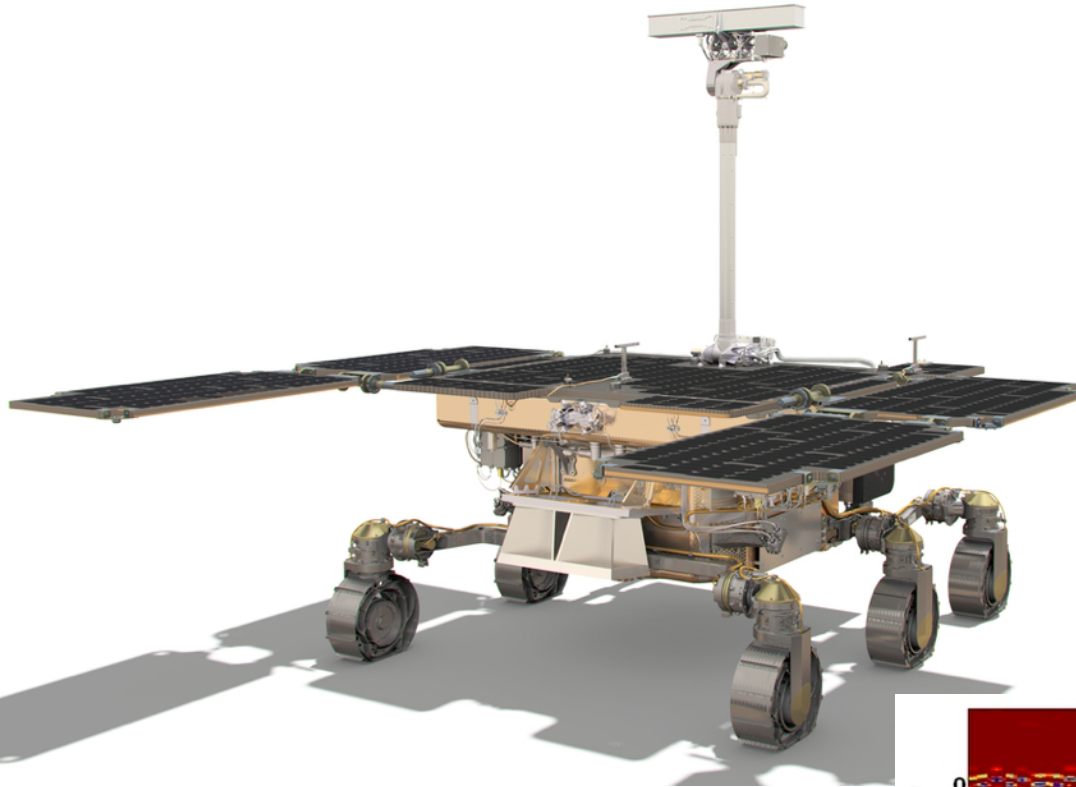


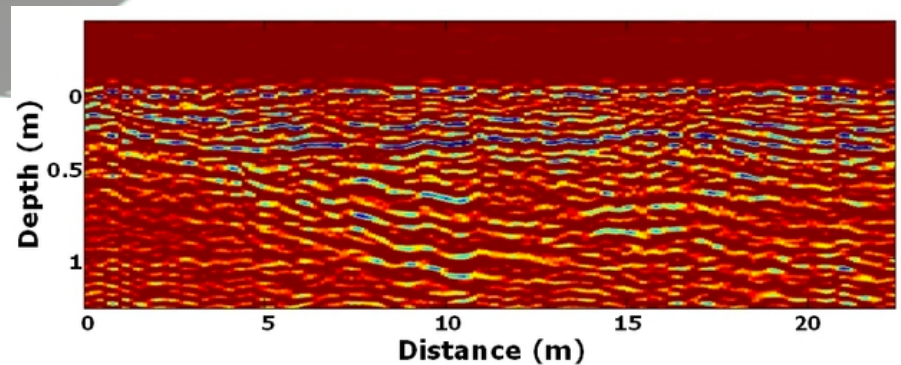


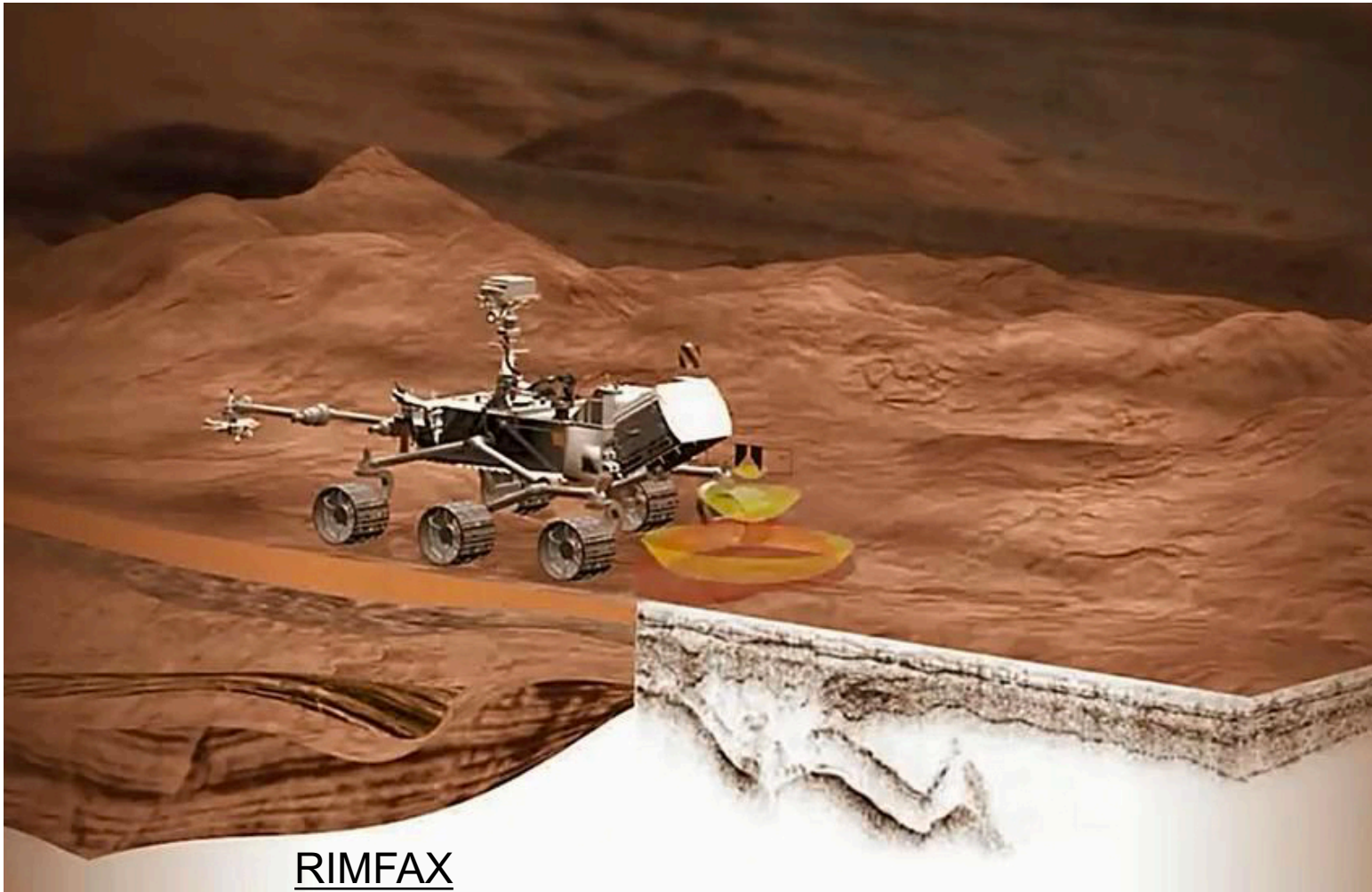
Conception d'Instruments Spatiaux : Recherche de Fiabilité

Philippe Caïs
Laboratoire d'Astrophysique de Bordeaux



WISDOM
Radar à pénétration de Surface





RIMFAX

Radar à pénétration de Surface

- Mise en orbite avec une fusée
 - Forte poussée, vibrations et chocs très importants
- Espace autour de la terre
 - Contraintes du vide
 - Températures extrêmes
 - Radiations
 - Effets Corona/Paschen sur Haute Tension
 - Effets de whyskers sur les matériaux Etain pur
 - Etc
 - Mettre la photo de la cloche du CNES
- Planétaire
 - Atmosphere corrosive, ou variations diurne/nocturne importantes

Constats

- l'instrument n'est pas réparable (à part Hubble)
- S'il faut changer quelque chose tardivement, cela coûte très cher quand cela est possible
- Malgré toutes les précautions, il y a toujours des risques de perdre son instrument



