
Compatibilité ElectroMagnétique

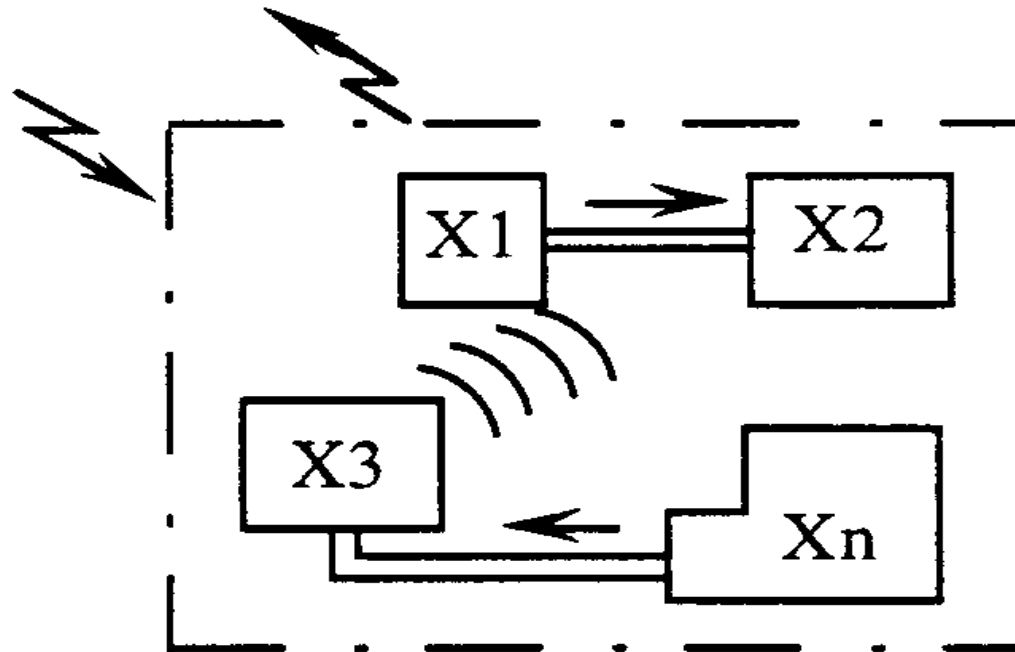
La Chasse aux Démons de Maxwell

De la magie noire...

...à la Physique Amusante.



SOURCES - COUPLAGES - VICTIMES



***Livrées à elles-mêmes, les choses vont de mal en pis.
Toute action humaine pour y remédier accélère le processus.***

Murphy, 1^{ère} loi

Méthode d'analyse de la CEM



- | | | |
|---|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> • Foudre
10 à 200 kA / 1 μs / 100 μs • IEMN
50 kV/m / ns / 100 ns • DES
10 kV / 1 ns / 100 ns • Emetteurs hertziens
W à MW / MHz à GHz • Générateurs HF puissants
0,1 à 100 kW / kHz à GHz • Logiques Rapides
V / 10 mA / ns / nW • Alimentations statiques
100 mV / 10 mA / MHz • Charges Inductives
kV / 10 A / ns / 100 kHz • etc... | <ul style="list-style-type: none"> • Impédance commune
I \rightarrow Z \rightarrow u • Carte à châssis
U \rightarrow C \rightarrow i • Champ à câble
E \rightarrow Fil \rightarrow i • Champ à boucle
H \rightarrow Boucle \rightarrow u • Diaphonie (s)
I \rightarrow M \rightarrow u
et/ou U \rightarrow C \rightarrow i • Propagation
Filaire ou Hertzienne + Ecrêtage
Varistance, éclateur, zenzer... + Filtrage
Passe-bas, passe-bande... + Blindage
Câbles et coffrets + Lignes
Adaptation d'impédance | <ul style="list-style-type: none"> • Circuits analogiques
Perturbations entretenues • Circuits numériques
Perturbations impulsives • Récepteurs optiques
Champ électrique • Récepteurs hertziens
Dans la bande de réception • Dispositifs pyrotechniques
Risques d'allumage... • Etres vivants
Puissance efficace de l'onde • etc... |
|---|--|---|

Immunité : ordres de grandeur

Les ordres de grandeur ci-dessous s'appliquent à tout type d'équipement hormis aux récepteurs radio dans leur bande qui sont bien plus sensibles.

PERTURBATION	Aucun problème	Problèmes...
Champ E HF * De 10 à 1000 MHz	0,3 V/m à la pire fréquence	10 V/m à la pire fréquence
Champ H Fréquence Réseau	0,3 A/m (TRC, microscope...)	1000 A/m matériel "standard"
Courant MC HF * sur câble d'alimentation	10 mA à la pire fréquence	300 mA à la pire fréquence
Courant MC HF * sur câbles signaux	0,3 mA (ana.) (3 mA numérique)	100 mA (1 A câble blindé)
Tension parasite * RMS sur alimentation	0,3 V (mauvais régulateur)	10 V à la pire fréquence
Tension MC HF * en entrée électronique	3 mV (bas-niveau) (300 mV numérique)	10 V (sans opto) (300 V avec opto)
Courant de fuite** Conducteur vert / jaune	1 A (sauf Différentiels)	100 A (vidéo + champ H)

* Multiplier la valeur permanente RMS par environ 300 (typiquement de 100 à 1000) pour la valeur d'une impulsion crête "équivalente".

** Compter 1 A eff de courant de fuite par MVA de puissance installée (en industrie) et 10 A eff / MVA pour des matériels électroniques.

Les couplages



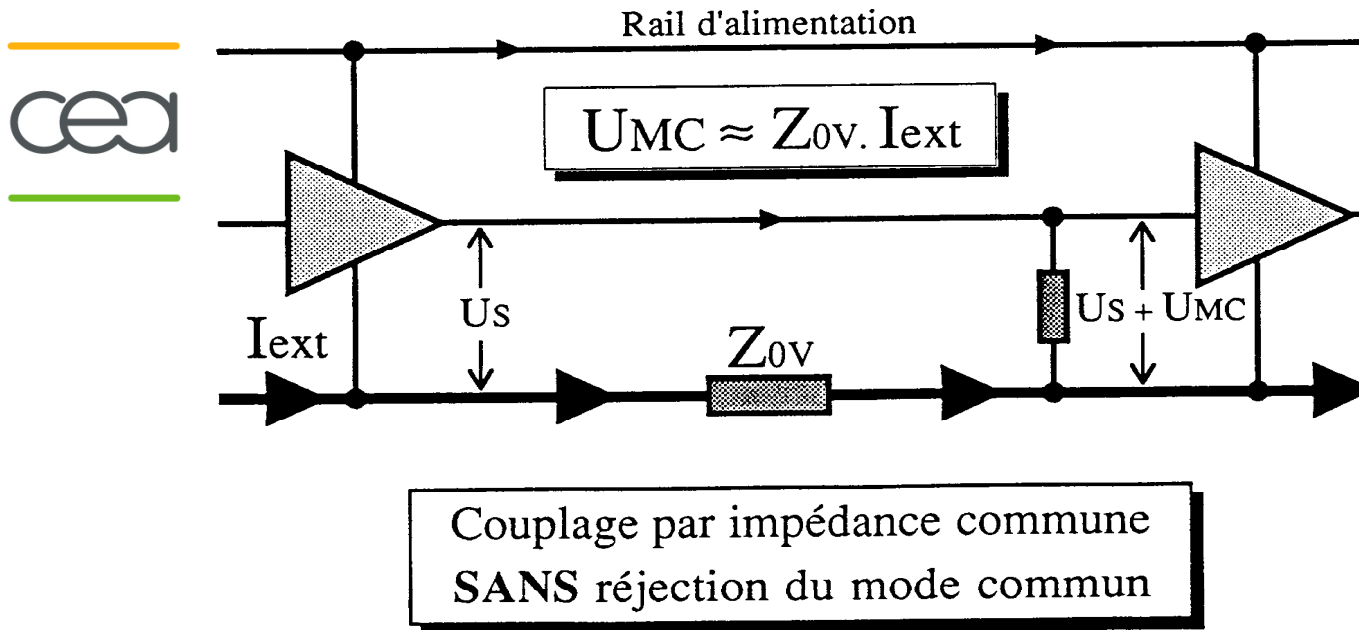
- IMPEDANCE COMMUNE
- CHAMP A BOUCLE

Si plusieurs pannes peuvent survenir dans un système et interagir, celle qui arrivera en premier sera celle qui :

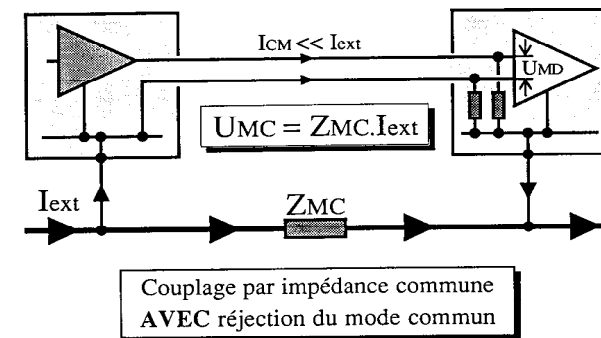
- causera le plus de dégâts,***
- entraîne en cascade la séquence la plus désastreuse d'autres pannes***

Murphy, 2^{ème} loi

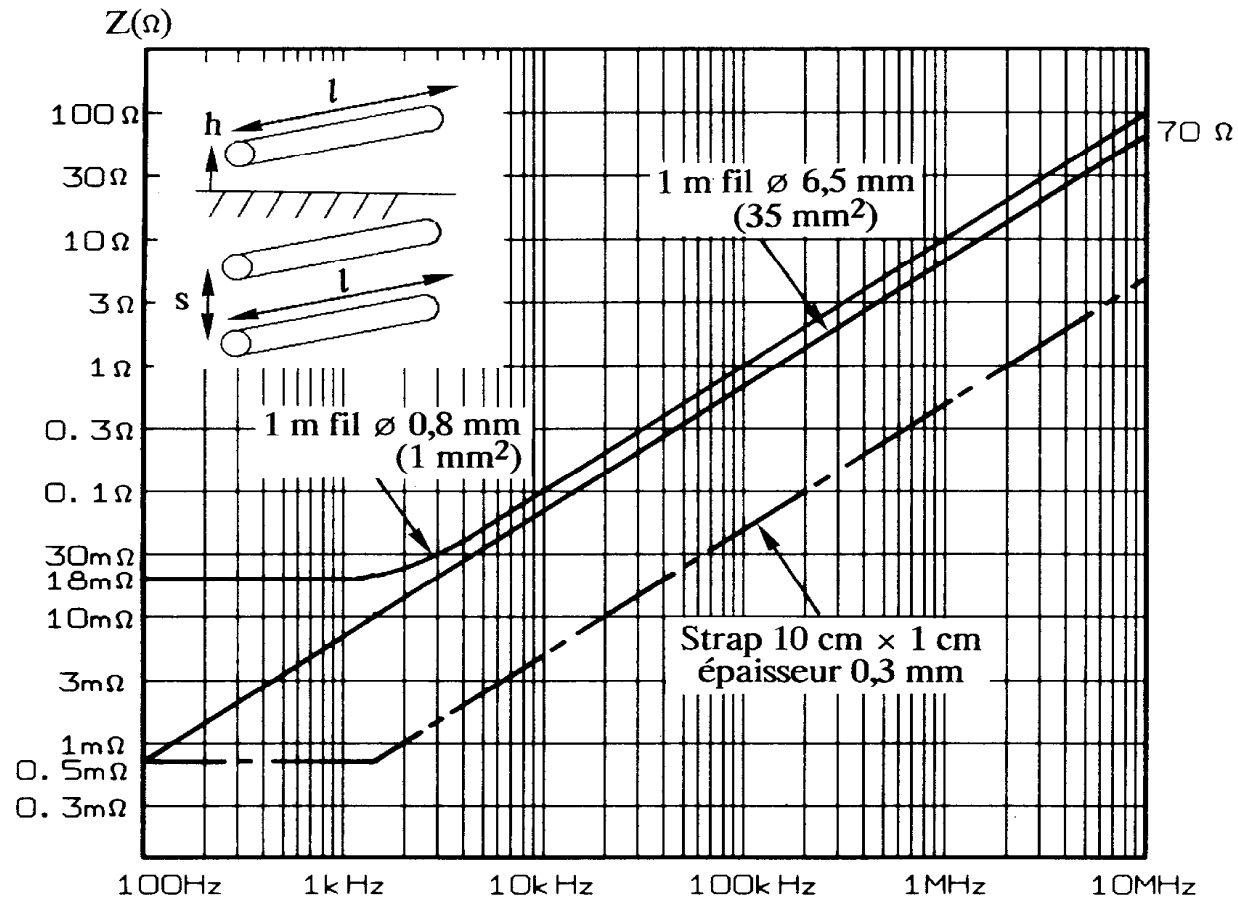
Principe du couplage par impédance commune



Parasitages mutuels de circuits utilisant les mêmes alimentations et mêmes retours



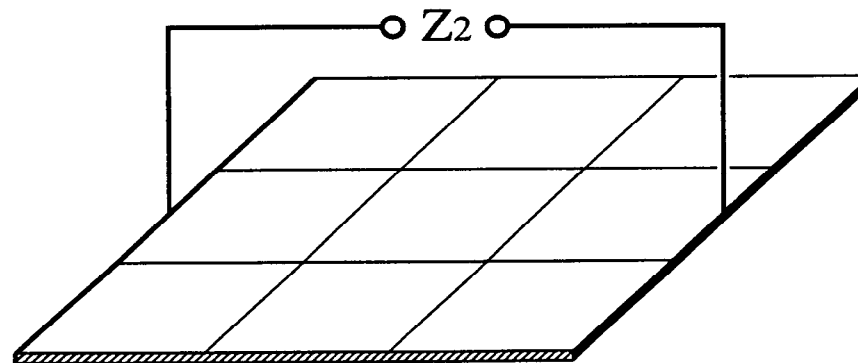
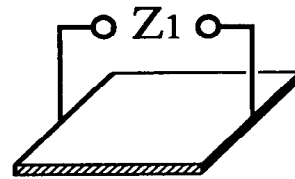
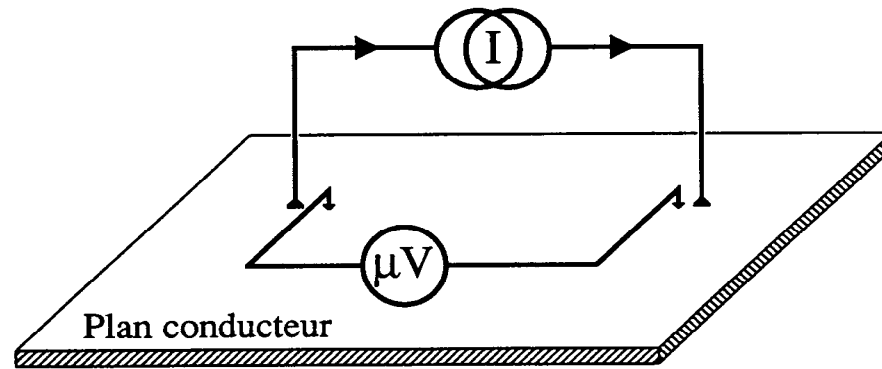
Impédance d'un fil



Impédance typique de conducteurs en cuivre pour $h > l$ ou $s > 2l$

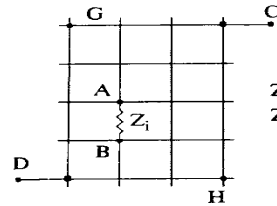
Impédance d'un plan de masse

cea



$Z_1 = Z_2 = Z_{\square}$: Impédance par maille

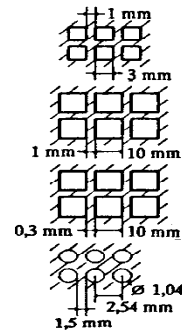
Impédance de grilles métalliques



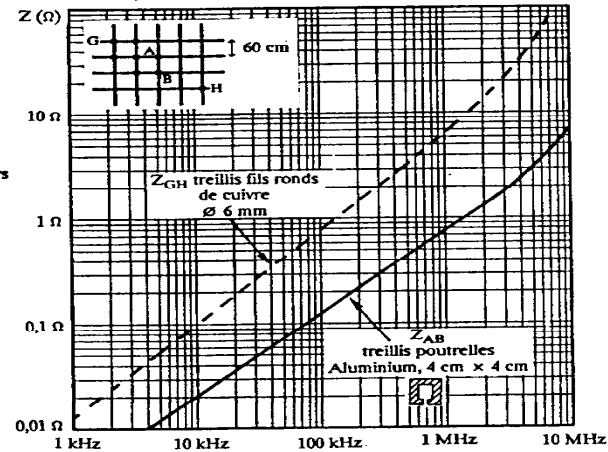
Z_{AB} (Minimum) $\approx 0,5 Z_i$ (asymptote)
 Z_{GH} (Maximum) $\approx 3,4 Z_i$

Valeurs pour cuivre 35 μm (1 oz.)

F	DC-10 kHz	100 kHz	1 MHz	10 M	100 M	300 M	1 GHz
Z_{AB}	0,85 m Ω	1,08 m Ω	7,5 m Ω	75 m Ω	0,75 Ω	2,25 Ω	7,5 Ω
Z_{GH}	5,8 m Ω	7,3 m Ω	51 m Ω	510 m Ω	5,1 Ω	15,3 Ω	51 Ω
Z_{AB}	2,8 m Ω	3,6 m Ω	22 m Ω	0,22 m Ω	2,2 Ω	6,6 Ω	22 Ω
Z_{GH}	19,4 m Ω	24,5 m Ω	146 m Ω	1,46 m Ω	14,6 Ω	43,1 Ω	146 Ω
Z_{AB}	5,7 m Ω	6,5 m Ω	28 m Ω	0,28 m Ω	2,8 Ω	8,4 Ω	28 Ω
Z_{GH}	38,4 m Ω	43 m Ω	190 m Ω	1,9 m Ω	19 Ω	57 Ω	190 Ω
Z_{AB}	0,5 m Ω	0,73 m Ω	5,5 m Ω	55 m Ω	0,55 Ω	1,65 Ω	5,5 Ω
Z_{GH}	3,4 m Ω	5 m Ω	37,4 m Ω	0,37 m Ω	3,74 Ω	11,2 Ω	37,4 Ω



Valeurs pour grilles de planchers de 60 x 60 cm



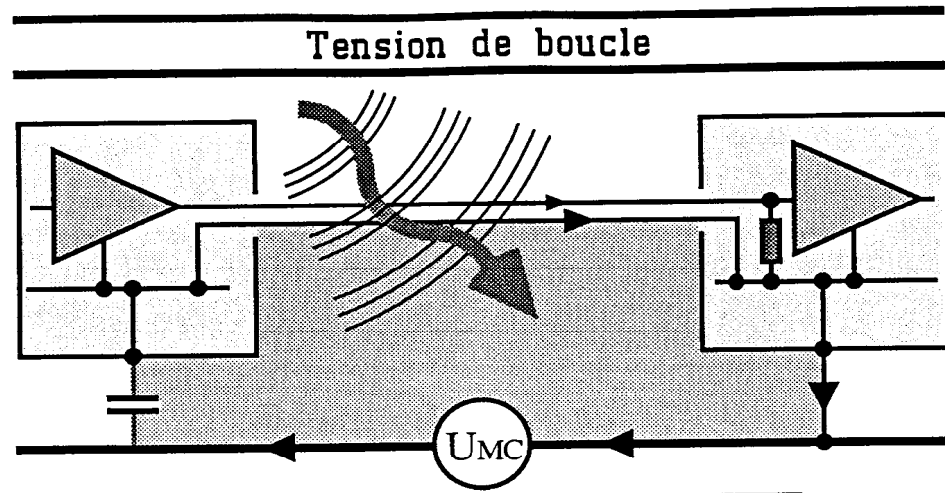
Impédance commune : Résumé



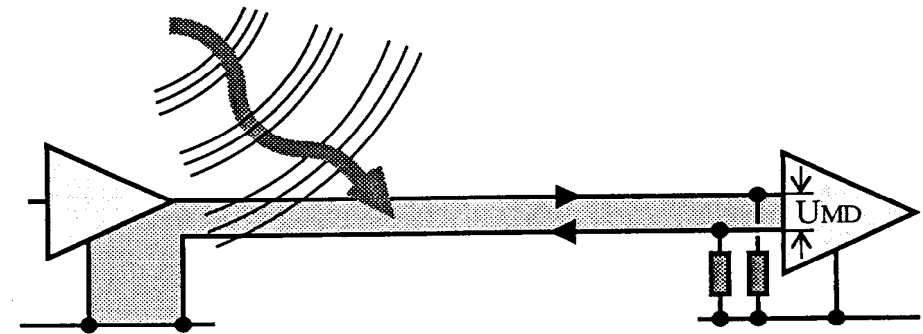
- Survient chaque fois que différents circuits se partagent des conducteurs en commun, principalement les masses
- S'aggrave quand la fréquence augmente car l'impédance est surtout selfique

REMEDE :

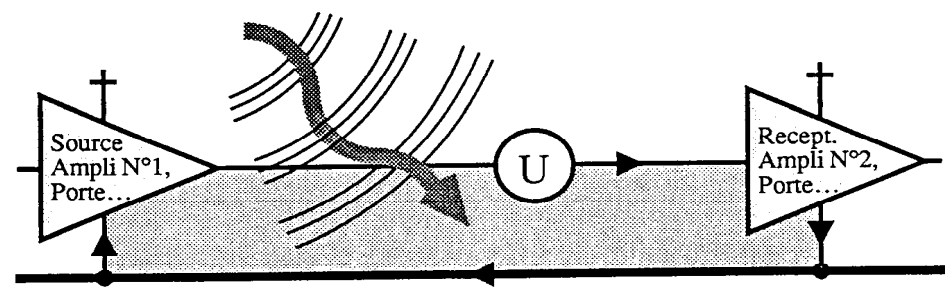
Conducteurs de masse plus larges, grilles ou plans



Couplage champ à boucle de masse



Couplage champ à boucle en M.D.



