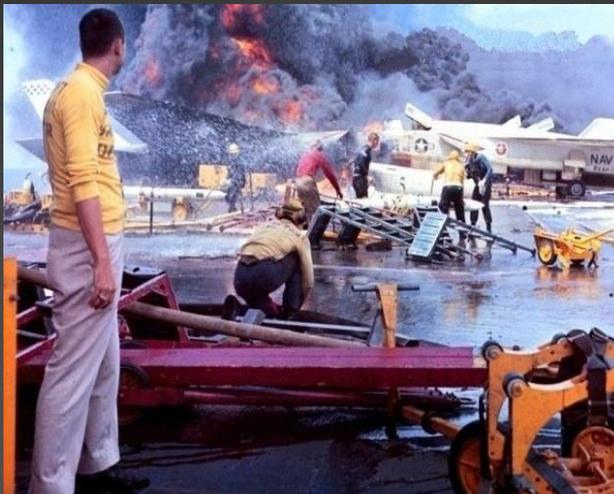
Photo of the fire aboard the U.S. Navy aircraft carrier *USS Forrestal* (CVA-59) on 29 July 1967 off Vietnam.

Source: *USS Forrestal* 1967 cruise book



USS Forrestal

PatSys



Crew removing ammunition



RA-5Cs burning



Nose of a North American RA-5C Vigilante plane destroyed in the USS Forrestal (CVA-59) fire, 1967.



Bomb hole in flight deck of USS Forrestal after fire, Aug. 1967



Firefighters putting out fire on USS Forrestal



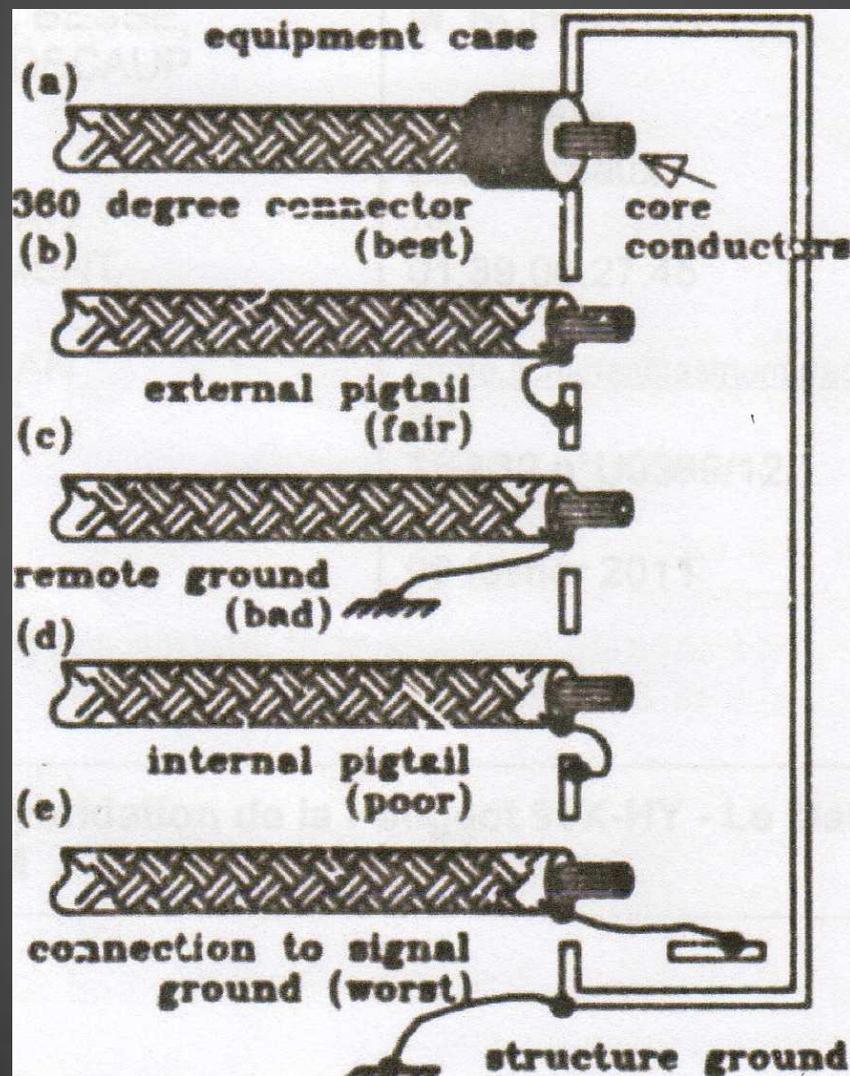
Crewmembers in front of what remains of a row of F-4B Phantoms that were parked along the starboard stern quarter



Journées d'Andé - 9 & 10 juin 2012



- ❑ C'est facile, c'est pas cher...



