



Problématique de la contamination chimique dans le spatial : quelles solutions pour minimiser les risques ?

Delphine FAYE

CNES – service Laboratoires & Expertise



Ariane : autonomie d'accès à l'espace

Sciences : développements technologiques pour répondre aux questions fondamentales de l'humanité sur l'origine du système solaire, des galaxies et de la vie

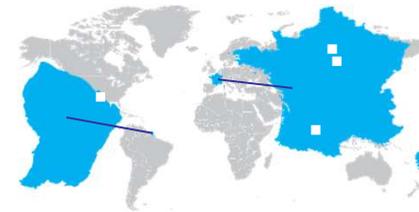
Observation : satellites qui fournissent des mesures indispensables pour la météorologie, l'océanographie, l'étude du changement climatique, l'aménagement du territoire

Télécommunications : haut débit, localisation, collecte de données environnementales, recherche et sauvetage

Défense : observation à très haute résolution, écoute, télécommunications hautement sécurisées, surveillance de l'espace



4 centres



TOULOUSE (1762 empl.)

- Etude, conception, développement et contrôle des systèmes orbitaux
- Numérique, exploitation des données
- Préparation du futur

Service Laboratoires & Expertise

Missions

- recherche et développement appliquée pour l'expertise dans les domaines de l'électronique, des matériaux, de la contamination et des microsystèmes
 - intervention à différents niveaux : préventif et/ou correctif
- support aux projets et à la R&T dans ses domaines de compétence
- activités de R&T en expertise et nouvelles technologies



Ressources humaines

Environ 60 personnes
CNES et partenaires
(THALES - ELEMCA - INTRASPEC)

Moyens

essais d'environnement : 280 m²
Analyse technologique : 300 m²
Mécanique & matériaux : 100 m²
Contamination & physico-chimie : 270 m²

Contamin@Lyon **28 NOV 2019**

Quels sont les enjeux de la maîtrise de la contamination ?

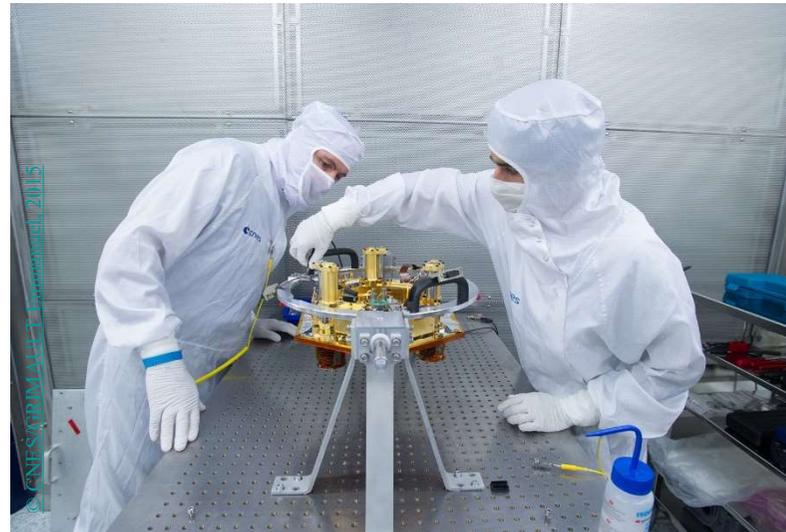
Aspects particulières, microbiologiques et chimiques

SOFITEL LYON BELLECOUR ASPEC - info@aspec.fr
www.aspec.fr



Projet TARANIS
assemblage de la charge utile sur la plateforme

Salles propres : 675 m² - ISO 5 / ISO 7 / ISO 8



Mission Insight
Intégration de l'instrument Seis



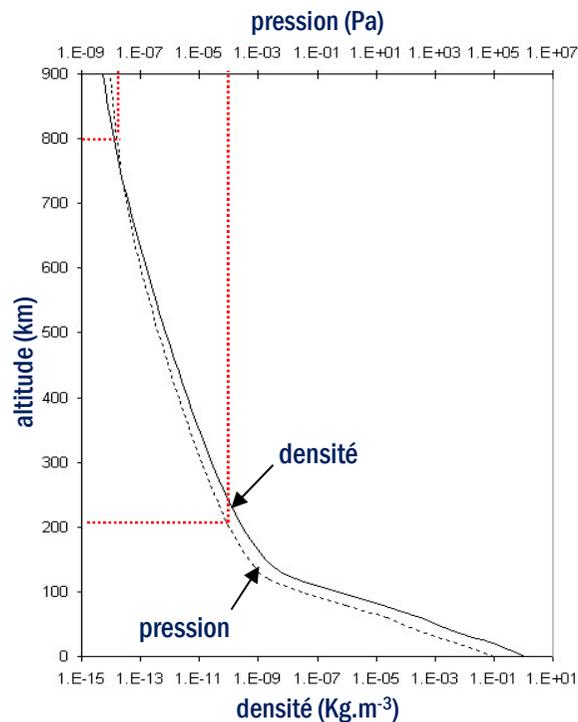
SOMMAIRE

- Problématique de la contamination chimique dans le spatial
- Un plan de propreté adapté pour chaque satellite
- Bonnes pratiques de prévention des risques
- Focus sur la surveillance en salle propre



SOMMAIRE

- **Problématique de la contamination chimique dans le spatial**
- Un plan de propreté adapté pour chaque satellite
- Bonnes pratiques de prévention des risques
- Focus sur la surveillance en salle propre