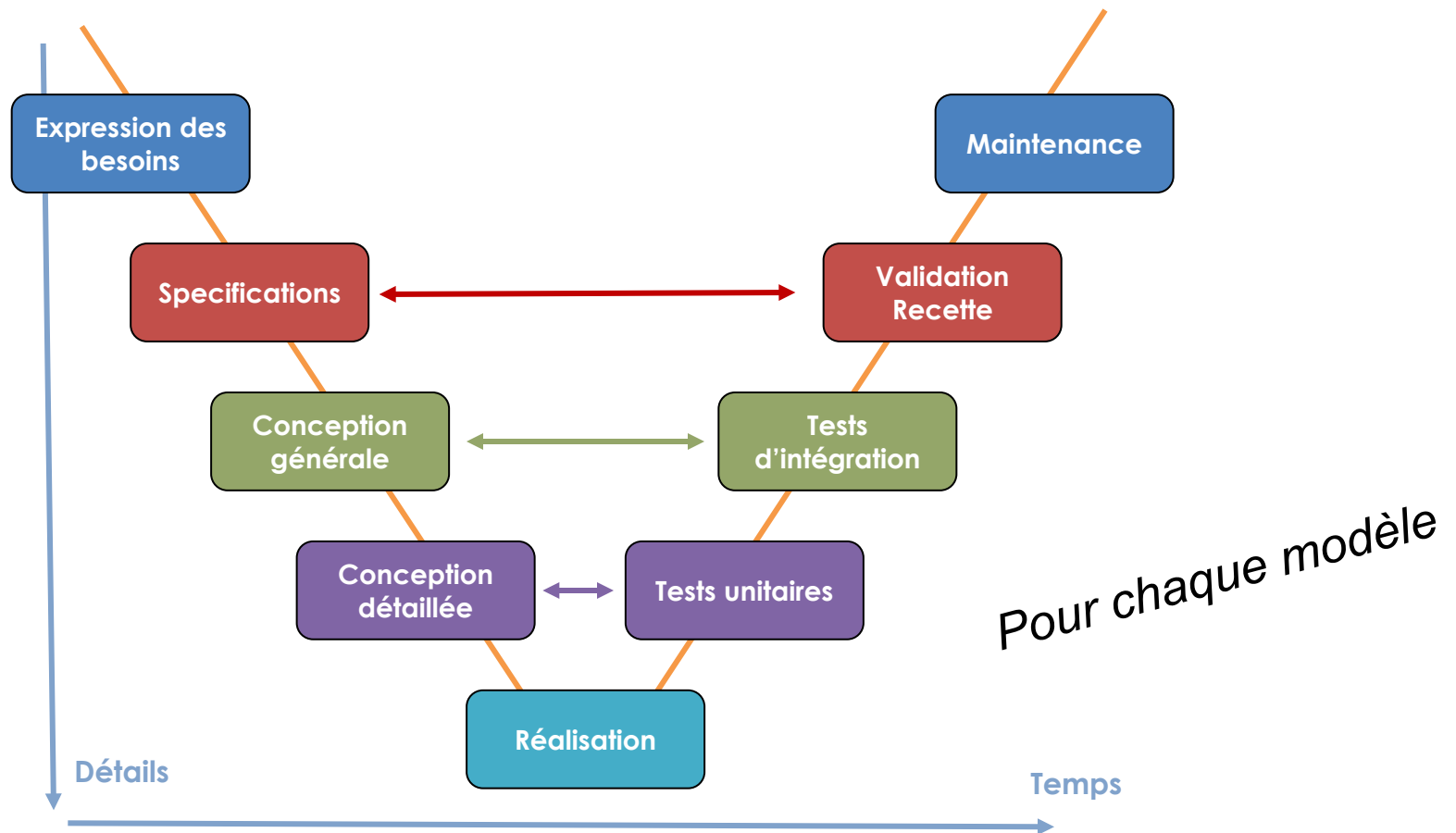
Mars Science Laboratory
Mission Animation

Ce qu'il faut faire

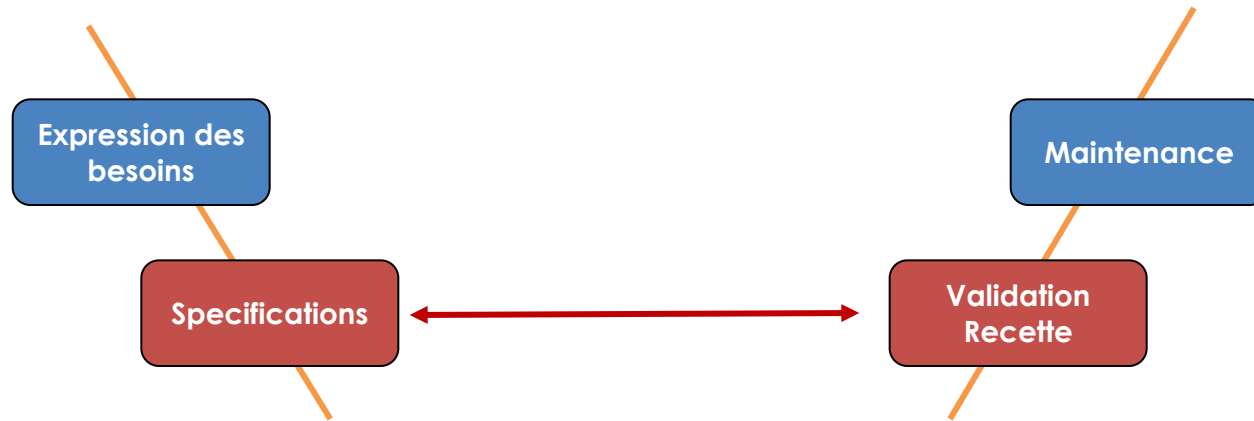
- **Assurer la fonctionnalité** malgré le poids , l'encombrement et la consommation minimalistes
- **Design robuste/fiable** ... ça veut dire quoi?
 - Proposer des redondances pour éviter les 'points de panne unique' et des scénarios en cas de dégradation de l'instrument
 - Trouver des **matériaux et composants 'qualifiés'** ou les **faire qualifier**
 - Plan de **Construction** de l'instrument (EM, QM, FM, FS)
 - Plan de **Validation** de l'instrument (et Calibration)
 - Plan de **Contrôle/Programmation** de l'instrument (reprogrammable en vol, architectures robustes)

Objectif : Assurer la fonctionnalité pour une durée de vie de plusieurs années en orbite ou sur une surface, parfois même après un voyage de 10 ans dans l'espace (Rosetta)

- Adopter une démarche 'spatiale' à tous les niveaux du développement



- Définition des Spécifications et leur vérification



- Injecter les spécifications d'environnement. Ex sur MAR2020, on a 300 spécifications qui viennent de l'environnement martien !
- Et pour chacun, il faut prévoir comment valider (inspection, analyse, tests) et le démontrer

- Conception générale



- **Maîtrise des risques techniques**

- AMDEC ou FMECA

- Évaluer l'impact, ou la criticité, des modes de défaillances des composants d'un système sur la fiabilité, la maintenabilité, la disponibilité et la sécurité de ce système

- **Basé sur l'analyse fonctionnelle**

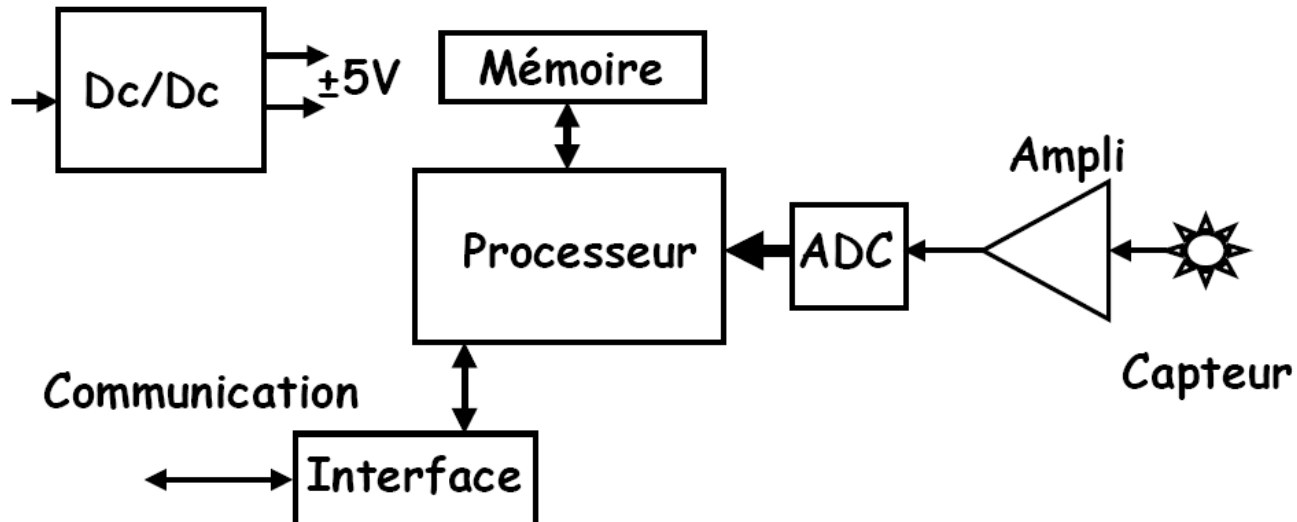
- Découpage fonctionnel
- Analyse de défaillance puis identification des risques en fonction de leur criticité
- Mise en place d'actions correctives si nécessaire
- Liste des symptômes liés aux pannes