Couplage champ magnétique à carte

Couplage champ à boucle

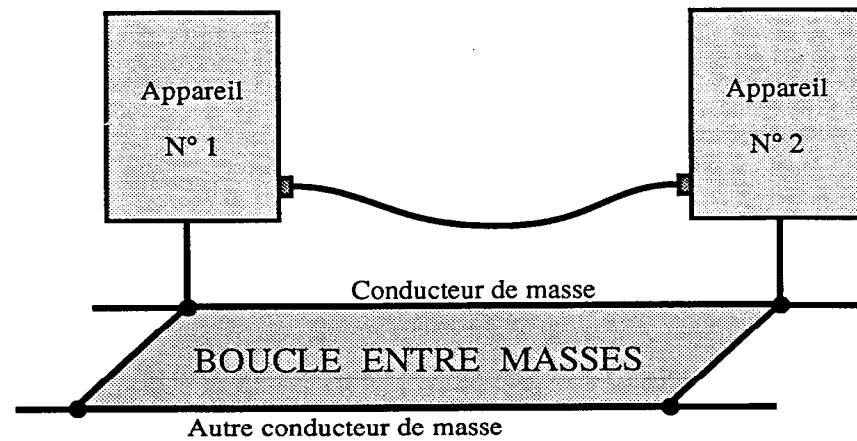


- Survient dans toute surface câble-sol, câble structure, etc... exposée à un champ variable
- La tension induite croît avec H , la fréquence et la surface de boucle
- La tension de mode commun existe même avec une boucle ouverte

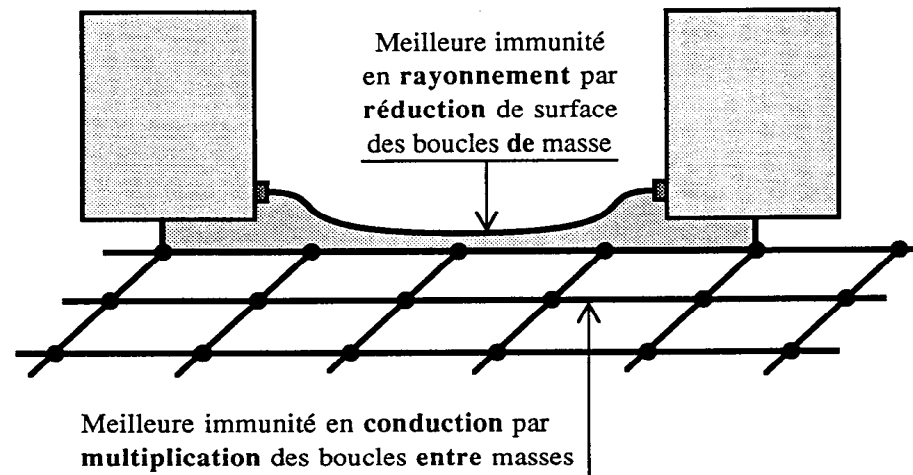
REMEDES :

- Diminuer les surfaces
- Chemin de câbles métallique
- Atténuation du champ

Définition et effets des boucles entre masse

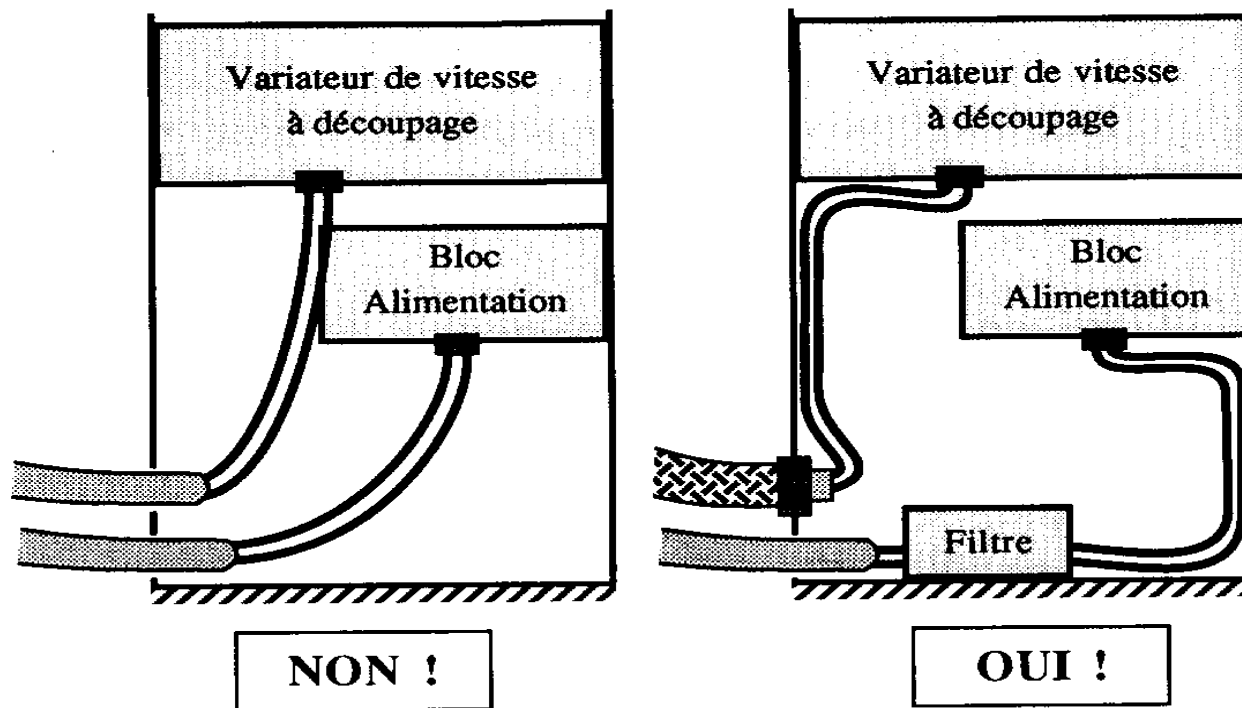


Il est possible d'éviter les boucles entre masses

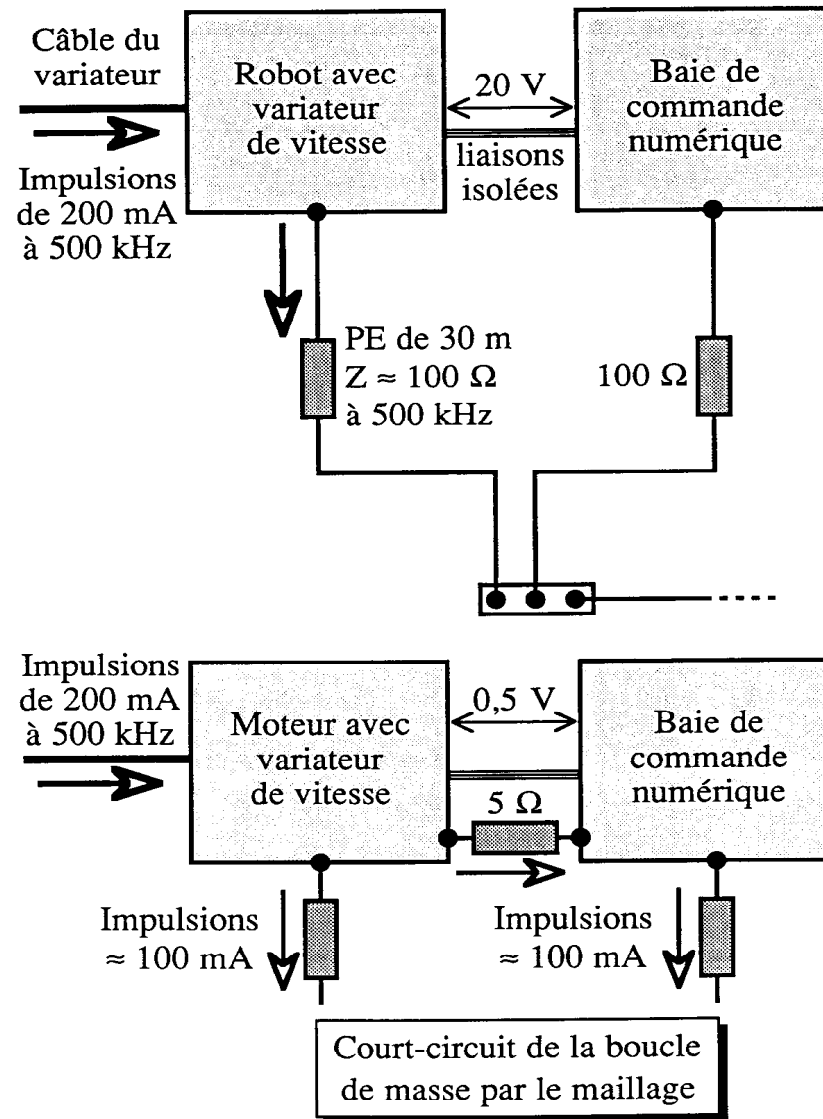


Les boucles ENTRE masses sont FAVORABLES !

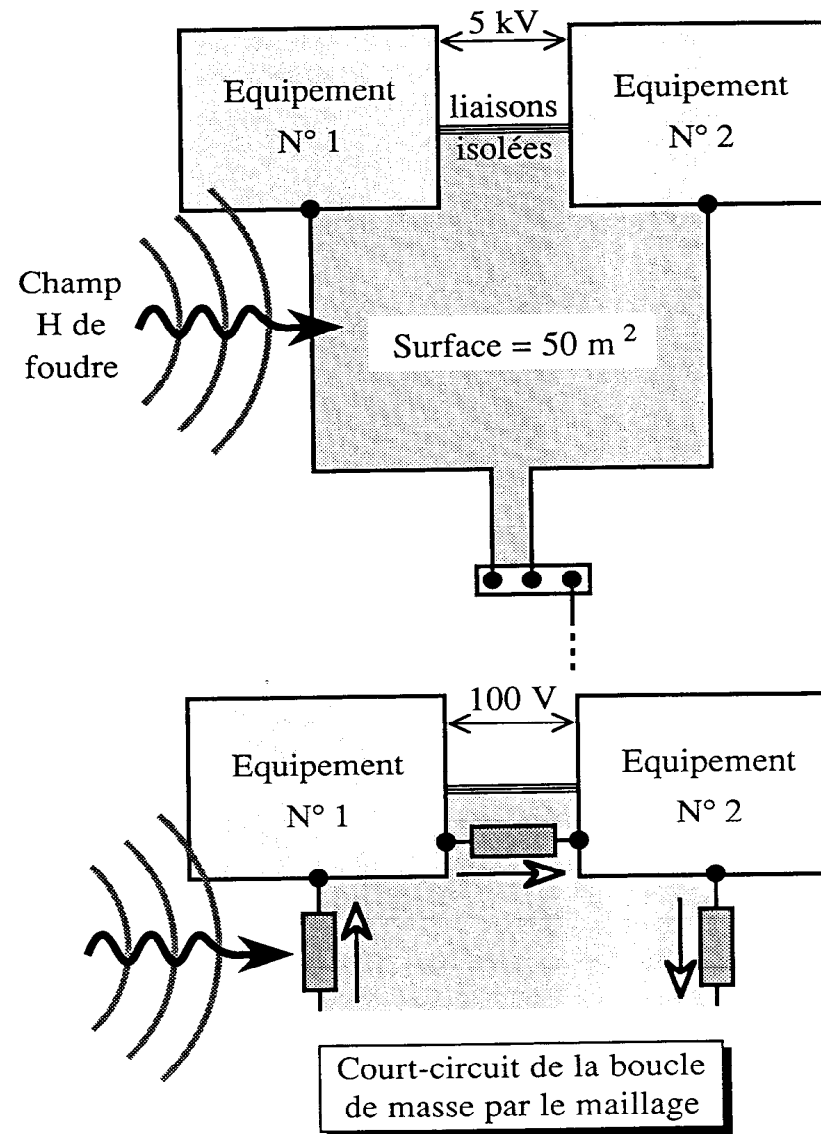
Câblage dans une baie



Masse en étoile = impédance commune



Masse en étoile = boucle de masse

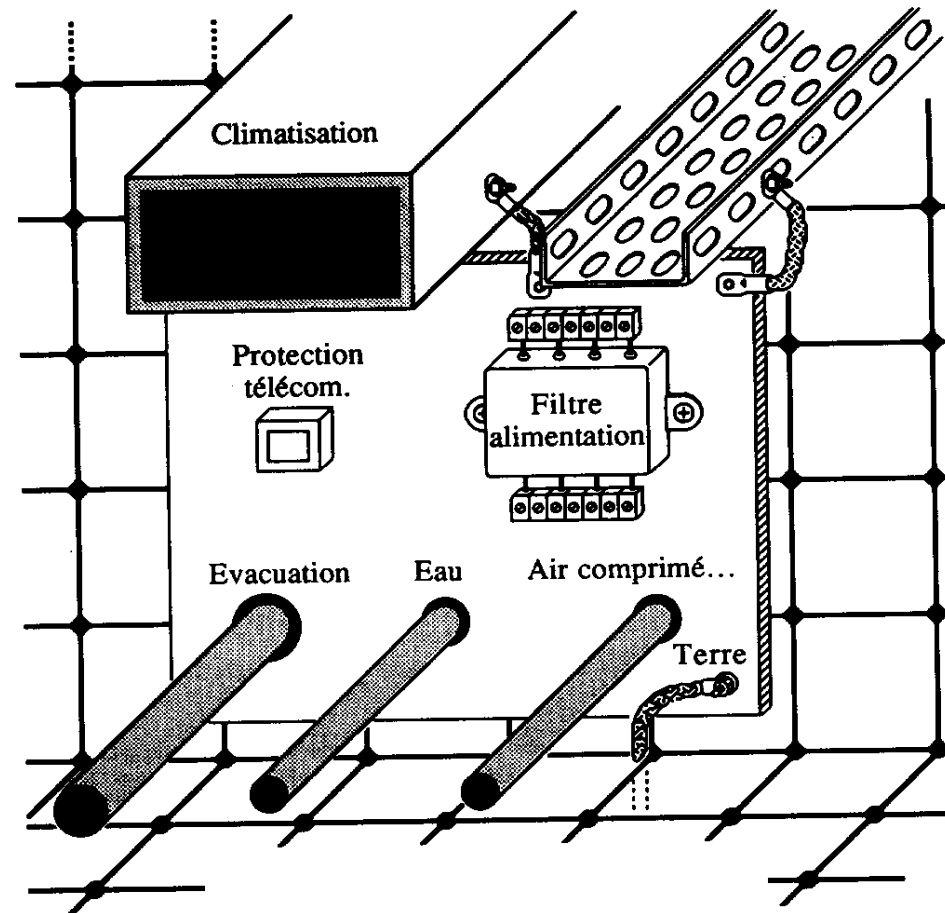


L 'EQUIPOTENTIALITE

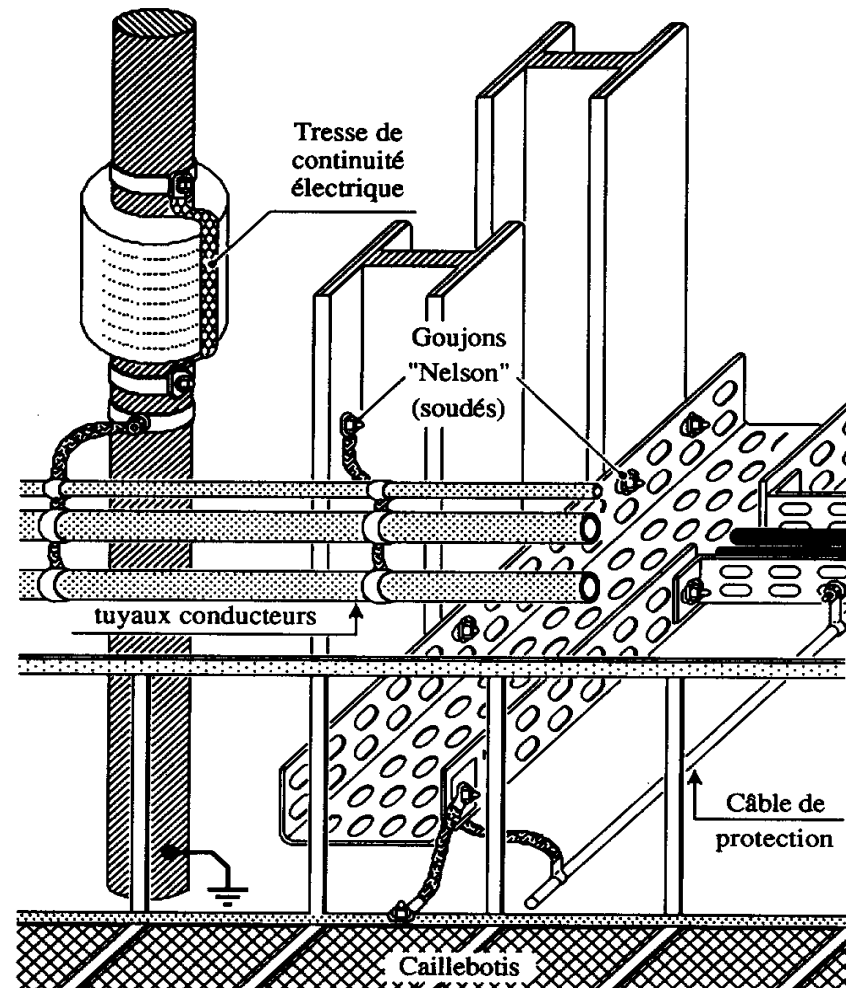
La biscotte tombe toujours du côté du beurre

Murphy, 3^{ième} loi

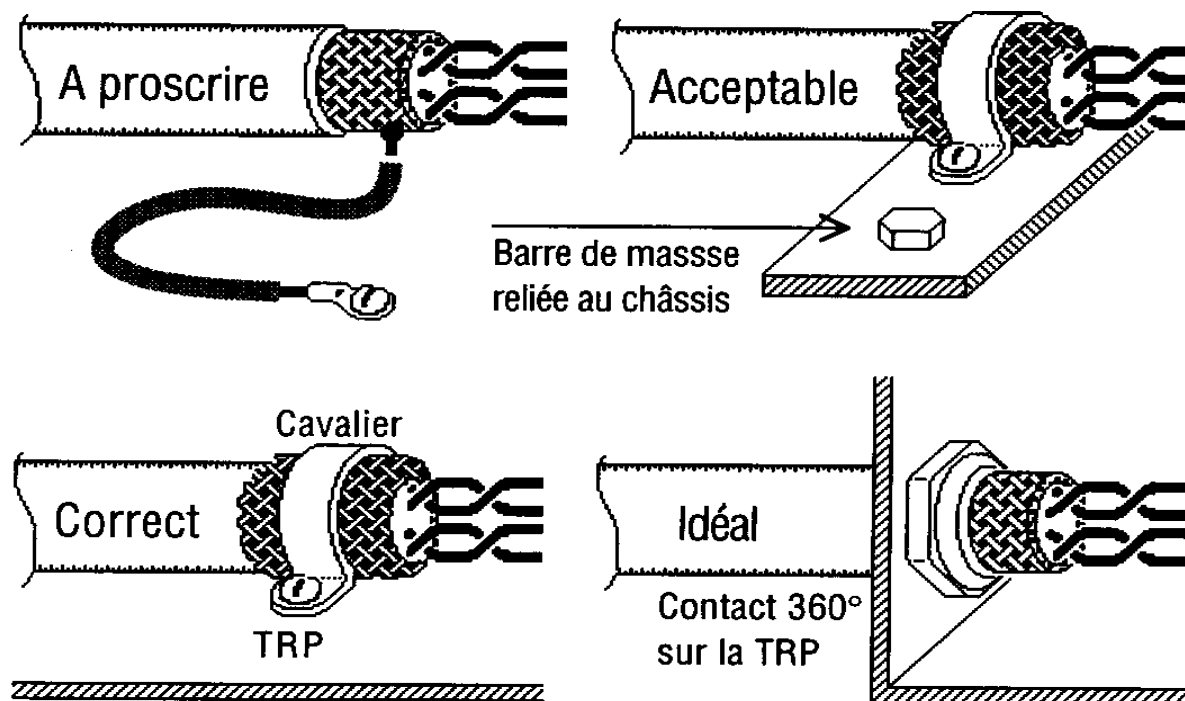
Plaque collectrice



Interconnexion des structures

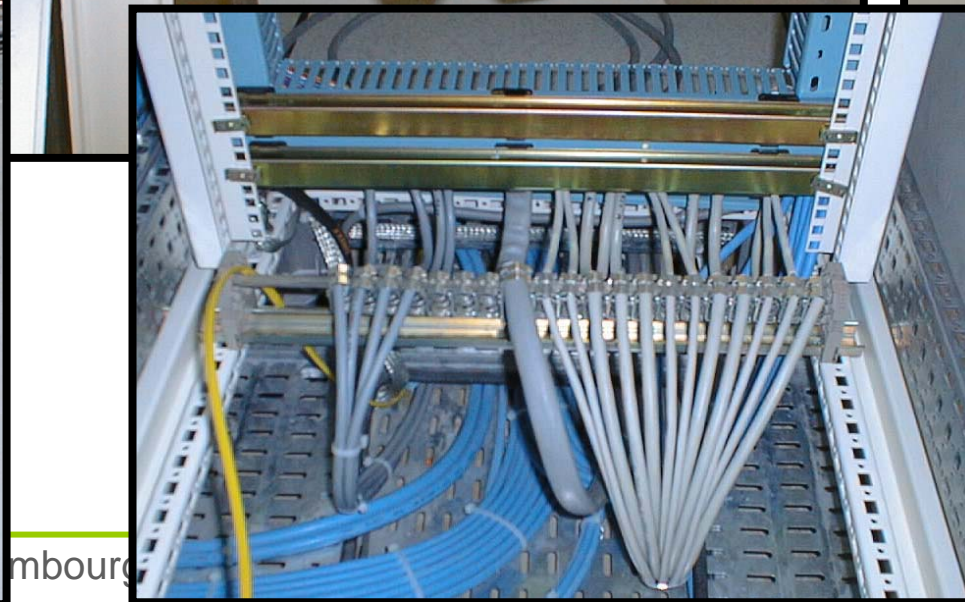
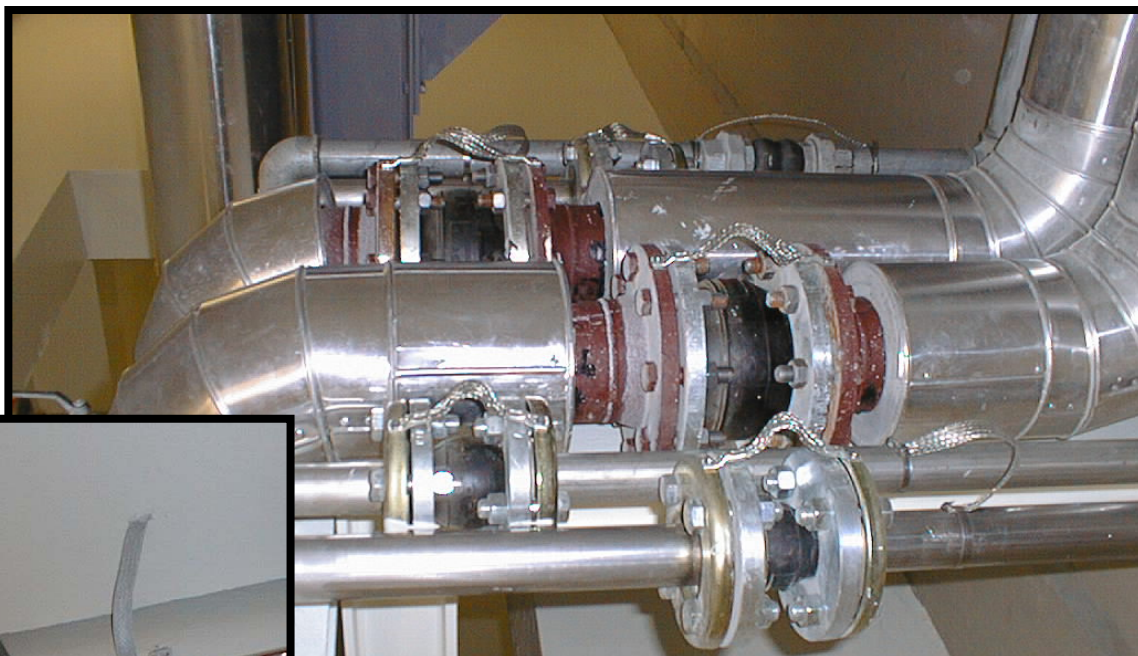


