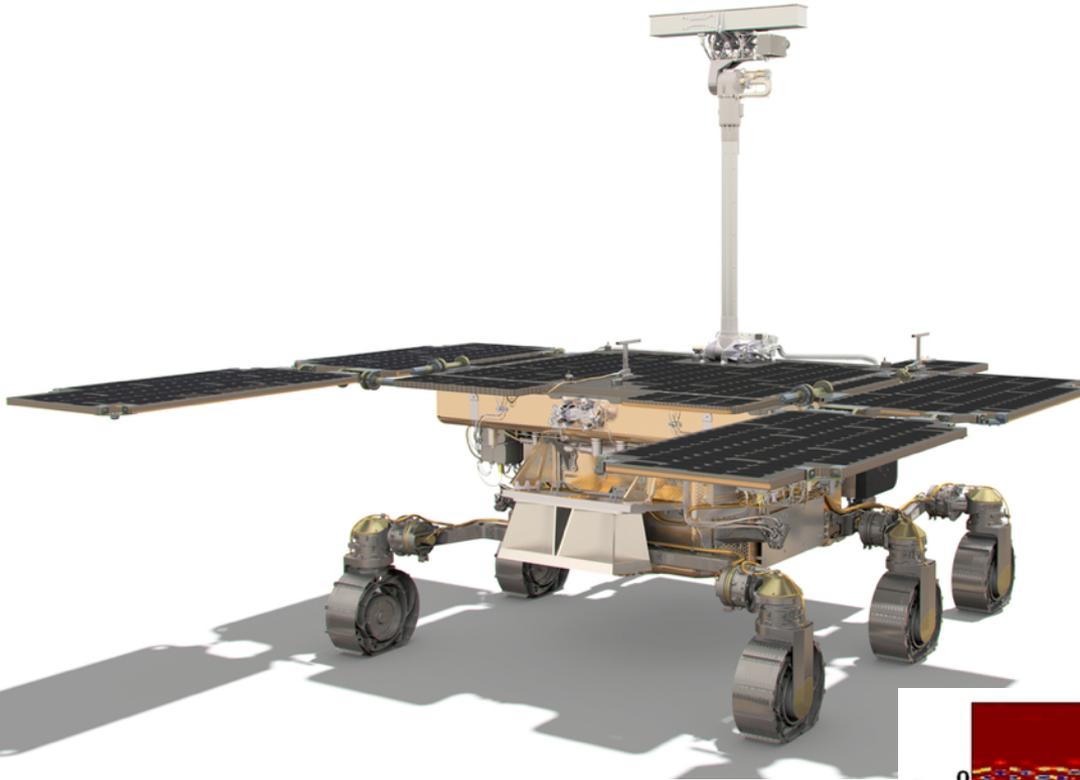




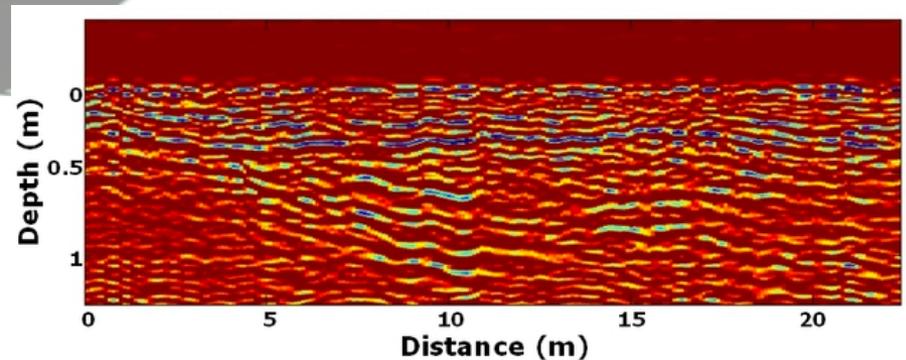
---

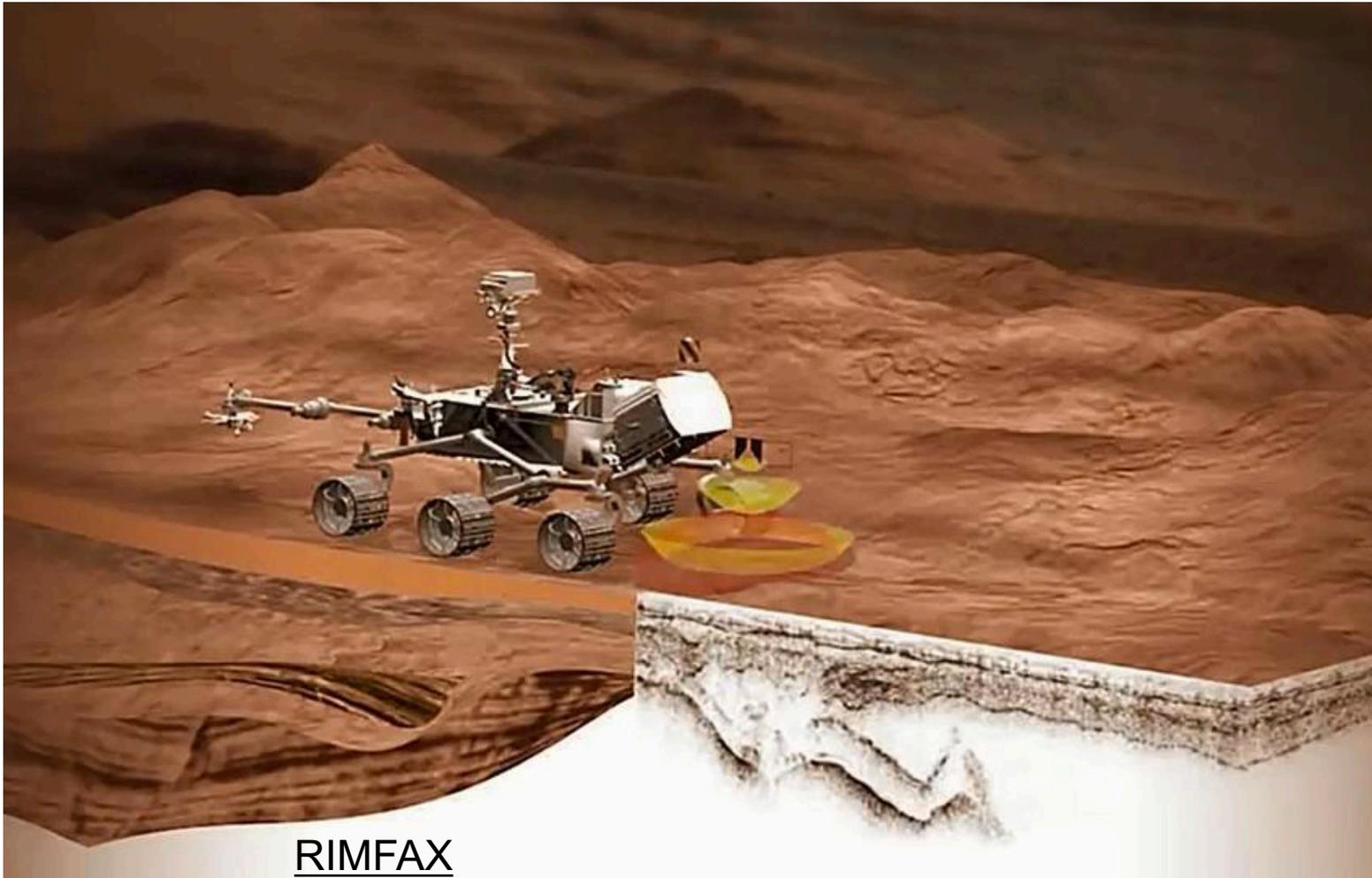
# Conception d'Instruments Spatiaux : Recherche de Fiabilité