- **Scénarios d'injection de fautes au niveau Software**

Exemple d'assurance produit

Diagramme fonctionnel

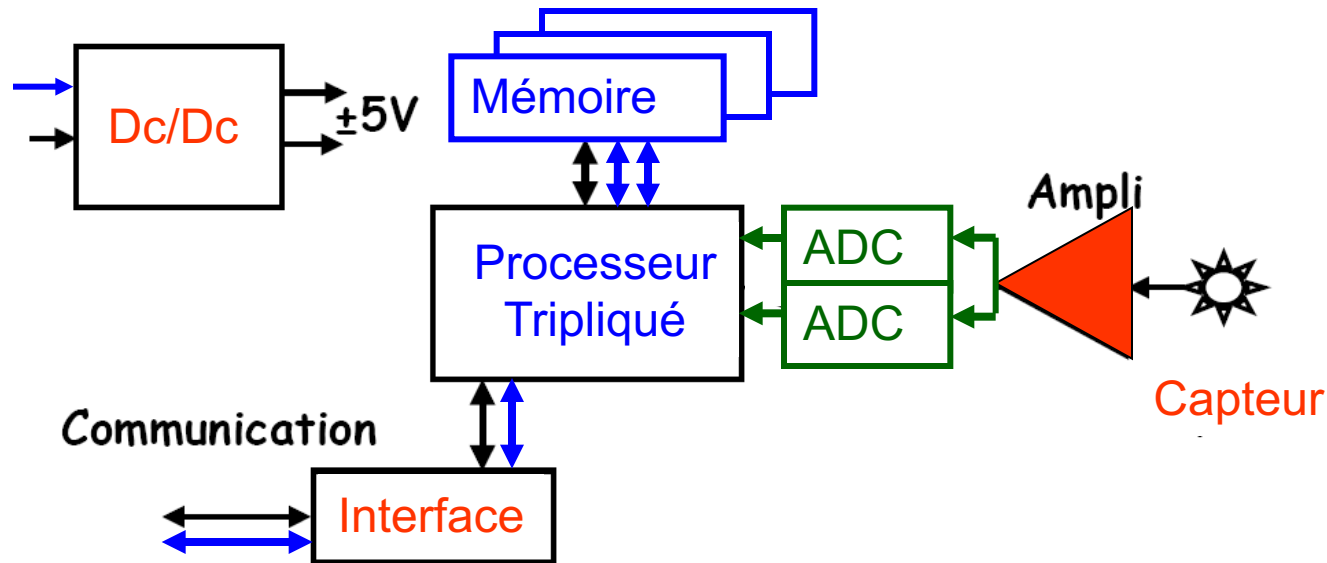
Réseau Qualité IN2P3



ID #	Fonction		Mode de défaut	Cause probable	Effet du défaut sur		Gravité	Détection	Remarques
					Système	Projet			
1	Réception		Pas de réception	Panne de l'interface	Pas de mesure de température	Perte de donné	II Critique	Watch dog	
2				Défaut Liaison	Pas de mesure de température	Perte de donné	II Critique	Watch dog	
3				Panne de l'interface	Mauvaise mesure de température	Données erronées	II Critique	Diagnostics externes	
4				Panne de l'interface	Pas de mesure de température	Perte de donné	II Critique	Watch dog	

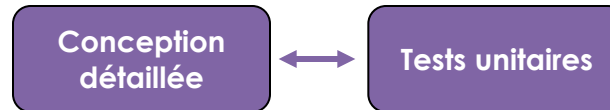
Communication

- Redondances passives ou actives



- Reconfigurabilité : prévoir des commandes pour basculer d'un mode à l'autre (ex. ADC)
- Évaluer les modes dégradés de l'instrument en cas de panne (ex. parallélisation de l'instrument)