... et ça peut éviter de perdre gros



Lessons learned

(3) Constant and diligent attention must be paid to the EMC of spacecraft systems by assuming that every new system is different and past assumptions on susceptibility to EMI should be carefully reconsidered and thoroughly retested.

(4) Any spacecraft anomaly caused by EMI is serious. Although an anomaly by itself might appear trivial, it in combination with a certain series of events may cause irreparable damage to a space mission or experiment.

(5) HIRF can have serious effects on advanced electronic systems. The consequences of EMI on automated electronic systems used for critical functions are increasingly serious.

USS Forrestal, 1967 : Prise de conscience de la dangerosité des rayonnements hyperfréquences de puissance (HPM: High Power Microwaves ou MFP : Microondes de Forte Puissance)

(6) Use of COTS hardware potentially increases EMI risks.

**HIRF: High Intensity Radiated Fields
COTS: Commercial OffThe Shelf**

AIAA 95-3654

Failures and Anomalies Attributed to Electromagnetic Interference

Richard D. Leach, Computer Sciences Corporation, Huntsville, Alabama

AIAA 1995 Space Programs and Technologies Conference – September 26-28, 1995/Huntsville, AL

This document is the property of PATSYS. It shall not be communicated to third parties without prior written agreement. Its content shall not be disclosed.



Les difficultés inhérentes à l'Electromagnétisme... ou la difficulté de respecter les règles du jeu

- ❑ **EMI leaves no fingerprints :**
Guerre électronique propre et sournoise
- ❑ **Le déni**
Echecs imputés à des problèmes mécaniques
- ❑ **La difficulté de croire (le « mystère des ondes »)**
« EM means ElectroMagnetic and not Electrical Mystery »
- ❑ **La difficulté de légiférer**



« Many good people are in place, but too few appreciate that in the end physics determines how waves propagate, not policies and procedures. »

Dr Randy J. Jost





Les difficultés inhérentes à l'Electromagnétisme... ou la difficulté de respecter les règles du jeu

- ❑ **EMI leaves no fingerprints :**
Guerre électronique propre et sournoise
- ❑ **Le déni**
Echecs imputés à des problèmes mécaniques
- ❑ **La difficulté de croire (le « mystère des ondes »)**
« EM means ElectroMagnetic and not Electrical Mystery »
- ❑ **La difficulté de légiférer**



*En cas d'incendie,
il est interdit
parce que dangereux
d'utiliser l'ascenseur.*

**« Many good people
are in place, but too few
appreciate that in the
end physics determines
how waves propagate,
not policies and
procedures. »**

Dr Randy J. Jost



Les difficultés inhérentes à l'Electromagnétisme... et à tout le reste

- « Il faut se rappeler qu'il n'y a rien de plus difficile à entreprendre, de plus dangereux à diriger ou de plus délicat à réussir que la création et la mise en place d'un nouveau système ; car celui qui s'y engage a pour ennemis tous ceux qui profitent de l'ordre ancien, et n'a que de tièdes défenseurs en ceux qui profiteraient du nouveau. Cette tiédeur vient en partie [...] de l'incrédulité des hommes **qui ne croient point véritablement aux choses nouvelles s'ils n'en voient déjà réalisée une expérience sûre.** »

Machiavel, 1532

Changing things in an established culture is like changing things in a cemetery ...
... you don't get a lot of help from the residents.