Vide spatial

$P=10^{-4}$ Pa à 200 km

$P=10^{-8}$ Pa à 800 km

variations plus ou moins importantes selon le cycle solaire, la rotation de la Terre, les orages magnétiques

Grandes amplitudes des températures (-150°C/+150°C)

Cyclages thermiques

dégazage des matériaux

Différents mécanismes mis en jeu : sublimation, diffusion, désorption voire décomposition

perte de masse par émission de gaz

matériaux du spatial : rarement des corps purs \Rightarrow tous les phénomènes participent au dégazage

cas des métaux

taux rapidement très faibles

cas des matériaux organiques

mécanisme très complexe

- dégazage très rapide des espèces de grande volatilité

- émission lente des composants de plus faible volatilité (diffusion prépondérante)

Principaux matériaux polymères

Éléments de structures : composite à matrice époxyde/cyanate

polyaryléthercétone, polycarbonates
polyuréthanes, polyamides, polyimides
fluoropolymères

Câblages : fluoropolymères



Colles : époxies, silicones
polyuréthanes

résines/verniss : polyuréthanes, époxies
silicones

Lubrifiants :
perfluorocarbones,
fluorosilicones

rubans adhésifs : polyesters, acryliques
polyamides, fluorocarbones

Revêtements de contrôle thermique

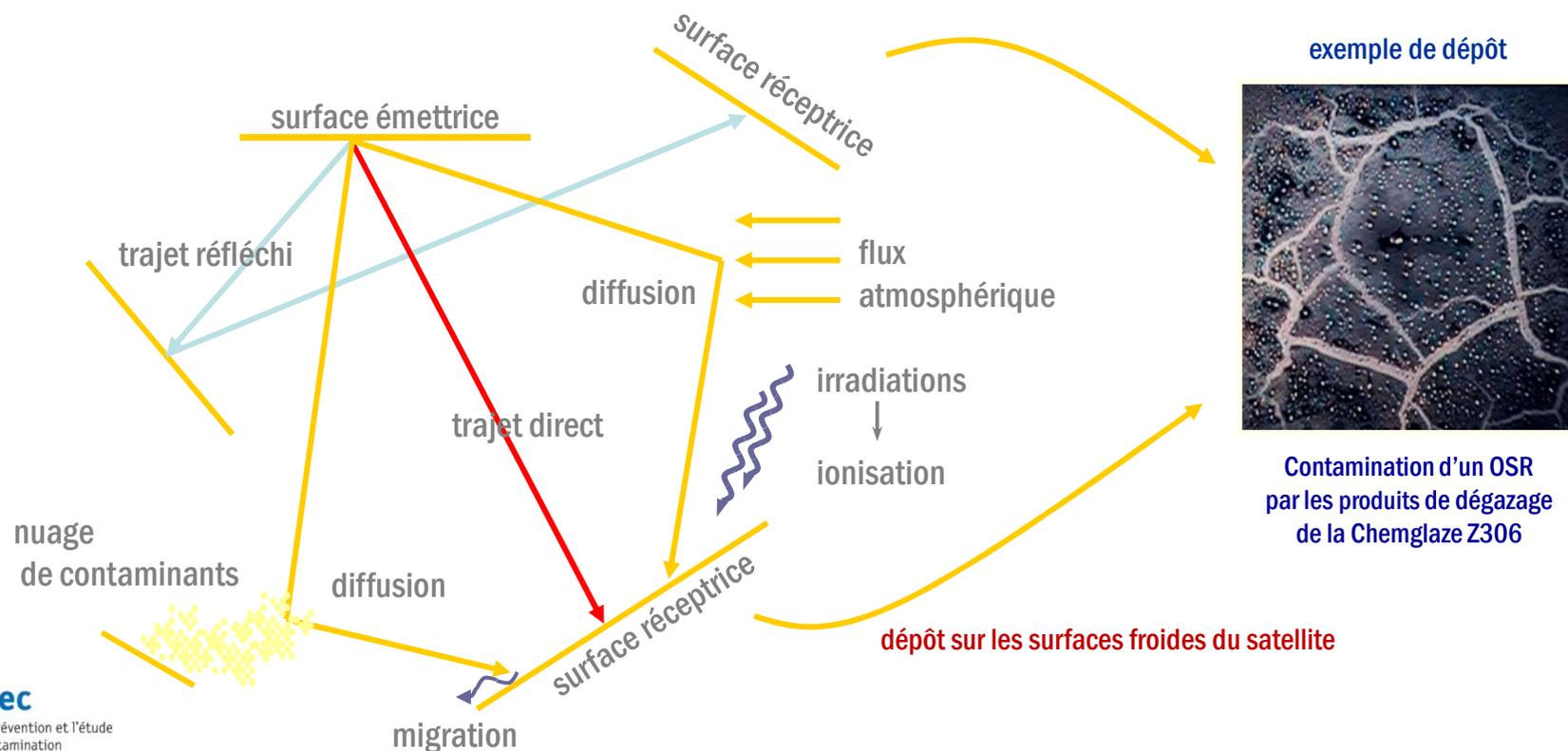
peintures noires et blanches : polyuréthanes, silicones

Autres revêtements : fluoropolymères

Isolation thermique : polyesters, polyimides

Conséquences du dégazage sur l'environnement

- création d'une atmosphère raréfiée locale autour du satellite
- élévation de pression interne
- phénomène de transport/condensation/ré-émission des contaminants
- synergie avec les autres paramètres de l'environnement spatial