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

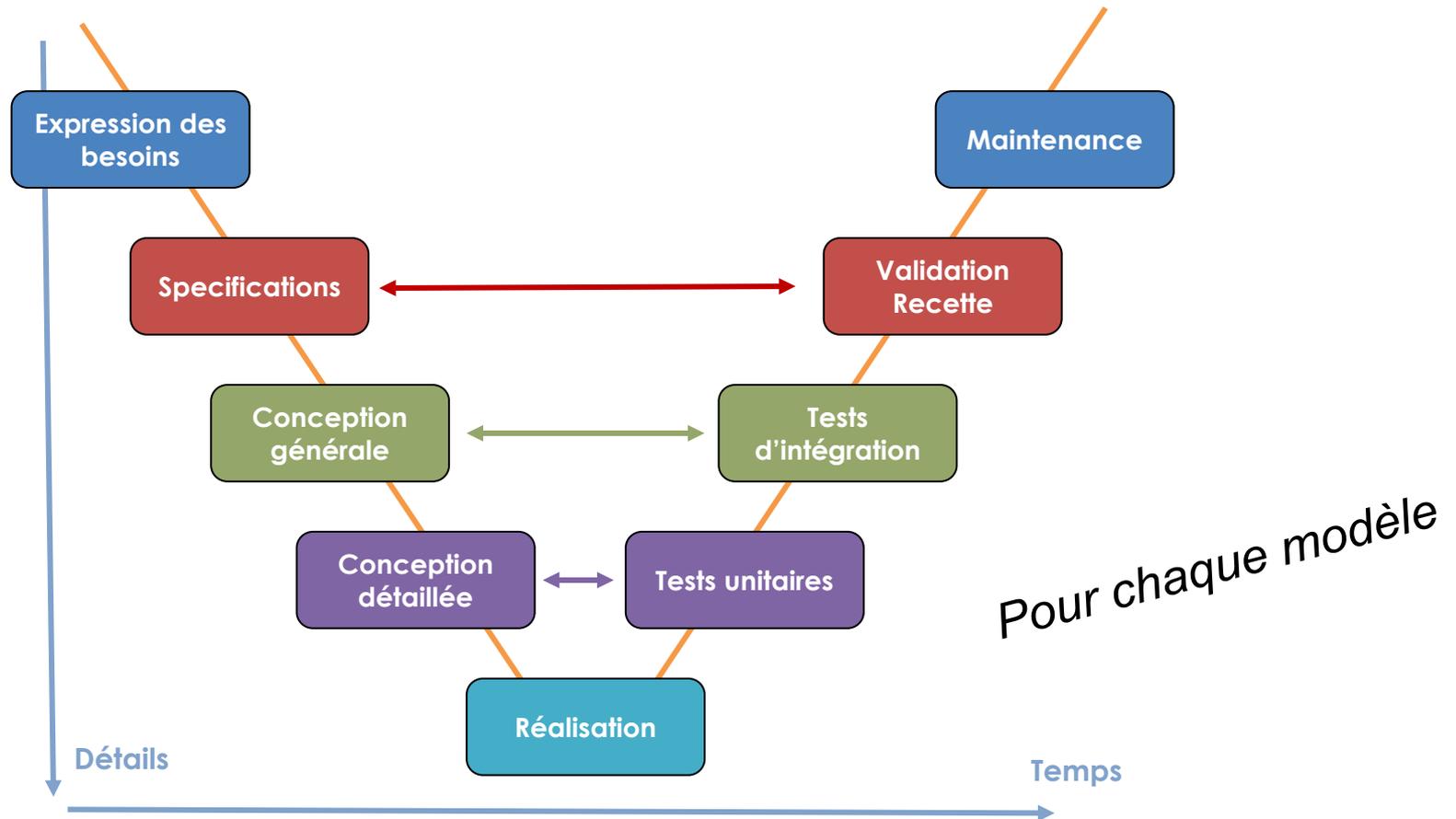
# Ce qu'il faut faire

---

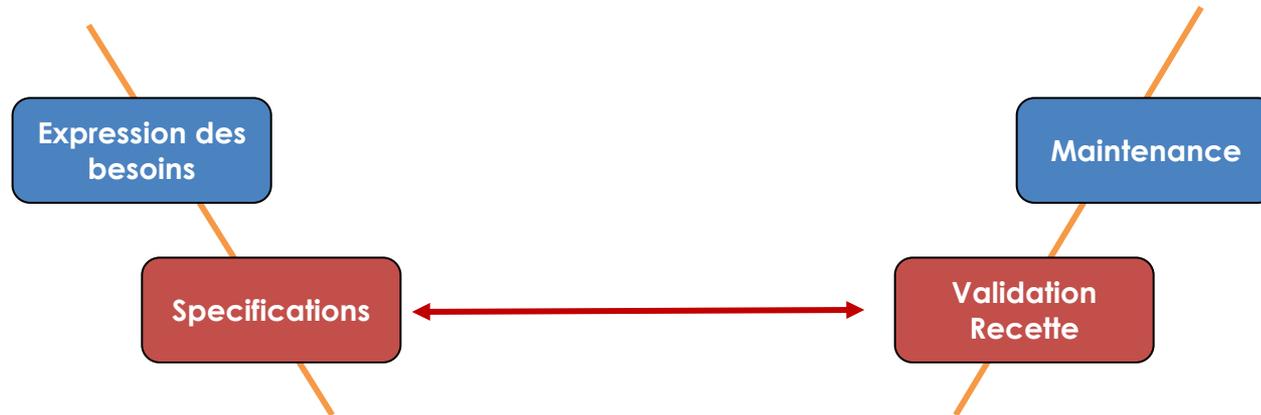
- **Assurer la fonctionnalité** malgré le poids , l'encombrement et la consommation minimalistes
- **Design robuste/fiable** ... ça veut dire quoi?
  - Proposer des redondances pour éviter les 'points de panne unique' et des scénarios en cas de dégradation de l'instrument
  - Trouver des **matériaux 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**

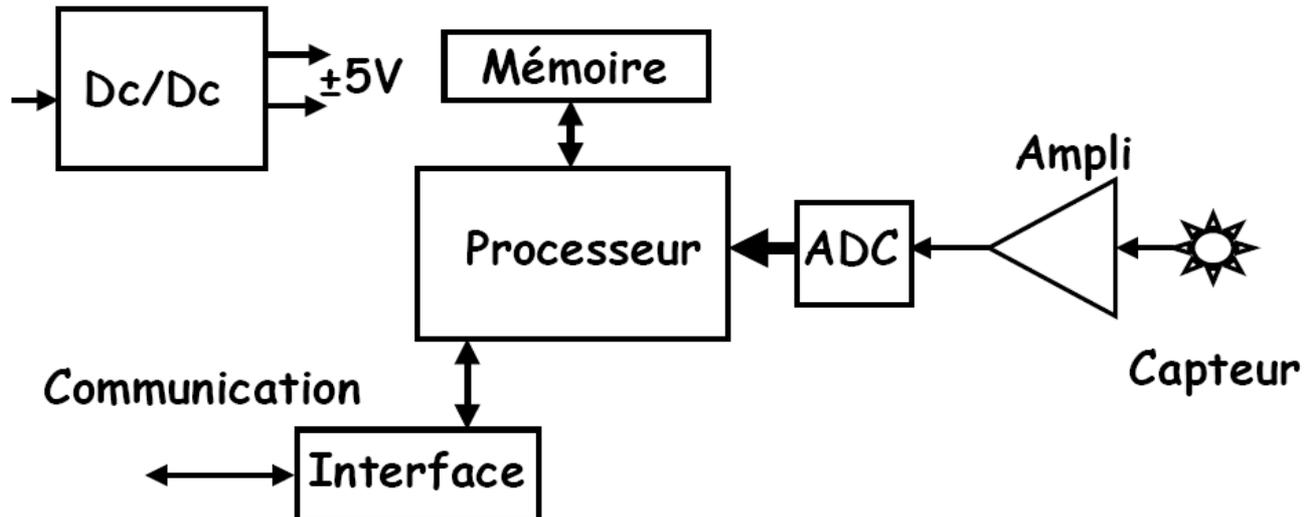
- Découpage fonctionnel
- Analyse de défaillance puis identification des risques en fonction de leur criticité
- Mise en place d'actions correctives si nécessaire
- Liste des symptômes liés aux pannes

