



Quelques-uns des experts design et composants qui ont planché sur « l'affaire » PWM. De g. à d. Christophe Denardi, Nicolas Anduze, Christian Rouzies, Jean Garnier, Kevin Sanchez, Denis Schwander et Thierry Battault.

© CNES/E. GRIMAUT, 2010

Swarm, les experts Toulouse et l'autopsie du PWM

Il ne mesure que quelques millimètres de long mais il a donné bien du fil à retordre au projet Swarm. En octobre 2009, le Pulse Width Modulation, plus connu sous le nom de PWM, tombait en panne. Pour CNESquisepasse, les membres du projet et les experts du CST ont accepté de rejouer l'enquête en images. Récit.

Ce n'était pas un vendredi 13, mais presque. L'équipe Swarm se souviendra longtemps de ce jour où la défaillance d'un composant de quelques millimètres carrés a provoqué le gel du projet pendant plus de 4 mois. Le vendredi 9 octobre 2009 donc, les ingénieurs de STEEL Électronique, une

société de Martres-Tolosane spécialisée dans la fabrication de cartes électroniques pour le spatial, effectuent des tests sur les cartes du magnétomètre Swarm. Le convertisseur DC/DC, qui sert à réguler à -5V la tension fournie par les panneaux solaires et les batteries pour alimenter l'électronique de l'instrument, tombe alors en panne au démarrage [1].

« Les deux cartes modèles de vol ont lâché en parallèle, explique Marc Marmouget, concepteur de la carte électronique chez STEEL Électronique. Nous avons prévenu le CNES qui nous a autorisé à utiliser une des deux cartes pour tenter d'identifier l'origine de la défaillance. » Après les premières analyses, les PWM semblent être en panne. Les électroniciens débrassent le PWM et utilisent un « socket » [2], un support permettant d'interchanger facilement les PWM, pour pouvoir investiguer en préservant au mieux la carte de vol. Leurs gestes sont comptés, car le nombre d'interventions possibles au cm² sur le modèle de vol est limité pour ne pas endommager la carte. Avec un nouveau PWM implanté sur le socket de

la carte utilisée pour l'investigation, celle-ci fonctionne à nouveau. Un certain nombre d'essais sont même ensuite réalisés avec succès, mais après suppression du socket et le PWM ressoude sur la carte, celle-ci tombe à nouveau en panne très rapidement. La défaillance du PWM est toujours la même : un court-circuit entre la broche d'alimentation Vcc du composant et la broche de masse. « Dans la mesure où la panne se produisait dès la mise sous tension, nous ne pouvions pas aller plus loin dans les investigations, explique Marc Marmouget. Il fallait faire appel aux experts du CNES pour déceler l'origine du problème. »

Catastrophique

Côté projet au CNES, la nouvelle fait l'effet d'une bombe [3]. « Nous ne nous attendions pas à avoir un problème de design à ce stade du développement, explique Isabelle Fratter, chef du projet Swarm. Nous étions prêts à démarrer la qualification de l'instrument quand nous avons appris la nouvelle ». Sur le coup, le projet penche pour une fausse manip' ou un branchement incorrect. « Des anomalies nous en rencontrons des centaines au cours de la vie d'un projet, poursuit Daniel Chery, responsable assurance qualité. Mais là nous avons déjà commencé la fabrication des modèles de vol et notre planning était très tendu pour pouvoir livrer l'instrument à l'ESA en février 2010. Bref, la situation était catastrophique ». L'anomalie, qui ne se reproduit que dans des circonstances bien précises, est d'autant plus inattendue que le composant « présumé coupable » a déjà volé sur d'autres missions telles que Corot ou Planck, sans jamais faire parler de lui. Deuxio, la « scène de crime » s'annonçait difficile à

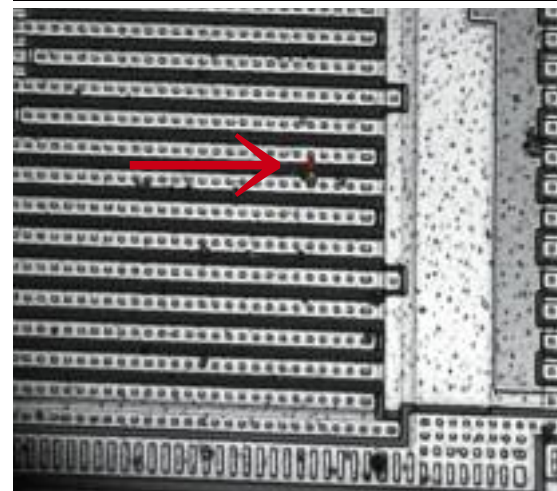
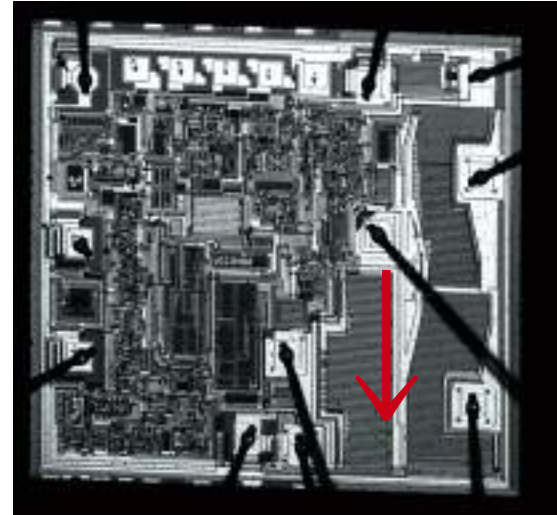
reproduire. Il était temps de nommer une commission d'enquête composée d'experts du CNES [4 et 10] pour comprendre la panne et trouver une solution. « Cette commission agit comme une task force en rassemblant des experts du design, des procédés et des composants, explique Isabelle Fratter. Elle s'est réunie une quinzaine de fois en quatre mois, afin de faire le point régulièrement sur les actions entreprises et réduire au maximum l'impact de cette anomalie sur le planning. C'est une force du CNES de pouvoir rassembler et mobiliser cette expertise. »