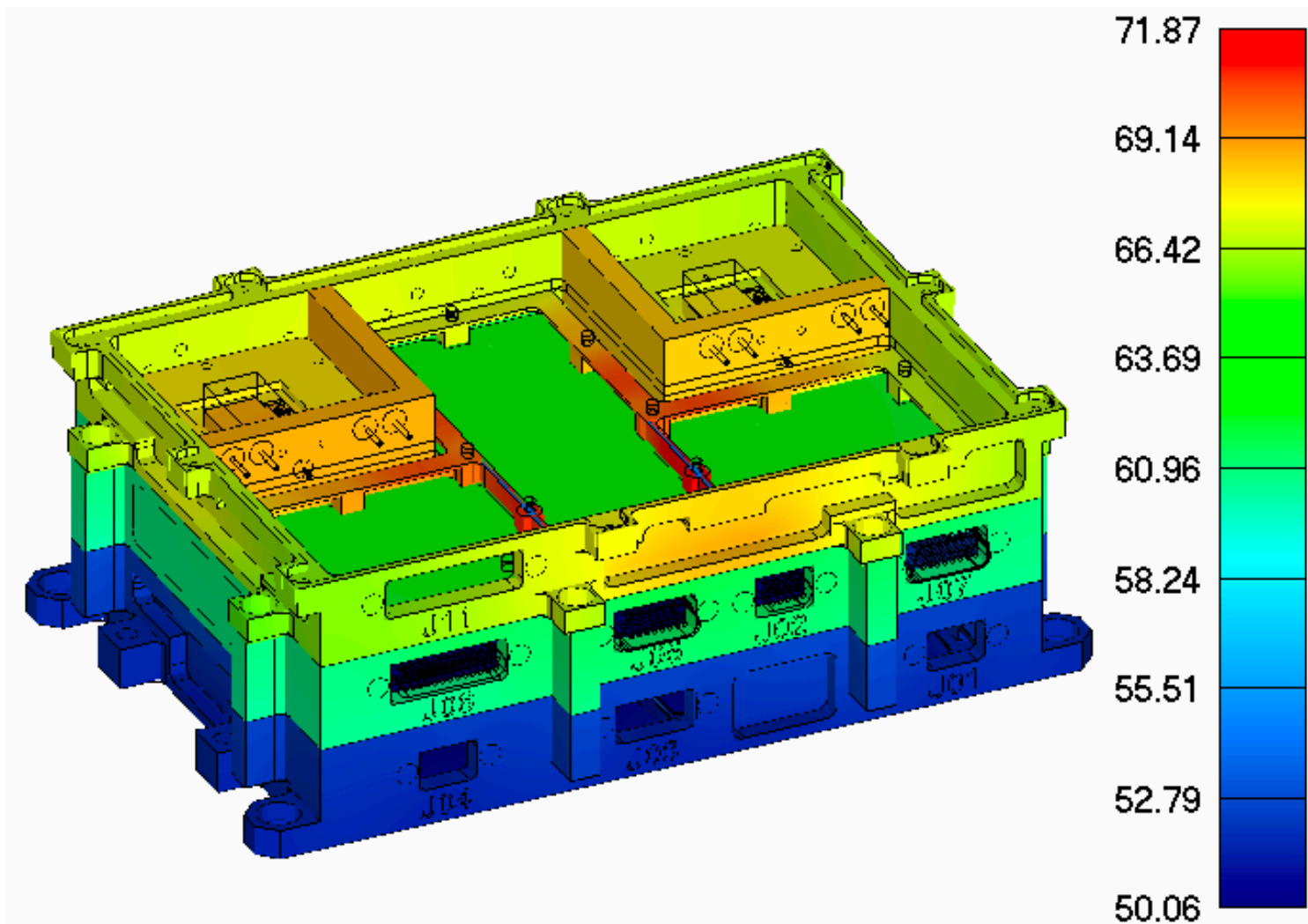
- Conception détaillée



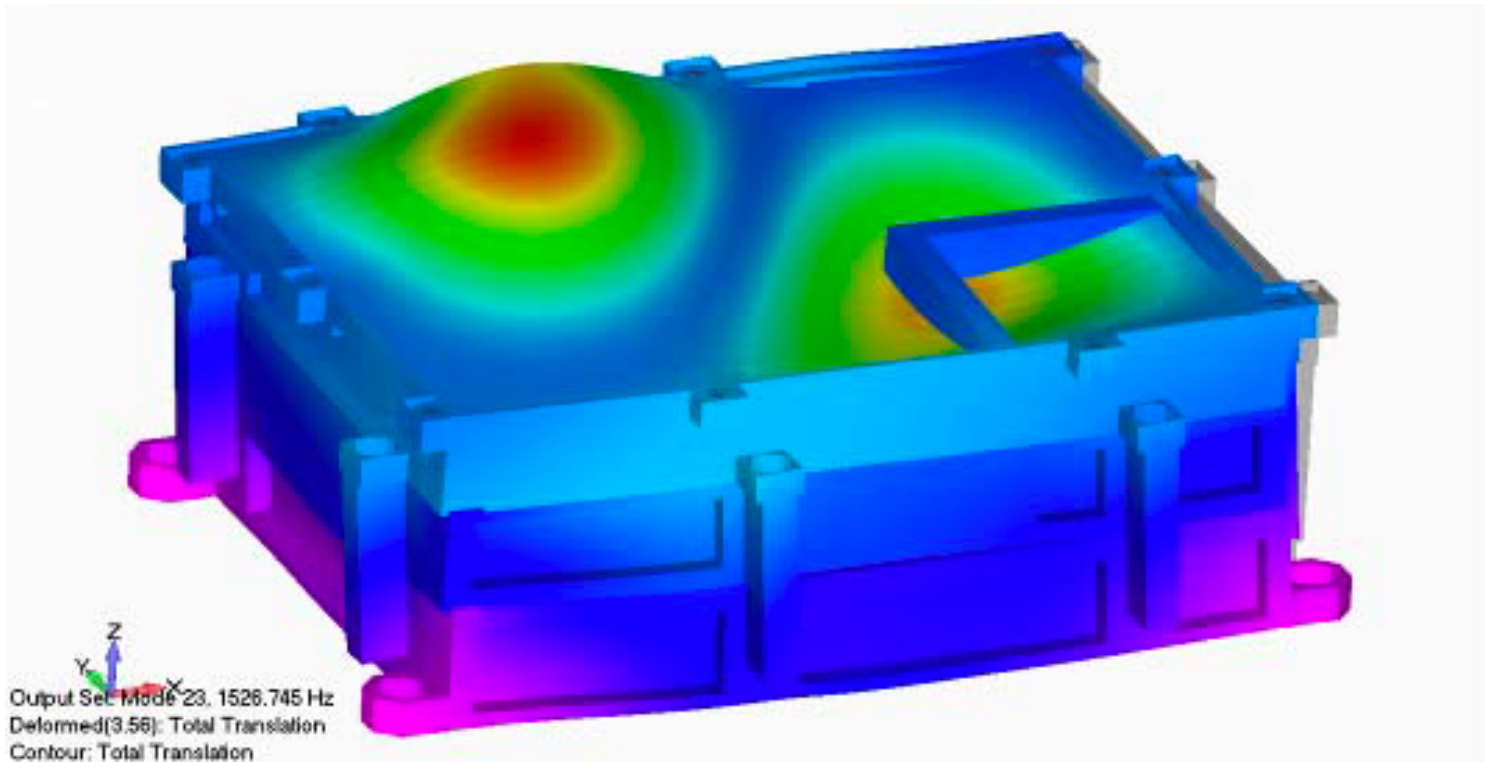
- Analyses du design

- Mécanique : analyse des déformées mécaniques
- Thermiques : analyse des températures
- Optique : projection de faisceaux
- Electronique :
 - Analyse de Pire Cas
 - Analyse de Stress des composants/Derating
 - Dossiers de justification, etc
- Logiciel
 - Analyse de timing interne et aux I/F
 - Tests unitaires des fonctions
 - Triplication

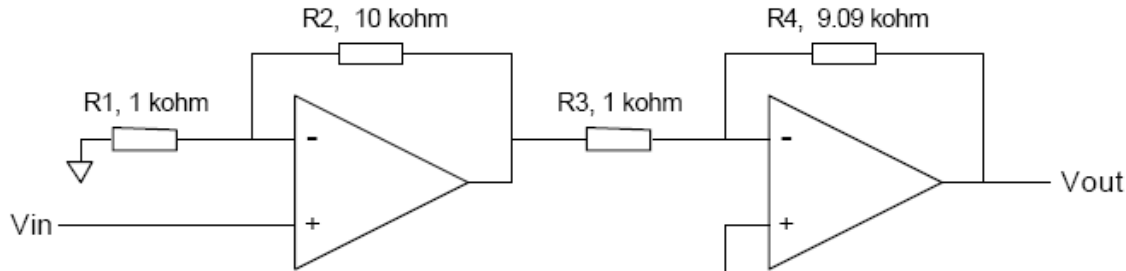
- Champ des températures



- Déformation élastique



- Il existe des méthodes statistiques (Monte-carlo), mais aussi la méthode des valeurs extrêmes



- Tolérances de 1% sur les résistances mais +2% tenant compte de la température, aging, etc

This results in a nominal gain of $A_{nom} = 100$

The extreme worst case minimum gain

$$A_{min} := \frac{R4_{min}}{R3_{max}} \left(1 + \frac{R2_{min}}{R1_{max}} \right) = 89$$

and the extreme worst case maximum gain

$$A_{max} := \frac{R4_{max}}{R3_{min}} \left(1 + \frac{R2_{max}}{R1_{min}} \right) = 112$$

resistor	nominal	minimum	maximum
R1	1000	970	1030
R2	10000	9700	10300
R3	1000	970	1030
R4	9090	8817	9363

- Ce résultat (+-10%) doit être analysé par rapport à la fin de vie de l'instrument

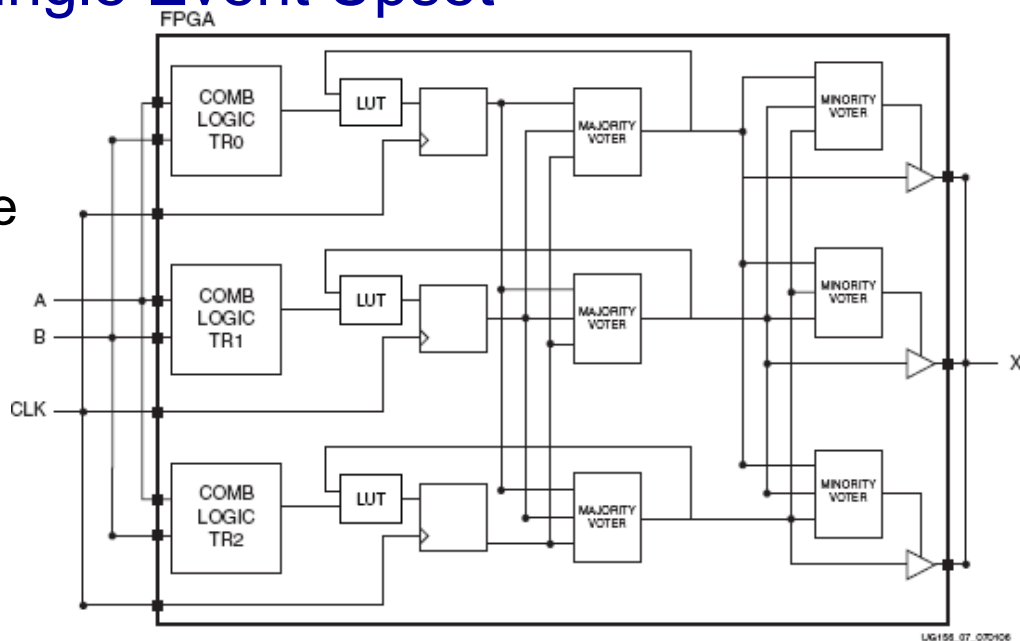
- Analyse fine sur chaque composant pour évaluer le stress appliqué
- Règles de derating : PSS-01-301 → quelle marge prendre pour les capas / résistances, quelle température de jonction des composants ... et à 70°C !!!
- Ex. sortie Vout sur 50ohms avec +5V

Part	C	VOLTAGE			PSS-301	
n°		Act.	Rated	Stress	D'rtng	Comp.
PCB temperature +30°C		V	V	%	%	Y/N
Resistors - 0805	Y	5	75	7%	80%	Y
OP270	Y	15	22	68%	80%	Y

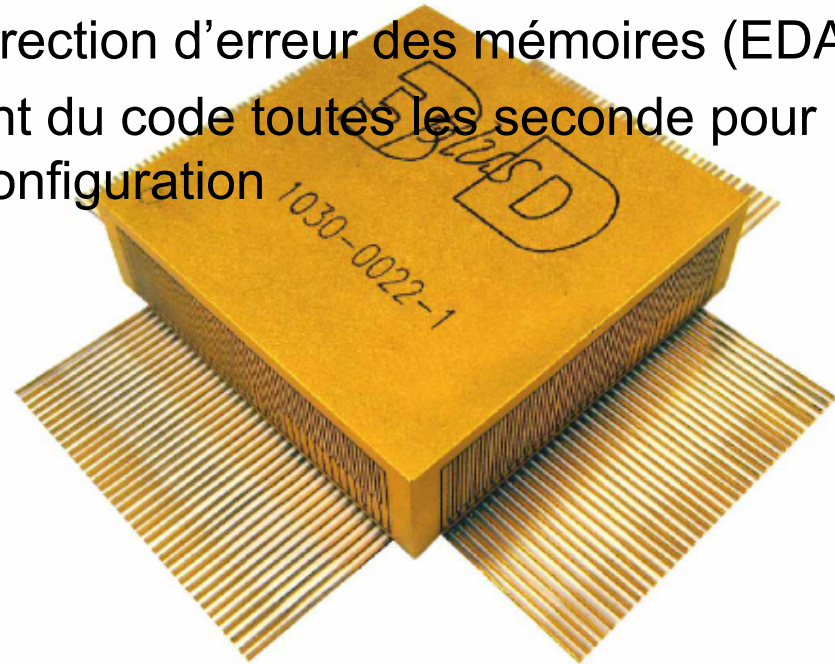
Part	C	POWER DISS.				
n°		Act.	Rated	Stress	D'rtng	Comp.
PCB temperature +30°C		mW	mW	%	%	Y/N
Resistors - 0805	Y	100	200	50%	50%	Y
OP270	Y	200	500	40%	50%	Y