Raccordement câble blindé



Une bonne installation

cea



mbourg

Intervention sur une installation de Radiographie impulsienne

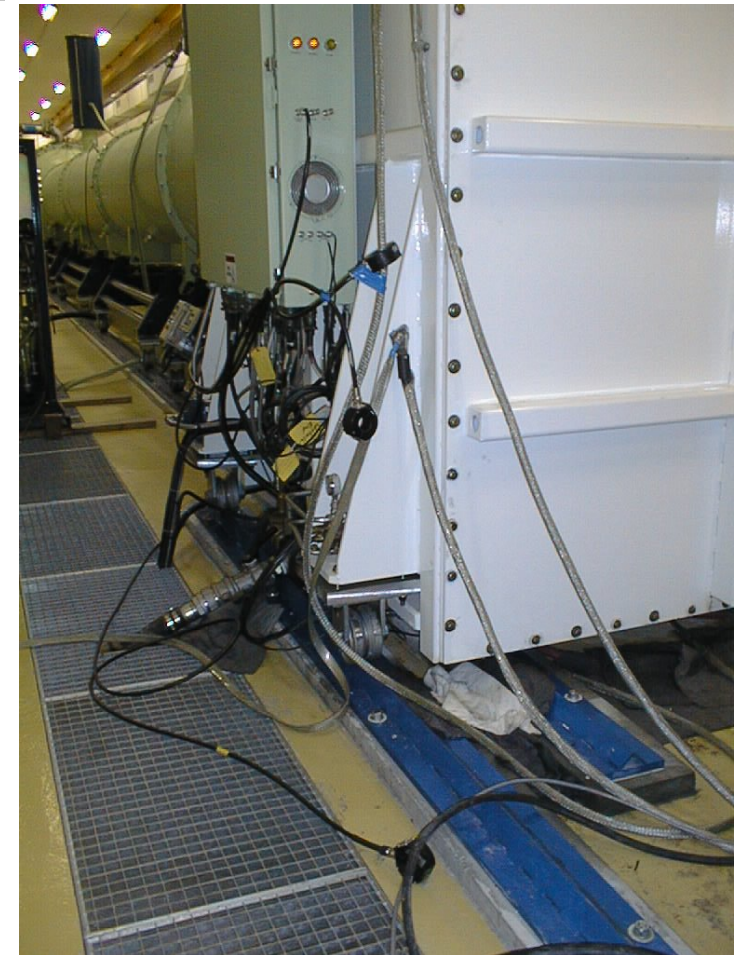
***Les chances que la biscotte tombe du côté du beurre sont
proportionnelles au prix de la moquette***

Gordon, complément à la 3^{ième} loi de Murphy

Machine de radiographie impulsionnelle

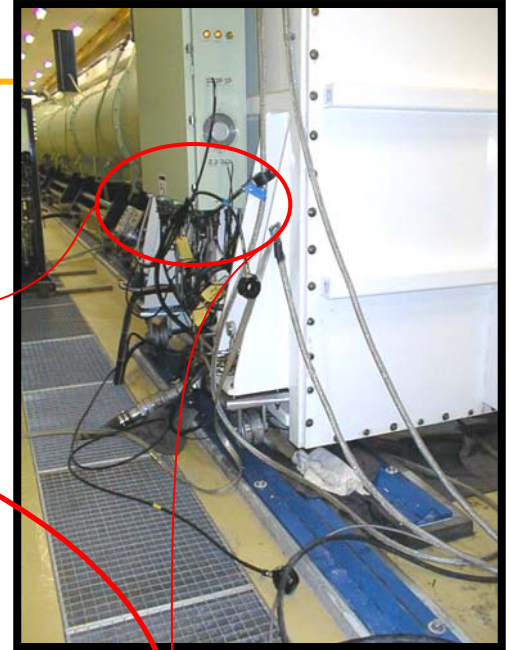
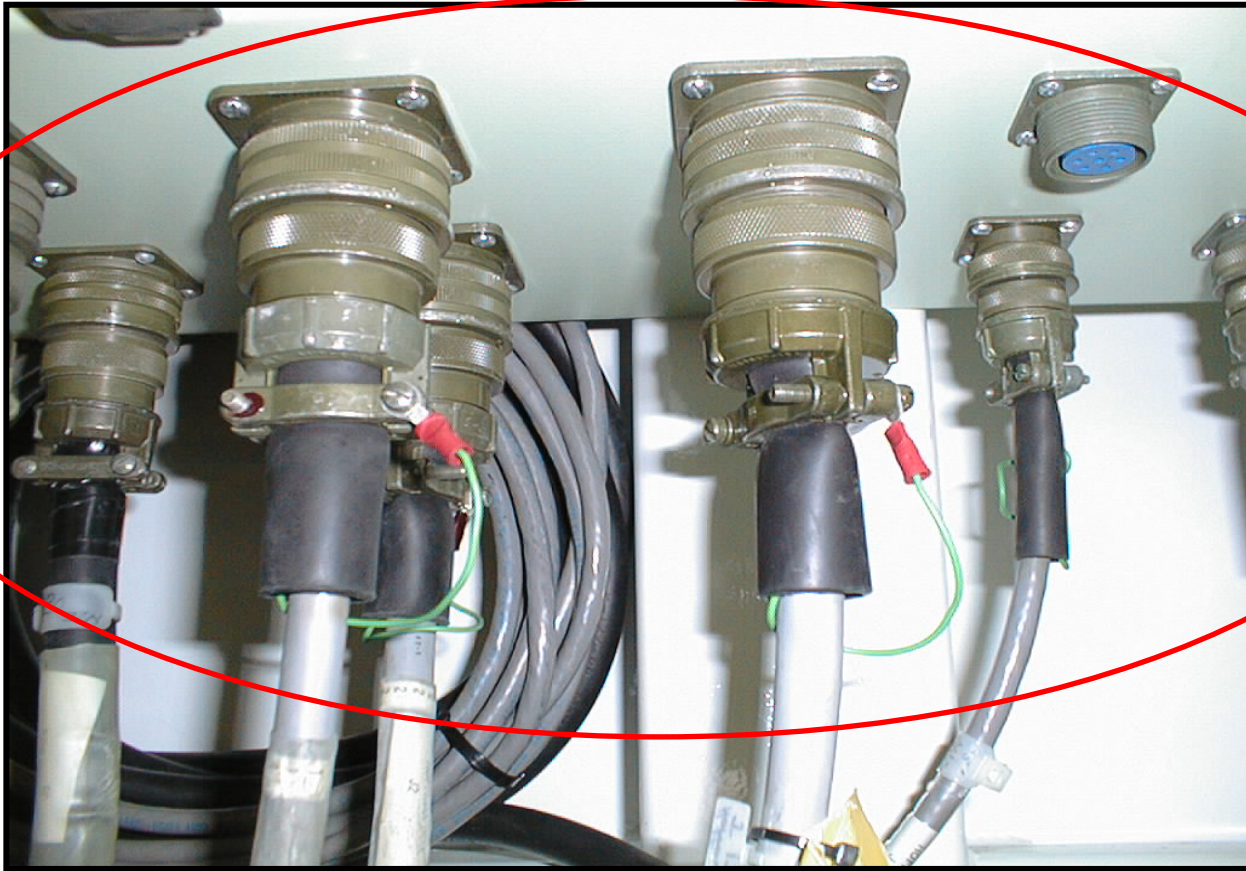


- Accélérateur d'électrons à induction
- 3500 A à 20 MeV
- Cible de conversion X
- Largeur impulsion 60 ns

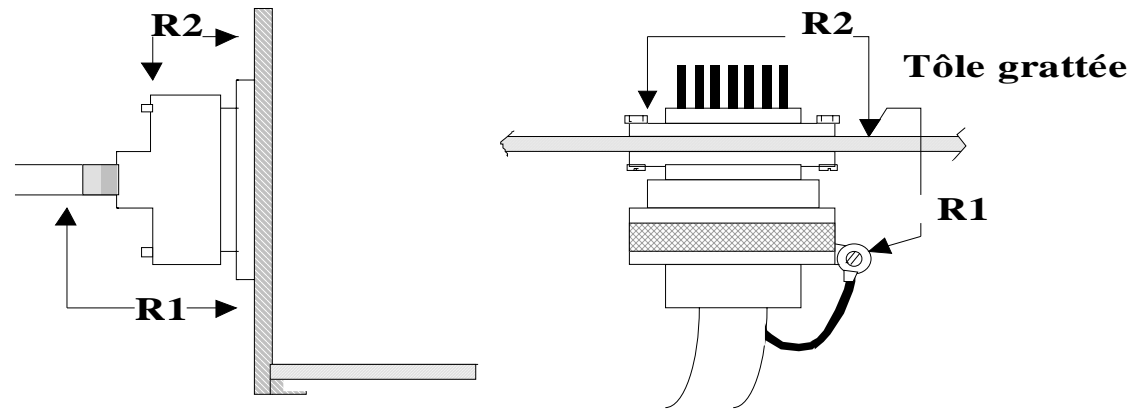




- **Intervention sur incident**
 - Alimentation 100 kV hors service
 - Destruction des composants E/S de la carte de pilotage de l'alimentation
- **Diagnostic**
 - Problème d'équipotentialité



Résistance des raccordements

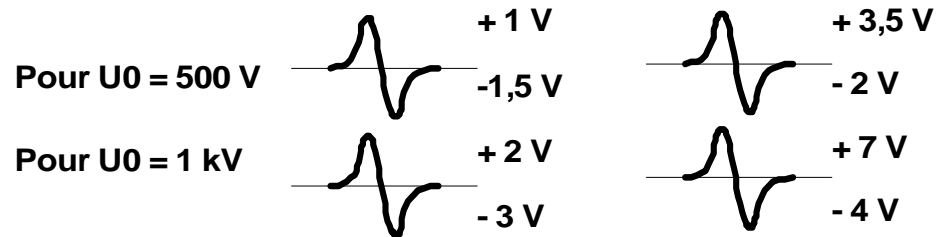
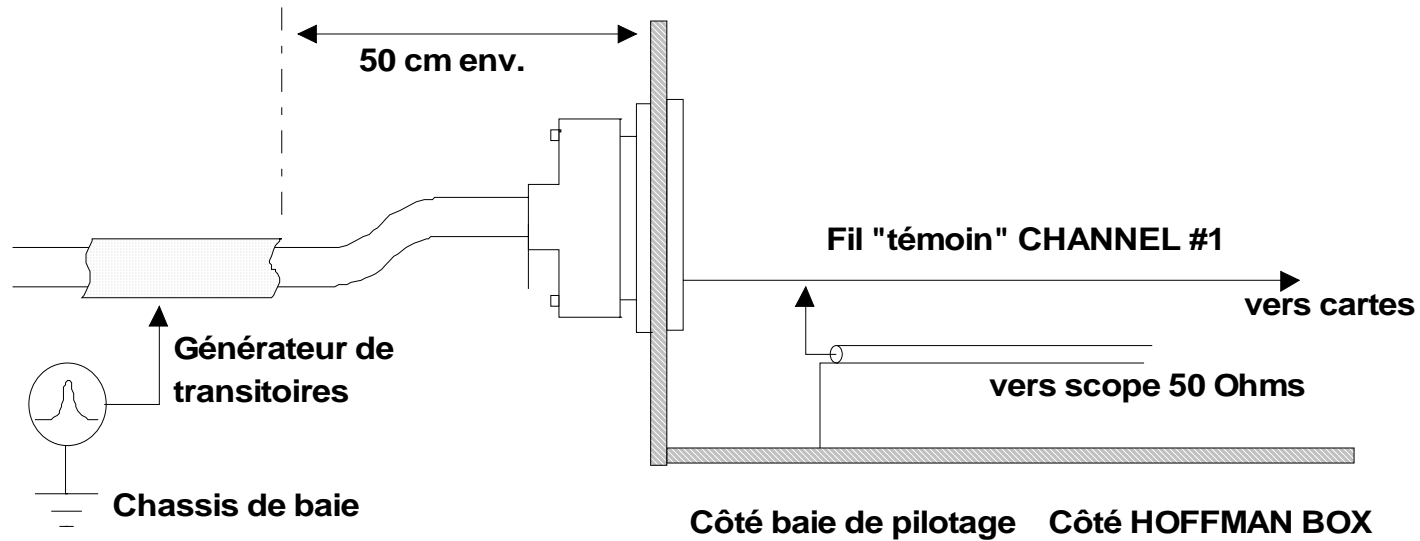


Connecteurs J1, J2
côté baie de pilotage côté HOFFMAN BOX

	R1	R2
Connecteur J1	85 mΩ	82 mΩ
Connecteur J2	36 mΩ	35 mΩ

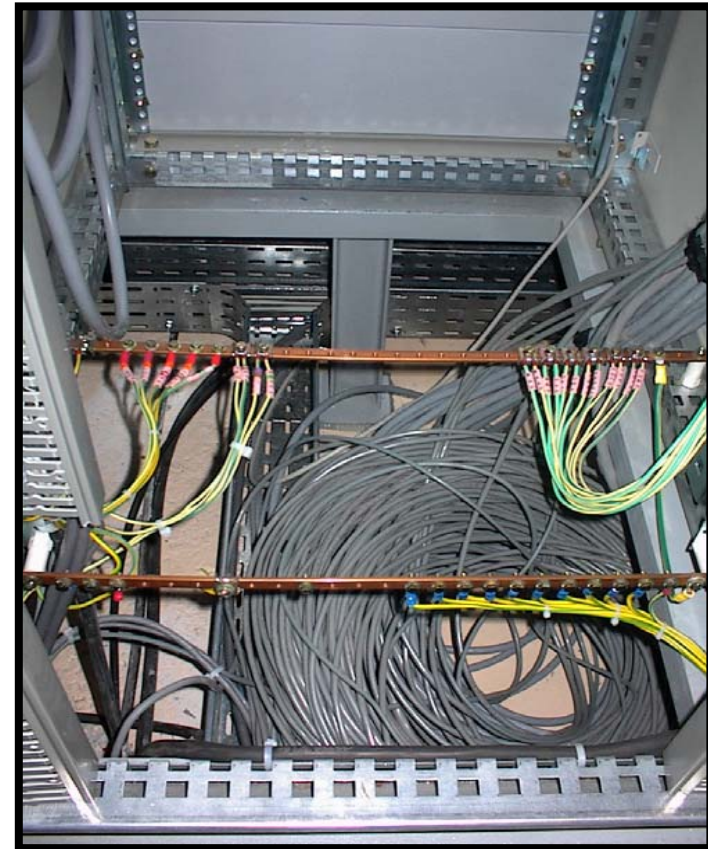
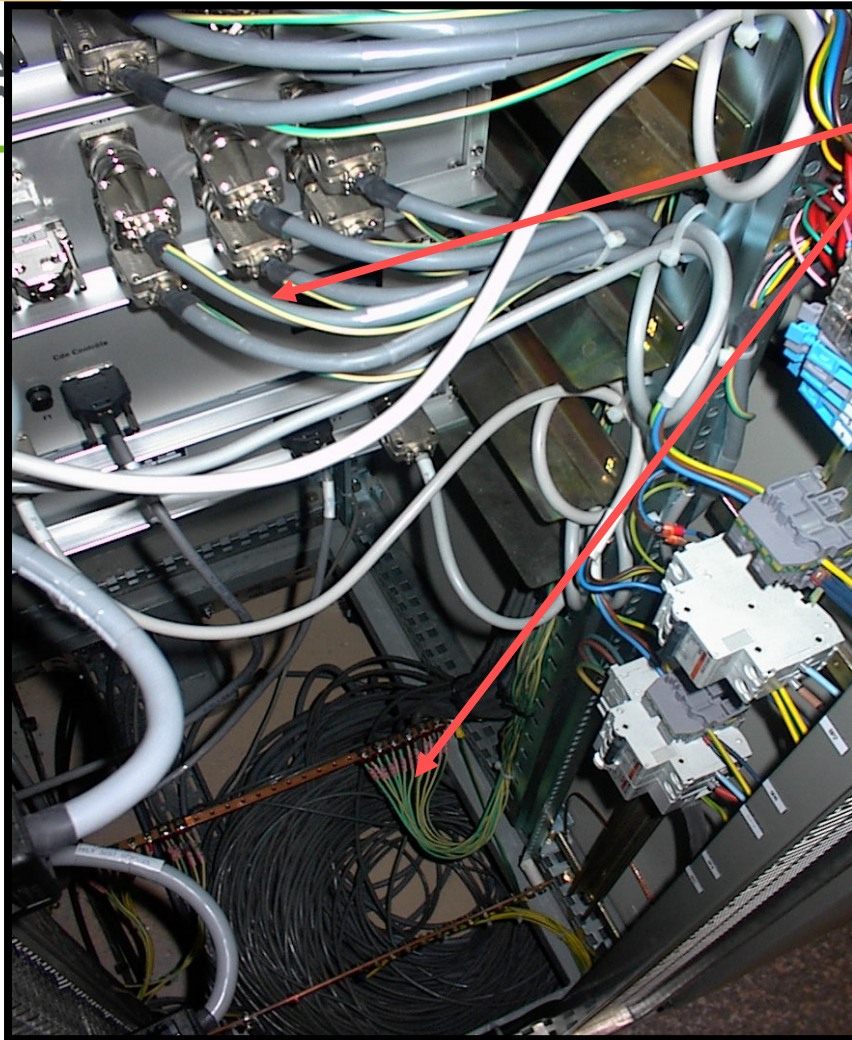
Résistance gaine - tôle < 10mΩ

Test en transitoires rapides en salve (mode commun)



CEI 61000-4-4

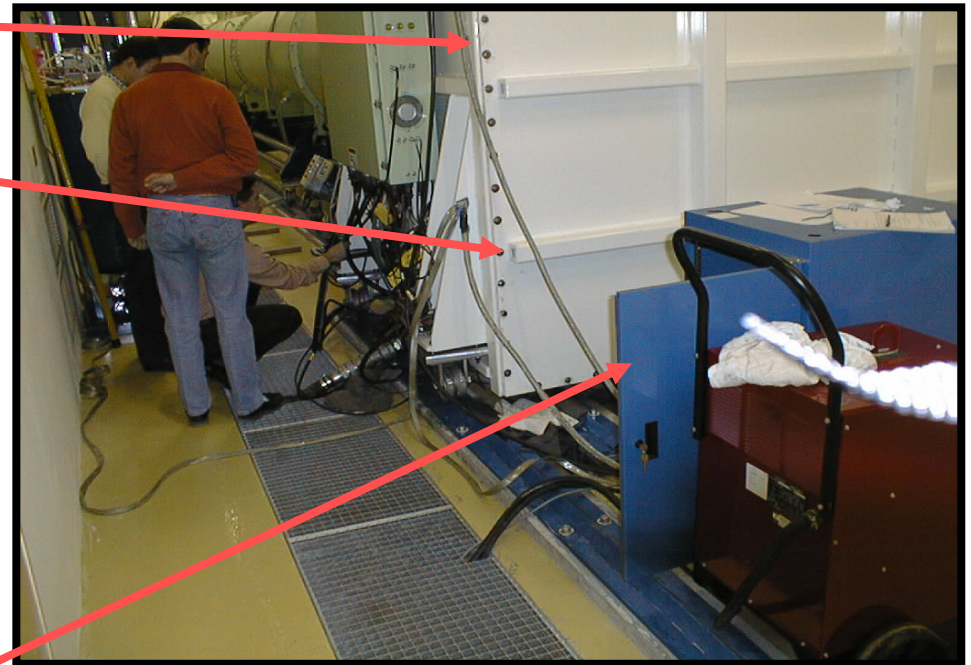
Mise à la masse par fil vert/jaune
de 2 mètres