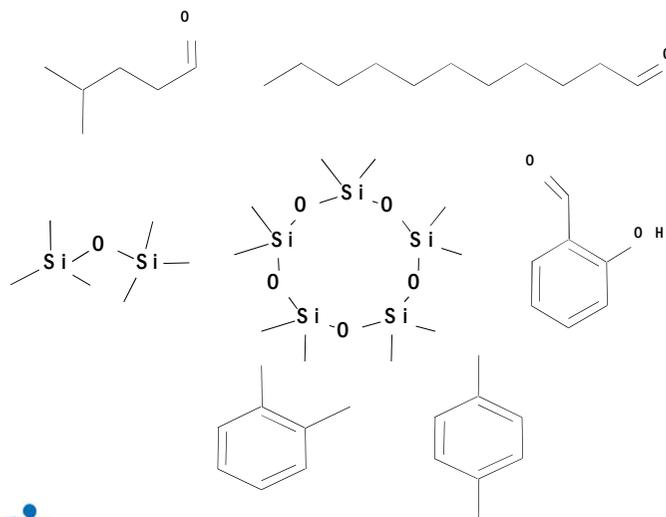
Quelques espèces moléculaires typiques dégazées

espèces présentes de poids moléculaire variable

- eau
- solvants, additifs, excès de catalyseur
- résidus de monomères
- agents de nettoyage mal éliminés
- ...

produits de décomposition dus à l'exposition à divers environnements

produits secondaires générés par des interactions intermoléculaires ou par des réactions chimiques



Contaminant*	polymère source	abondance
phtalates	polyesters ; uréthannes	haute
phénols	époxies	haute
polybenzimidizoles	Kapton®	haute
hydrocarbures aromatiques	multiples	haute
silanes ; siloxanes	silicones	moyenne
alcènes	multiples	moyenne
carbonyles aliphatiques	multiples	moyenne
amines aromatiques	uréthannes ; époxies	faible

*Analyse en chromatographie phase gaz et spectrométrie de masse

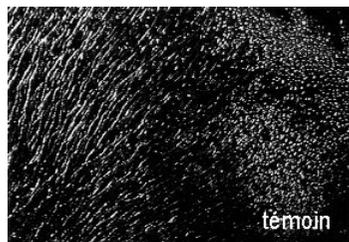
Principaux effets

- ❑ perturbations directes des mesures **lumière parasite**
- ❑ effet corona **problèmes électriques**
- ❑ condensation / réémission de gaz **contamination**

contaminant (selon l'ECSS-Q-ST-70-01)
toute matière étrangère ayant un temps de résidence
suffisamment long sur une surface ou dans un environnement
fonctionnel pour en dégrader les performances ou la durée de vie

➤ dépôts

films continus ou dépôts plus ou moins homogènes de gouttelettes de tailles différentes



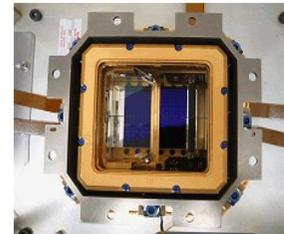
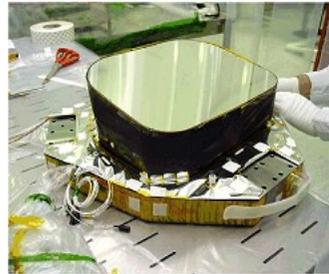
➤ la forme des gouttelettes dépend :
de l'état de surface du substrat
du type d'accrochage et d'interaction dépôt/substrat



Principaux effets

Surfaces sensibles

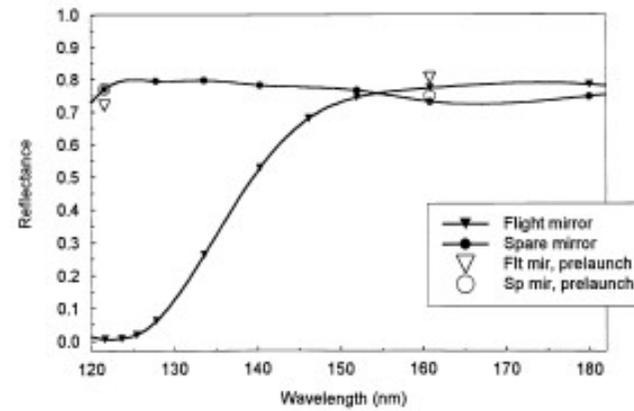
optiques, détecteurs
senseurs stellaires ou solaires
cellules solaires
revêtements de contrôle thermique



- dégradation des surfaces de contrôle thermique
- modification des caractéristiques thermo-optiques
- α_s absorptivité solaire, ε émissivité

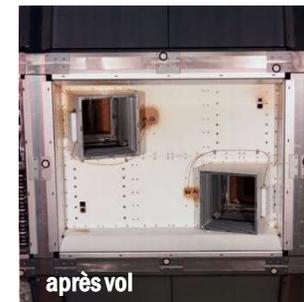
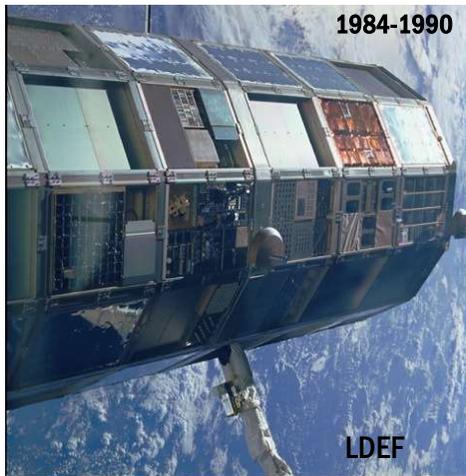
- perte de performances d'éléments optiques (lentilles, miroirs, détecteurs)
- modifications des caractéristiques optiques :
 - transmission des lentilles / réflexion des miroirs
 - augmentation de la diffusion