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

# Exemple d'assurance produit

## Diagramme fonctionnel

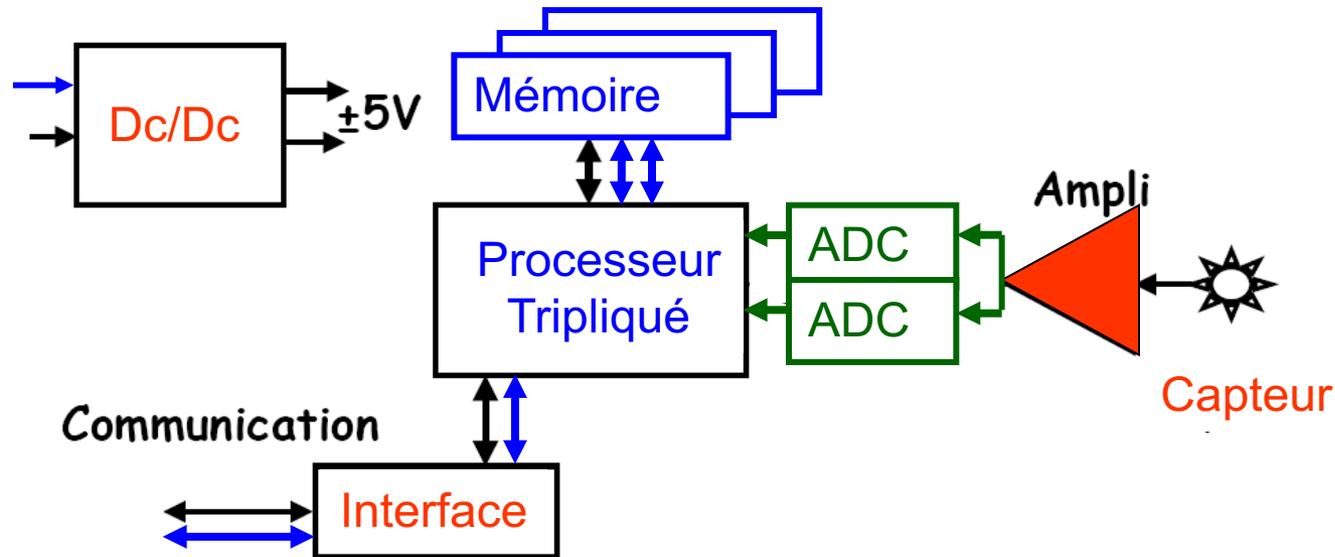
Réseau Qualité IN2P3



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	

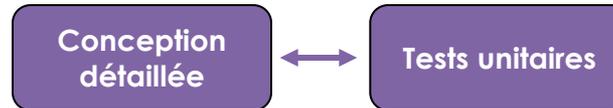
Communication

- 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)