Amélioration de l'équipotentialité



- Caisson avec la capacité chargée à 2 MV
- Chaussette métallique autour du câble haute tension

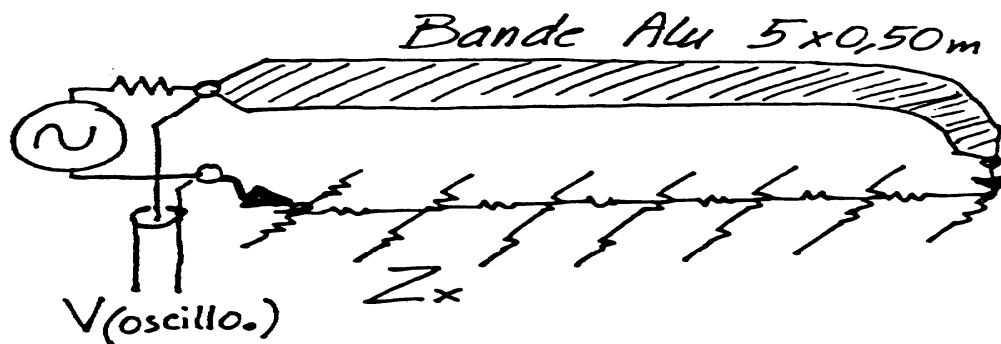


- Alimentation 100 kV
- Tresse de masse entre les tiroirs
- Ferrite sur le câble en provenance du PC de tir

Mesure de l'impédance du ferrailage



- BUT
 - Equipotentialisation de l'installation en utilisant le ferrailage du bâtiment
- MOYEN
 - Mesure de l'impédance HF de ce ferrailage



Rien n'est perdu tant que vous n'avez pas commencé à vous en occuper

Murphy, 4^{ieme} loi

Mesure de l'impédance du ferrailage



- Transitoire : 10 A / tm 300ns

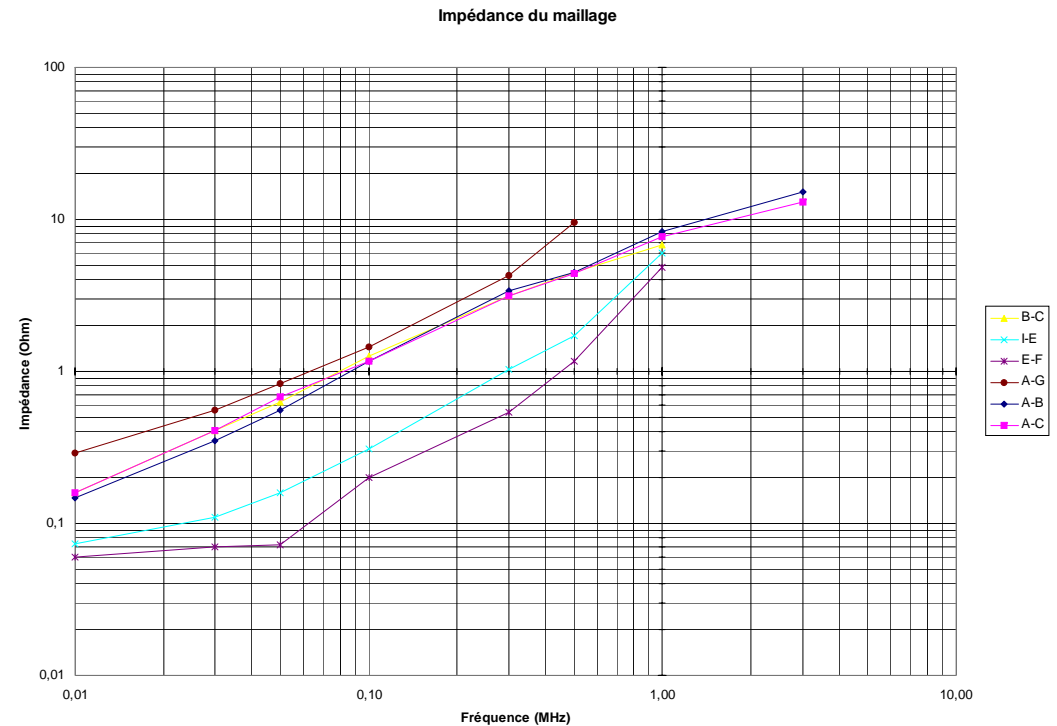
- $Z = 10$ Ohms à 1 MHz

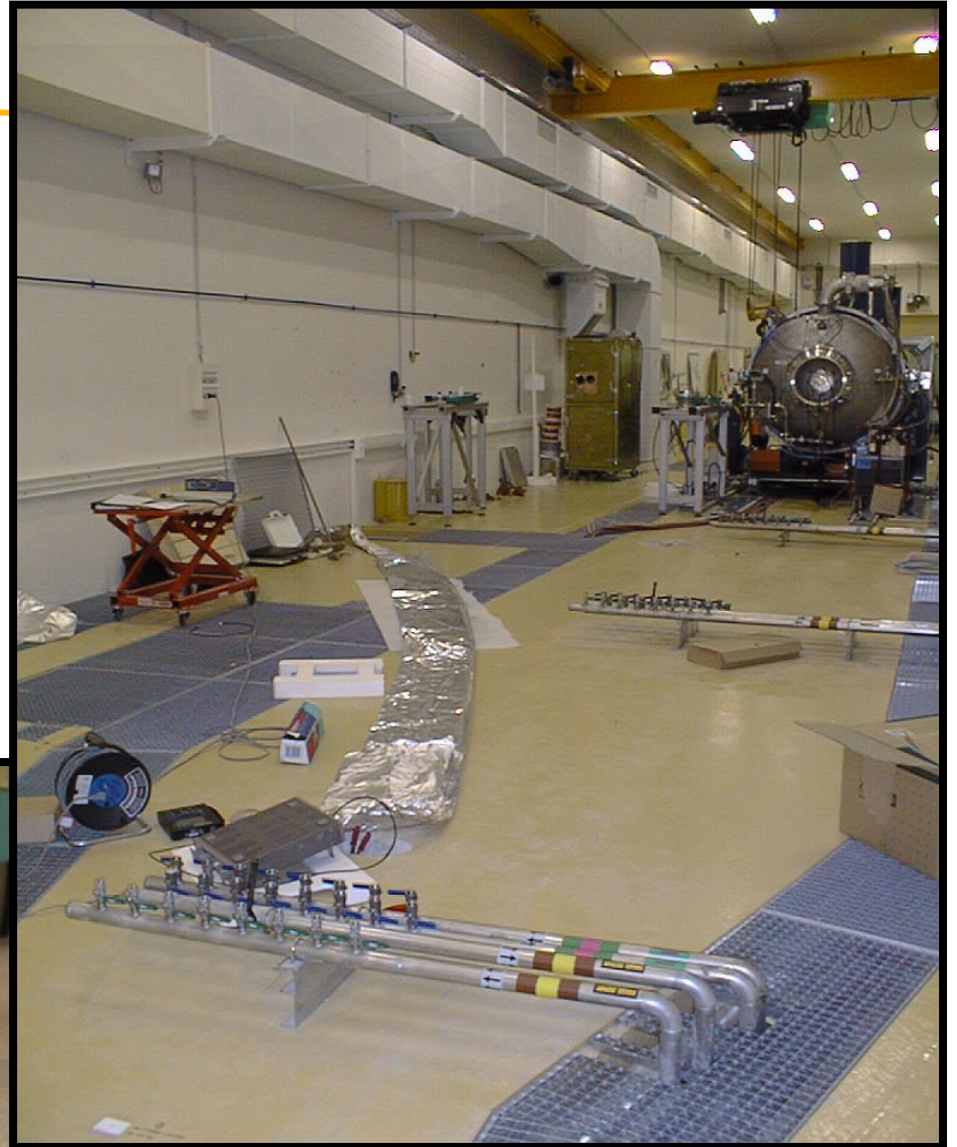
- -> DDP = 100 Volts

- Avec fil V/J 35 mm²

- $Z = 200$ Ohms à 1 MHz

- -> DDP = 2000 Volts





Les Générateurs

***On ne dispose jamais assez de temps pour faire les choses correctement
Mais on trouve toujours celui pour les refaire***

Postulat de Nicholson aux lois de Murphy

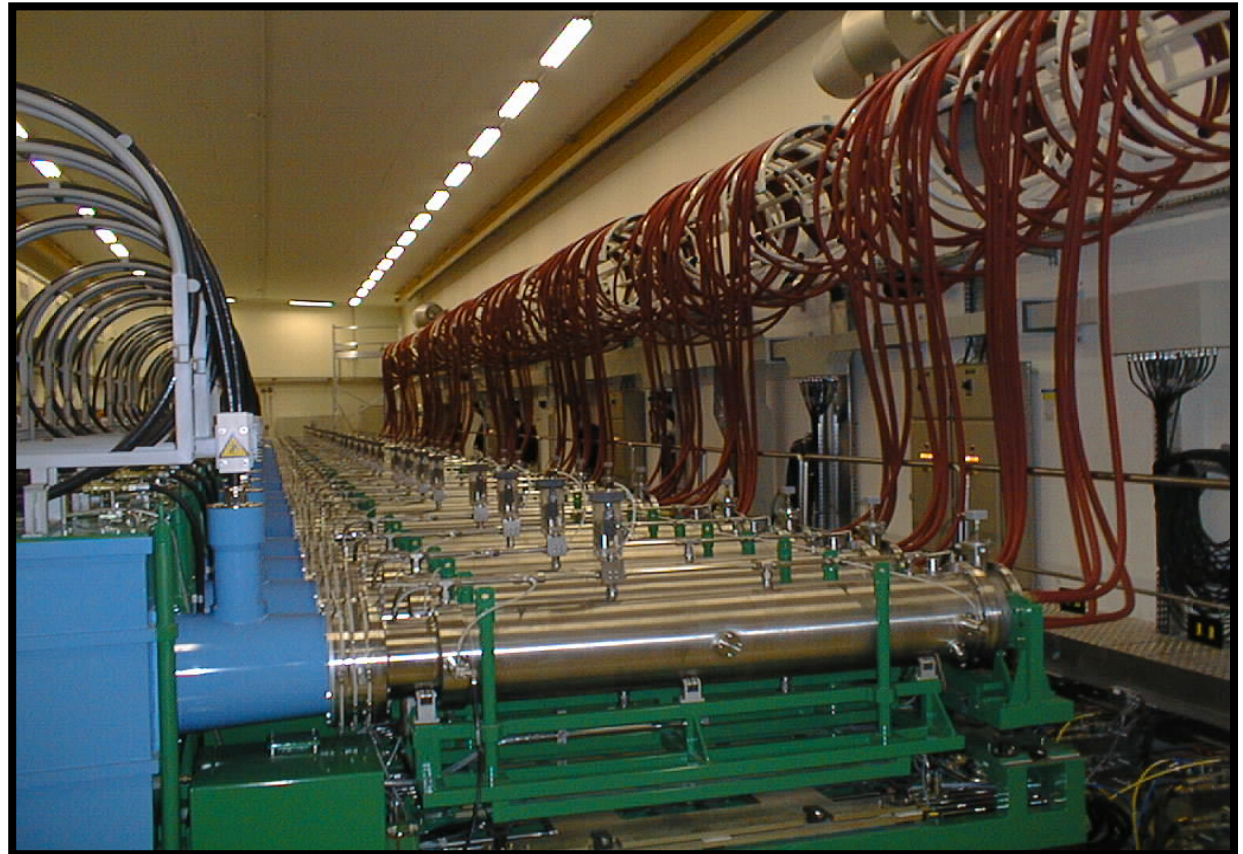
Cellules accélératrices



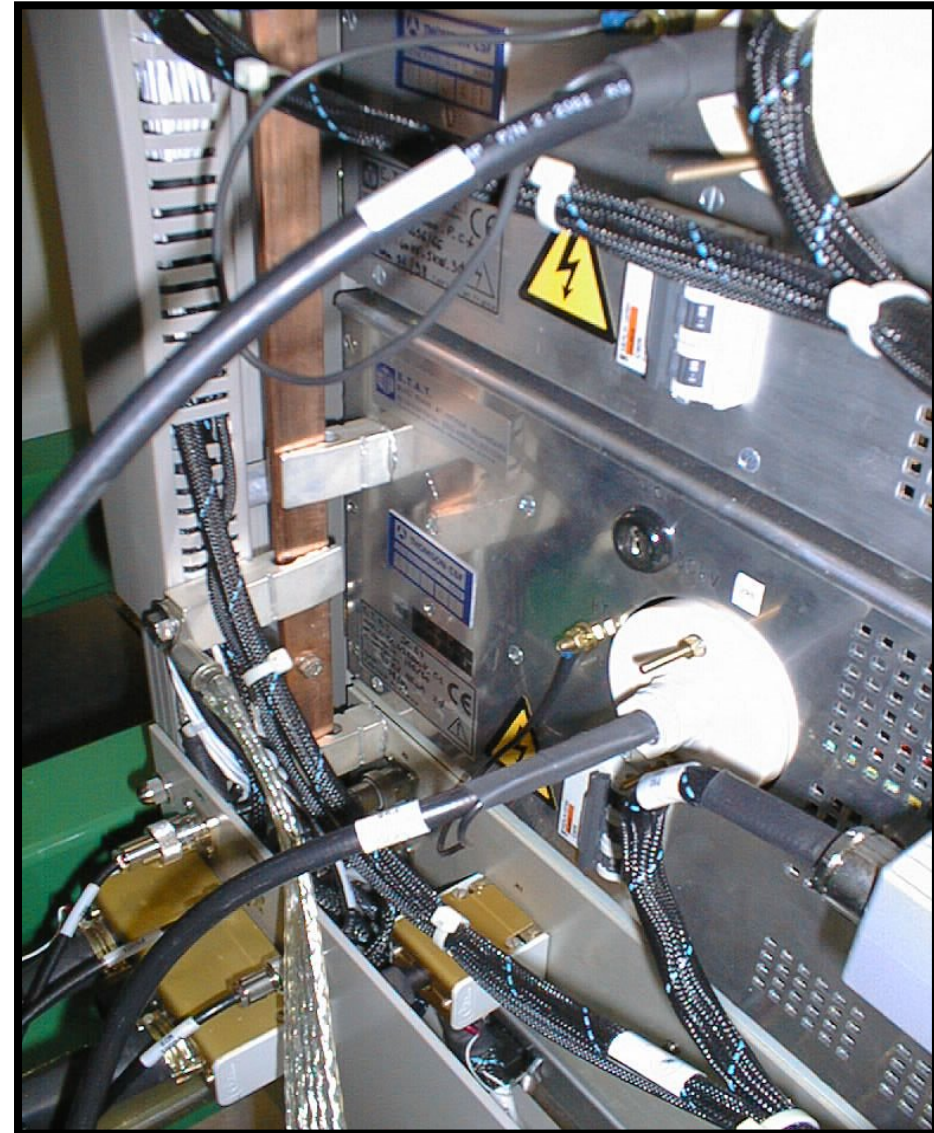
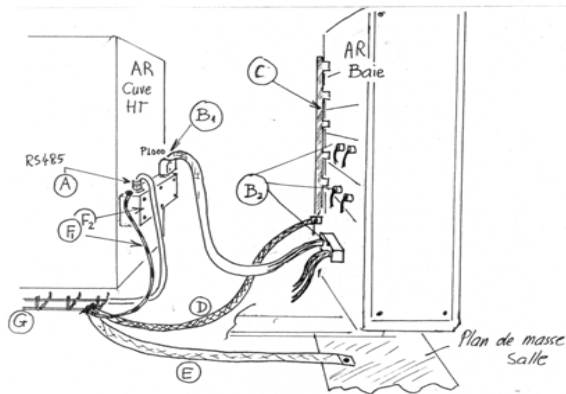
Les générateurs



- 16 générateurs synchronisés
- Impulsion de 250 kV avec un temps de montée de 20 ns



Equipotentialisation des baies des générateurs



Mesure du courant parasite pendant un tir

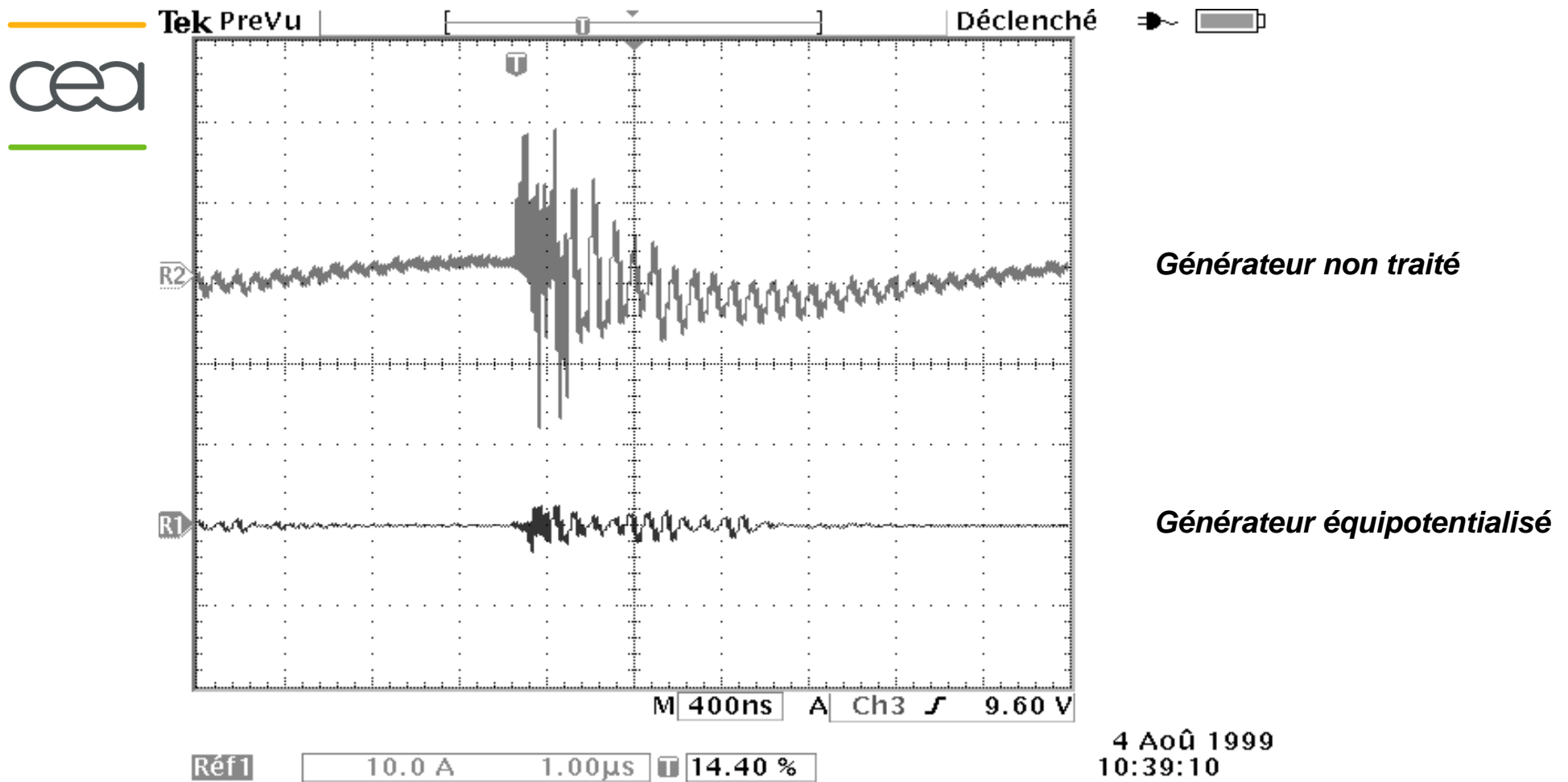


La mesure se fait en parallèle sur une baie non traitée ainsi qu'une baie équipotentialisée

Pinces de courant



Résultats des mesures des courants parasites



Le courant parasite est réduit de 20 dB (X 10)