Retours d'expérience en orbite



caméra WFPC-I UV perdue due à une contamination et une exposition aux UV

Réflexion en UV en incidence normale
Miroirs de vol et spare
(Tveekrem et al., SPIE vol. 2864)



© NASA - LDEF



SOMMAIRE

- Problématique de la contamination chimique dans le spatial
- **Un plan de propreté adapté pour chaque satellite**
- Bonnes pratiques de prévention des risques
- Focus sur la surveillance en salle propre

prévention des risques de contamination

sensibilité à la contamination différente selon les équipements spatiaux
 dépendance des paramètres mission
 niveaux de propreté à spécifier différents

exigences dans CRS (Contamination Requirement Specification)

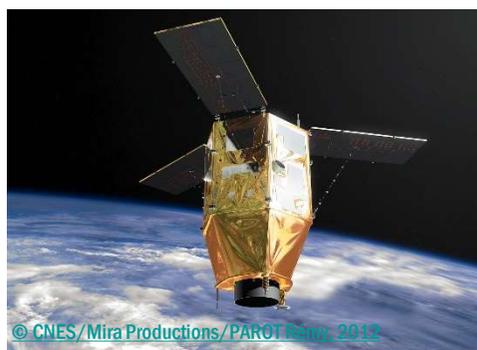


Exemples de spécifications moléculaires sur les surfaces sensibles avant lancement



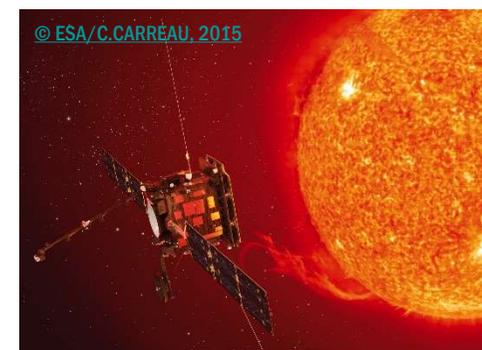
satellite THD Sat
télécommunications

10^{-6} g/cm^2



satellite PLEIADES
Observation de la Terre

$5 \cdot 10^{-7} \text{ g/cm}^2$



sonde Solar Orbiter
Observation du soleil

$2 \cdot 10^{-8} \text{ g/cm}^2$



possibilité d'exclure des types de contaminants
(ex : silicone, aromatiques...)



 **réponse aux exigences à l'aide d'un plan de propreté : C&CCP
(Contamination and Cleanliness Control Plan)**

Description of sensitive items and sources of contaminants

Cleanliness requirements

Selection of materials and processes

Mitigation and corrective actions

Environments and facilities

MAIT activities

**du niveau instrument jusqu'au satellite
différentes phases de développement et d'opération**

Extrait du sommaire de l'ECSS-Q-ST-70-01C

cadre normatif

**fortement recommandé
guide de pratiques très utile**



et



branche assurance produit

Exemples de références normatives applicables

norme	titre
ECSS-Q branch : space product assurance	
ST-70	materials, mechanical parts and processes
ST-70-01	cleanliness and contamination control
ST-70-02	thermal vacuum outgassing test for the screening of space materials
ST-70-05	detection of organic contamination of surfaces by infrared spectroscopy
TM-70-52	kinetic outgassing of materials for space
ST-70-54	ultra cleaning of flight hardware
ST-70-71	data for selection of space materials and processes
IEST-STD	
CC1246E	product cleanliness levels – Applications, Requirements, and Determination
ISO	
14644	cleanrooms and associated controlled environments

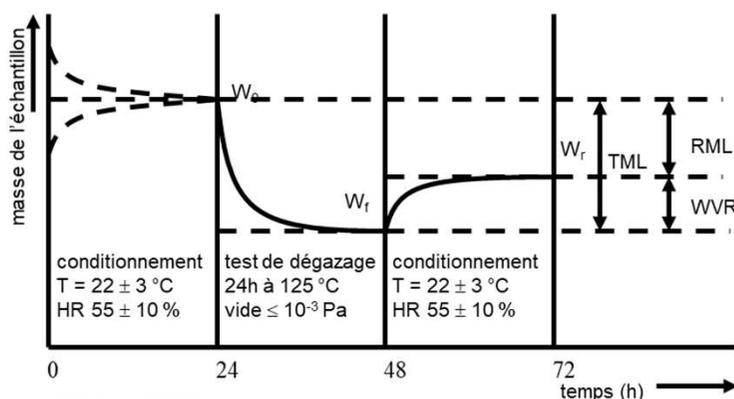


SOMMAIRE

- Problématique de la contamination chimique dans le spatial
- Un plan de propreté adapté pour chaque satellite
- **Bonnes pratiques de prévention des risques**
- Focus sur la surveillance en salle propre