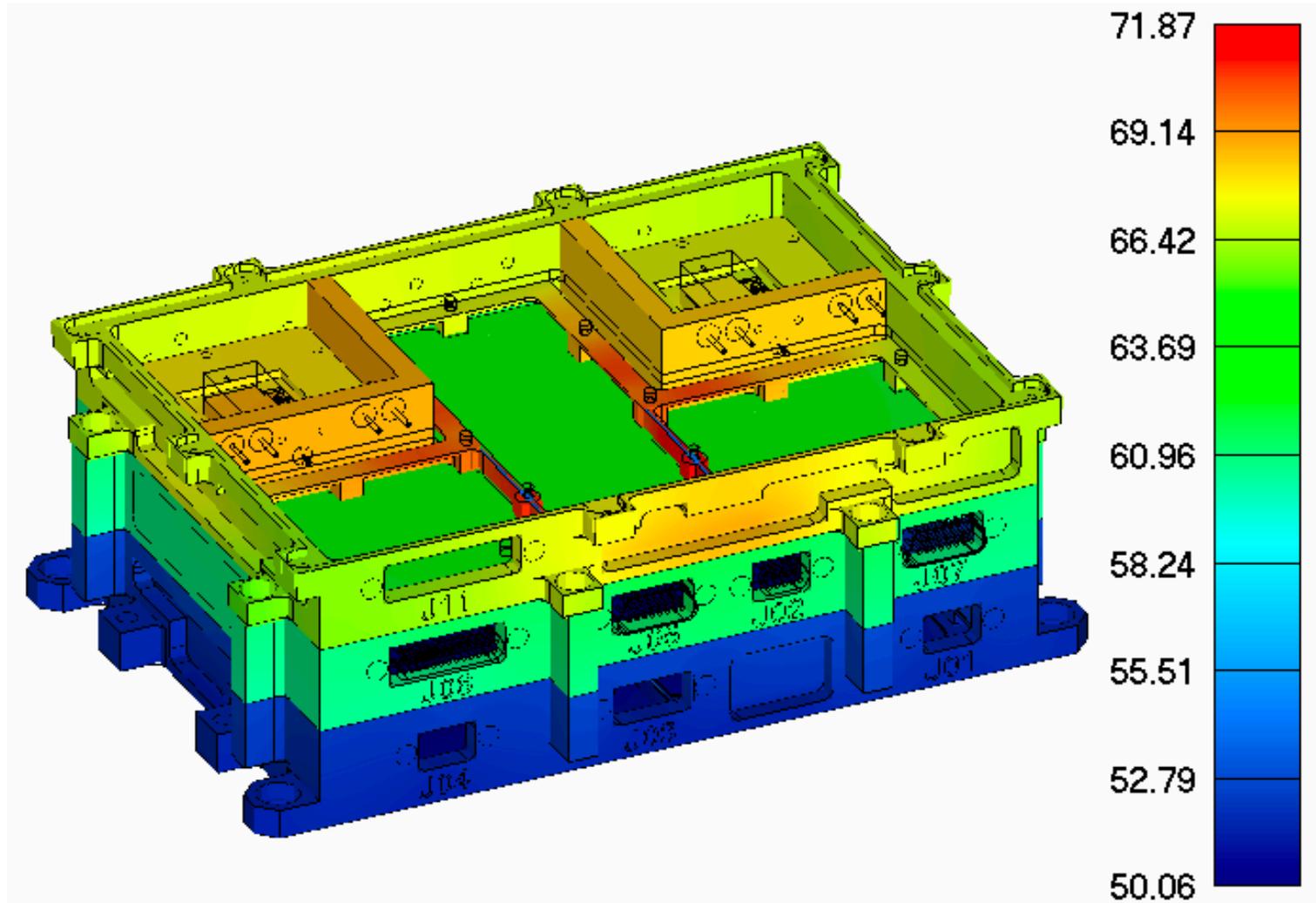
- Conception détaillée



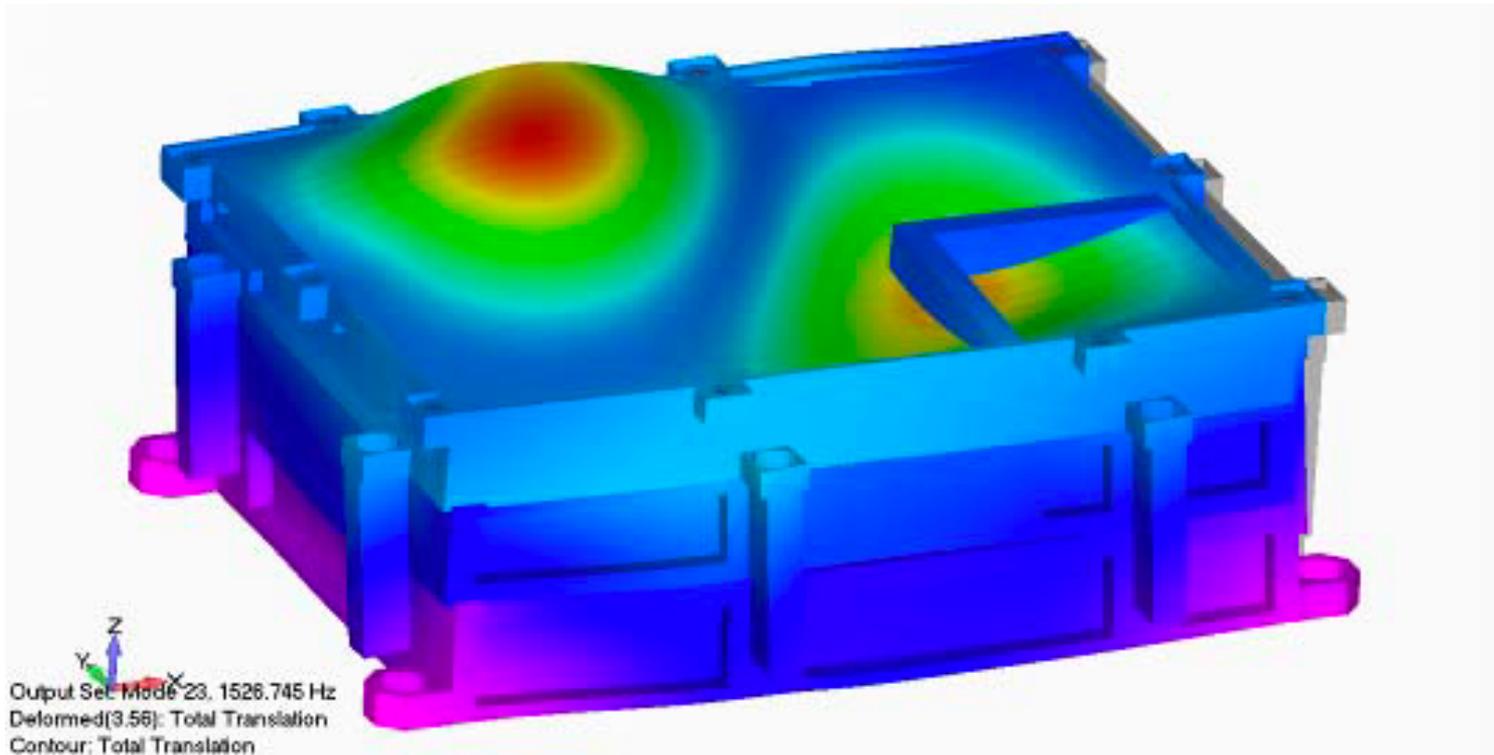
- Analyses du design

- 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

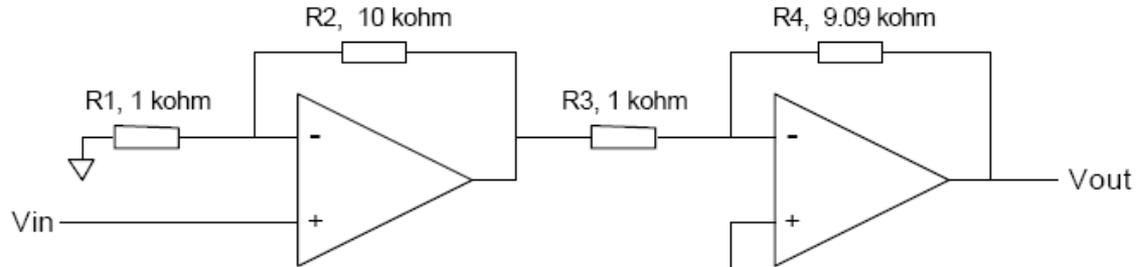
- Champ des températures



- 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

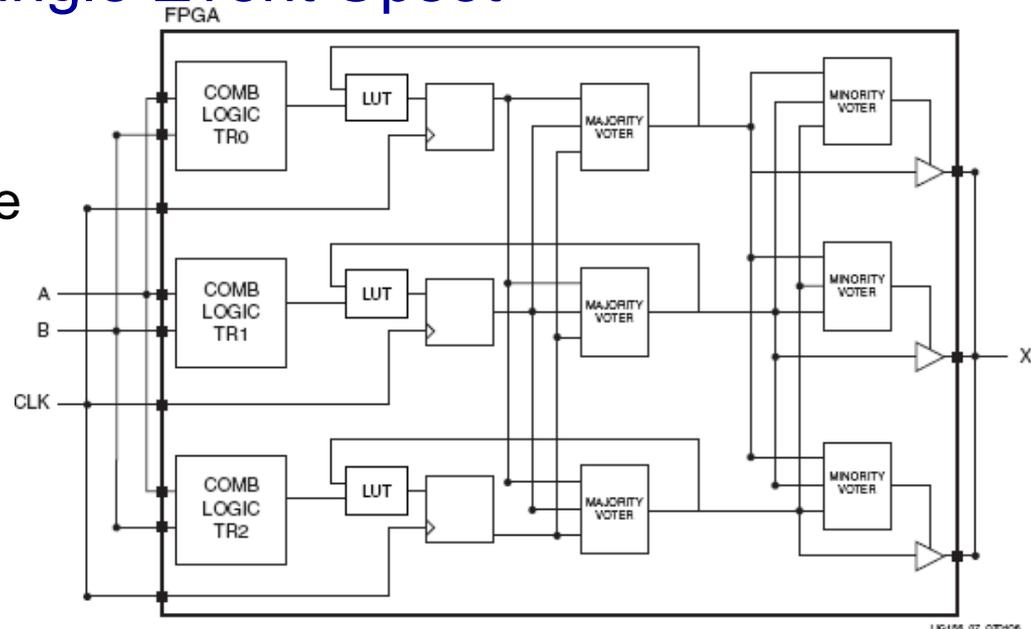
- Analyse fine sur chaque composant pour évaluer le stress appliqué
- Règles de derating : PSS-01-301 → quelle marge prendre pour les capas / résistances, quelle température de jonction des composants ... et à 70°C !!!
- Ex. sortie Vout sur 50ohms avec +5V

Part n°	C	VOLTAGE			PSS-301	
		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

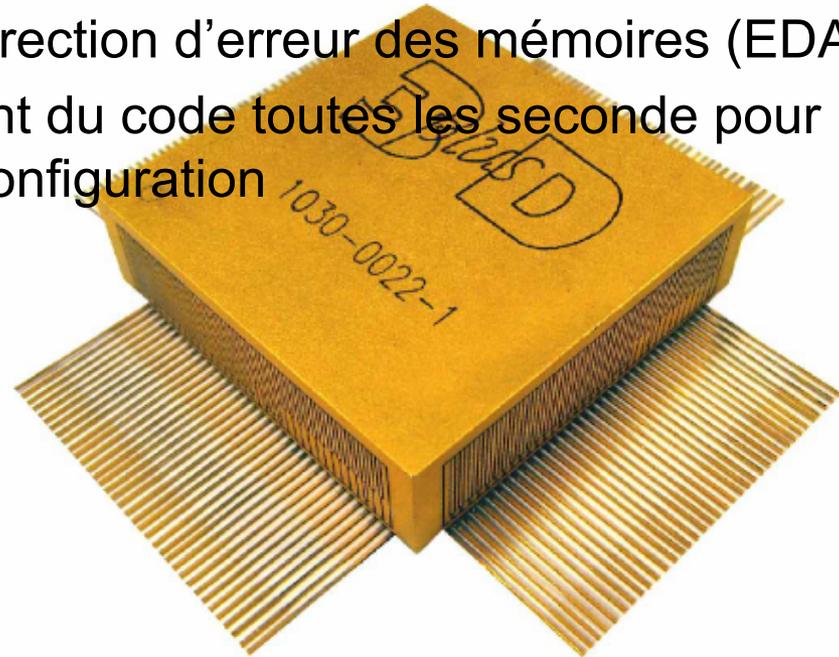
Part n°	C	POWER DISS.				Comp.
		Act.	Rated	Stress	D'rtng	
PCB temperature +30°C		mW	mW	%	%	Y/N
Resistors - 0805	Y	100	200	50%	50%	Y
OP270	Y	200	500	40%	50%	Y

Part n°	C	Tj					Comment
		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 TriPLICATION (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

