HAL
open science

Sélection de méthodes optiques pour la détection de défauts sur les réflecteurs optiques solaires (OSR)

Rémi Gilblas, Thierry Sentenac, Jean-José Orteu

To cite this version:

Rémi Gilblas, Thierry Sentenac, Jean-José Orteu. Sélection de méthodes optiques pour la détection de défauts sur les réflecteurs optiques solaires (OSR). 14ème Colloque Méthodes et Techniques Optiques pour l'Industrie., Nov 2015, Lannion, France. hal-01352751

HAL Id: hal-01352751

https://hal.science/hal-01352751v1

Submitted on 9 Aug 2016

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Sélection de méthodes optiques pour la détection de défauts sur les réflecteurs optiques solaires (OSR)

R. GILBLAS, T. SENTENAC, J.-J. ORTEU

Université de Toulouse ; CNRS, INSA, UPS, Mines Albi, ISAE ; ICA (Institut Clément Ader) ; Campus Jarlard F-81013 Albi, France

Introduction

La bonne santé et la durée de vie maximale d'un satellite placé dans des conditions spatiales sont régies principalement par sa régulation thermique. La minimisation des gradients de température entre les faces « nuit » et « jour » du satellite est un souci permanent pour les acteurs du domaine spatial. Parmi les solutions existantes, le recours à des composants optiques appelés OSR (Optical Solar Reflector) permet de garantir un satellite « froid ». Ces composants recouvrent donc les satellites à raison de 625/m² et montrent des performances maximales pour un bon état de surface, sans défauts. Au montage du satellite, au sol, une importante phase de tri est donc mise en place par le constructeur.

Le projet OSRAS (OSR Automatic Screening) a pour objectif d'automatiser le tri visuel actuel voire de le rationnaliser en identifiant les défauts critiques. Les OSR étant des composants fragiles, nous privilégierons les méthodes sans contact, et parmi celles-ci, nous ne choisirons pas les méthodes exploitant une excitation énergétique de type différence de potentiel (électroluminescence[1]) ou ultrasons [2]. Enfin, le prototype doit être capable de supporter des cadences élevées, donc nous ne prendrons pas en compte les méthodes de déflectométrie[3], les techniques à base de scan laser[4] ou la tomographie X[5]. Nous nous focaliserons donc sur les méthodes optiques faibes énergie, comme dans la référence [6].

Dans cet article, nous présentons la pré-étude permettant la sélection d'une méthode optique de détection incluant une caractérisation optique des OSR et une caractérisation dimensionnelle des défauts principaux. Enfin, nous évaluons les performances des méthodes sélectionnées par un premier prototypage.

1. Caractérisation optique des OSR et méthodes compatibles

Dans cette partie, nous présentons les propriétés radiatives des OSR.

1.1 Description et composition d'un OSR

Un OSR est un composant multicouche (voir figure 1) destiné à être collé (sur sa face interne en NiCr) sur un satellite.

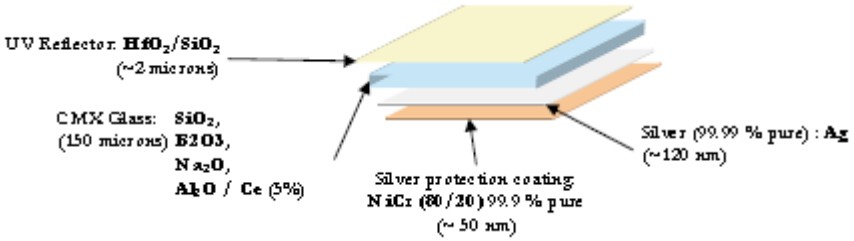

Figure 1 : Schéma de composition d'un OSR(haut : face externe ; bas : face interne)

La couche d'Ag a pour rôle la bonne réflexion des rayonnements solaires visibles atteignant l'OSR en conditions spatiales, et donc la minimisation du chauffage radiatif du satellite. La couche NiCr (face interne) protège la couche d'Ag contre les éventuelles agressions chimiques de la colle située en dessous. La couche CMX Glass a un double rôle : 1) elle confère une bonne émissivité thermique à l'OSR, donc la possibilité d'évacuer la chaleur interne due principalement aux composants

électroniques vers l'extérieur ; 2) Elle assure une bonne rigidité mécanique à l'ensemble. La couche Hf02/SiO2 (face externe) protège l'OSR des rayonnements UV, donc à un vieillissement prématuré du composant.