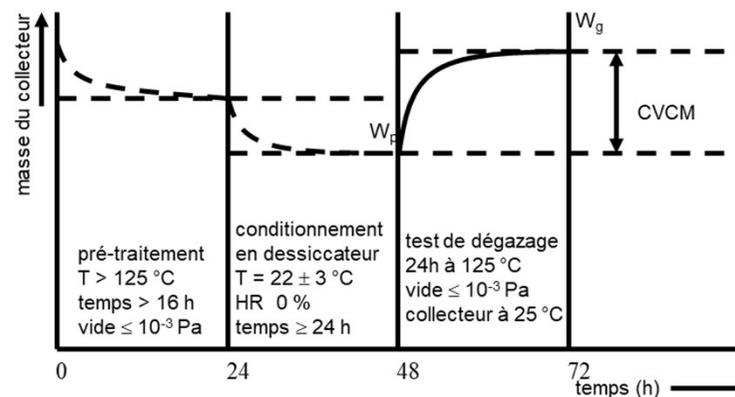
En conception satellite : sélection stricte des matériaux

Test μ VCM selon ECSS-Q-ST-70-02C
RML < 1% CVCM < 0.1%



TML : Total Mass Loss
RML : Recovered Mass Loss
WVR : Water Vapour Regained

$$TML = RML + WVR$$



CVCM : Collected Volatile Condensable Material

Base de données

<https://matrex.cnes.fr>

matrex

Accueil Matériaux Procédés Substances Projets Fournisseurs Liens

Matériau 2145 : Scotch-Weld EC-2216 Gray

Informations générales Propriétés Substances Projets Fournisseurs

Détails

Type d'utilisateur : CNES

Publique
 European Space Material Database

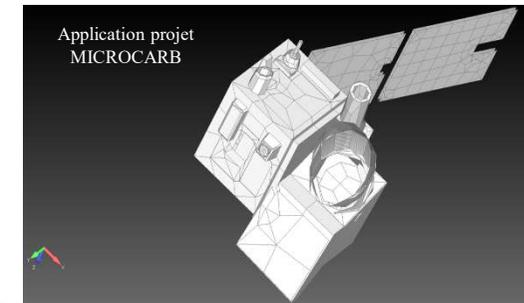
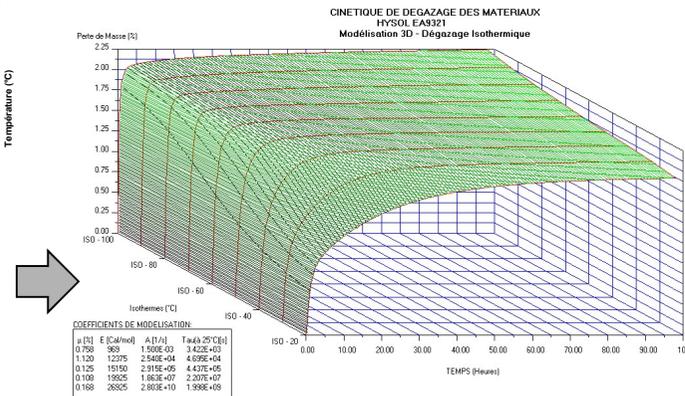
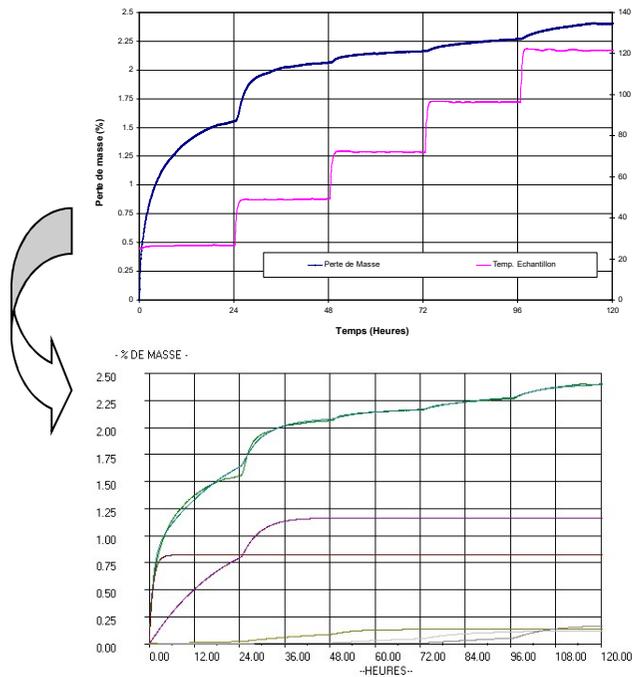
Propriété	Valeur(unité)	Visibilité	Commentaires	Date de la dernière mise à jour
Dégazage sous vide CVCM	0.01 (%)	Publique	Source: ECSS-Q-70-71A Test type: ECSS-Q-70-02	2019-08-26 16:37
Dégazage sous vide RML	0.75 (%)	Publique	Source: ECSS-Q-70-71A Test type: ECSS-Q-70-02	2019-08-26 16:37
Dégazage sous vide TML	1.42 (%)	Publique	Source: ECSS-Q-70-71A Test type: ECSS-Q-70-02	2019-08-26 16:38
SPA11_Inflammabilité	0 (-)	Publique	Pass Source: ECSS-Q-70-71A Test type: NASA-STD-6001	2019-08-26 16:37
SPA10_Toxicité	0 (-)	Publique	Pass Source: ECSS-Q-70-71A Test type: NASA-STD-6001	2019-08-26 16:37
Dégazage sous vide CVCM	0.04 (%)	Publique	Cured in air for 7 days @ 25°C Source: Technical datasheet	2019-08-26 16:27
Dégazage sous vide TML	0.77 (%)	Publique	Cured in air for 7 days @ 25 °C Source: Technical datasheet	2019-08-26 16:39