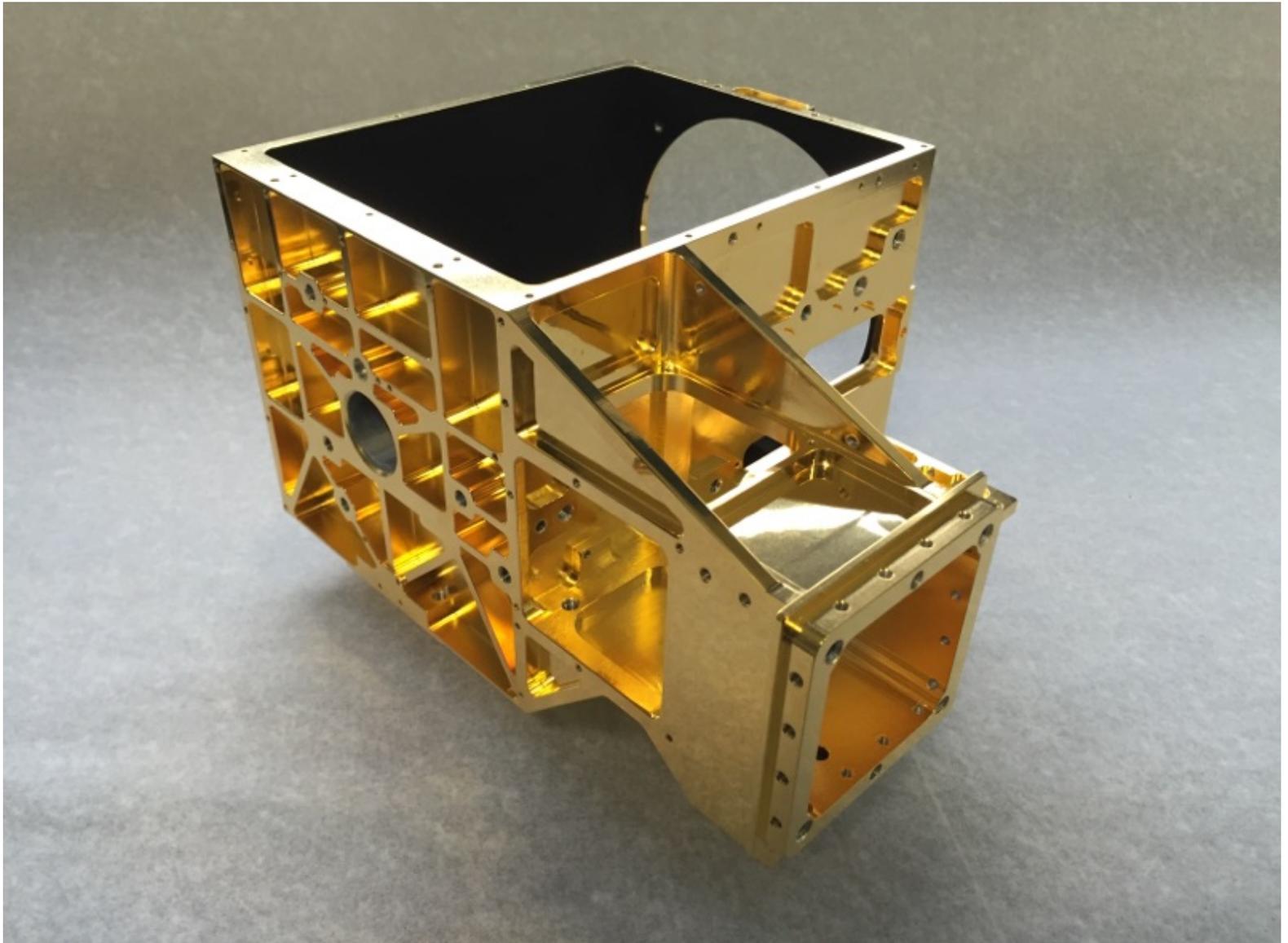
- Sous traitants qualifiés CNES, ESA, NASA

- 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)