1.2 Propriétés radiatives des OSR

Des mesures spectrométriques sont réalisées sur l'OSR afin de définir la méthode de mesure sans contact la plus adaptée à la détection des défauts. Nous utilisons un spectromètre à transformée de Fourier de marque Bruker, permettant des mesures sur la gamme de longueur d'onde [0.9-25]µm. Le spectromètre est équipé d'une sphère intégrante qui rend possible la mesure de la réflectance R.

Pour le cas de la transmission, la présence de deux couches métalliques de 170 nm d'épaisseur au total ne laisse aucun doute quant à l'opacité de l'OSR. Dans ces conditions d'opacité, l'absorptivité A est le complément à un de la réflectance : A+R=1.

Les spectres d'absorption sont présentés figure 2.

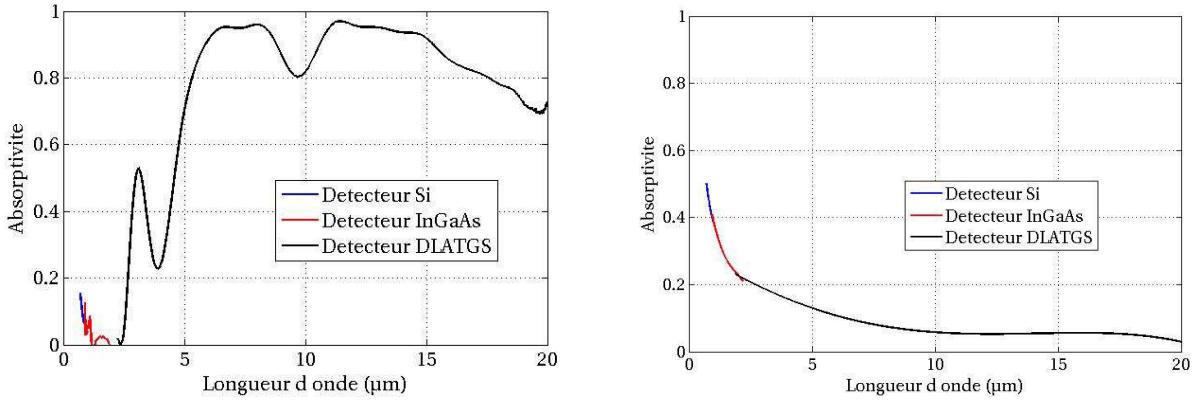

Figure 2 : Spectres d'absorption de l'OSR vu de : a) la face externe ; b) la face interne

La face externe présente bien une forte absorptivité dans l'infrarouge moyen (après 4 µm), ce qui conforte le caractère « bon émetteur thermique » de l'OSR. Dans le visible (plage du rayonnement solaire), l'absorptivité est faible, donc c'est le caractère « bon réflecteur solaire » qui est ici mis en évidence. En ce qui concerne la face interne, la variation décroissante et les faibles valeurs d'absorptivité sont typiques d'un matériau métallique.

1.3 Méthodes de détection et propriétés radiatives

Les propriétés radiatives des OSR nous renseignent sur les méthodes de détection pertinentes pour la détection automatique des défauts. Sur la face externe nous observons deux domaines : l'un propice à la réflexion de la lumière (visible et proche infrarouge), donc aux méthodes de réflectographie et l'autre propice à l'émission et l'absorption de la lumière (infrarouge moyen), donc aux méthodes de thermographie. La face interne, elle, est globalement réfléchissante, donc se prête plutôt aux méthodes de réflectographie. Nous affinerons le choix de la méthode et le dimensionnement du prototype par la caractérisation dimensionnelle des défauts donnée dans la section suivante.

2. Caractérisation dimensionnelle des défauts

Les défauts les plus fréquemment observés sur les OSR sont décrits et caractérisés dans cette section.