Dr Randy J. Jost
Space Dynamics laboratory



Synthèse (1) : les 12 principes directeurs d'Andrée Piecq

Journées d'Andé – 9 & 10 juin 2012

Les 12 Ppes directeurs d'A PIECQ	Systèmes militaires et spatiaux	Systèmes de Systèmes : SdS	Pioneer	Blackhawk	Sheffield	Atlas Centaur 67	Forrestal
Les Systèmes et Sous-Systèmes	Voir Architecture fonctionnelle/organique	Voir Architecture fonctionnelle/organique					
Les Membres	Equipements, Composants	Systèmes, Equipements, Composants					
La Finalité	Mission	Mission					
La Totalité (émergences)	Perf. du système que n'a pas l'ensemble des éléments pris séparément	Perf. du SdS que n'a pas l'ensemble des éléments pris séparément					
La Circularité (Réciprocité)	Interactions bidirectionnelles	Interactions bidirectionnelles					
La Réception des Informations	Echanges d'énergie, de matière, de données	Echanges d'énergie, de matière, de données, de consignes					
L'Emission des Informations	Echanges d'énergie, de matière, de données	Echanges d'énergie, de matière, de données, de consignes					
Les Frontières ou Lieux de contacts et d'échanges	Interfaces (matérielles, immatérielles)	Interfaces (matérielles, immatérielles)					
Les Règles de fonctionnement	Efforts gén ^x , Gabarits, Protocoles, Tolérances, Normes	Interopérabilité, Normes					
La Rétroaction (régulations, réactions >0 ou <0)	Asservissements, Compromis	Rétroactions, Compromis					
L'Homéostasie (tendance au maintien d'une stabilité interne : « équilibrage »)	Par définition (<i>engineered systems</i>)	Par définition (<i>engineered systems</i>)					
L'Equifinalité (CI ou causes ≠ : ⇒ mêmes résultats)	Absence de solution unique	Absence de solution unique					



Conclusion

- ❑ Des raisons quand on joue et qu'on perd gros :
 - ❑ Méconnaissance des enjeux (= ici les risques avec leurs probabilités et gravités)
 - ❑ Manque d'atouts
- ❑ « Ça ne peut pas arriver », « Ça ne peut pas être si grave »
- ❑ « Ça n'existe pas » : ignorance, déni de la réalité, refus de, ou difficulté à accepter, la nouveauté
- ❑ Ingrédients classiques : négligence des problèmes d'interfaces, des « règles de fonctionnement », défaut de logique collaborative, « détail qui tue »...
- ❑ Importance du facteur humain : l'homme est une partie du système (niveau « organique »)
- ❑ ... mais s'il n'y avait pas d'homme, il n'y aurait pas de jeu.



« If everything is under control you are just not driving fast enough. »

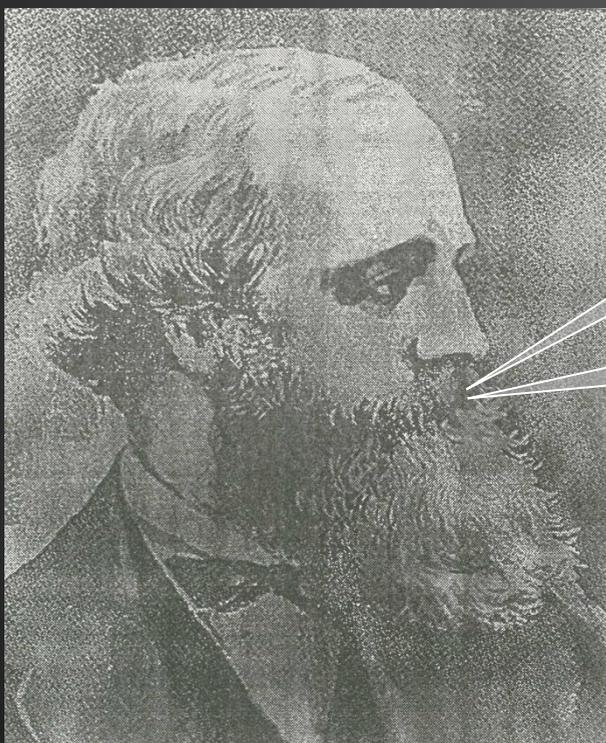
Stirling Moss, former car racer (born in 1929)

« Rework is not bad luck, but risk to manage »

**Edmond Tonnelier & Olivier Terrien ,
Models and Metrics, An Experience Report at Thales Airborne Systems,
Complex Systems Design & Management, Paris, Dec 7-9, 2011**



Journées d'Andé – 9 & 10 juin 2012



James Clerk MAXWELL
(1831 – 1879)

**Thank you
for attention**

Any questions ?