Part	C	Tj					Comment
n°		Act.	Rated	Stress	D'rtng	Comp.	
PCB temperature +30°C		C	C	%	C	Y/N	
Resistors - 0805	Y	42	70	60%	70	Y	125°C/W et 0.1W consommés
OP270	Y	34	150	23%	110	Y	20°C/W et 0.2W consommés

- Contrôle de l'instrument, le traitement et le stockage des données est souvent assuré par un FPGA.
- Cibles disponibles : Actel , Atmel et maintenant Xilinx (Q-Pro – 17k€ /composant)
- Certaines cibles sont seulement programmables 1 fois!
- Protections contre les Single Event Upset
 - Actel, Atmel tripliquées et certifiées insensibles
 - Xilinx en mettant en place les outils de Triplification (TMRtool) et méthode de scrubbing



- Exemple de code de mémoire de masse pour les Mars Exploration Rover (Spirit, Opportunity)
 - 3x1Gbyte de 16bits
 - Triplication de toutes les broches I/O
 - Vote majoritaire sur chaque I/O et sur chaque cellule du FPGA par logiciel (XTMRtool)
 - Code de détection et correction d'erreur des mémoires (EDAC)
 - Scrubbing : rechargement du code toutes les seconde pour rafraîchir la couche de configuration



- Réalisation

Réalisation

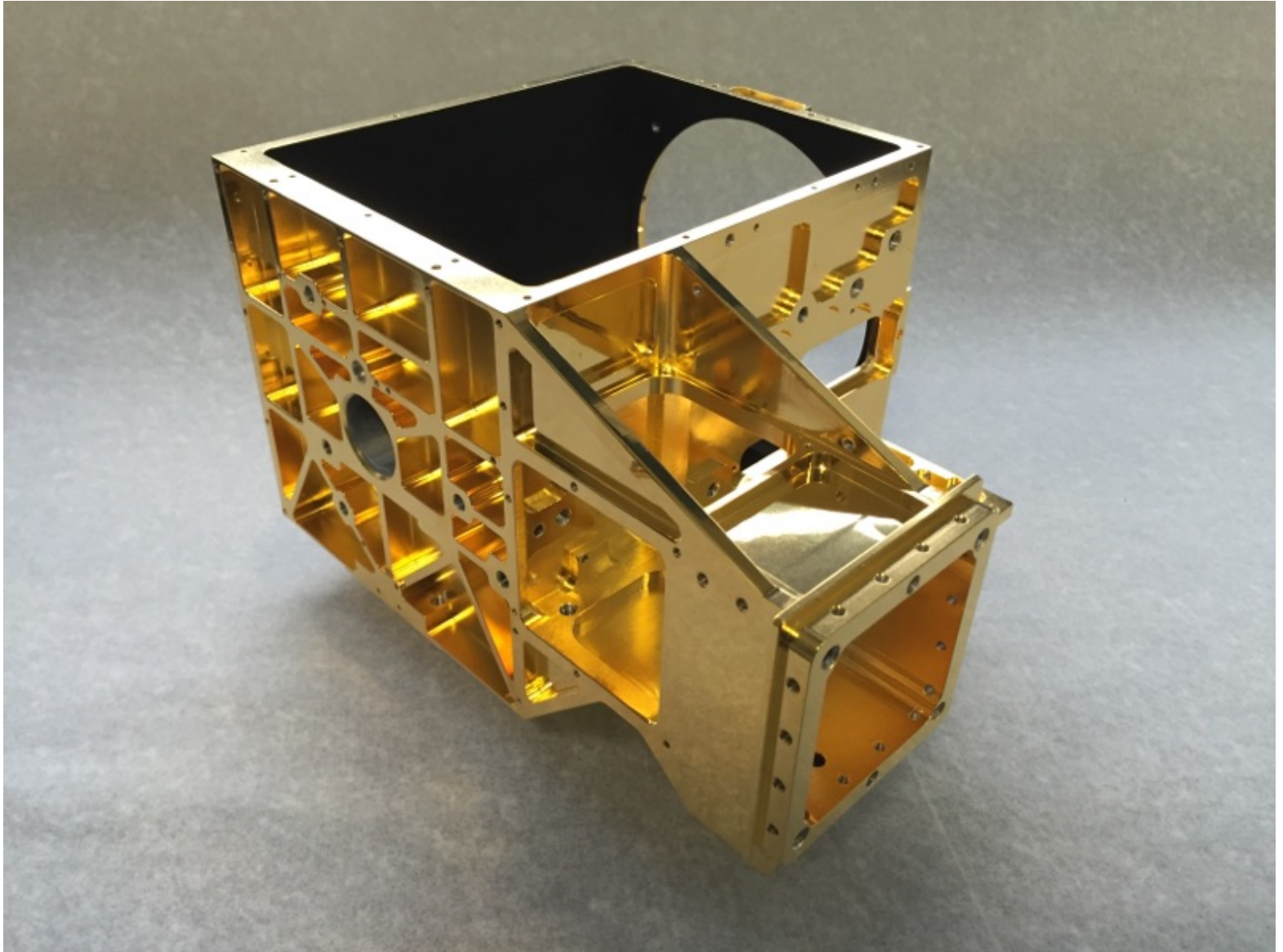
- Sous traitants qualifiés CNES, ESA, NASA

- Mécanique :

- Utiliser les matériaux qualifiés adaptés (aluminium, titane, invar , u-Métal...)

- Electronique :

- Composants qualifiés MIL, ESA, NASA ou se qualifier soi-même les COTS
- Adaptés suivant le profil de mission (température, dose)