En conception satellite : simulation des cinétiques de dégazage et modélisation

limites du test μ VCM

test standard uniquement pour comparer les matériaux
conditions de tests \neq conditions d'utilisation

différentes méthodologies dans l'ECSS-Q-TM-70-52A

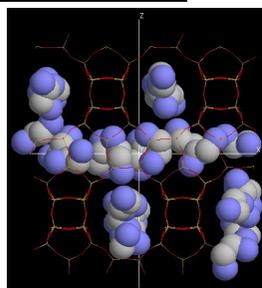
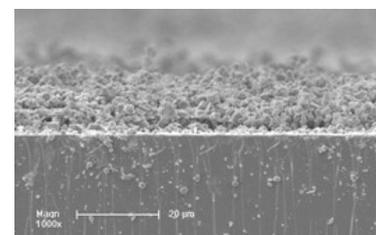
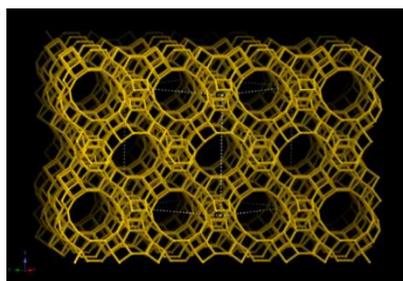
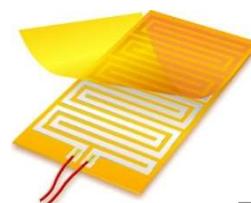


en vue de prétraitements thermiques
et modélisation en vol

En conception satellite : réflexion sur les solutions sol/vol

capots de protection des éléments sensibles
système de purge à l'azote sec

dimensionnement et orientation des événements
réchauffeurs pour la décontamination en vol
pièges moléculaires



Credits: NASA/Chris Gunn

En fabrication satellite

vérification de la propreté des aires de fabrication ou d'assemblage des matériels
nettoyage de tous les éléments fabriqués sans condition spécifique de propreté
dégazage sous vide des principales sources de contaminants :

- au niveau charge utile : câbles, MLI, adhésifs, matériaux composites...
- au niveau plate-forme : panneaux solaires



En intégration satellite

vérification la conformité des zones d'intégration ISO (audits...)

sensibilisation du personnel aux risques propres à l'instrument/satellite

contrôle de la contamination avec des témoins étapes et cumulatifs (ECSS-Q-ST-70-05C)

point clé d'inspection des instruments avec différents éclaircissements

nettoyage au besoin (ECSS-Q-ST-70-54C ou ISO 14644-13, REX R&T)

vigilance vis-à-vis de l'introduction de nouveaux matériaux ou équipements en salle propre (ISO 14644-15)

sélection des consommables (liste noire, validation au cas par cas)

- matériaux d'emballage
- tissus d'essuyage (wipes)
- tampons de prélèvement (swabs)
- solvants spécifiques...

projet de norme en cours (ISO 14644-18)



En essai

nettoyage des moyens d'essais suivant des procédés non contaminants
mise en place de témoins spécifiques, microbalance ou spectromètre de masse
emballage des éventuelles sources de contaminants liées aux moyens sol



© CNES/TRONQUART Nicolas, 2019

vide thermique



vibrations



SOMMAIRE

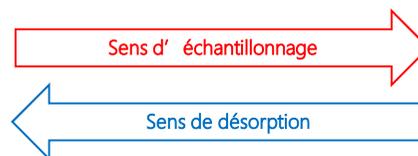
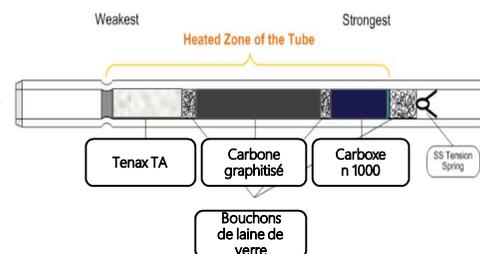
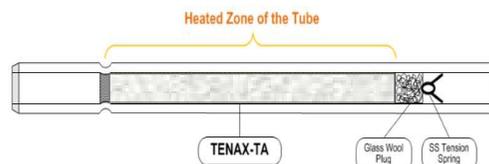
- Problématique de la contamination chimique dans le spatial
- Un plan de propreté adapté pour chaque satellite
- Bonnes pratiques de prévention des risques
- **Focus sur la surveillance en salle propre**