Laser de forte puissance

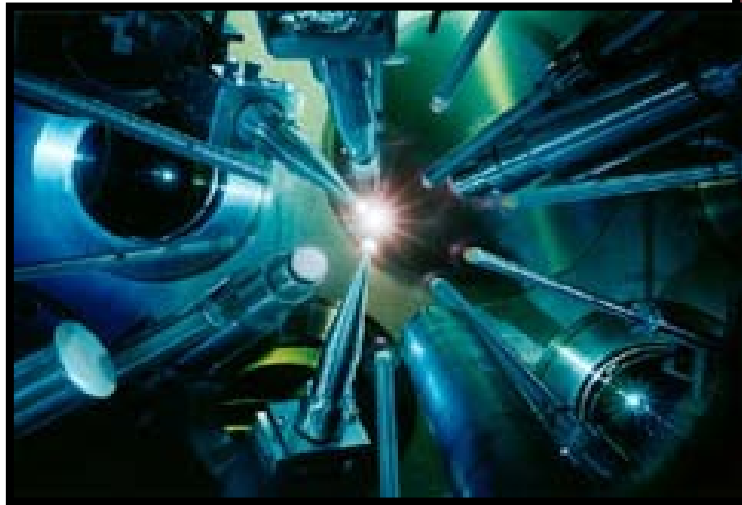
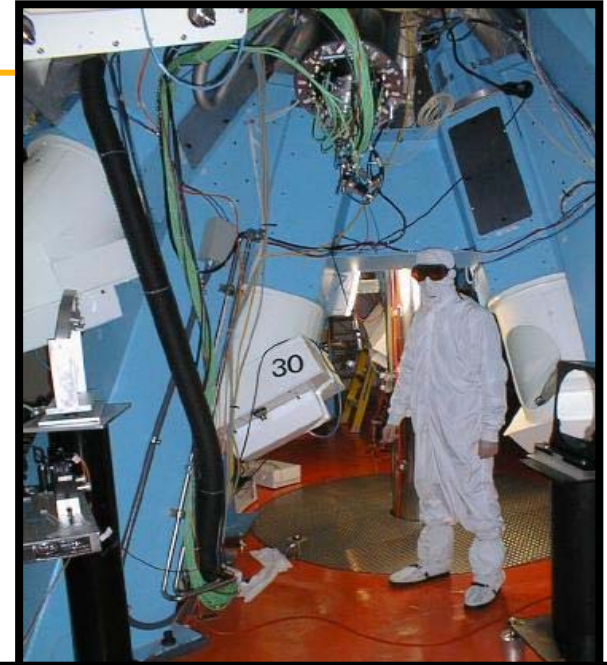
***Personne ne croit en une théorie, sauf celui qui l'a faite
Tout le monde croit en une mesure, sauf celui qui l'a faite***

Finnagam, compléments aux lois de Murphy

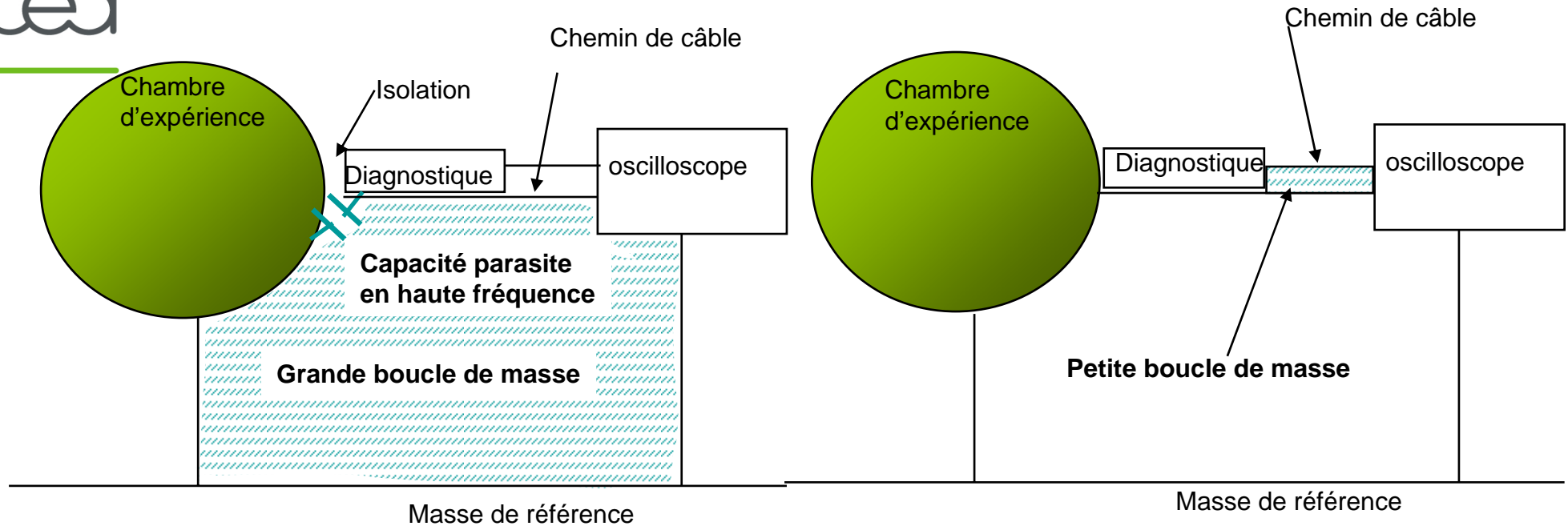
Laser de forte puissance



- 60 faisceaux soit 30 kJ à 3 ω
- Impulsion laser de 1 ns

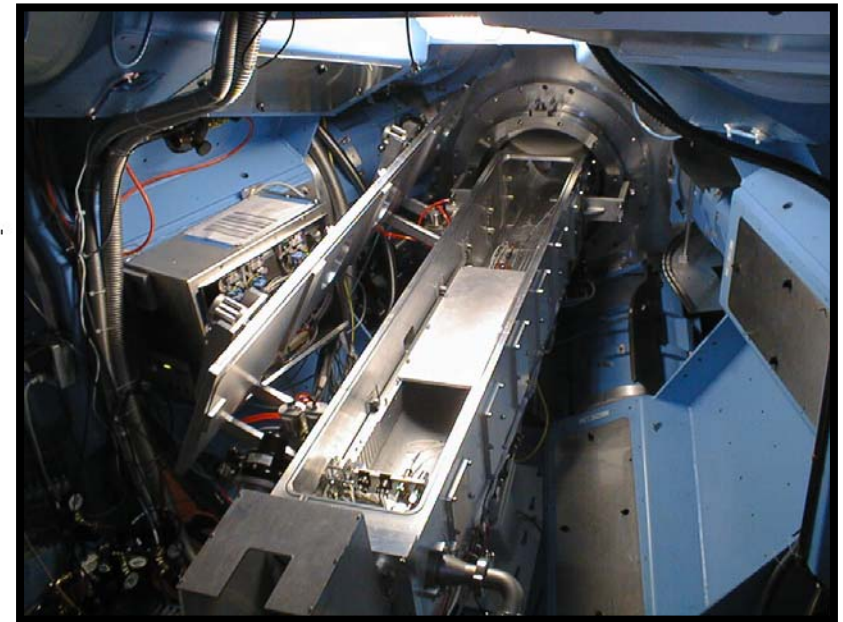
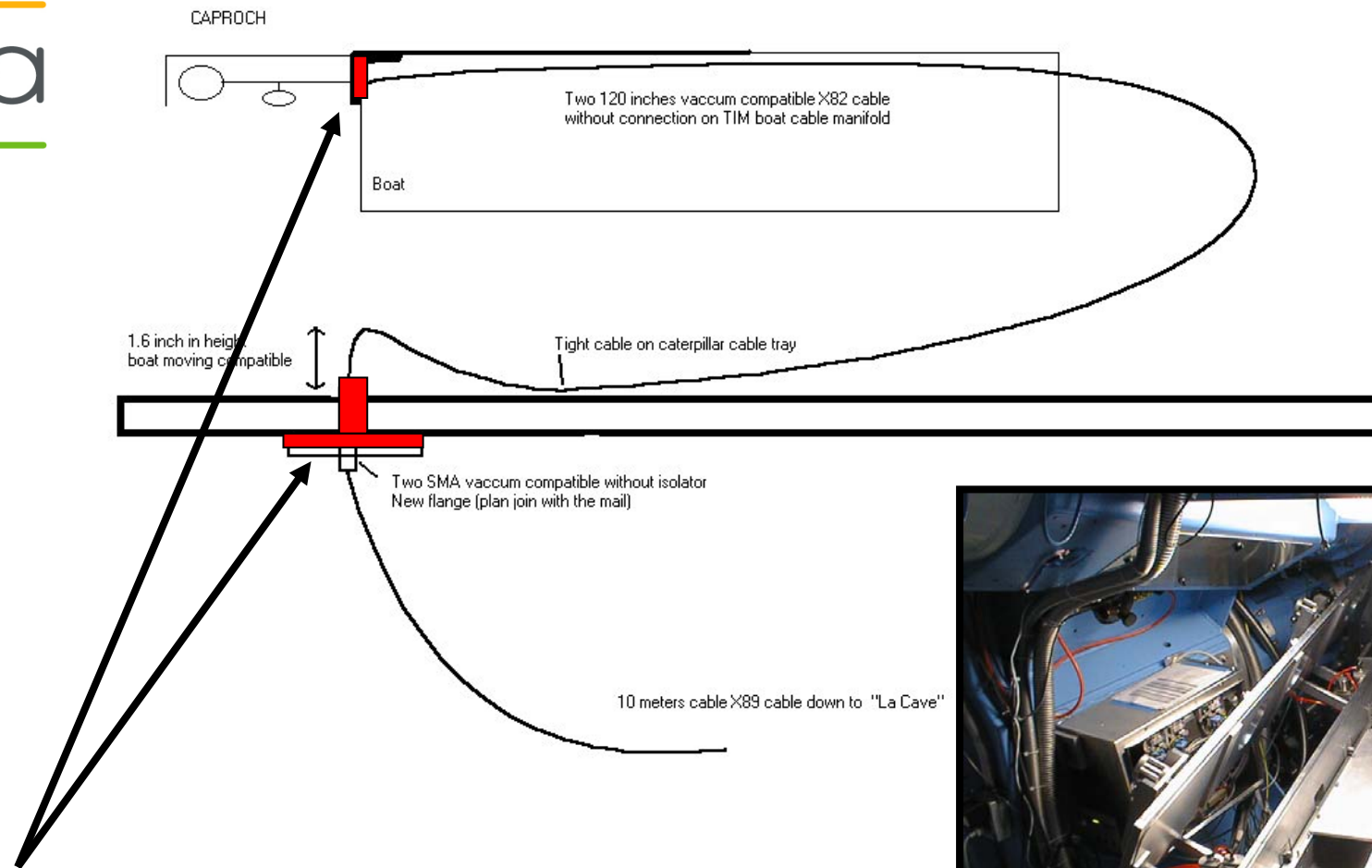


Principe du câblage en étoile



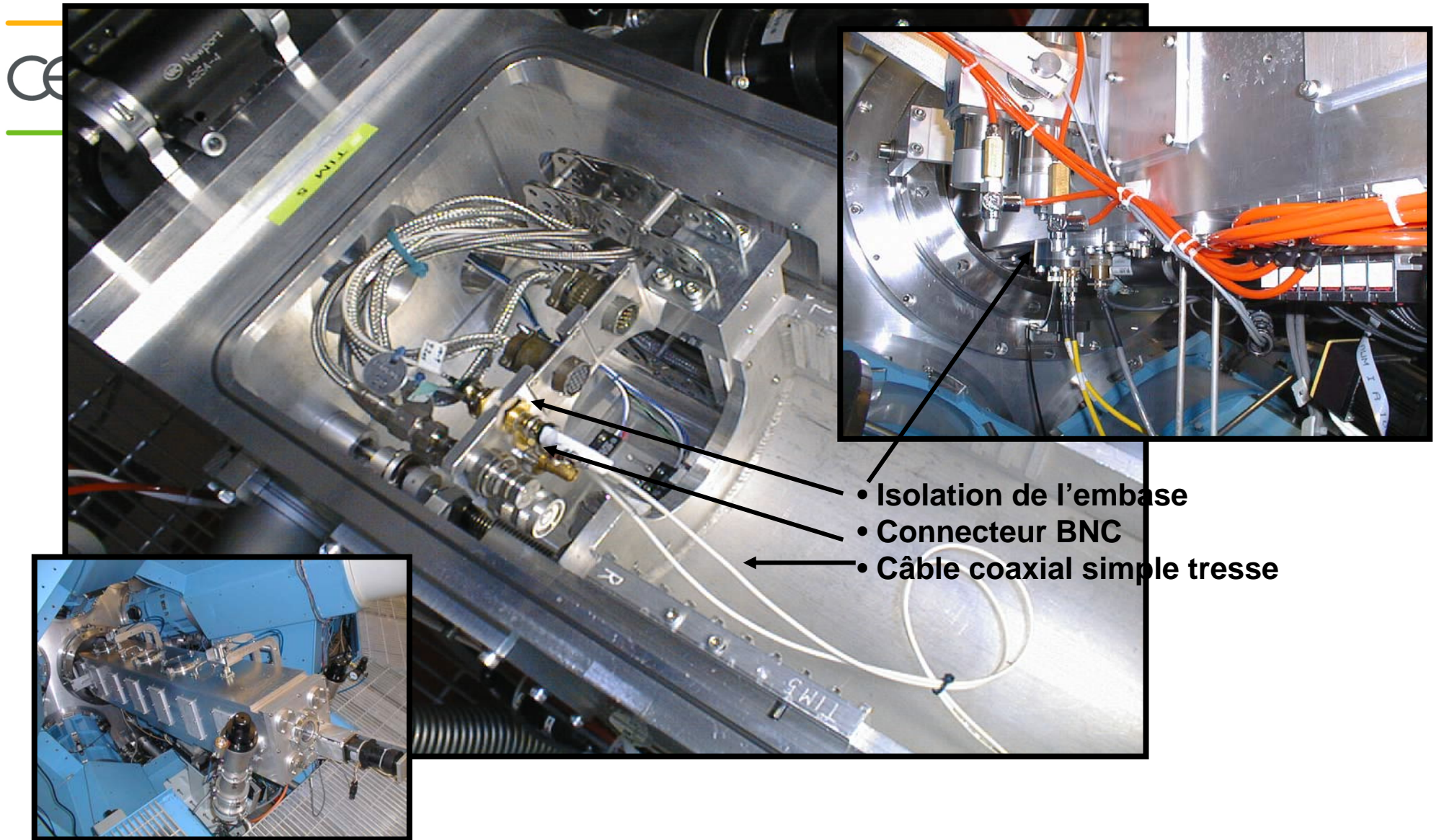
Le principe du câblage en étoile nécessite une isolation mais ne peut pas éviter les couplages par capacité parasite en haute fréquence

La mise à la masse de tous les équipements permet de réduire les boucles de masse



Isolation du diagnostic / masses métalliques

Conditions de câblage initiales

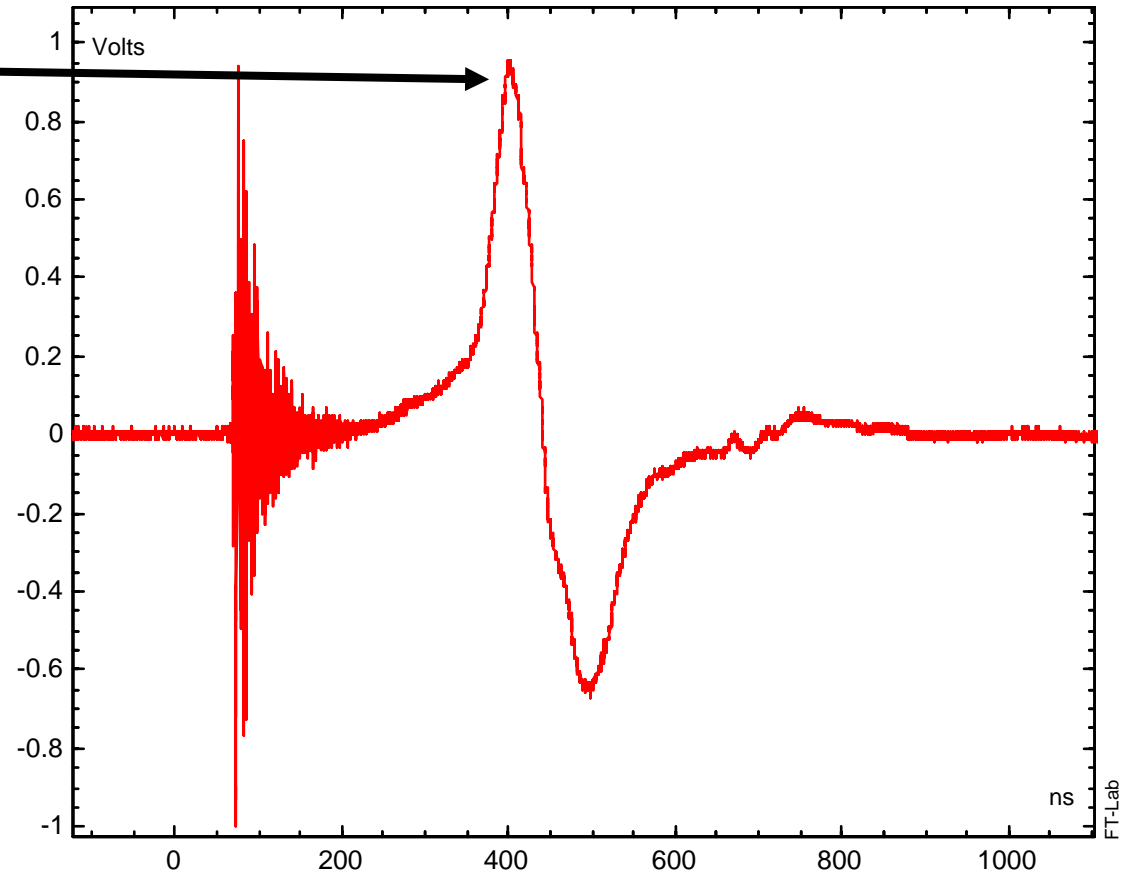


Amélioration de la mesure par respect des règles CEM



L'impulsion est-elle un réellement physique ?

- Etape 1
- Câblage en étoile (isolation)
- Connecteur à baïonnette (BNC)
- Câble coaxial simple tresse

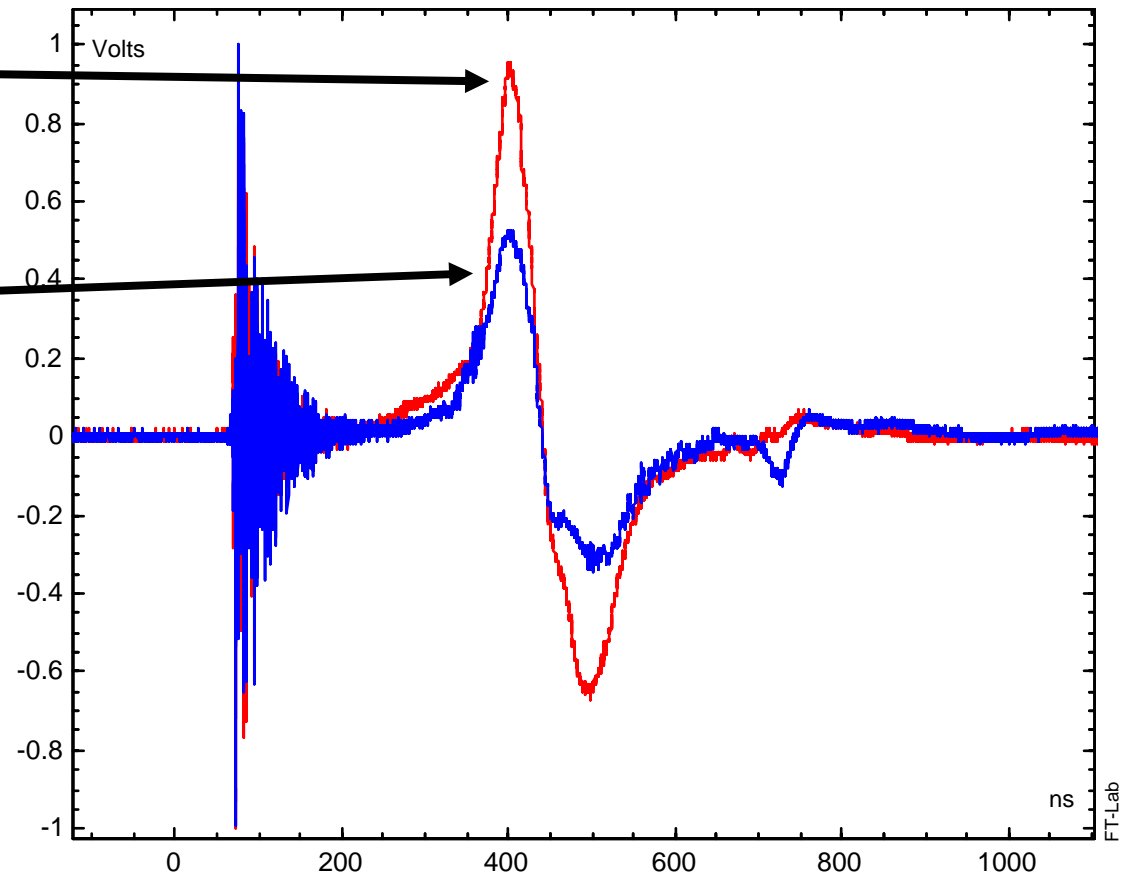


Amélioration de la mesure par respect des règles CEM



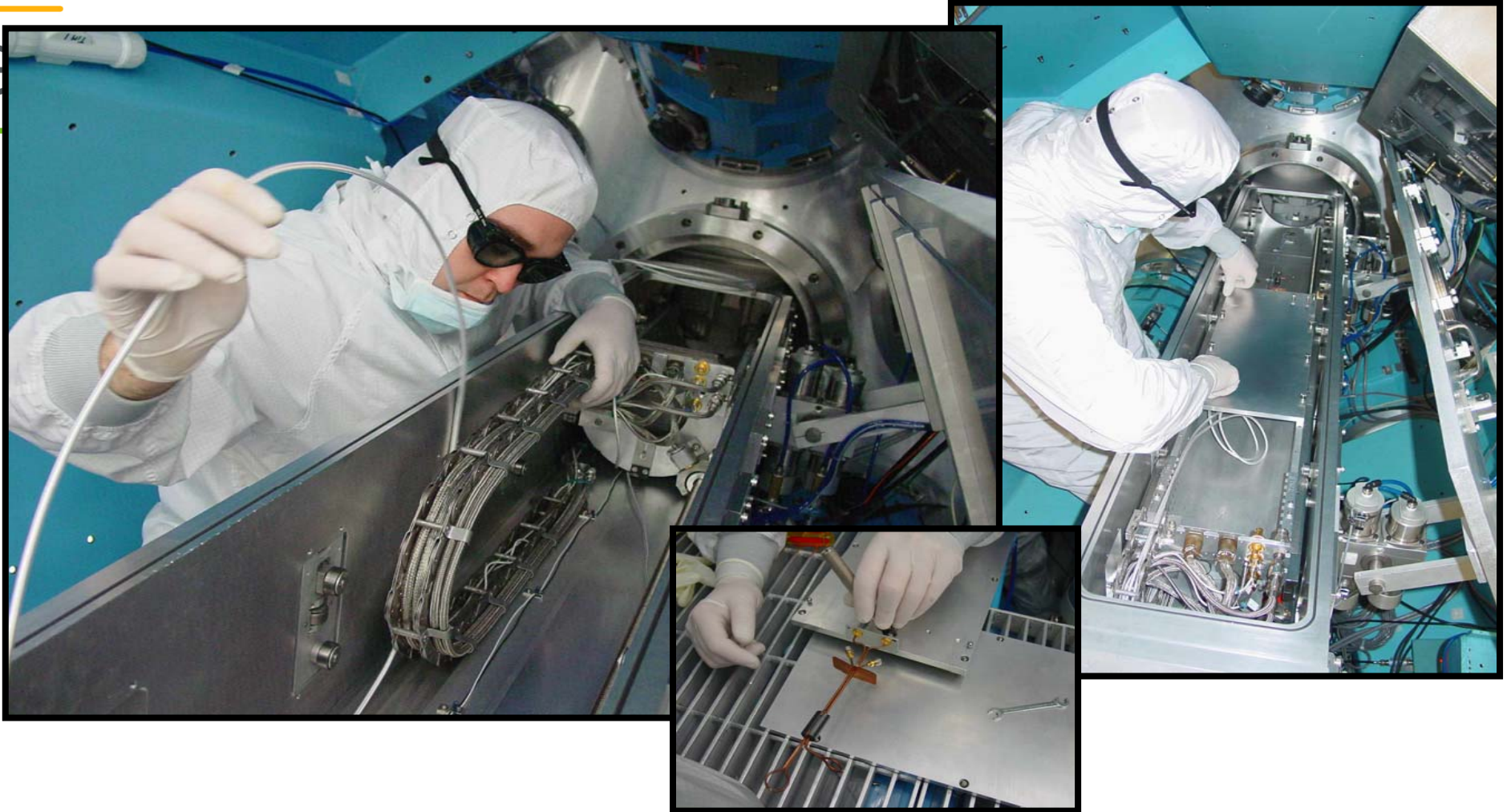
Réduction du signal par la mise à la masse des connecteurs