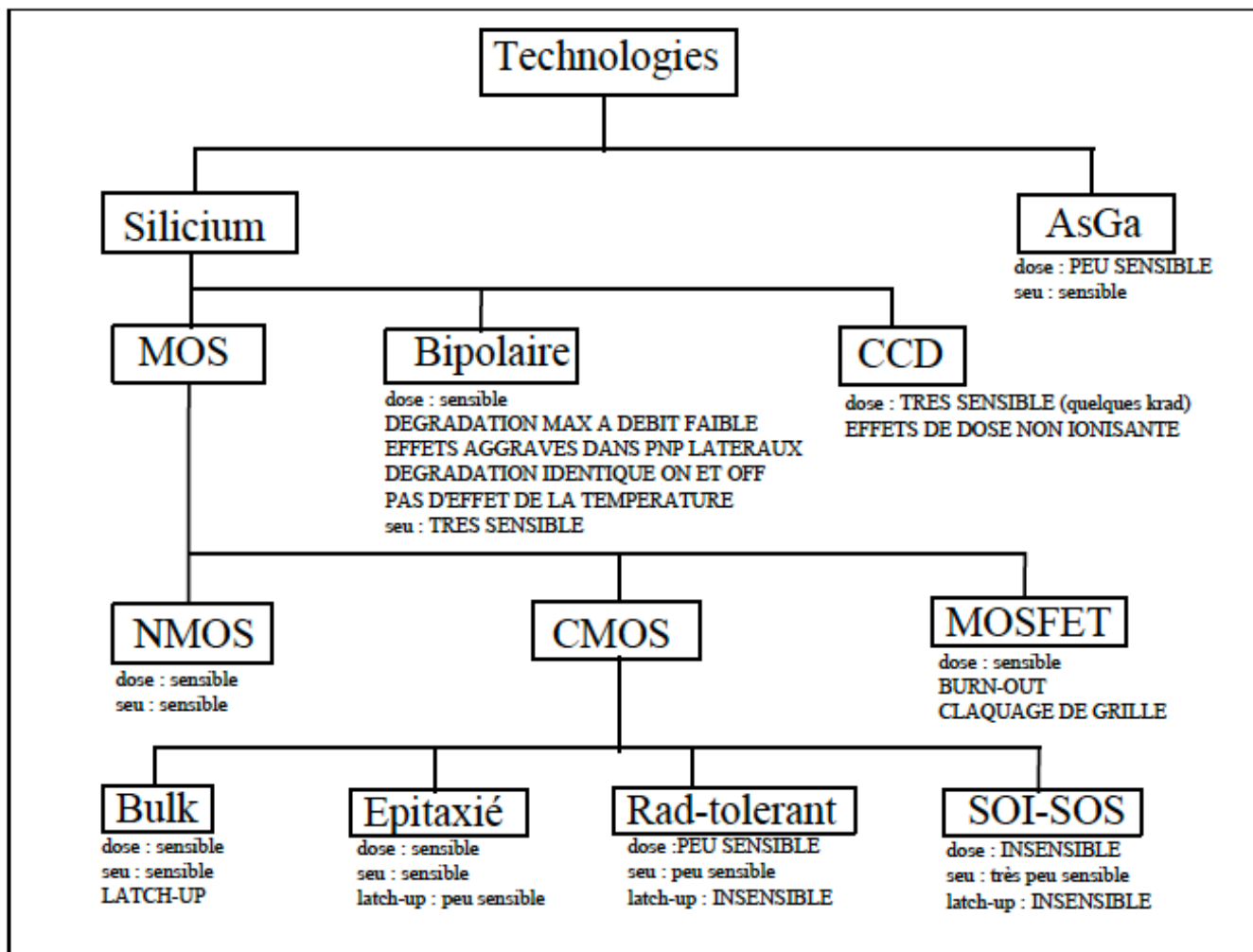


Tests unitaires

2017-09-26 09:01:48

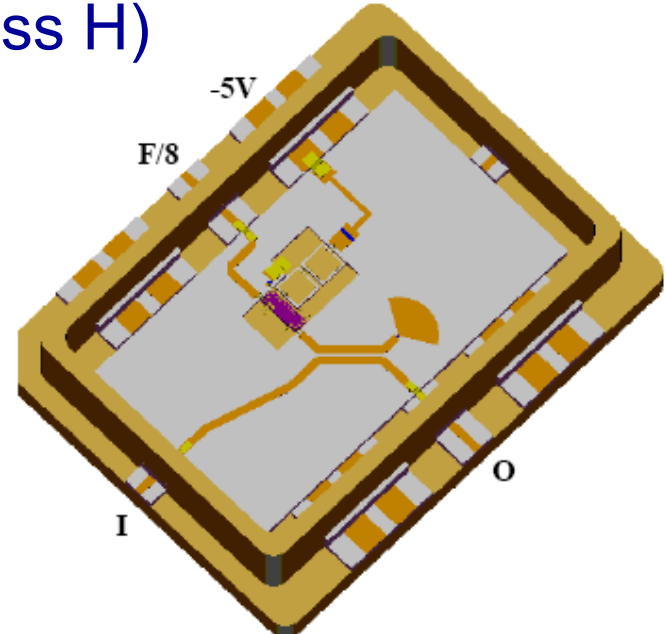


Choix de la technologie

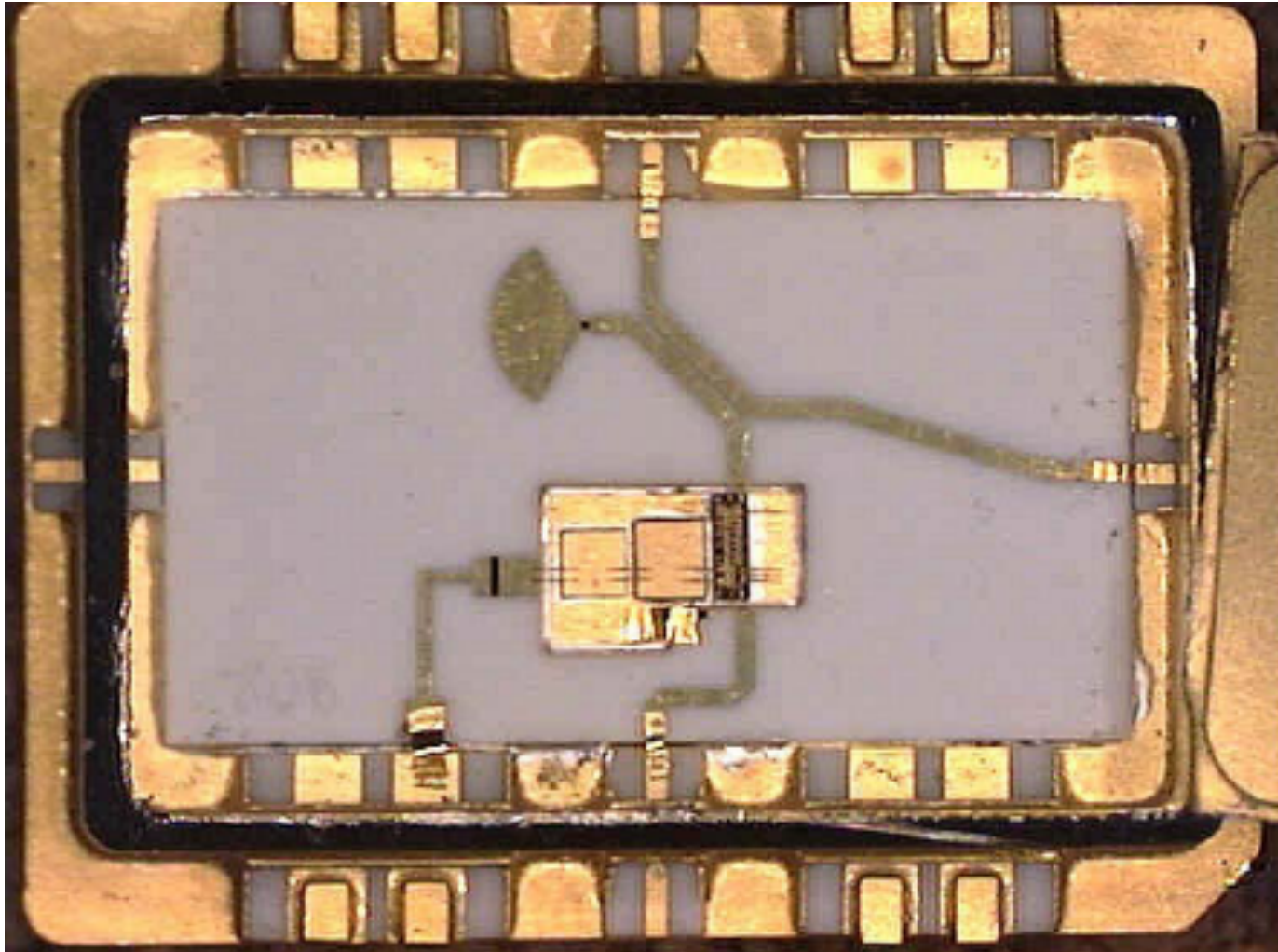


Composants qualifiés

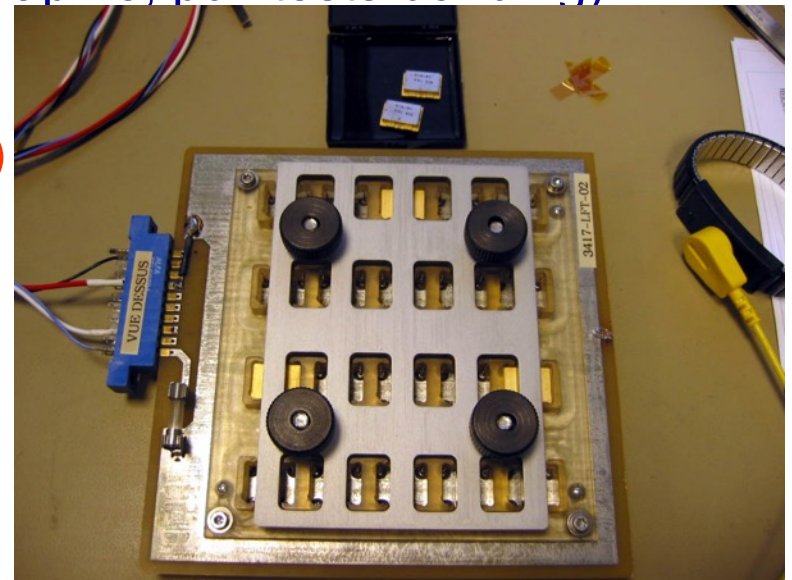
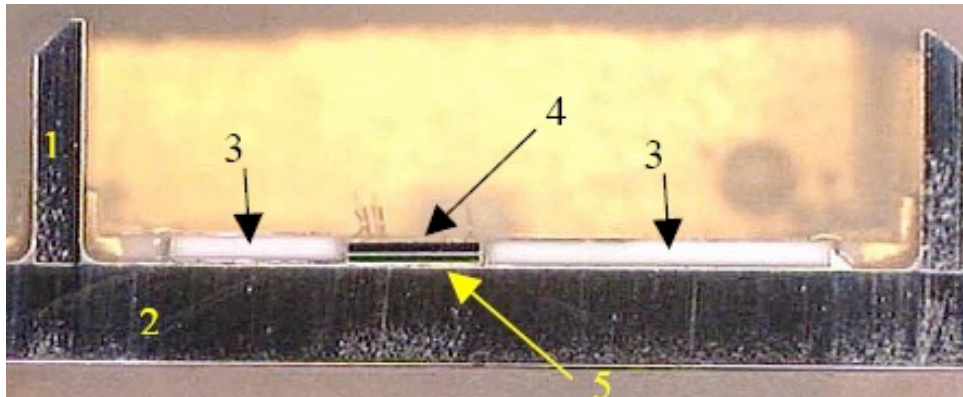
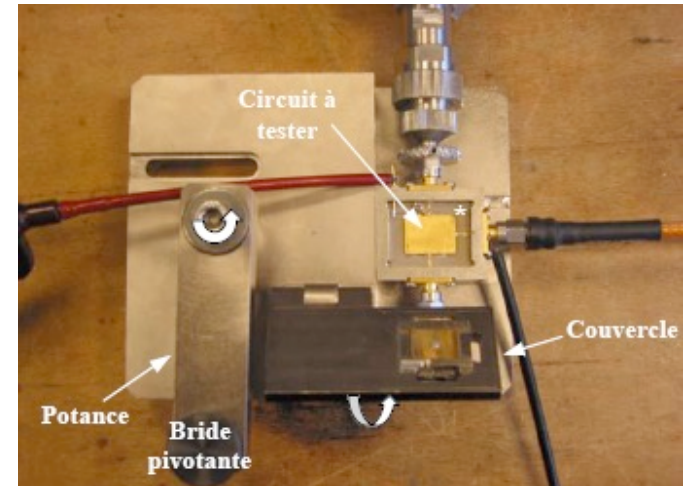
- Composants passifs (quelques 0603) et certains actifs sont disponibles sur catalogues (Preferred Parts List). Se conformer aux spécifications pour chacun des composants (ex. 5962-8872101V2A = OP270)
- Sinon il faut faire qualifier son composant (exemple d'un hybride – standard 38534 class H)