Mesure de la concentration des espèces chimiques dans l'air de la salle

prélèvement d'air avec sacs ou tubes d'adsorbants ⇒ analyse TD-CPG/SM ou FID



Système de prélèvement d'air sur tube adsorbant



Couplage TD-GC-MS

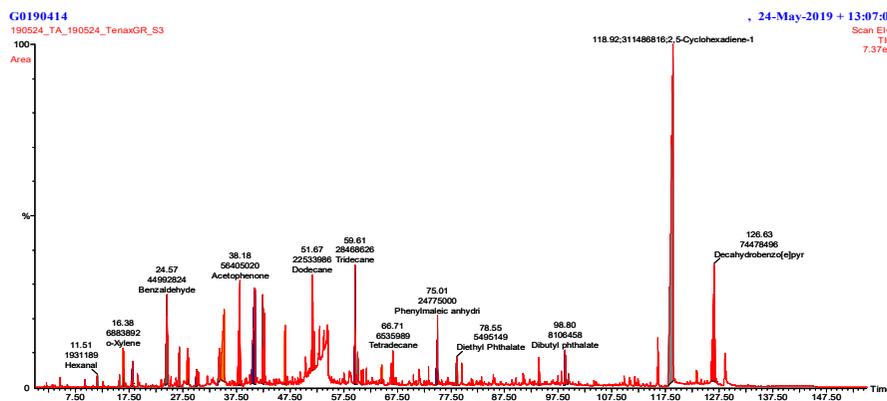
filtre enduit, imprégné d'un réactif chimique approprié (adsorption spécifique du contaminant)
série de barboteurs remplis d'eau désionisée ou d'un réactif liquide approprié
échantillonnage continu de l'air ambiant ⇒ analyse par spectrophotométrie IRTF

Retour sur étude interne récente

Objectifs :

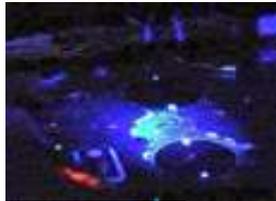
- Etablir des méthodes d'analyse **qualitative** et **quantitative** de la contamination chimique en salle propre, dans l'air et sur les surfaces, à l'aide de la CPG/SM
- A l'issue de la mise en place des différentes méthodes, réaliser une procédure utilisable en routine pour la surveillance de la contamination moléculaire en salle propre

Echantillonnage et extraction	Injection directe en GC-MS	Thermodésorption (TD-GC-MS)
Contamination de l'air	Sacs Tedlar	Tubes adsorbants (Tenax GR, Chromosorb 106)
Contamination des surfaces	Rinçage de témoin (Chloroforme, IPA, hexane, pentane)	Essuyage de témoin (Tissu imbibé d'IPA ou hexane)

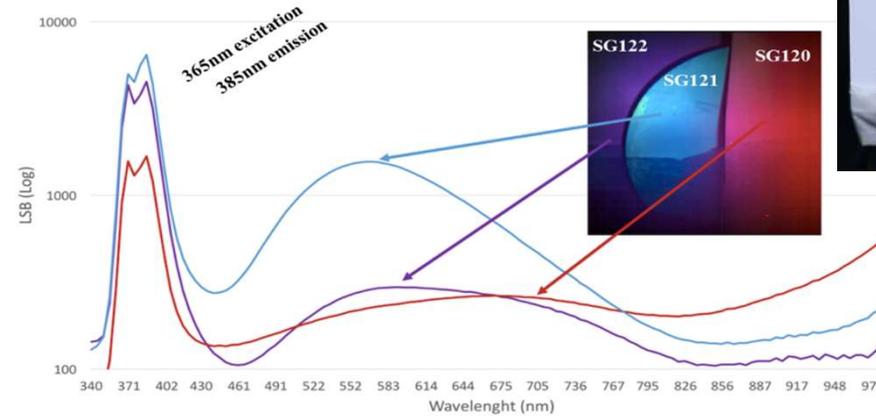
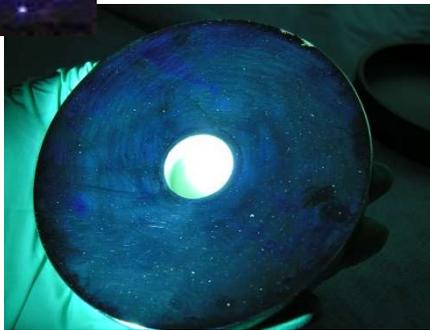


- Au total, 94 composés mesurés
- 35 mentionnés dans la littérature comme étant COV potentiels contaminants
- Aldéhydes, alcanes linéaires, hydrocarbures aromatiques, cyclosiloxanes...

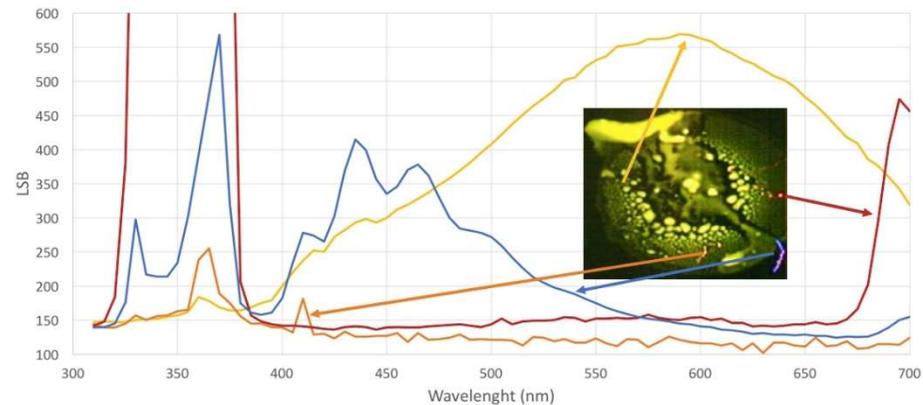
Contamination chimique des surfaces : révélation sous ultraviolet