Bibliographie

- ❑ Electronic Systems Failures and Anomalies attributed to Electromagnetic Interference
 - *R.D. Leach and M.B. Alexander, Editor – NASA Reference Publication 1374, July 1995*
- ❑ 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*
- ❑ 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*
- ❑ Trade-offs between EM hardening and general design of Launch Vehicles
 - *Patrick Farfal, André Schaffar, EADS SPACE Transportation - EUCASS, Moskow 4-7 July 2005*
- ❑ Atlas Centaur (AC-67) Lightning Strike Mishap 1987
 - *Brian O'Connor, Chief, Safety and Mission Assurance – Leadership VITS Meeting, March 5, 2007*
- ❑ 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*
- ❑ Professional Development Short Course on: Introduction to EMI
 - *Instructor: Dr. William G. Duff, Applied Technology Institute, Riva, Maryland*
- ❑ Professional Development Short Course on: Practical EMI Fixes
 - *Instructor: Dr. William G. Duff, Applied Technology Institute, Riva, Maryland*
- ❑ EMC for Product Designers, Third edition
 - *Tim Williams, Newnes, 2001*



Résumé

❑ JEUX, ENJEUX ET ERREURS « SYSTÈME » : LEÇONS TIRÉES DES MANQUEMENTS AUX RÈGLES DE COMPATIBILITÉ ELECTROMAGNÉTIQUE

Journées d'Andé 9-10 juin 2012

- ❑ La compatibilité électromagnétique est l'aptitude d'un système à assurer sa mission en dépit de l'environnement électromagnétique auquel il est soumis ou qu'il crée.

Les manquements au respect des exigences de compatibilité électromagnétique, ou les défauts de conception électromagnétique d'un système, peuvent conduire à des incidents ou des accidents parfois spectaculaires dans certaines conditions d'emploi.

A partir d'exemples réels, répertoriés et renseignés, dans les domaines militaire et spatial, sont analysés les manquements aux règles de compatibilité électromagnétique vus comme un « jeu » résultant d'une prise de risque inconsidérée, parfois d'une négligence coupable, par oubli d'interactions qui sont l'essence même du système ou de son immersion dans l'environnement.

Comme dans le jeu, les enjeux et conséquences sont parfois sans commune mesure avec les « mises », à savoir les mesures préventives qui auraient dû être prises afin d'éliminer les causes racines.

Outre les leçons tirées de ces événements, un classement des manquements est proposé, à la lumière des grands principes directeurs des systèmes et des recommandations classiques en matière d'ingénierie système.

Patrick FARFAL

- ❑ PatSys – Société par Actions Simplifiée à associé Unique
25 rue Jean Leclaire 75017 PARIS - France
Phone/Fax:+33 (0)1 42 52 89 60 - Mob.:+33 (0)6 72 14 82 40
Email: pfarfal.patsys@sfr.fr



□ Back-up

Journées d'Andé – 9 & 10 juin 2012



Sikorsky UH-60 BlackHawk helicopter



❑ **BlackHawk UH-60**

- Hélicoptère de transport tactique (Army) « *The Army most advanced helicopter to carry troops to the battle* » ; coût d'un appareil : 6 M\$ (1987)
- Variante : SH-60 SeaHawk (Navy) pour lutte anti-sous-marine

❑ **La situation**

- Vol à proximité d'un émetteur radio (Allemagne de l'Ouest, 1987)
- Commandes de vol hydrauliques à entrées numériques (*fly-by-wire*)

❑ **Les faits**

- Alarmes et fausses indications dans le cockpit, variations d'attitude intempestives

Mais :

- De 1981 à 1987, 5 crashes après vol à proximité d'émetteurs radio (altitude < 1000 pieds) : 22 morts, des blessés (sur 29 accidents ayant causé 48 morts)
- Maintien des appareils au sol par l'Army après un accident en Alabama (3 morts) en 1986, puis reprise des vols au bout de 49 jours ; déni du problème (3 accidents sur 5 attribués par l'Army à des problèmes mécaniques, 2 officiellement non expliqués) malgré l'avis des experts (50 % de chances de nouvel accident dans l'année) ; « *[shielding] would be very costly* »
- Pourtant, selon un ancien major de l'Army : « *If the radiation we're putting up in peacetime – microwaves, antennas, TVs – is causing the aircraft to flutter and wobble, then [...] we are going to have problems in wartime.* » (allusion à une *radio-wave weapon* soviétique) exploitant la vulnérabilité



Sikorsky UH-60 BlackHawk helicopter



□ La cause

- Système de stabilisation d'attitude affecté par des interférences créées par des HIRF
- Signaux numériques du *fly-by-wire* hautement susceptibles aux HIRF
- Hélicoptères déclarés par le constructeur Sikorsky conformes à chacune des exigences : « *shielded to each service's requirements* »
- A la conception initiale du *BlackHawk*, l'appareil n'était pas censé accomplir des missions à proximité de gros émetteurs