- Fabrication de l'hybride



- Cyclages thermiques $-55/+125^{\circ}\text{C}$
- PIND test (détection de particule)
- Shocks (1500g 0.5ms)
- Radiations (ONERA)
- Détection de Fines fuites et Grosses fuites
- Analyse de Gas Residuel
- Lifetests (125°C pdt 2000h)
- Destructive Physical Analysis (radiographie, pull tests bonding)
- 1 composant coûte donc 100fois le prix d'un commercial (OP270 à 500\$)

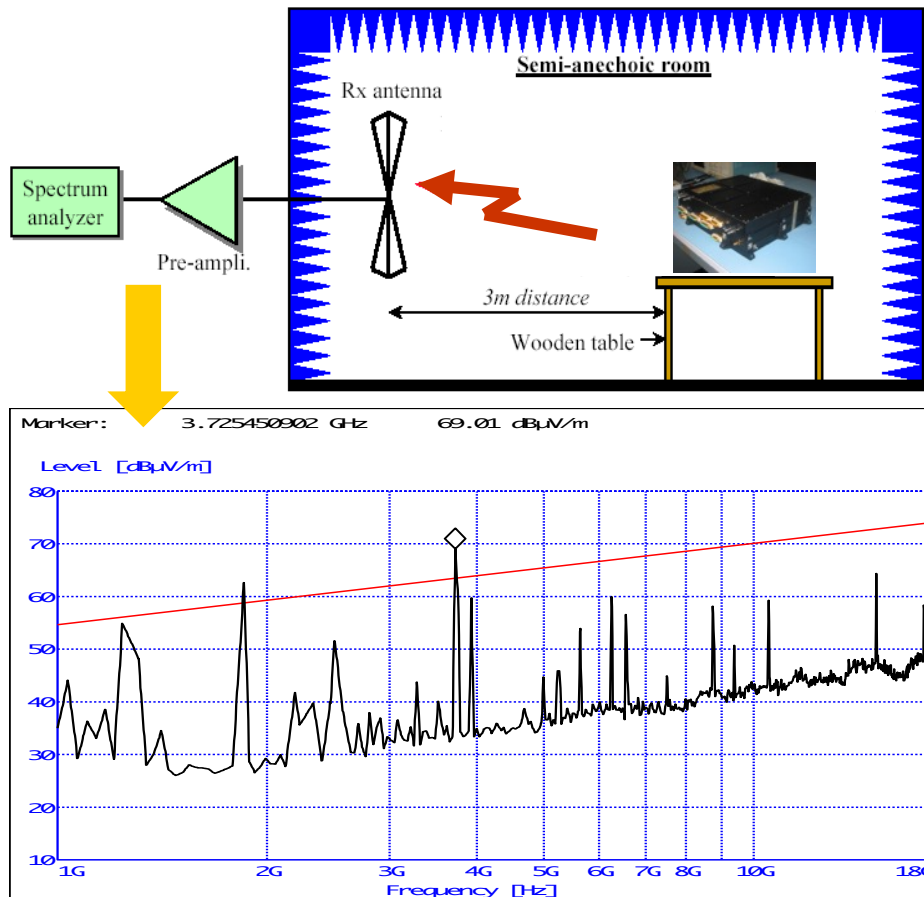


- Validation : Recette



- Une fois l'instrument assemblé, il faut passer les tests de qualification :
 - EMC/EMI
 - Vibration / chocs
 - Vide Thermique
- Puis faire la calibration de l'instrument
- Livraison avec certification (par exemple, dégazage des instruments pour Mars)

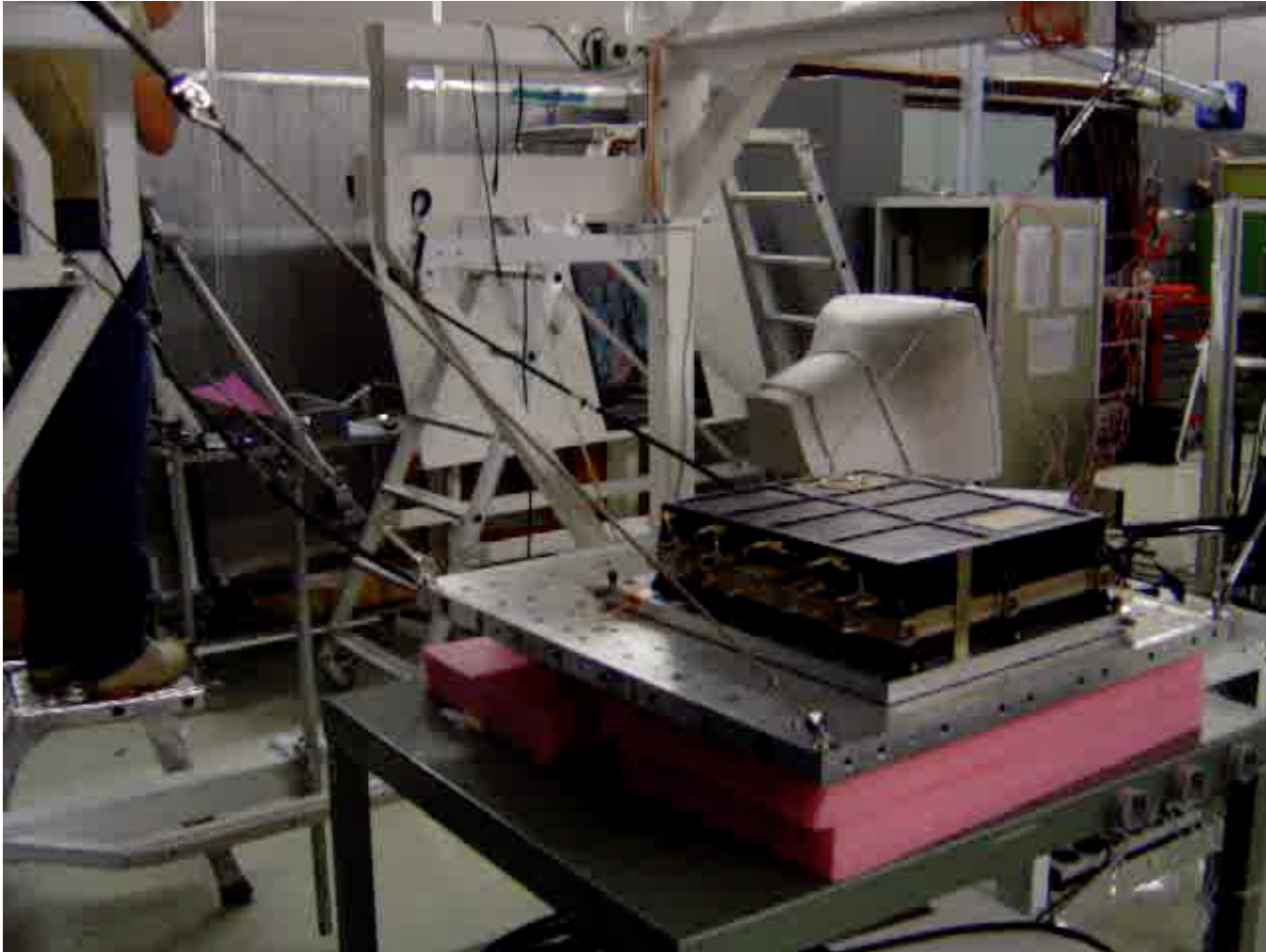
- Tests de Compatibilité Electro-Magnétique (Alcatel) en chambre anéchoïque. Étude des perturbations émises ou subies par l'instrument