@ 365 nm



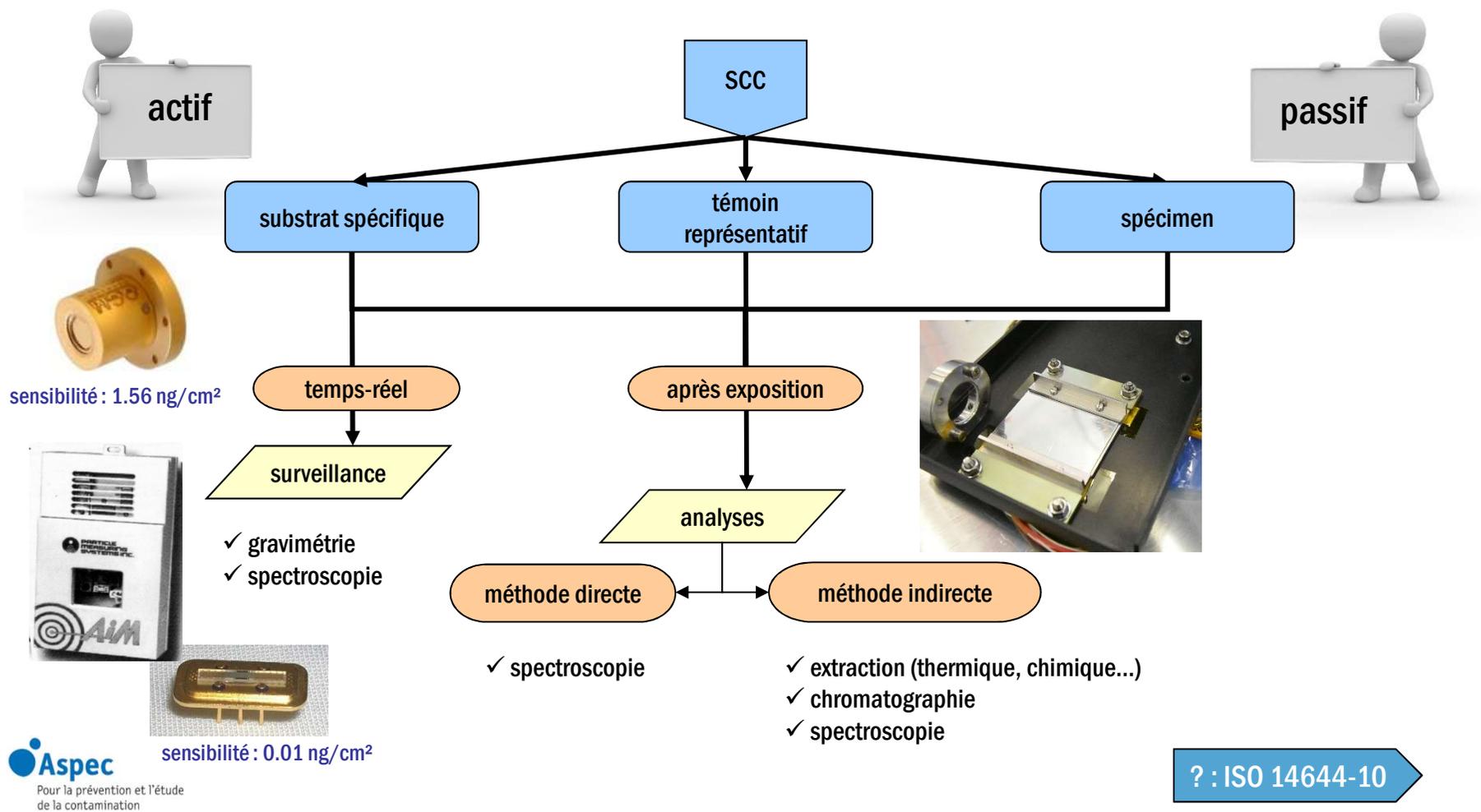
Spectres de fluorescence de différentes peintures blanches



Spectres de fluorescence des produits de dégazage d'une colle

Intérêt d'un instrument hyperspectral UV-vis :
technique non invasive de reconnaissance chimique

Mesure de la contamination chimique des surfaces (dans la salle et/ou au plus près des surfaces sensibles)



analyse in-situ des RNV* par spectrophotométrie IRTF

spectrophotomètre infrarouge



témoïn en ZnSe

sensibilité : 10 ng/cm²

analyse qualitative

caractérisation des fonctions chimiques des contaminants

analyse quantitative

application de la loi de Beer Lambert

$$\text{absorbance } A = \log(I_0/I) = -\log(T) = aLC$$

I_0 intensité infrarouge incidente

I intensité infrarouge transmise

T transmittance

a absorptivité ou coefficient d'absorption ($L \cdot g^{-1} \cdot cm^{-1}$)
(dépend de l'échantillon)

L épaisseur (cm)

C concentration ($g \cdot L^{-1}$)



technique simple, rapide et sensibilité acceptable



Conclusion

- Vide spatial et environnement induit
- Nombreux matériaux polymères : chaque cas est particulier en termes de cinétique de dégazage
- Attention à la contamination : impact significatif et synergie avec l'environnement spatial
- Prévention des risques sol/vol
- Importance de la surveillance temps réel et inspection régulière
- Besoin de développer des moyens de détection fiables et très sensibles
- Adaptation pour le vol ?

Contamin@Lyon **28 NOV 2019**

Quels sont les enjeux de la maîtrise de la contamination ?

Aspects particuliers, microbiologiques et chimiques

SOFITEL LYON BELLECOUR ASPEC - info@aspec.fr www.aspec.fr



Merci de votre attention !