2.1 Types de défauts rencontrés

Les défauts les plus fréquemment observés au contrôle visuel sont au nombre de 4 : 1) Pinholes (voir figure 3,a), petits défauts de forme circulaires isolés sur l'OSR ; 2) Rayures (voir figure 3,b), défaut de forme allongé ; 3) Nébuleuse : ensemble de pinholes de formes variables voire zone présentant un aspect différents du reste de l'OSR. 4) Pollution : défaut apporté par l'environnement extérieur et adsorbé par la surface.

Une des inconnues principale est la localisation du défaut dans l'épaisseur de l'OSR. Les défauts peuvent être situés sur l'une des deux surfaces de l'OSR (pollution ou dégradation de la surface suite à une manutention), à l'interface entre les multicouches (défaut usine lors de l'assemblage du matériau multicouche) ou encore dans le volume (défaut lié au matériau). Mais les défauts peuvent aussi traverser plusieurs couches, comme le pinhole présenté figure 3, qui traverse les couches successives de $Hf0_2/SiO_2$ de la couche protectrice UV. Si les défauts traversent les deux couches métalliques, l'OSR n'est plus opaque localement dans les domaines visible et proche infrarouge.

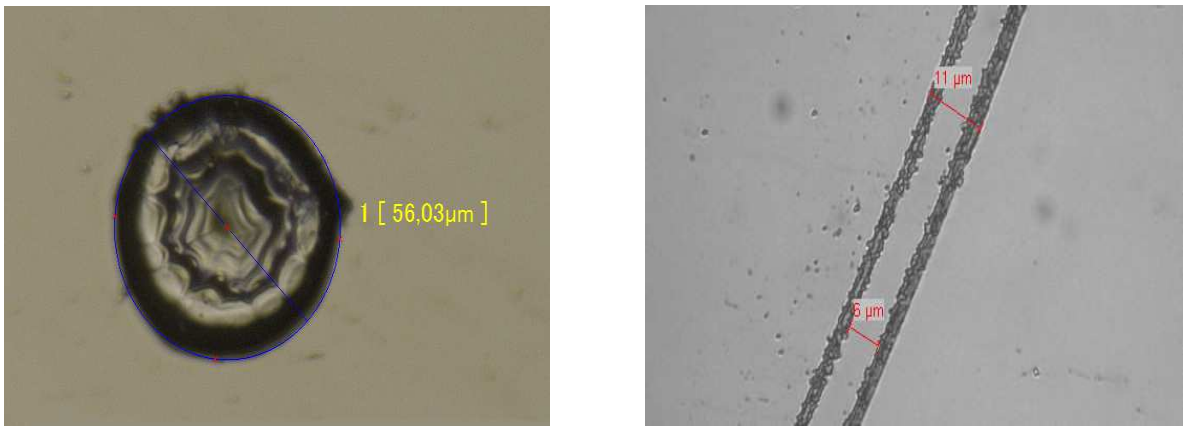

Figure 3 : Défauts visualisés par microscopie optique en a) pinhole; b) rayures

2.2 Identification des méthodes de mesure

Compte tenu de la méconnaissance a priori des dimensions des défauts, nous mettons en œuvre une démarche multi échelle permettant de dimensionner tout type de défauts. Pour les macro-défauts (dimensions > 100nm), nous utiliserons : 1) Une table lumineuse pour les défauts millimétriques, 2) Un microscope optique en réflexion, pour détecter des défauts à l'interface Argent/CMX ou les défauts de surface sur la face NiCr. 3) Un microscope optique en transmission pour les défauts traversant les couches métalliques. Pour les micro-défauts (dimensions < 100nm) : 1) Un MEB (microscope électronique à balayage) pour les défauts de surface UVProtect et NiCr ; 2)Un AFM (microscope à force atomique) pour les mêmes défauts et accéder à leurs profondeurs.

2.3 Résultats des dimensions des défauts

Les résultats des dimensions des défauts sont réunis sur le tableau 1, qui rassemble les mesures réalisées par les différents moyens de caractérisation. Les dimensions des défauts sont approximées selon deux dimensions, une dimension de longueur et de largeur. Notons que les défauts traversant ont été détectés sur un jeu de 200 OSR alors que les défauts de surface sur un jeu de 10 OSR seulement.