- Etape 1
 - Câblage en étoile (isolation)
 - Connecteur à baïonnette (BNC)
 - Câble coaxial simple tresse
- Etape 2
 - Mise à la masse multipoints
 - Connecteur à baïonnette (BNC)
 - Câble coaxial simple tresse



Amélioration du câblage

CEA

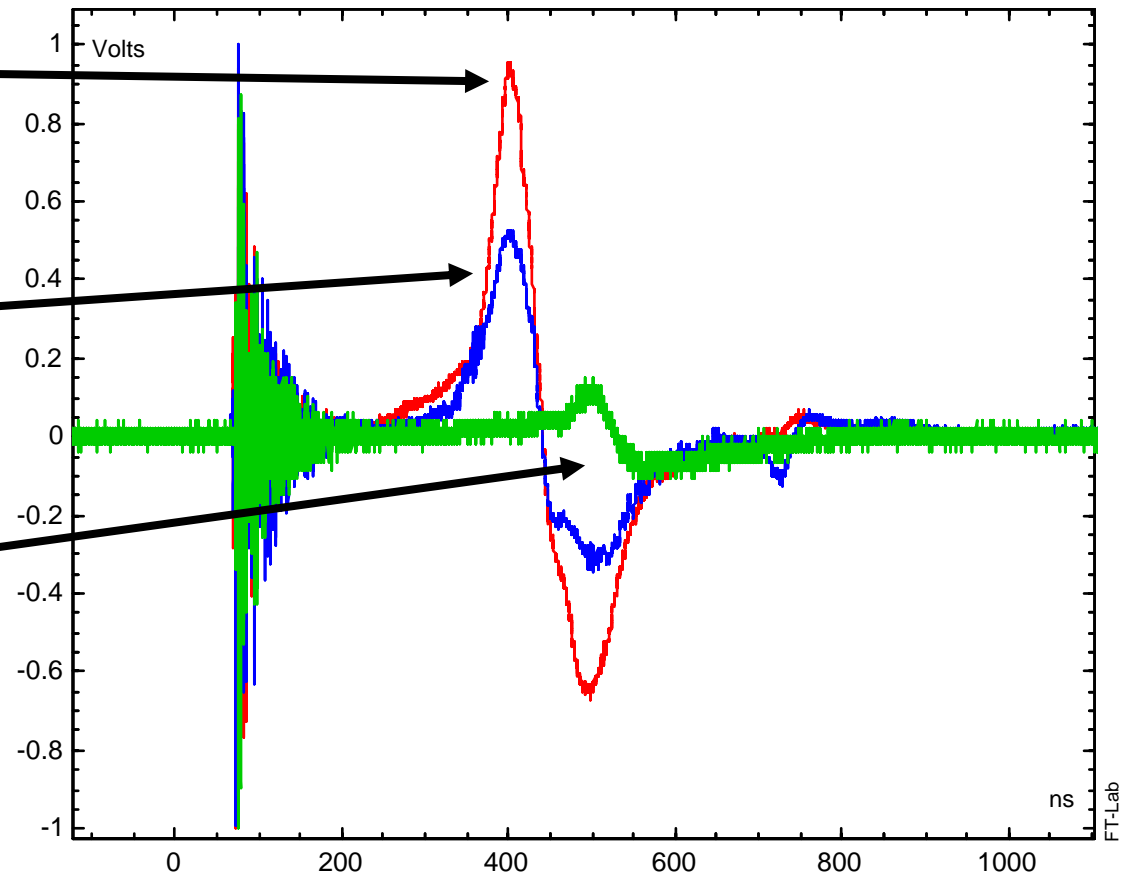


Amélioration de la mesure par respect des règles CEM

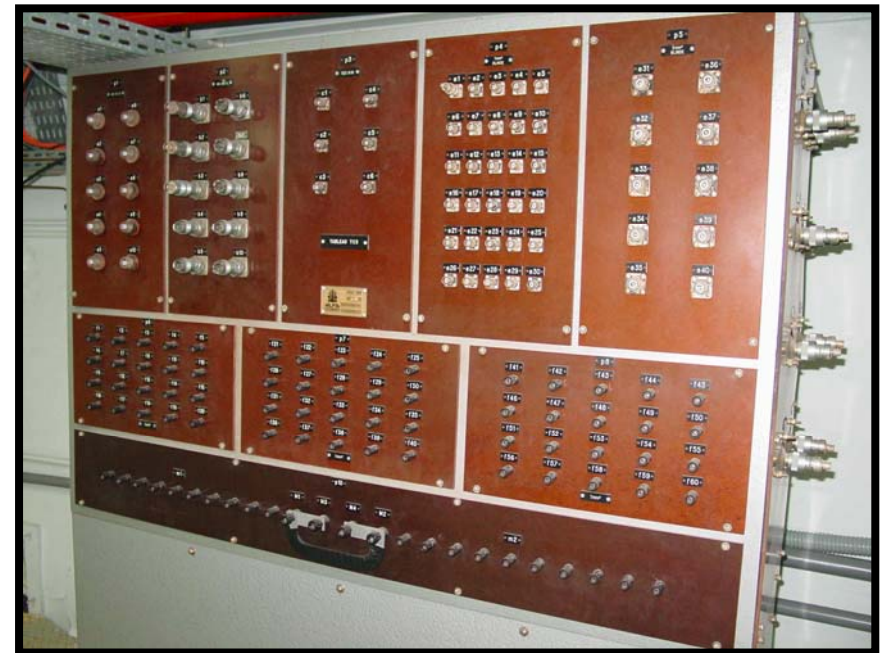


C'était bien un problème de CEM

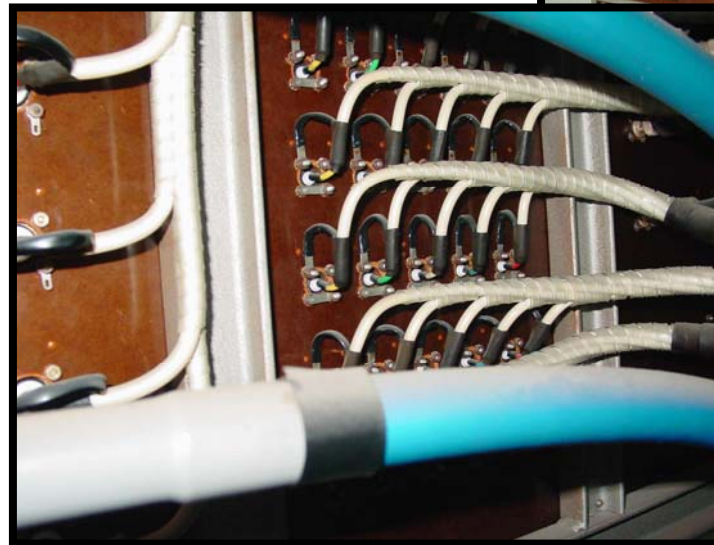
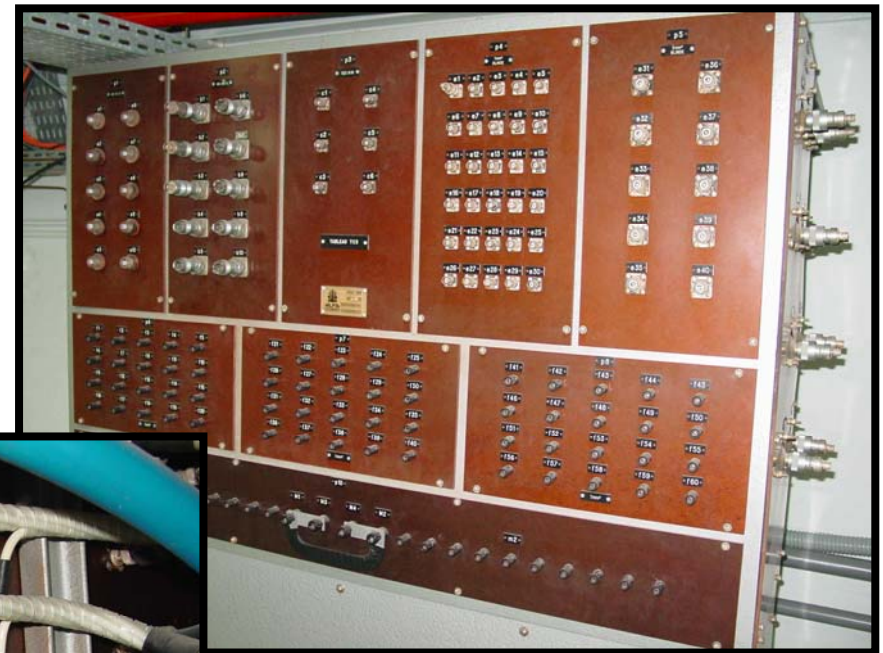
- Etape 1
 - Câblage en étoile (isolation)
 - Connecteur à baïonnette (BNC)
 - Câble coaxial simple tresse
- Etape 2
 - Mise à la masse multipoints
 - Connecteur à baïonnette (BNC)
 - Câble coaxial simple tresse
- Etape 3
 - Mise à la masse multipoints
 - Connecteur à vis (SMA)
 - Câble coaxial double tresse



Installation de mesure isolée

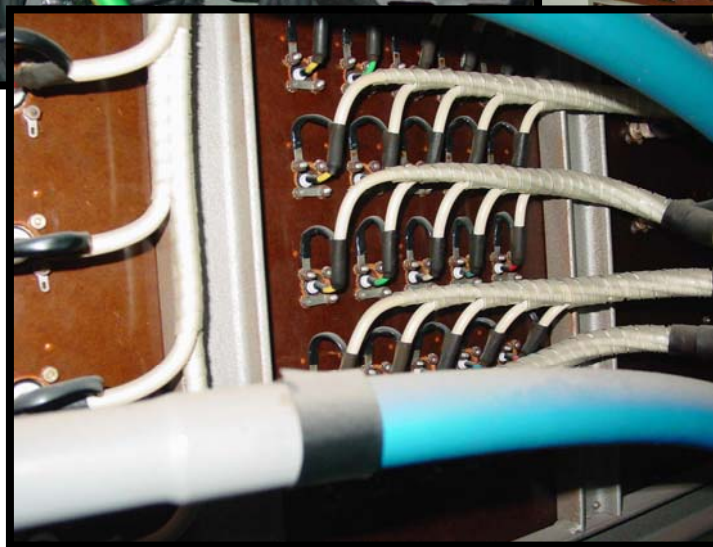
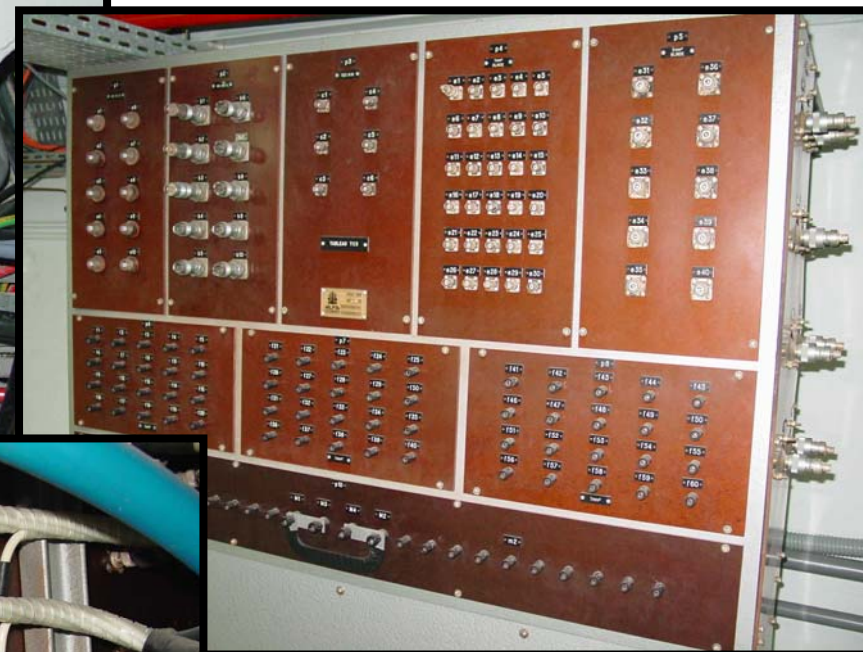
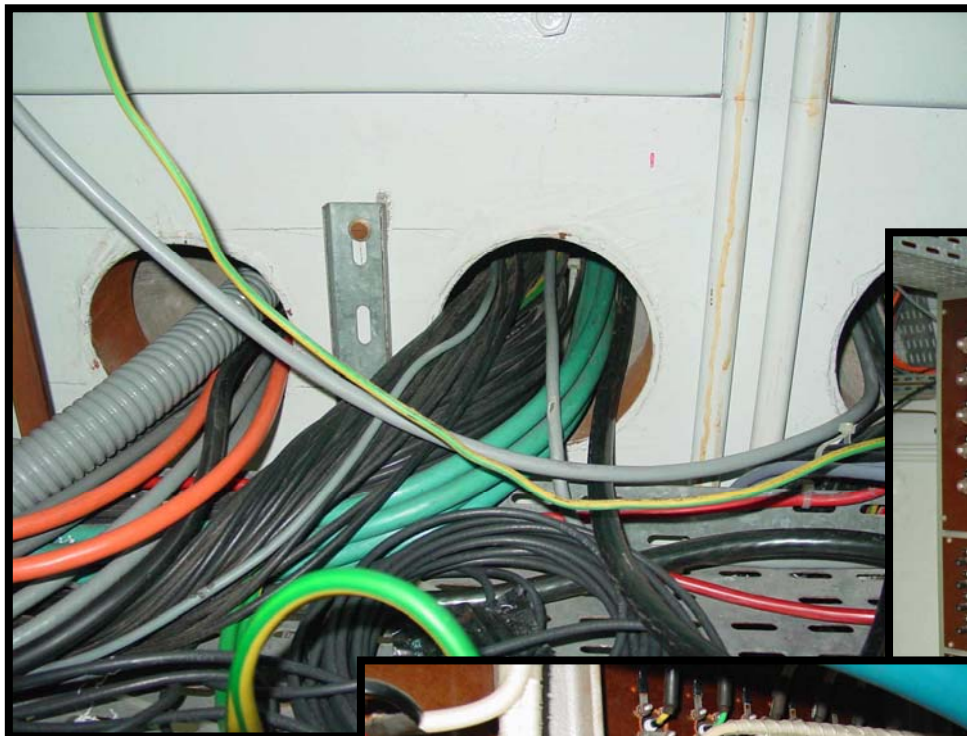


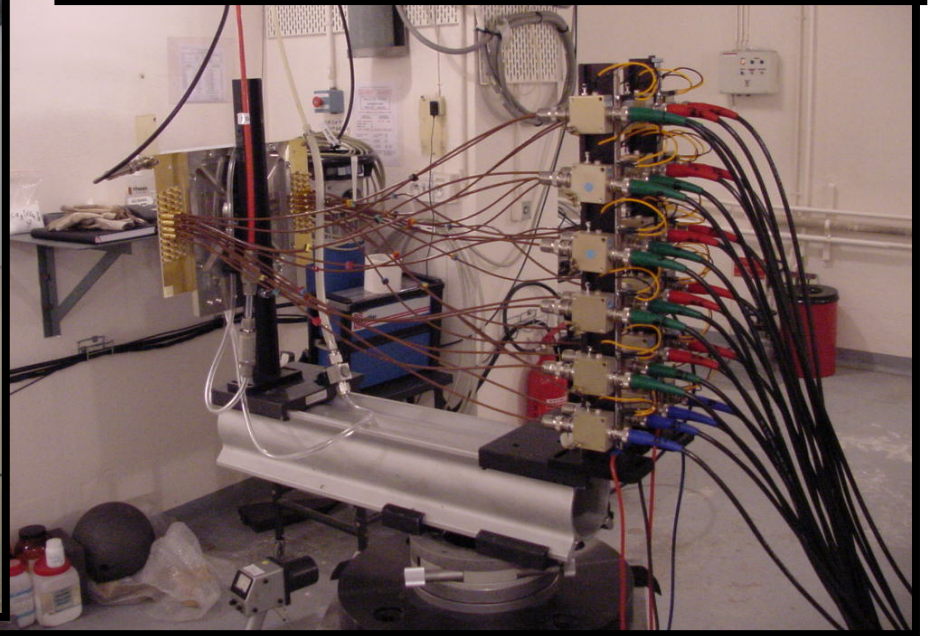
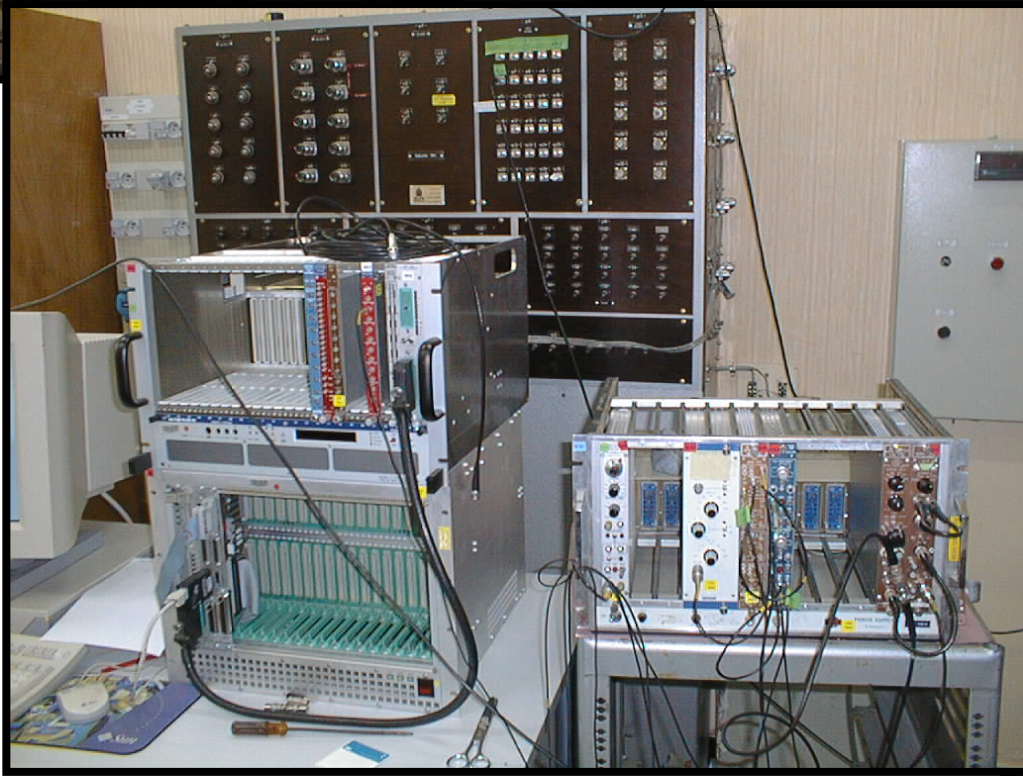
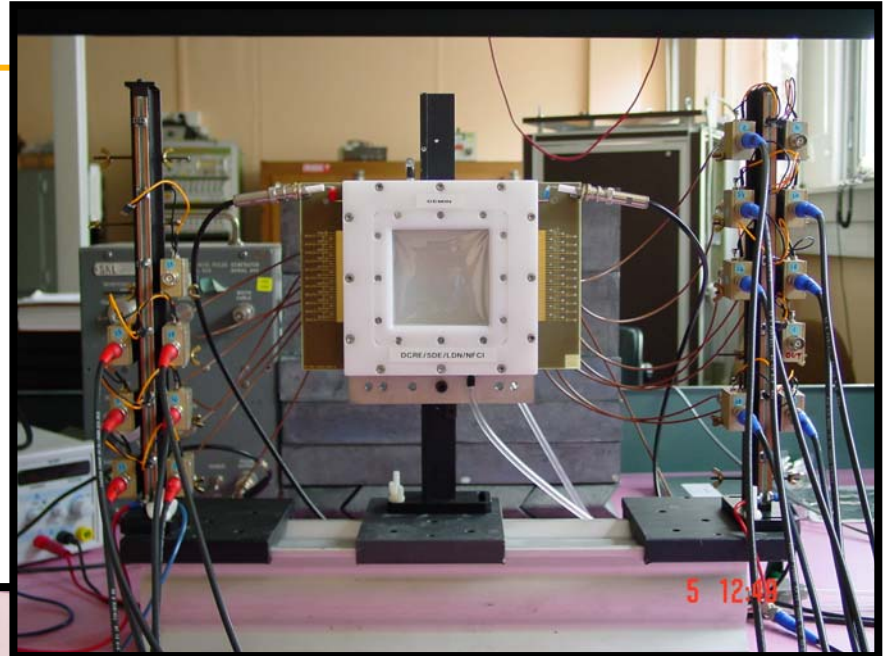
Installation de mesure mal connectée