□ Le remède

- L'incident de 1987 a été l'élément déclenchant d'une investigation poussée (rapport du 8 novembre 1987 : « *Transmissions from radio antennas, radar and microwave towers can interfere with the wiring and electrical components of the Army's UH-60 Black Hawk helicopters and generate potentially devastating false commands* »)
- « *Far different approach* » de la Navy : interdiction à ses 14 premiers *BlackHawks* d'entraînement de s'approcher à moins de « *a significant number of miles* » (classifié) d'émetteurs
- Durcissement aux environnements EM rencontrés sur les navires pour les futurs *SeaHawks* : « *heavily shielded from electronic interference. They can now buzz radio towers with impunity* »
- En secours, réinitialisations (*resets*) du pilote

Utilisation du Système hors Environnement spécifié
(Erreur humaine)
Défaut d'interopérabilité
entre systèmes militaires et civils
EMI leaves no fingerprints



Apollo 12



CM: Command Module
 LCC: Launch Commit Criterion
 LM: Lunar Module
 SCE: Signal Conditioning Equipment
 SM: Service Module

□ Apollo 12 (AS-507)

- 6^e mission habitée et 2^e mission lunaire du programme Apollo (lanceur Saturn V + CM-108 « Yankee Clipper », SM-108, LM-6 « Intrepid »)

□ La situation

- Peu après le décollage (14 novembre 1969)

□ Les faits

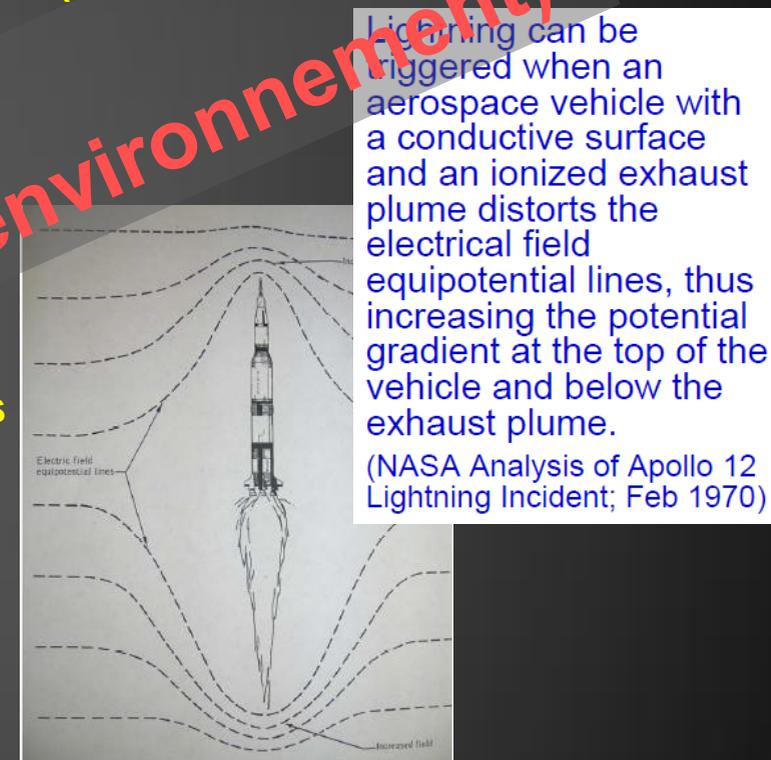
- 2 foudroiements : 2 km (36,5 s) et 42 km (52 s)
- A 36,5 s déconnexion des piles à combustible, nombreuses alarmes, perte définitive de 9 capteurs de température et de pression, défaillance temporaire (60 s) du SCE,
- A 52 s perte transitoire d'inertialité
- Succès de la mission (pose du LM à 177 m du point prévu)

□ La cause

Tir en conditions pré-orageuses, insuffisantes pour un déclenchement spontané de la foudre mais suffisantes compte tenu du facteur d'amplification lié à la présence du véhicule + panache (phénomène prédit dès 1950 par H.W. Kasemir)

□ Le remède

Apollo 12 was struck twice by lightning on November 14, 1969, resulting review of applicable atmospheric science and adoption of five LCCs related to lightning, including one for triggered lightning.





Atlas Centaur 67

Impacts foudre et arcs (d'après l'examen des débris)

Journées d'Andé - 9 & 10 juin 2012