Défaut	Localisation	Population	Occurrence (Défauts/ OSR)	Dimensions selon x (µm)	Dimensions selon y (µm)	Dimensions selon z (µm)
Pinholes	Surface/interface	25	2.5	20 ± 15	idem	11 ± 7
	Traversante	35	0.175	75 ± 106	18 ± 11	-, > 0.17
Rayures	Surface/interface	34	3.4	-	9 ± 8	0.117 ±
	Traversante	36	0.18	- ≈10000	3.6 ± 2.2	-, > 0.17
Nébu-leuses	Surface/interface	29	2.9	2884 ± 2806	1539 ± 1540	-
	Traversante	32	0.16	109 ± 409	107 ± 156	-, > 0.17
Pollutio	Surface/interface	5	0.5	47 ± 44	idem	-

Tableau 1 : Résultats des dimensions des défauts.

Les tirets '-' indiquent que la mesure n'a pas été possible. Les cases « idem » correspondent aux formes circulaires.

En analysant les résultats des occurrences des défauts, nous notons que les défauts de surface sont les plus fréquents. Néanmoins, parmi ces défauts, il est très difficile de déterminer si ce sont de réels défauts (enlèvement de matière) ou des poussières. Il y a donc de fortes chances que cette occurrence soit plus faible si l'environnement de la pièce où s'effectue la mesure est contrôlé, de type salle blanche.

Ensuite, en ce qui concerne les pinholes, nous observons une taille de l'ordre de 40 µm avec un écart-type important autour de cette valeur, ce qui indique l'absence de taille caractéristique. Les rayures ont une largeur de l'ordre du µm et une longueur d'environ 1 cm. Les nébuleuses ont des dimensions millimétriques, et sont plus étendues en surface que en traversant, car sont constituées en partie par des défauts de surface. Enfin les défauts de pollution ont une taille d'environ 50 µm mais peuvent être enlevés par nettoyage en environnement contrôlé.

De façon générale, les défauts ont des dimensions très variables et non caractéristiques, ce qui va demander un compromis sur le dimensionnement du prototype.

2.4 Taille des défauts et pré-dimensionnement du prototype de détection des défauts

Le cahier des charges impose d'avoir l'OSR (4cm*4cm) en entier sur une image. Or nous avons vu que les défauts ont une taille minimale de l'ordre du µm. Il est donc nécessaire de choisir une caméra haute résolution (grand nombre de pixels) avec un objectif zoom macroscopique (grossissement élevé).

3. Développement de prototypes de détection de défauts

Cette section présente le développement et les résultats des prototypes des méthodes identifiées précédemment.

3.1. Présentation des méthodes développées

Le tableau 2 présente le matériel utilisé pour le développement des prototypes.

Méthode	Source	Face visée + direction	Détecteur	Face observée + direction
Transmittographie	Visible Halogène	Interne normale	Cam 5Mpi Visible	Externe normale
Réflectographie	Visible Halogène	Interne rasant	Cam 5Mpi Visible	Interne normale
Thermographie	Visible Halogène	Interne normale	Cam 0.3MPi IR	Externe normale

Tableau 2 : Présentation des prototypes développés

Tout d'abord, le prototype de transmittographie a été développé dans le domaine visible pour deux raisons majeures : 1) facilité d'accès à des caméras VIS haute résolution ; 2) Plus grande sensibilité théorique pour les micro-défauts. Nous avons choisi d'éclairer la face interne et d'observer la face externe pour être conforme au contrôle visuel actuel. La source VIS est une source halogène Dedolight 100W. La caméra est de marque Pike Technologies 5MPi (2052*2452), avec un capteur Si. L'objectif zoom utilisé est un TAMRON avec une focale de 28 à 300 mm. Une fois l'OSR dans l'image, la projection du pixel sur l'OSR est de **16 µm**.

Le prototype de réflectographie « dark field » permet la binarisation « physique » de l'image de l'OSR. En effet, l'incidence rasante permet une visualisation brillante des défauts sur un fond sombre (sans défaut). Nous nous affranchissons ainsi des problèmes de saturation causés par la visualisation d'une surface spéculaire. La face interne est visualisée car elle est destinée à être collée sur le satellite, donc c'est là que les défauts de surface sont les plus critiques. Nous utilisons le même matériel que précédemment.