Installation de mesure à réaménager

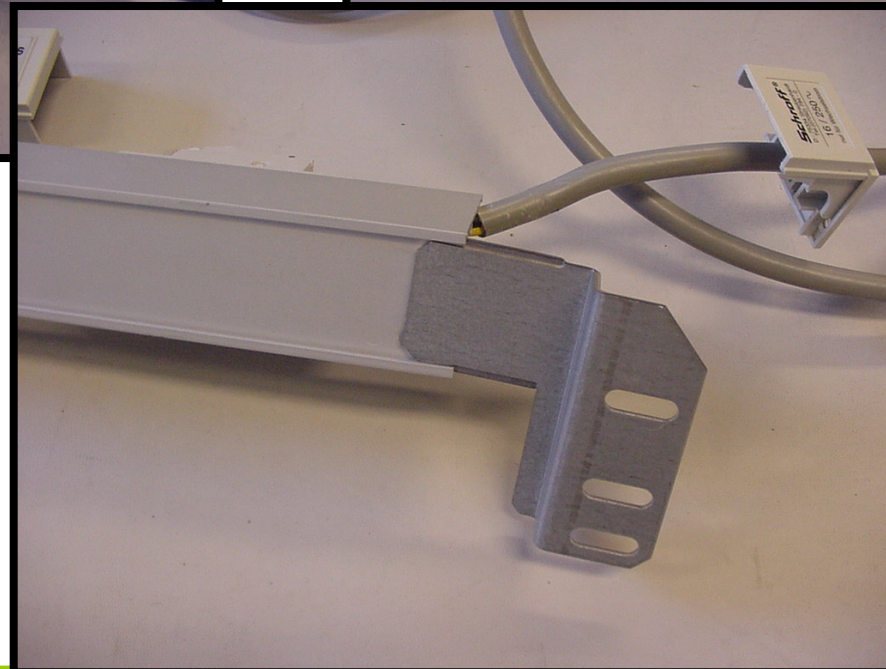
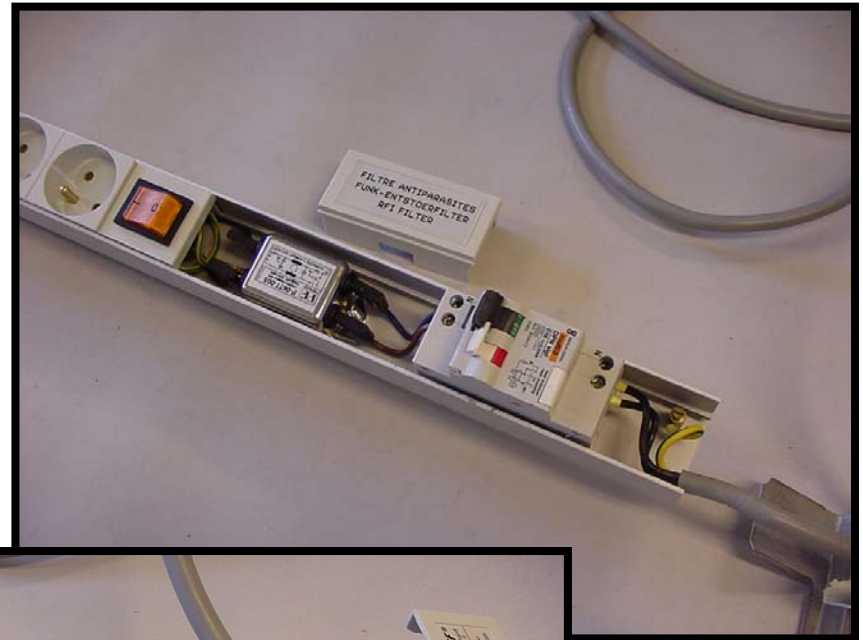
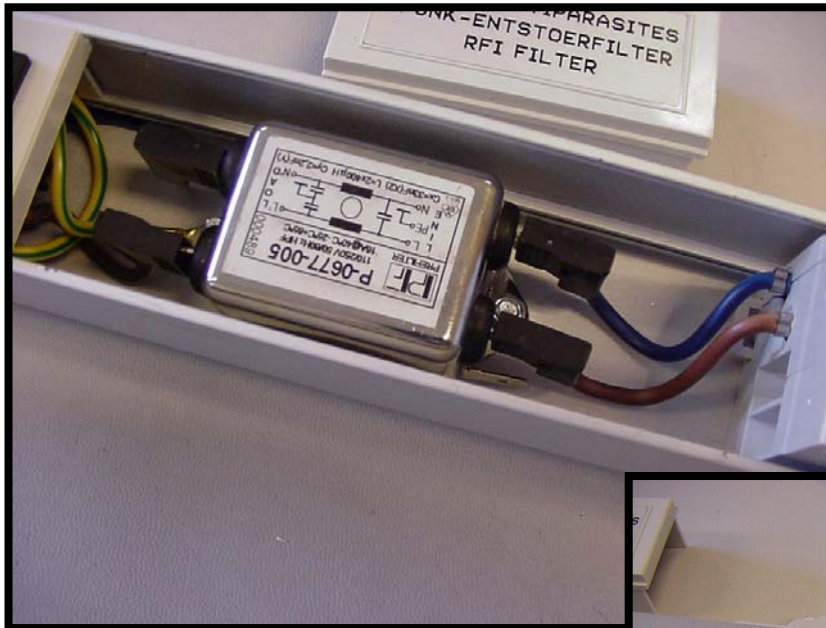
cea



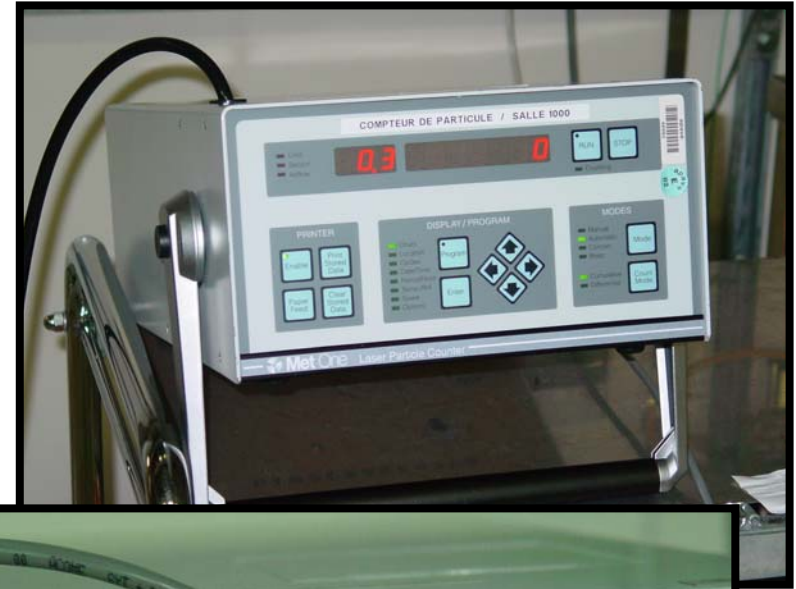


Attention à la mise à la masse des filtres

cea



Blindage de câble et des connecteurs



Amélioration de systèmes de mesures sensibles

cea

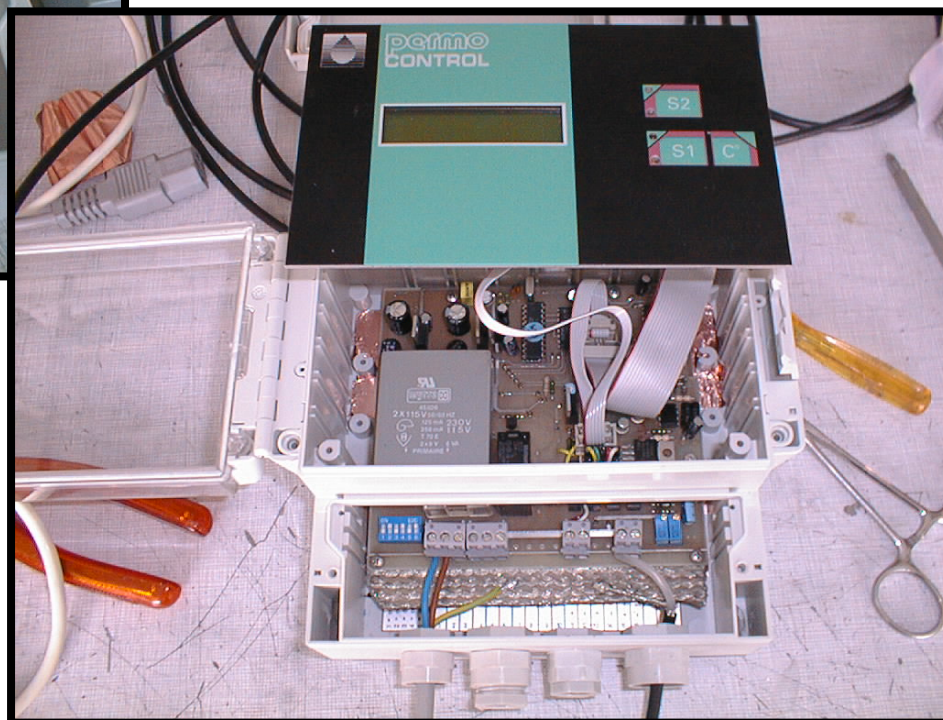
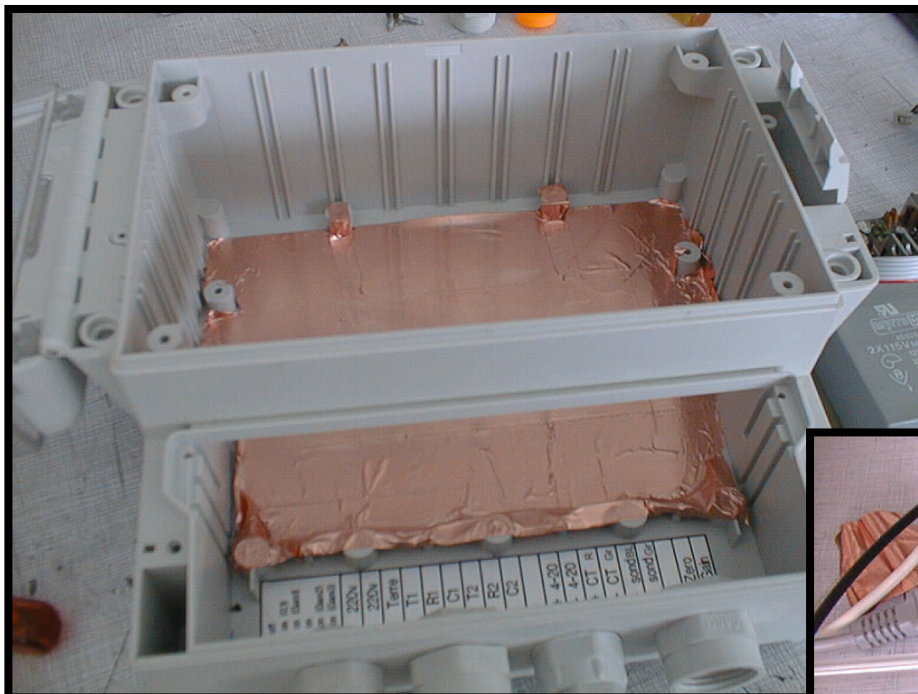


- Câble de mesure blindé
- Tôle de référence de potentiel

Cependant les mesures sont erronées pendant plusieurs minutes après chaque tir

Amélioration de l'équipotentialité du boîtier

cea



Test de l'immunité du boîtier



Transitoires Rapides en Salve CEI 61000-4-4

Avant modification :

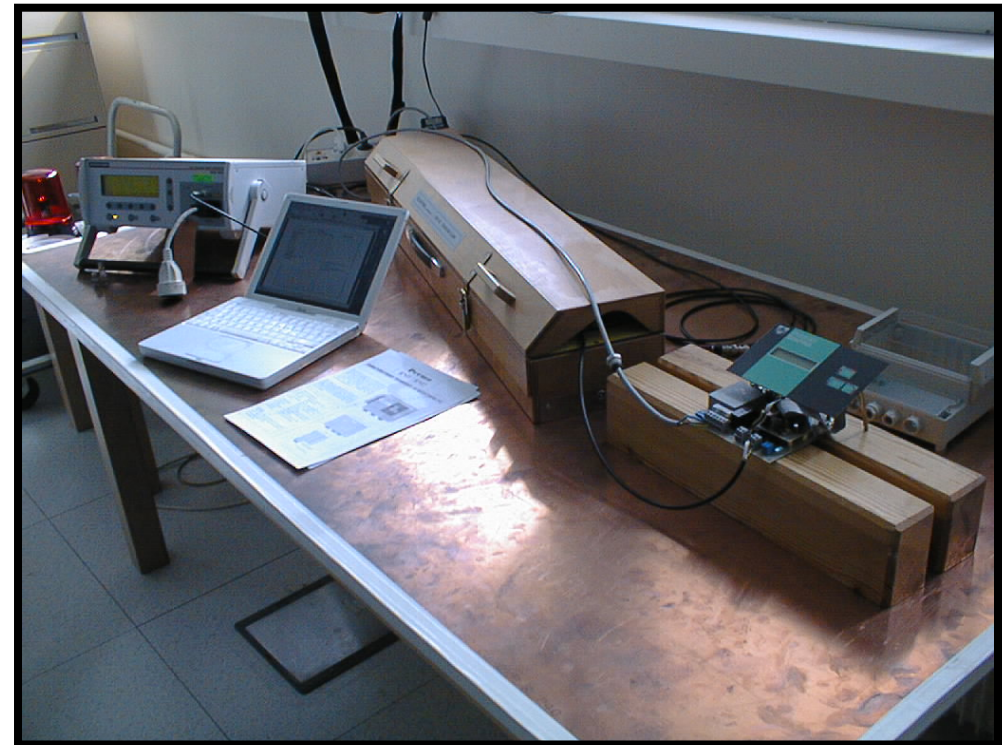
330 Volts :

Déclenchement d'un relais
Alarme LED dépassement
de seuil

Après modification :

2000 Volts :

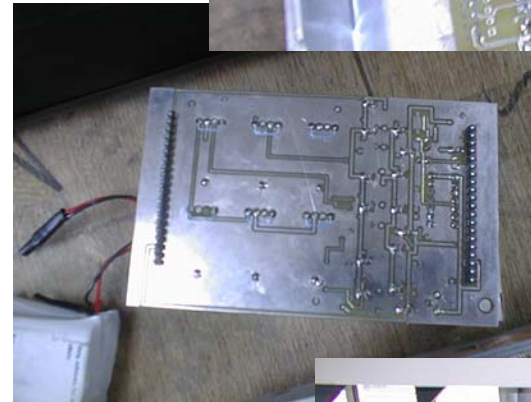
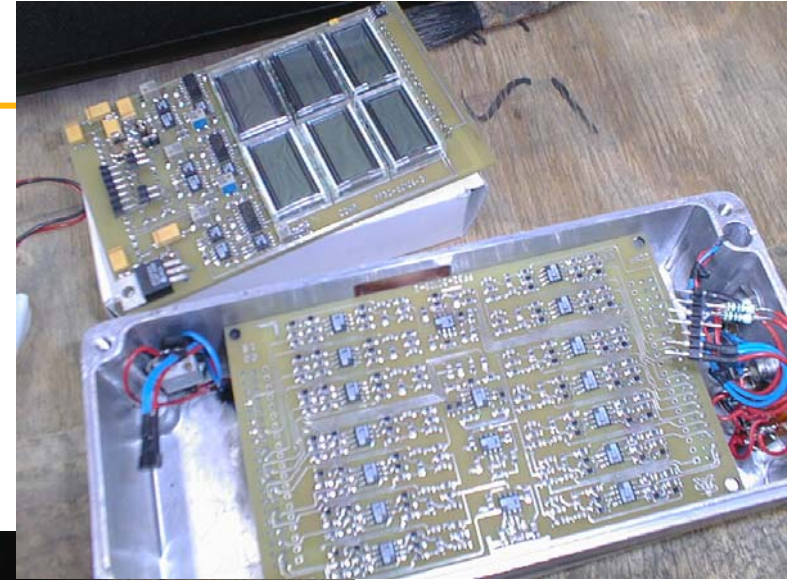
OK



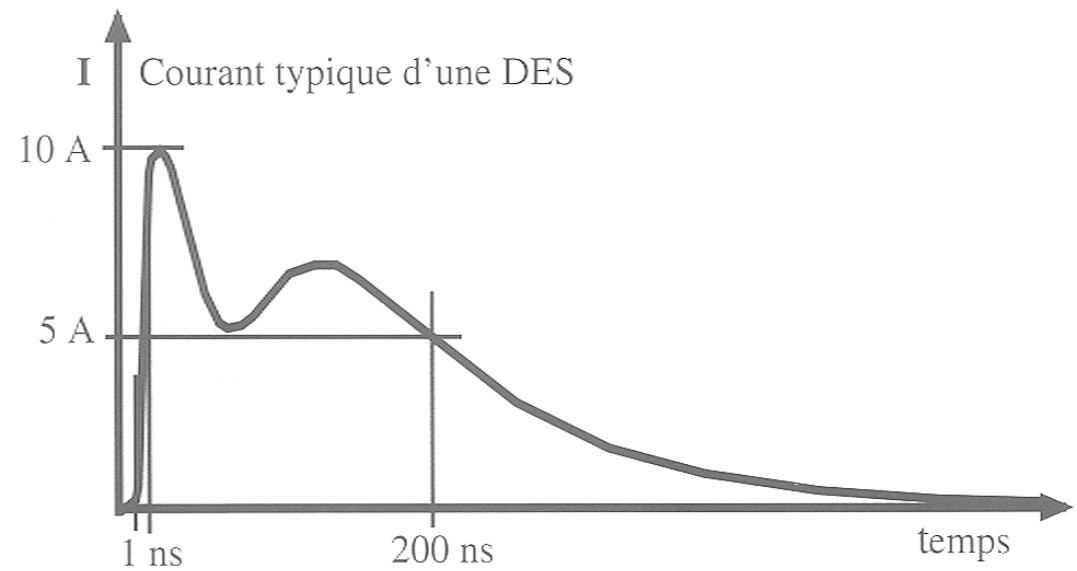
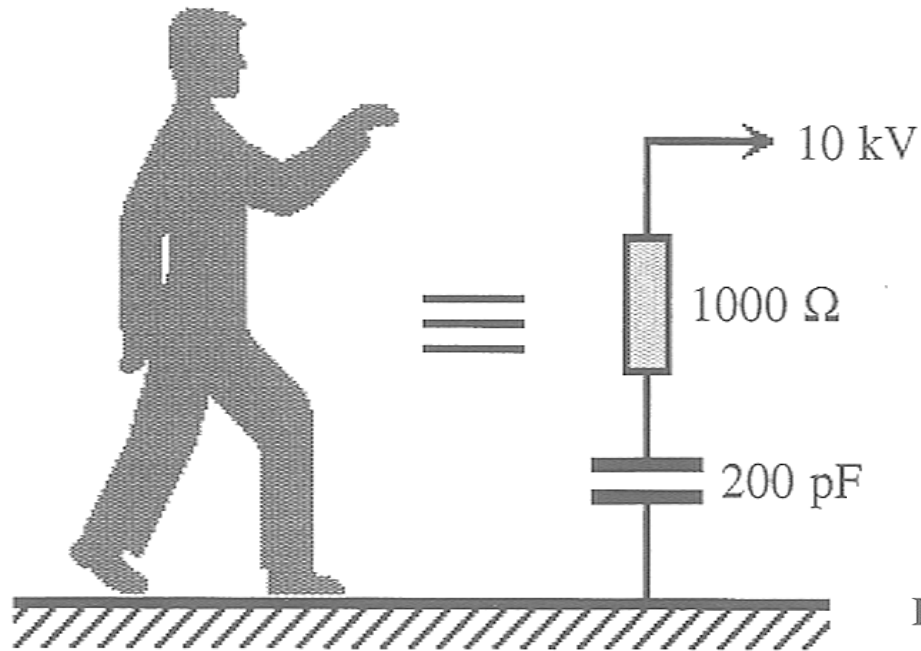
Blindage du détecteur



- Mettre dans une boîte blindée
 - Si le phénomène physique le permet, capton aluminisé ou autre
 - Sinon faire un guide d'onde
 - DIEDAC Dosimètre Individuel Electronique à Diode Associé à un Convertisseur
-
- Avant
 - DES : déclenchement à 200 V
 - Après
 - DES : OK jusque 4 kV
 - TRS : OK jusque 1 kV (niveau environnement industriel)