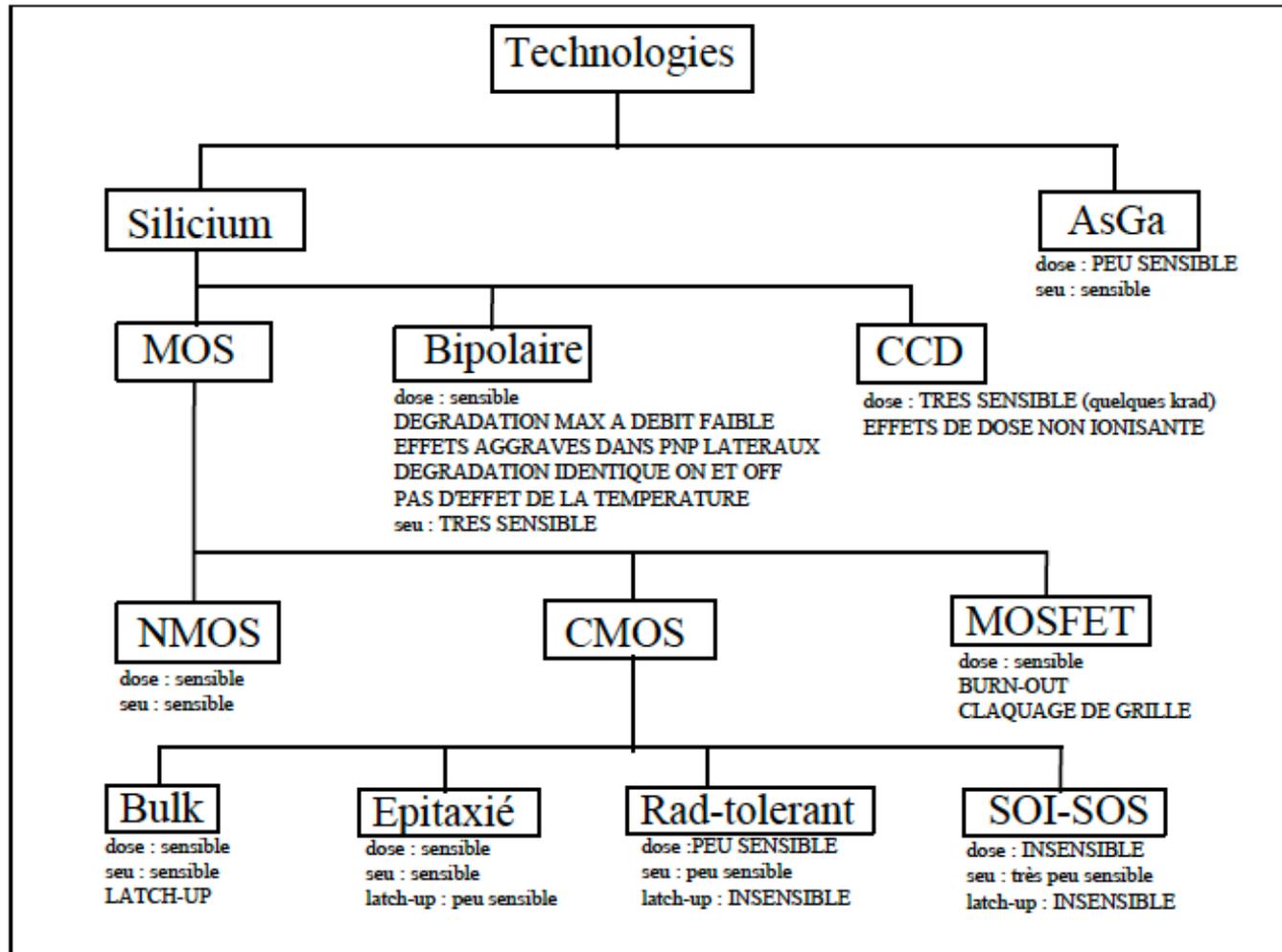


# Tests unitaires

2017-09-26 09:01:48

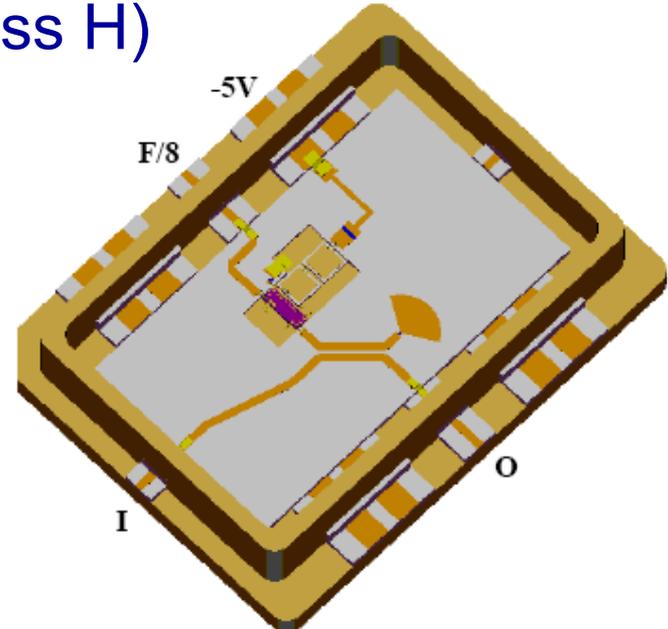


# Choix de la technologie

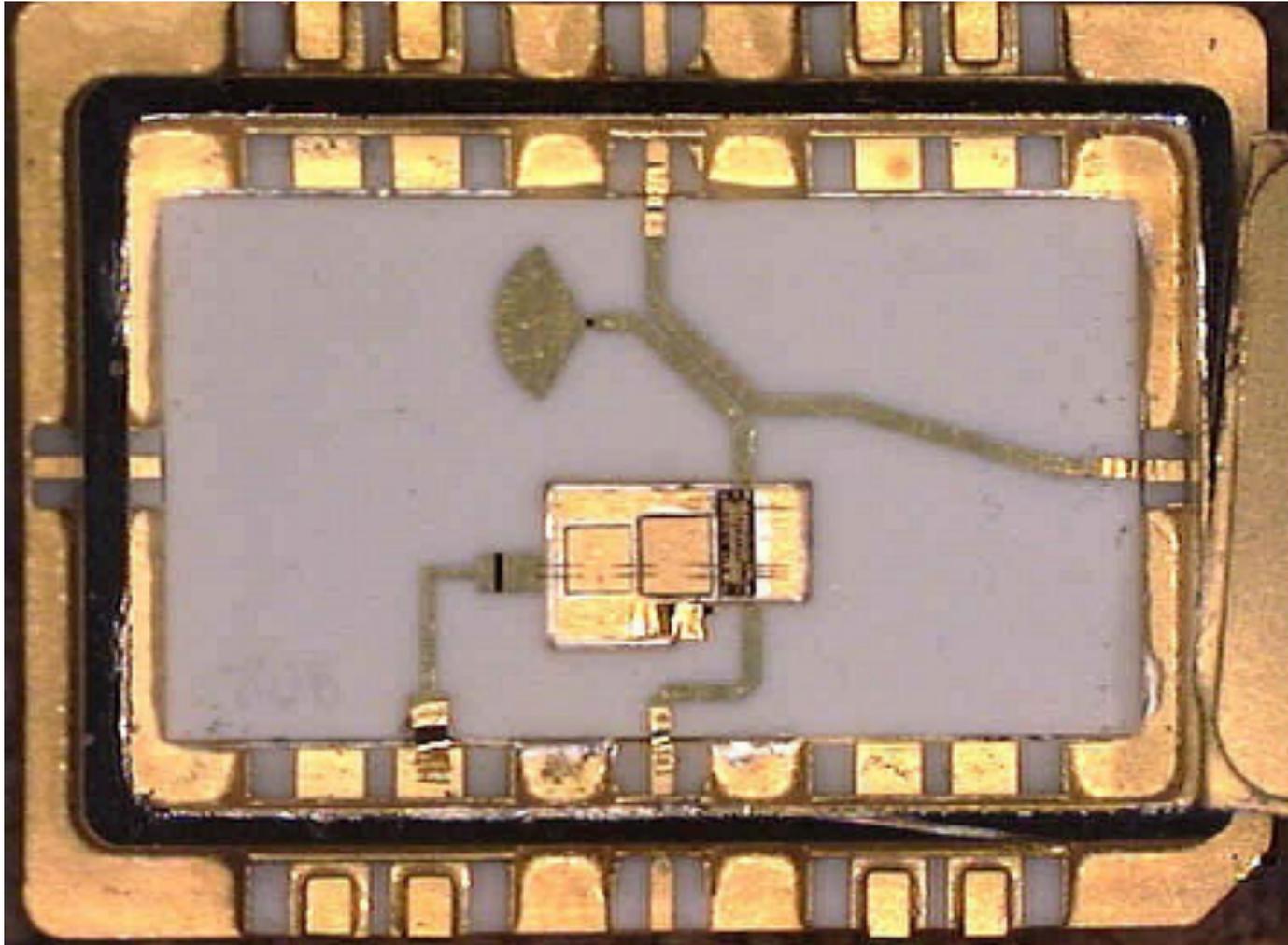


# Composants qualifiés

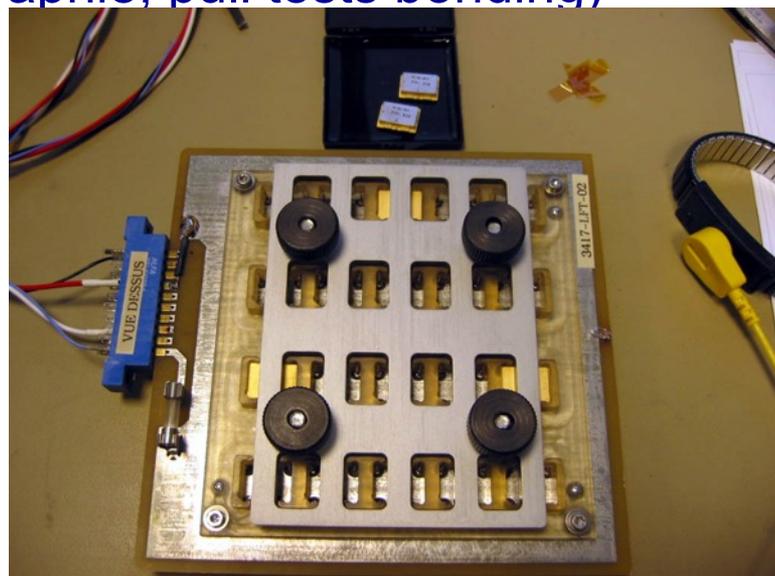
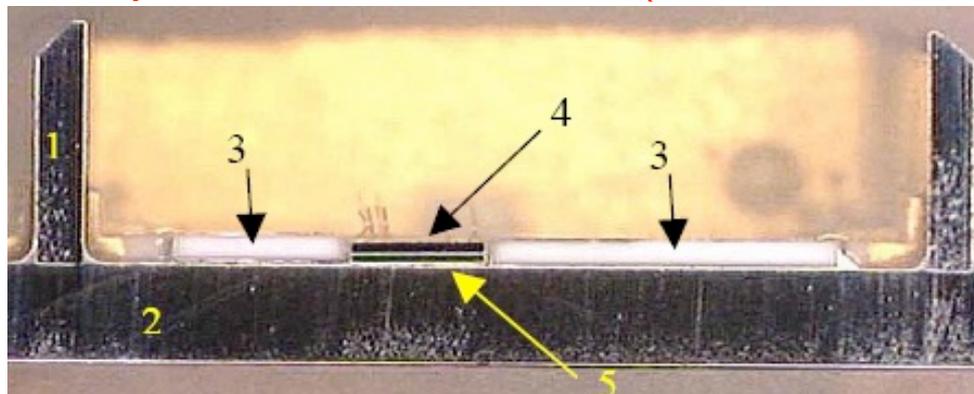
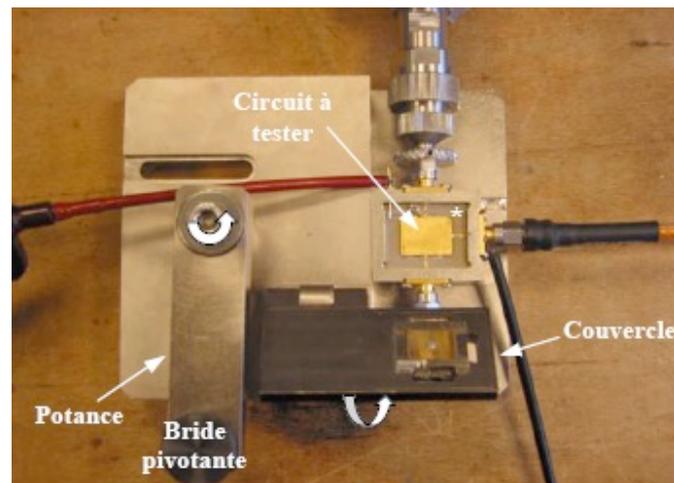
- Composants passifs (quelques 0603) et certains actifs sont disponibles sur catalogues (Preferred Parts List). Se conformer aux spécifications pour chacun des composants (ex. 5962-8872101V2A = OP270)
- Sinon il faut faire qualifier son composant (exemple d'un hybride – standard 38534 class H)