Le prototype de thermographie exploite la forte émissivité thermique de l'OSR dans le domaine MIR. Nous observons donc la face externe avec une caméra infrarouge de marque FLIR, modèle

SC7000, de définition 0.3 MPi (512*640), associée à un objectif à focale fixe de 50mm. La projection du pixel dans le plan vaut **90 µm**.

3.2 Résultats de détection par les prototypes de détection de défauts

La phase préalable à l'évaluation des méthodes consiste à élaborer un OSR « test », qui présente tous les types de défauts. Nous avons donc choisi un OSR présentant de nombreux défauts traversant et nous avons brossé la face interne pour créer des rayures surfaciques. Les images prises par les différents prototypes sont présentées Fig. 4 :

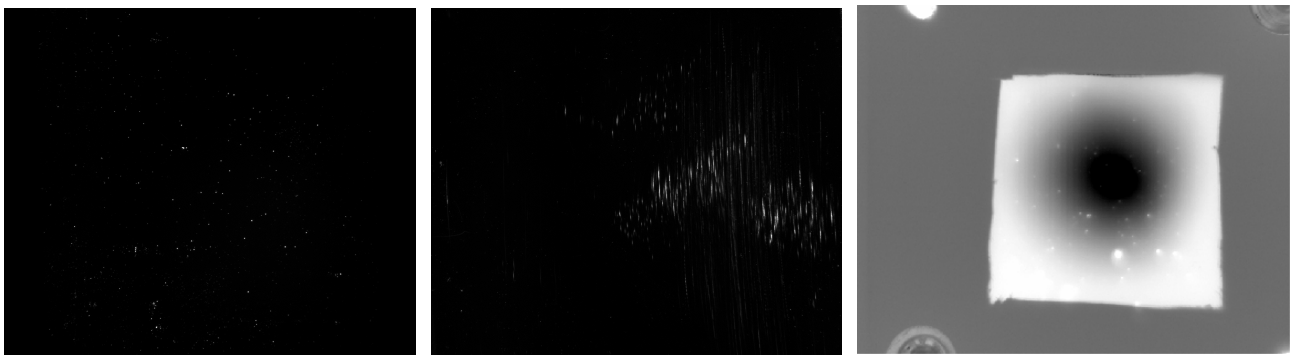

Figure 4: Images d'un OSR Test obtenus par les techniques de : a) Transmittographie ; b)Réflectographie ; c) Thermographie

L'image de transmittographie ne semble présenter que des pinholes et quelques rayures courtes. Cette image correspond aux défauts traversant les couches métalliques (>170 nm). Le prototype semble donc bien dimensionné, les images semblent de bonnes données d'entrée pour le logiciel de traitement d'image destiné à établir un diagnostic de l'OSR.

L'image de réflectographie, quant à elle, laisse entrevoir clairement les rayures créées par le brossage de la surface. Ce sont donc bien les défauts de surface qui ont été détectés. De plus, nous avons observé que les poussières déposées sur la surface de l'OSR sont également détectées par cette méthode. Il faut donc être vigilant sur cette méthode utilisée en environnement non contrôlé.

Enfin, l'image de thermographie produit une image d'OSR encore différente. Le motif concentrique correspond au front thermique avec en noir les températures élevées. Nous détectons cette fois tous les défauts constituant une variation locale de la conductivité thermique de l'OSR. Ils peuvent être situés aux interfaces comme au sein des matériaux constitutifs. Les défauts semblent être de dimension importante mais nous devons considérer la diffusion du front thermique au sein de l'OSR qui a tendance à surestimer la taille des défauts en surface.

3.3. Vers un prototype pré-industriel

Cette pré-étude nous guide pour le choix des méthodes adaptées en contexte industriel. Pour cela, 3 critères doivent être satisfaits : 1) Vitesse : capacité à tenir des cadences industrielles ; 2) Métrologie : Précision, robustesse, répétabilité ; 3) Simplicité de mise en œuvre et d'analyse.