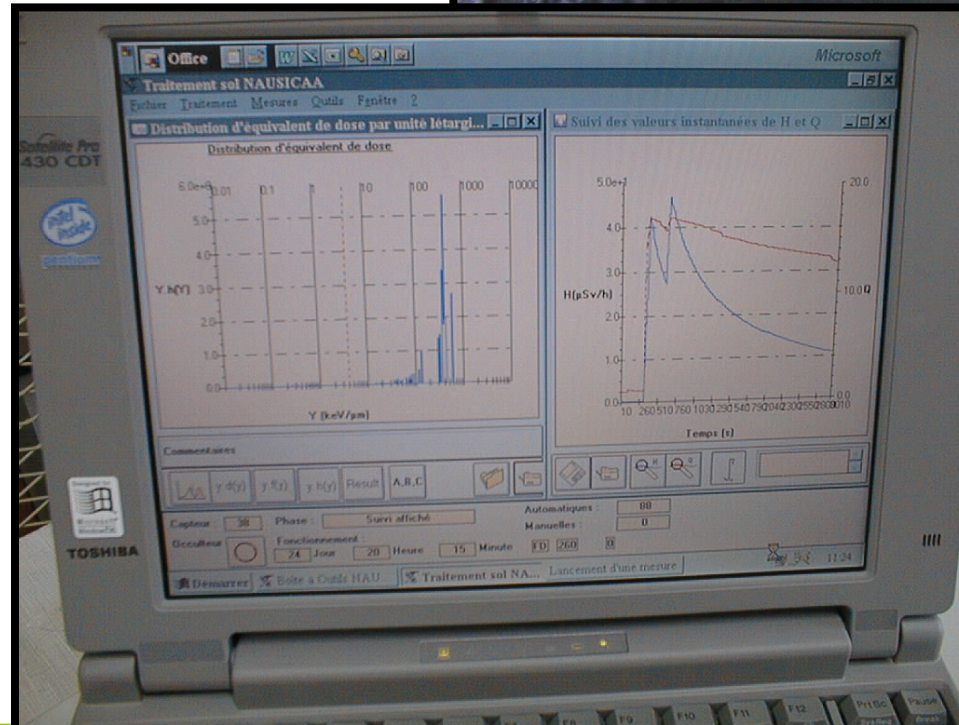
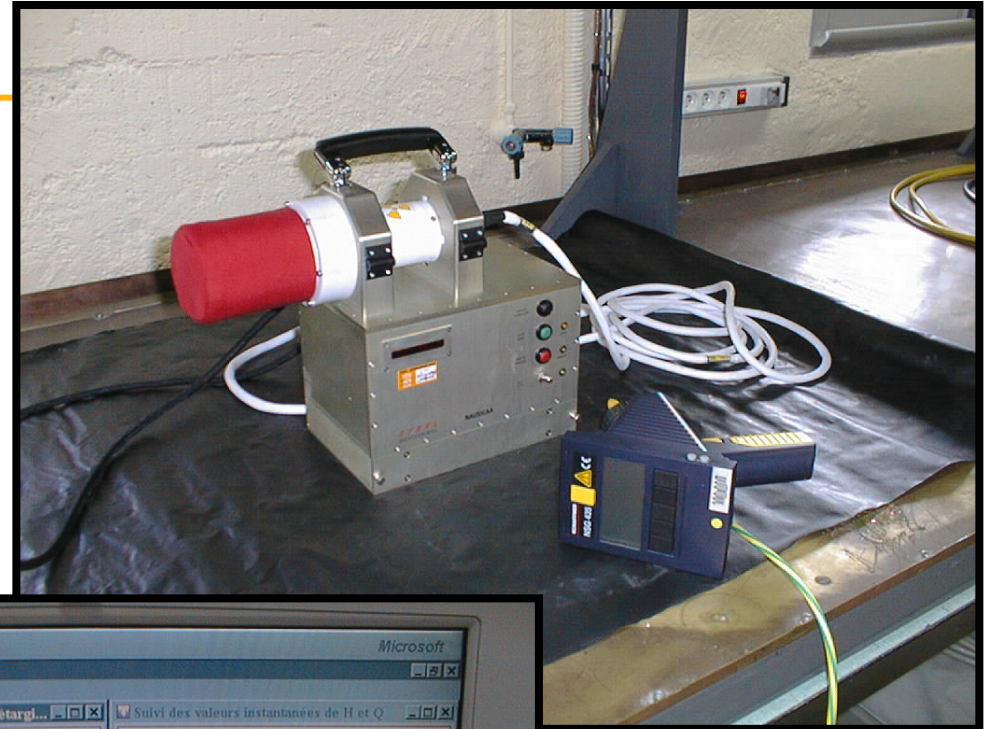
Décharge Electrostatique d'origine humaine



Décharges Electrostatiques



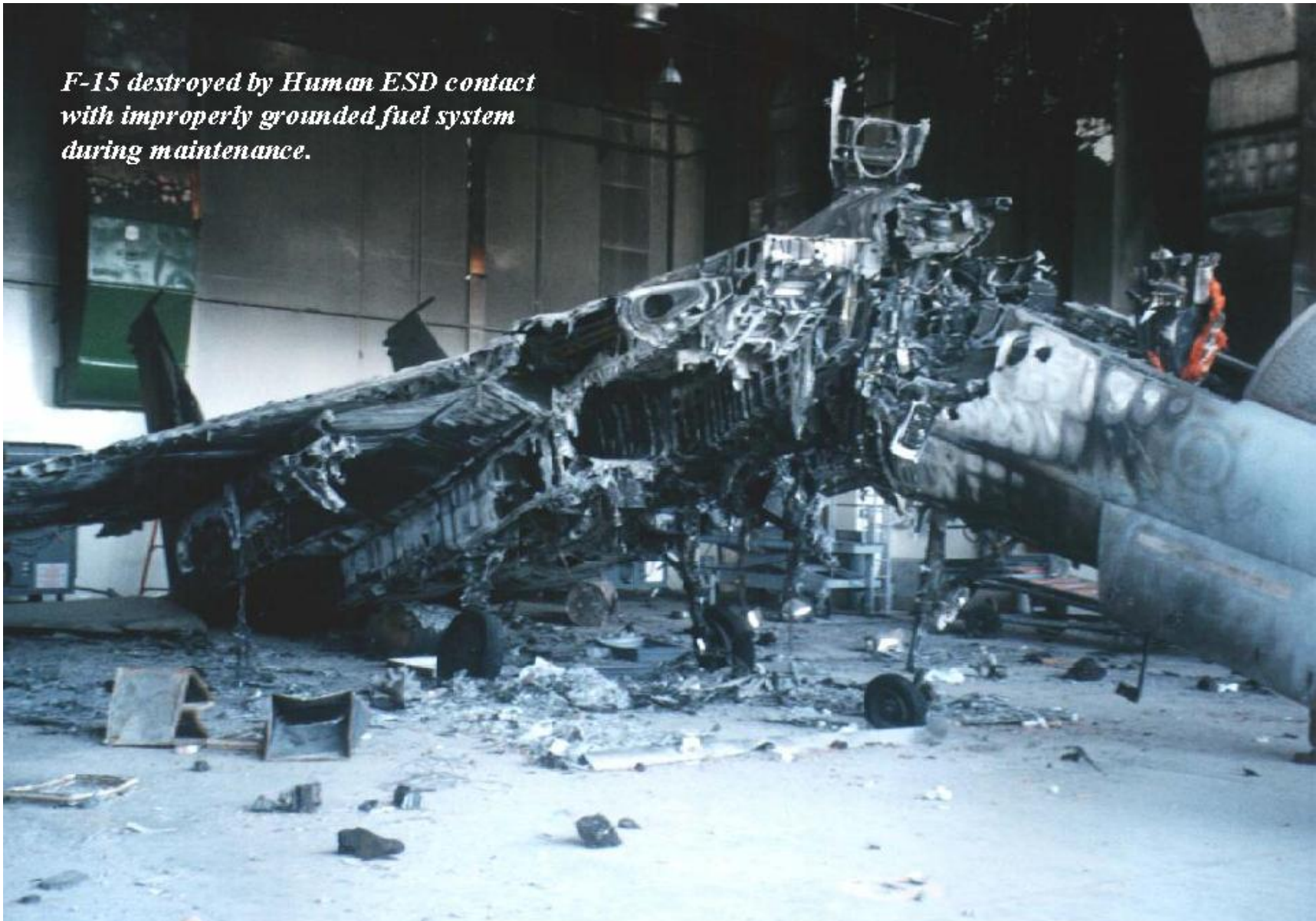
- Niveau résidentiel : 8 kV
- Niveau de test : 2 kV
- Résultat :
- Pics parasites entre 500 et 1000 keV/ μm



DES et mauvaise mise à la masse

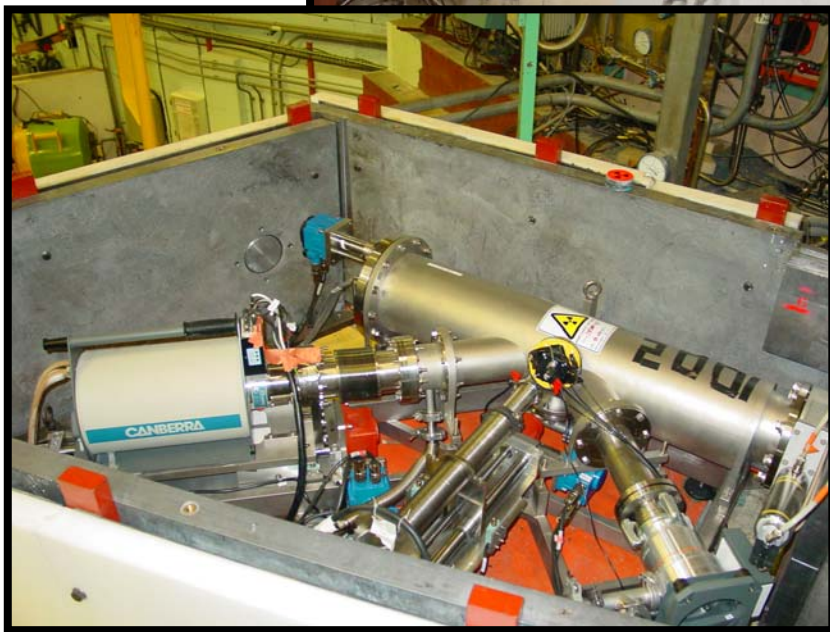
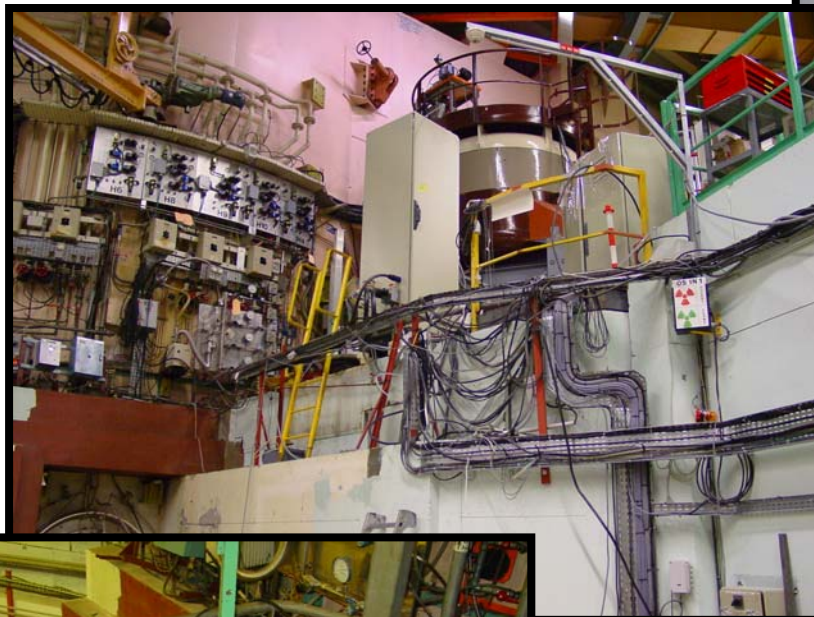
cea

F-15 destroyed by Human ESD contact with improperly grounded fuel system during maintenance.

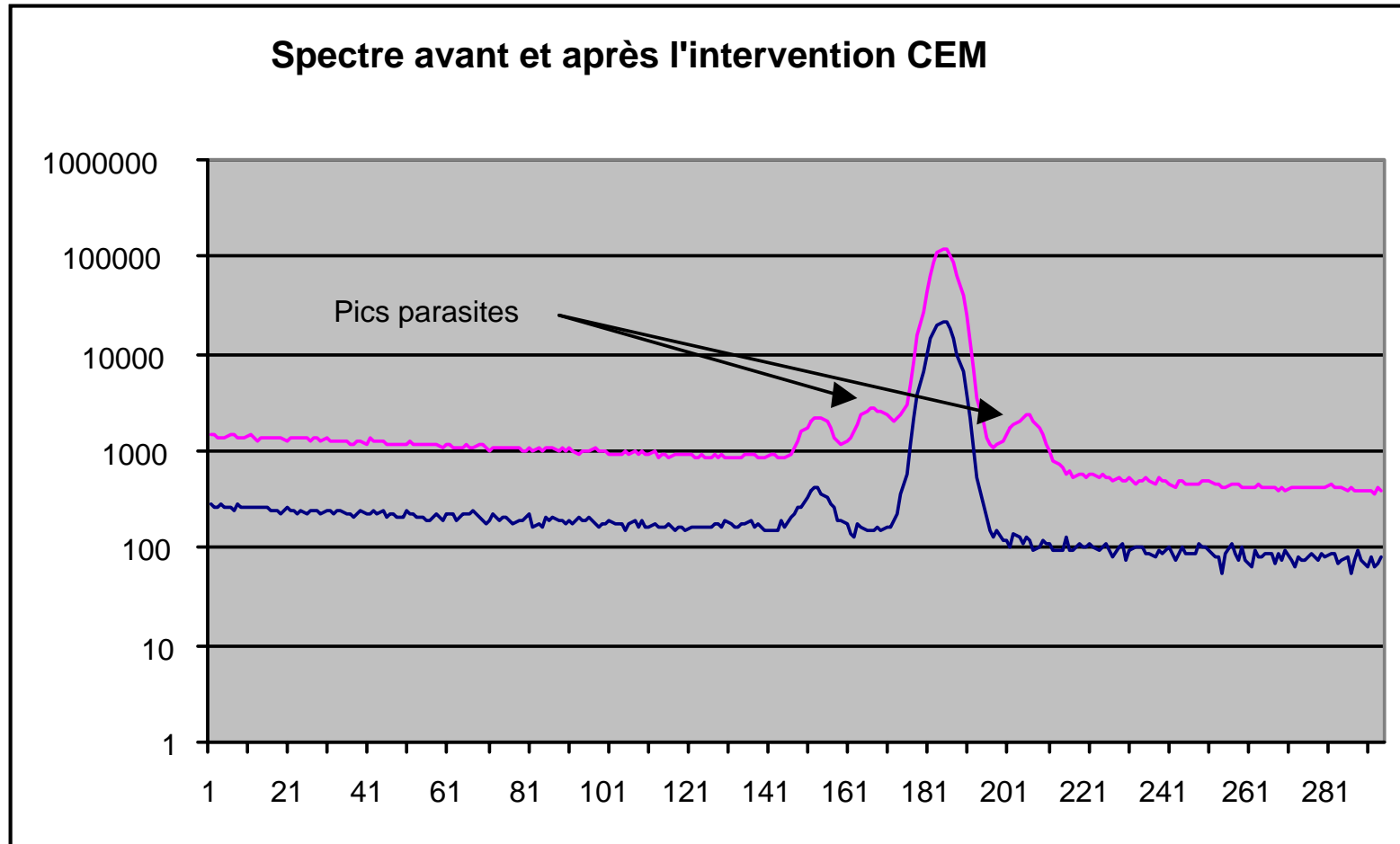


Mesure de l'activation de radioéléments à l'ILL

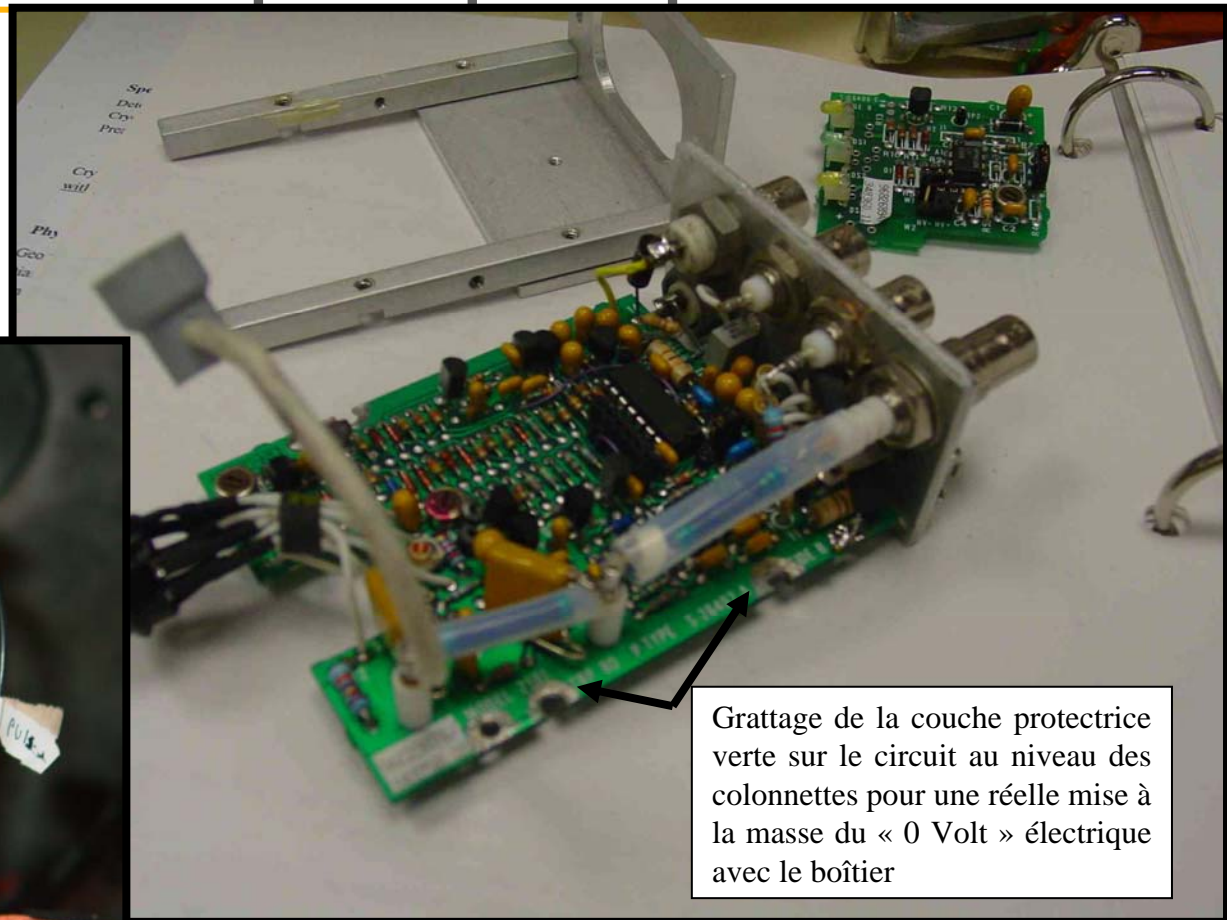
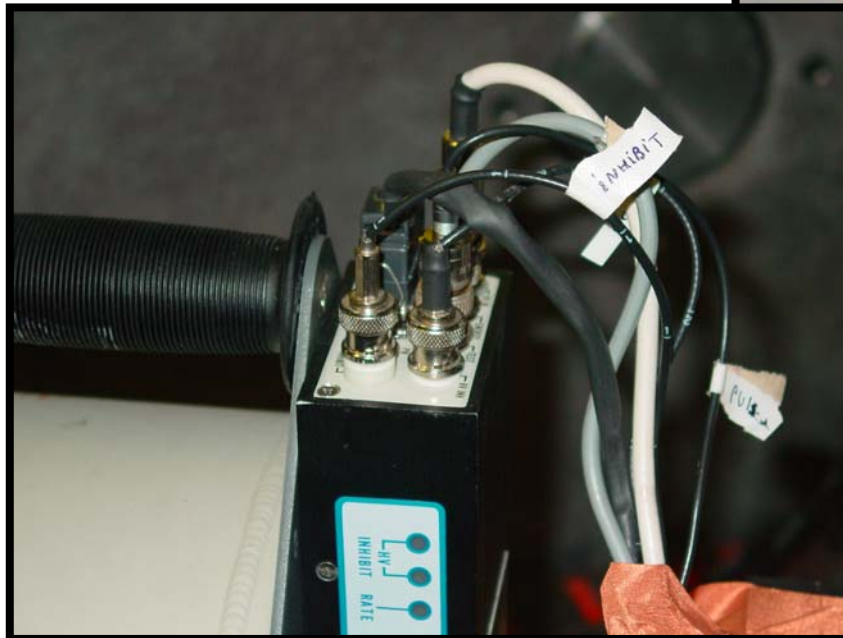
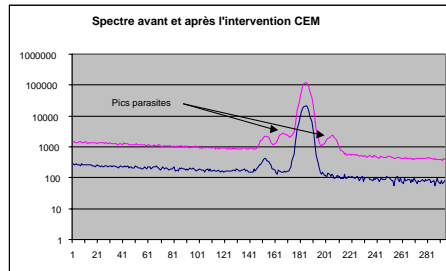
cea



Disparition des raies parasites après l'action CEM



Actions sur l'électronique du préamplificateur



- grattage de toutes les pièces du boîtier au niveau des fixations afin de retirer le traitement de surface qui est en général isolant
- serrage de toutes les vis de fixation
- grattage de la couche protectrice verte sur le circuit au niveau des colonnettes
- soudage d'une petite tresse entre le plan de masse de la carte électronique et la masse du connecteur de sortie « signal »

CONCLUSION

Murphy était un optimiste.

Postulat de O'Toole