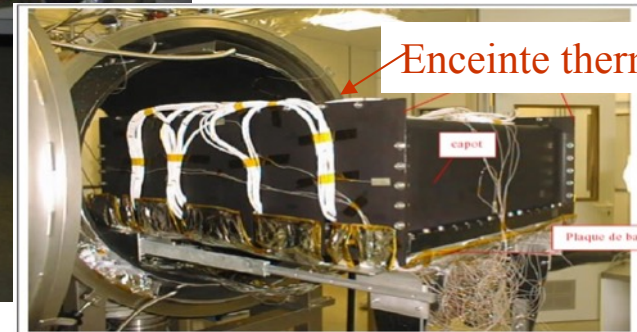
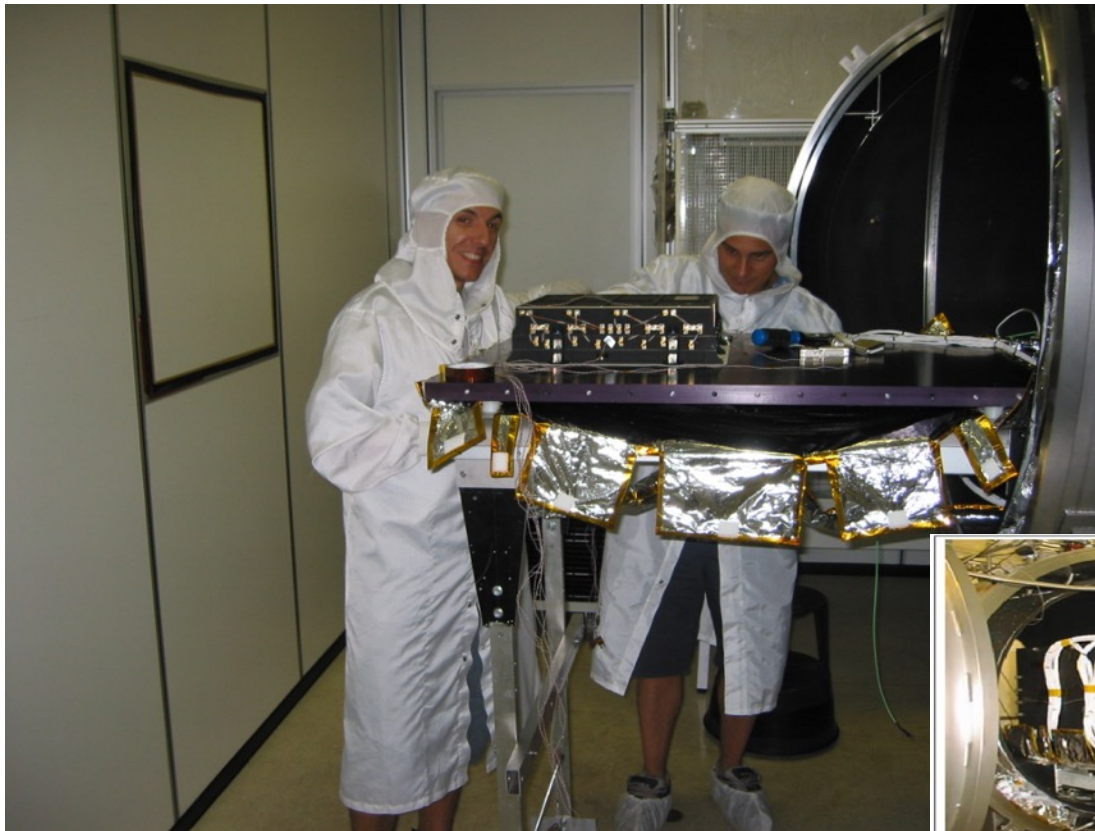
- Test de vibrations axe Z (Alcatel) – 25g sinus – 2minutes



- Chocs axe X (Alcatel) – 2000g de 2 à 10kHz

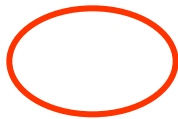


- Tests de vide (qlq 10^{-6} mbar) thermique (-55/+40°C) au LAM Laboratoire d'Astrophysique de Marseille



- Test 7jours 24h/24h

- Intégration sur satellite (Friedrichshafen – Allemagne-1 an avant lancement)

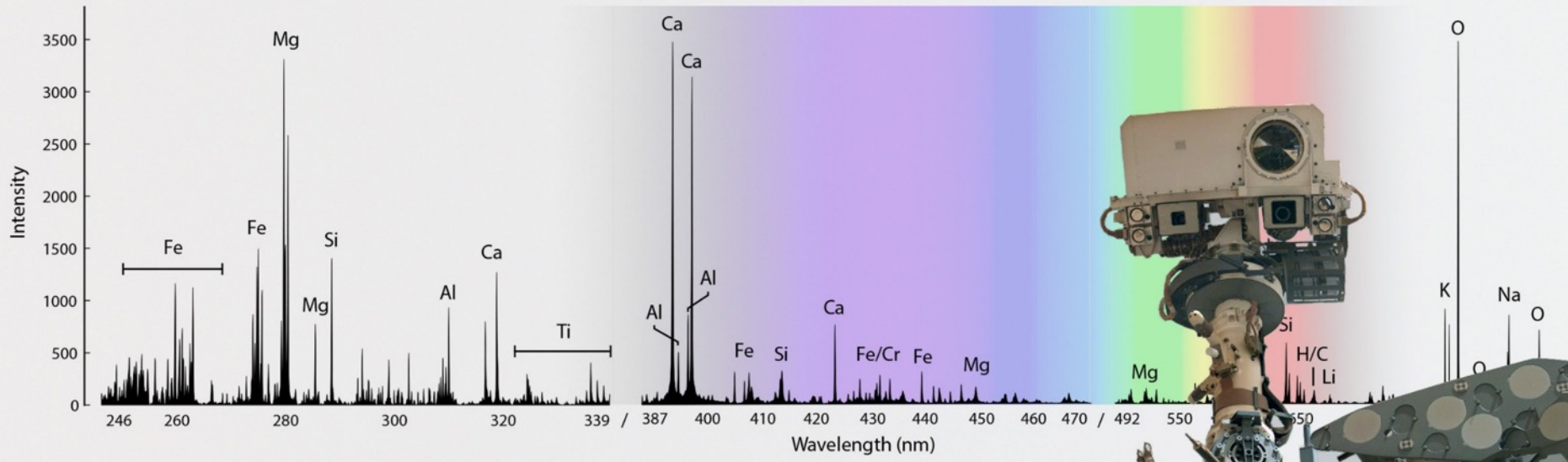


Conclusion

- **La recherche de fiabilité** se fait à chaque étape de la conception, réalisation et validation.
- Une solution simple est par essence plus robuste
- Les scénarios de pannes et les opérations dégradées doivent être envisagées et traitées

- **En conception/fabrication**
 - La meilleure stratégie est quand même d'utiliser ce qui est déjà 'qualifié' et qui a fait ses preuves
 - Sinon un programme de qualification est nécessaire, ce qui est toujours long et onéreux

- **En validation, c'est l'étape cruciale mais qui arrive souvent tard, donc il faut anticiper**



Merci de votre attention



Inga Nielsen

SAMPLING MARS

In 2020, NASA plans to send a rover to Mars to collect and store tubes of rock and dirt. The plutonium-powered vehicle will have seven instruments and may also carry a helicopter.

SUPERCAM

A laser blaster that can investigate chemical compositions of Martian rocks and dirt from a distance.



HELICOPTER

The rover may carry a helicopter that would fly through the thin atmosphere and scout out the path ahead.

RIMFAX

A ground-penetrating radar to explore beneath the surface.

A plutonium power source supplies electricity to the rover.

MASTCAM-Z

A zoomable panoramic camera.

MEDA

The rover's weather station, to measure temperature, wind speed and other meteorological factors.

SHERLOC

An ultraviolet spectrometer to study mineralogy and chemistry. (Its camera is named WATSON.)

PIXL

An X-ray spectrometer for probing the chemical composition of rocks and dirt close up.

ROBOTIC ARM

The rover arm can extend outwards to make scientific measurements and gather samples. Its instruments can study, in detail, an area about the size of a postage stamp.

MOXIE

An instrument to produce oxygen from carbon dioxide in the Martian atmosphere, as a test for creating resources for future astronauts.