- 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 ( $125^{\circ}\text{C}$  pdt 2000h)
- Destructive Physical Analysis (radiographie, pull tests bonding)
- 1 composant coûte donc 100fois le prix d'un commercial (OP270 à 500\$)

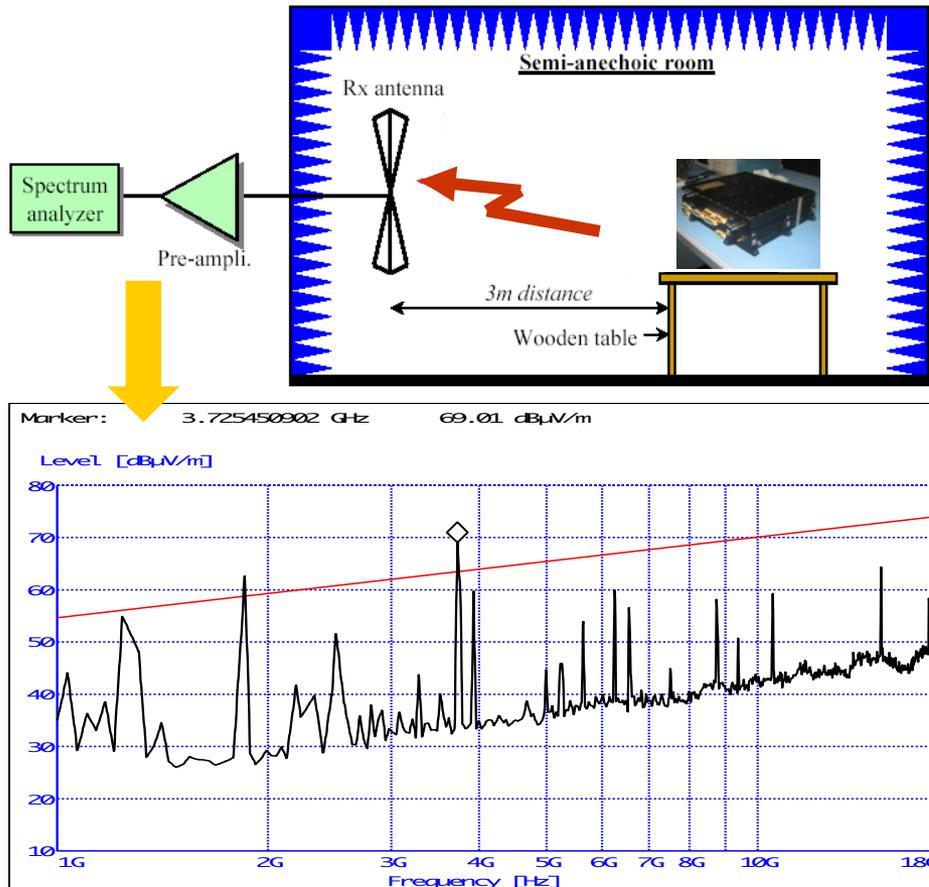


- Validation : Recette



- 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)

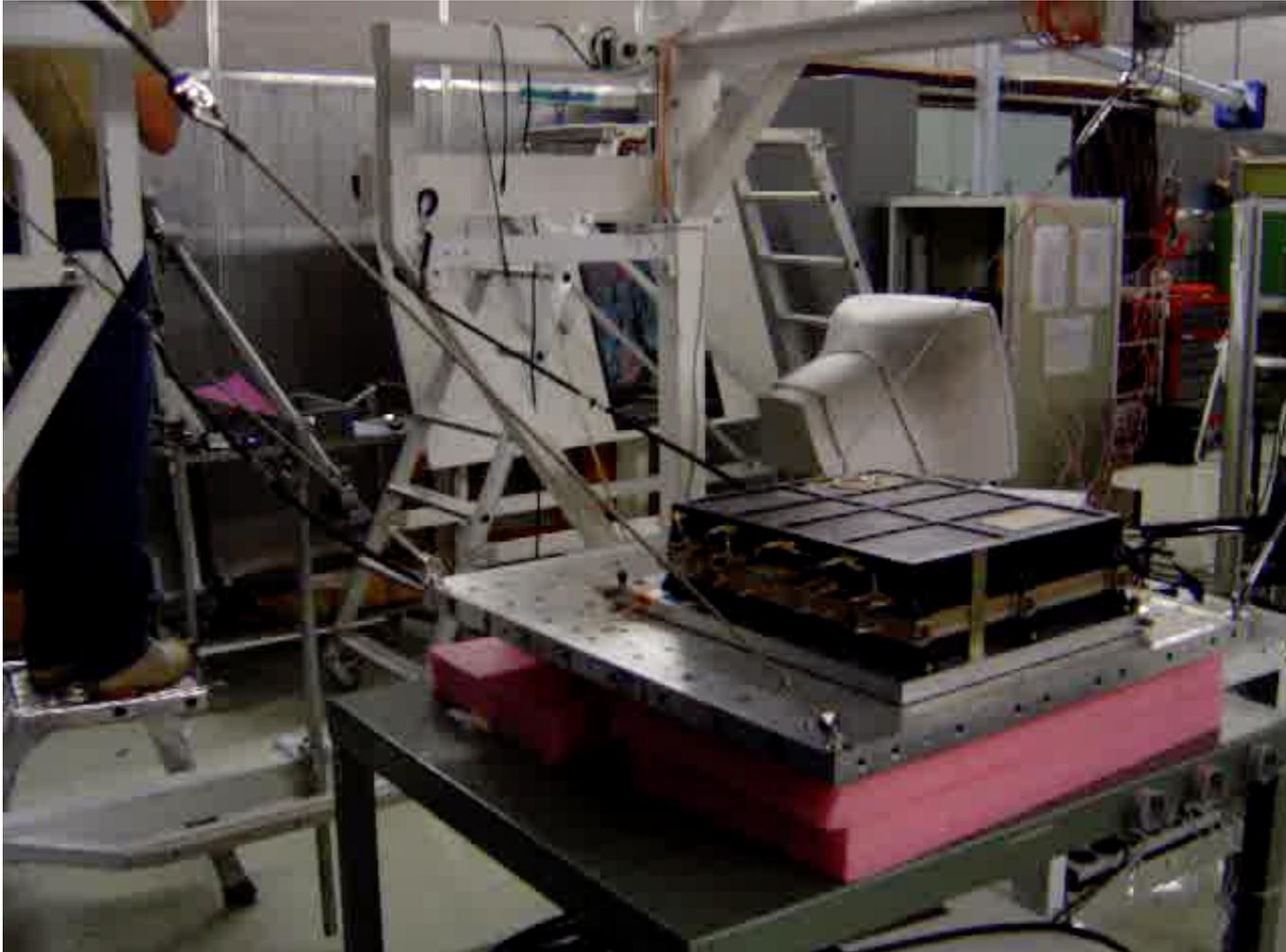
- Tests de Compatibilité Electro-Magnétique (Alcatel) en chambre anéchoïque. Étude des perturbations émises ou subies par l'instrument