Le critère 1) est satisfait par l'utilisation de caméra permettant une acquisition rapide de l'OSR entier et par l'utilisation d'algorithmes d'analyses relativement simples (binarisations…). Le critère 2) est atteint en utilisant une caméra haute résolution et un objectif zoom. De plus, nous pouvons améliorer la précision en utilisant un objectif télécentrique pour éviter les erreurs chromatiques. A fortiori, si l'environnemennt de mesure est contrôlé, la détection d'éléments « temporaires » de type polluants serait maîtrisée.

Nous choisissons donc une solution mixte alliant transmittographie et réflectographie. La thermographie est abandonnée car elle impose de faibles résolutions géométriques (de par la faible définition des caméras infrarouges et le coût élevé des objectifs infrarouges à fort grossissement). Elle inclue aussi des algorithmes de dépouillement dynamiques (car la température évolue au fil de l'éclairement sur l'OSR) et complexes pour retrouver la dimension vraie du défaut.

4. Conclusion

Cet article a pour objectif de démontrer comment les propriétés radiatives des matériaux peuvent constituer un guide pour le choix d'une méthode de détection matricielle optimale et maîtrisée. Le contexte considéré ici est la détection de défauts sur des revêtements utilisés dans le domaine spatial pour la régulation thermique des satellites. Les propriétés radiatives nous permettent de déterminer quelle méthode nous permet de sonder le matériau multicouche et à quelle profondeur.

Les propriétés radiatives des OSR montrent un domaine spectral propice à la méthode de thermographie et un autre à la méthode de réflectométrie. De plus, comme les OSR sont des composants multicouches, et que seules les couches métalliques sont opaques, il est possible de détecter les défauts traversant par transmittographie. La caractérisation dimensionnelle des défauts a montré une grande variabilité des défauts et pas de taille caractéristique. Les plus petits défauts (largeur des rayures) ont une dimension d'environ 1 µm alors que leur longueur est centimétrique. Cela impose donc l'utilisation d'une caméra haute résolution associée à un objectif zoom. Enfin, les prototypes développés ont montré de bonnes performances pour la transmittographie et la réflectographie. Cette solution mixte sera donc implémentée sur le prototype industriel. La thermographie, quant à elle, s'est révélée trop peu résolue.

Le développement du prototype industriel et l'évaluation de ses performances en condition d'usine fera l'objet d'une future publication. Les perspectives d'améliorations sont nombreuses et variées. Il serait important de connaître quels défauts sont les plus critiques pour la régulation thermique : les défauts des surfaces de collage? Les défauts aux interfaces? Les défauts au sein du verre? Nous pourrions ainsi développer une détection moins sévère, mais davantage ciblée sur les défauts critiques.

5. Remerciements

Le projet de R&D OSRAS, lauréat de l'appel à projet AEROSAT, est financé par l'Etat via le FNADT. Nous remercions également les partenaires d'OSRAS (AIRBUS D&S, MAP COATINGS, ALCI et ARMINES) pour leur aide et contributions à ce projet.

6. Bibliographie

1. M.Seeland, R.Rösch, B.Muhsin, G.Gobsch, H.Hoppe, "Electroluminescence as Characterization Tool for Polymer Solar Cells and Modules", Energy Procedia, Volume 31, 2012.

2. B.Yang, Y.Huang, L.Cheng, "Defect detection and evaluation of ultrasonic infrared thermography for aerospace CFRP composites", Infrared Physics & Technology, Volume 60, September 2013.

3. E.R. Fotsing, A. Ross, E. Ruiz, "Characterization of surface defects on composite sandwich materials based on deflectrometry", NDT & E International, Volume 62, March 2014.

4. N. Nazaryan, C. Campana, S. Moslehpour, D. Shetty, "Application of a He3Ne infrared laser source for detection of geometrical dimensions of cracks and scratches on finished surfaces of metals", Optics and Lasers in Engineering, Volume 51, Issue 12, December 2013.

5. C.Goidescu, H.Welemane, C.Garnier, M.Fazzini, R.Brault, E.Péronnet, S.Mistou, "Damage investigation in CFRP composites using full-field measurement techniques: Combination of digital image stereo-correlation, infrared thermography and X-ray tomography", Composites Part B: Engineering, Volume 48, May 2013.

6. D. M. AIKENS, « The truth about scratch and dig », International Design Conference and Optical Fabrication and Testing, Optical Society of America, 2010.