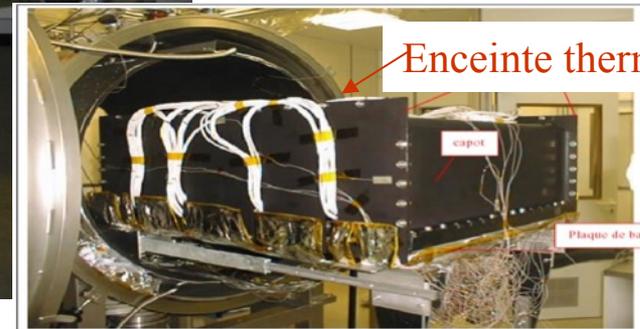
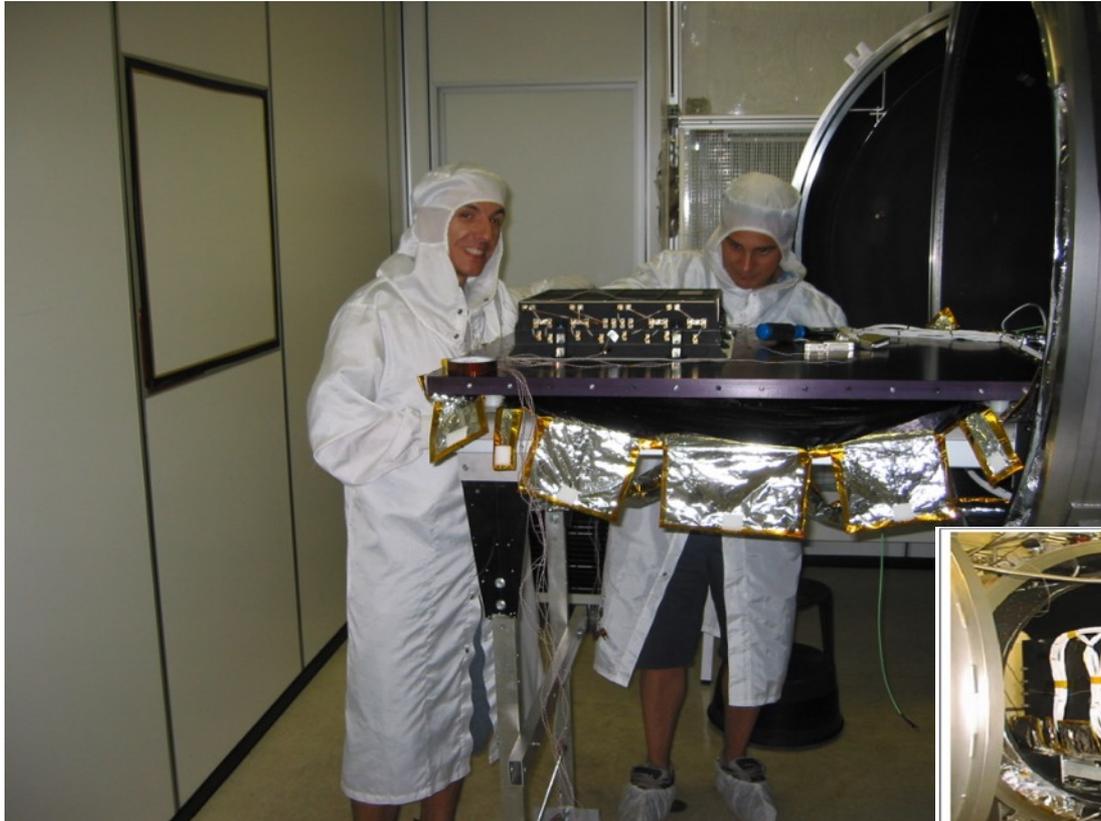
- Test de vibrations axe Z (Alcatel) – 25g sinus – 2minutes



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

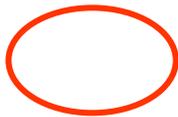


- Tests de vide (qlq  $10^{-6}$  mbar) thermique (-55/+40°C) au LAM Laboratoire d'Astrophysique de Marseille



- Test 7jours 24h/24h

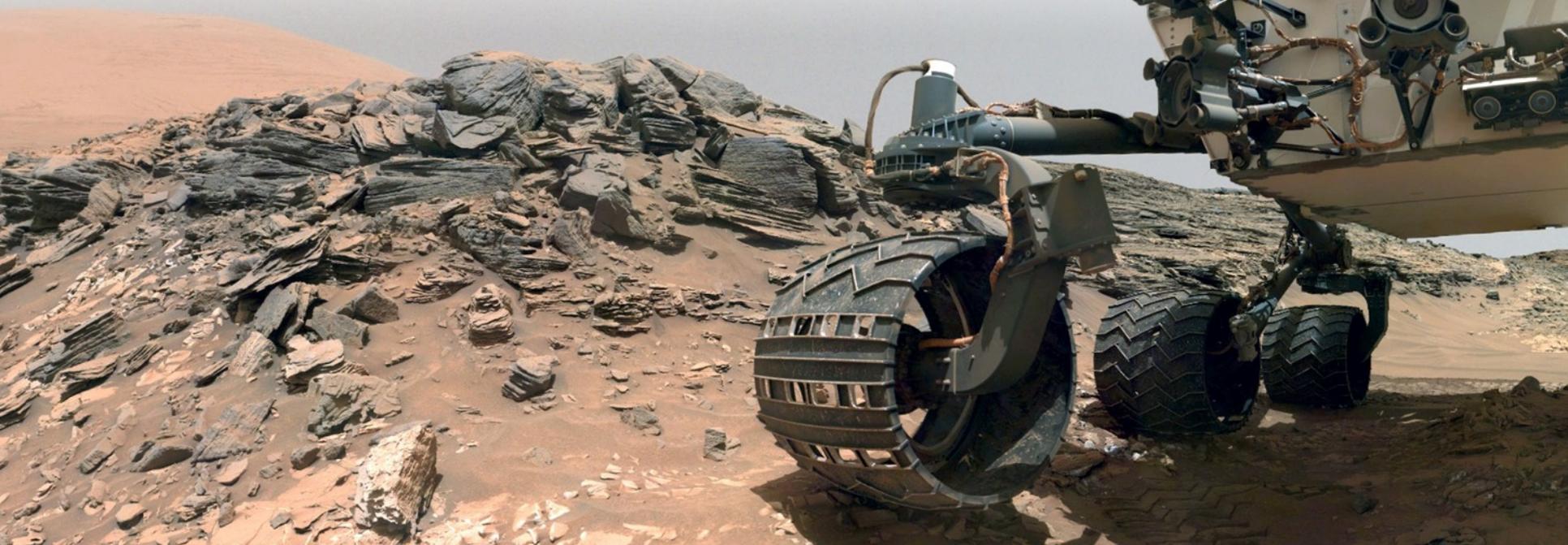
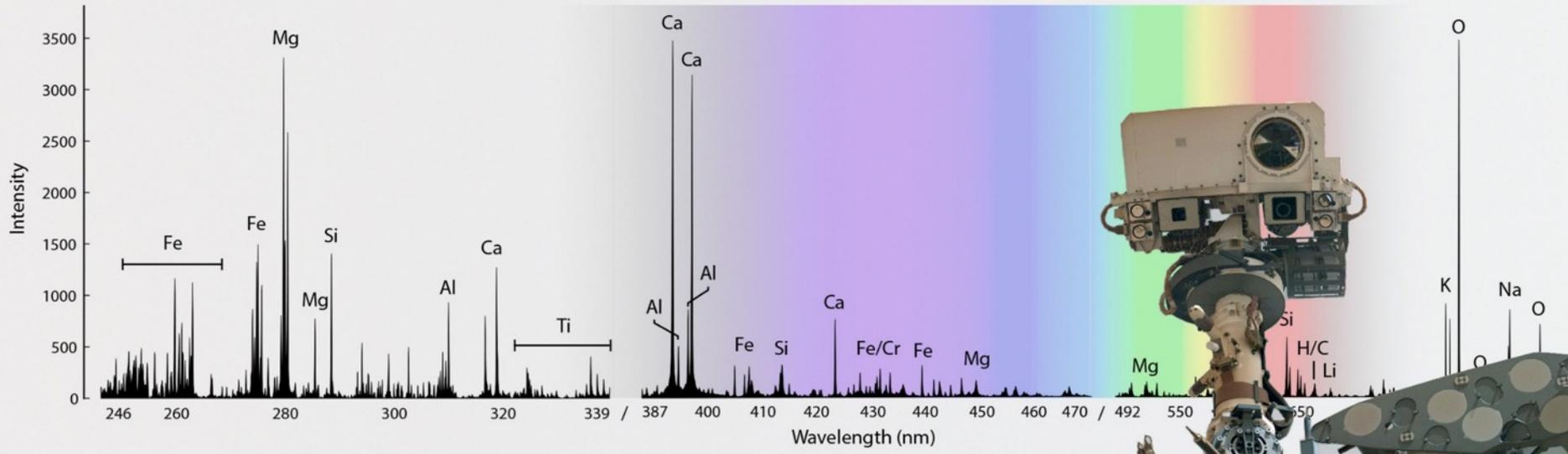
- Intégration sur satellite (Friedrichshafen – Allemagne-1 an avant lancement)



# 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

---



# 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.

## RIMFAX

A ground-penetrating radar to explore beneath the surface.

A plutonium power source supplies electricity to the rover.

## 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.

## 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.