S'agit-il d'un problème de design de la carte, de composant ou d'une faiblesse des deux ? Telle est la question que se posent les experts de cette commission d'enquête. La première étape de l'enquête va consister, pour Daniel Chery et Nicolas Anduze [5], à consulter le « casier judiciaire » du PWM afin de dresser une cartographie des causes possibles de l'anomalie. D'après les bases de données, le composant n'a rien de suspect. Produit par Texas instrument et « upgradé » pour le spatial, il a déjà fait ses preuves. Les experts notent cependant que les sites de fabrication de PWM ont beaucoup varié au fil des années.

La carte inspectée minutieusement

Lorsqu'une anomalie fonctionnelle est déclarée, une des premières expertises à réaliser consiste en une inspection visuelle minutieuse de la carte électronique en défaut à l'aide d'une binoculaire grossissant jusqu'à 40 fois [6]. Ce type d'expertise permet parfois de détecter des défauts technologiques et/ou la présence de corps étrangers – comme des particules métalliques entraînant

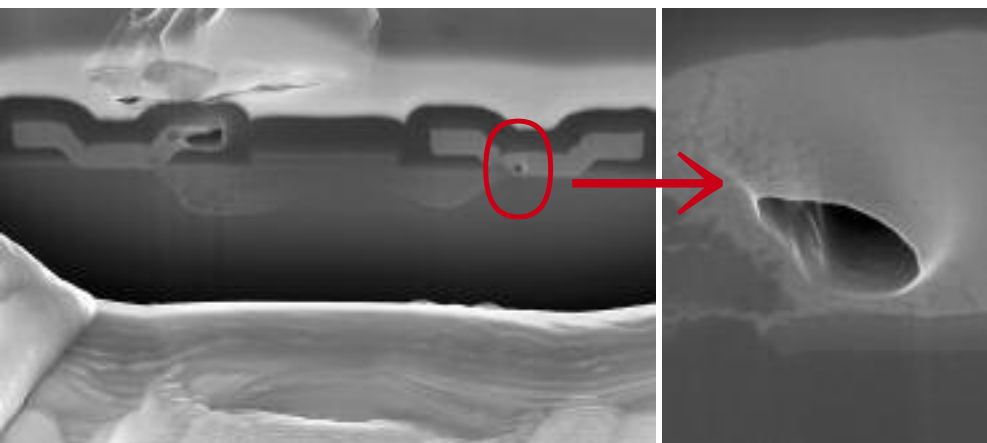
© CNES



Localisation du défaut sur la carte par stimulation thermique laser.

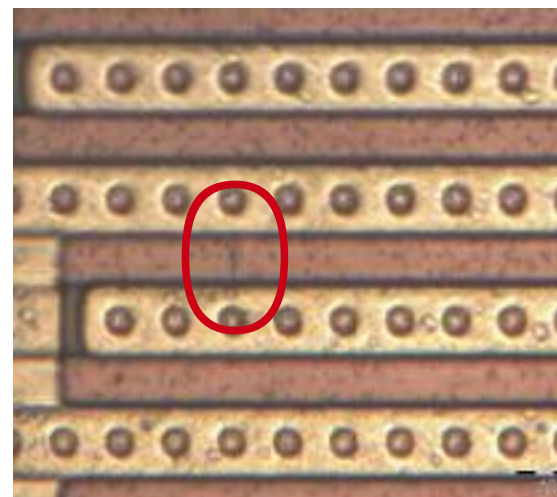
© CNES

Observation en coupe au microscope électronique à balayage. Cette analyse permet d'identifier très clairement la création d'un canal conducteur par fusion du silicium au sein du transistor.



© CNES

© CNES



Observation par imagerie optique.

© CNES

des courts-circuits – à l'origine de la panne fonctionnelle. Les conclusions qui en découlent peuvent orienter alors l'expertise à suivre ou cibler des zones critiques. Dans notre cas, rien d'anormal, visible à l'œil et sous binoculaire, n'était à signaler. Nous nous acheminons donc vers un problème « interne » au composant et/ou de design.

Le laboratoire d'expertise, qui a récupéré les composants endommagés, acquiert un lot de référence auprès du fabricant, afin de pouvoir procéder à différents tests. L'« autopsie » peut alors commencer. Celle-ci se déroule en quatre étapes principales: observation visuelle externe du composant, diagnostic électrique, localisation du défaut et caractérisation de l'anomalie. « À l'œil nu le composant ne présentait aucune zone d'agression en surface, précise Kevin Sanchez, ingénieur en charge du dossier au labo composants. Menés sur différentes machines de tests, les diagnostics électriques [7], ont eux confirmé un court-circuit entre la broche d'alimentation Vcc et la broche ground pour les trois composants défectueux.

Lire la suite p.19 →

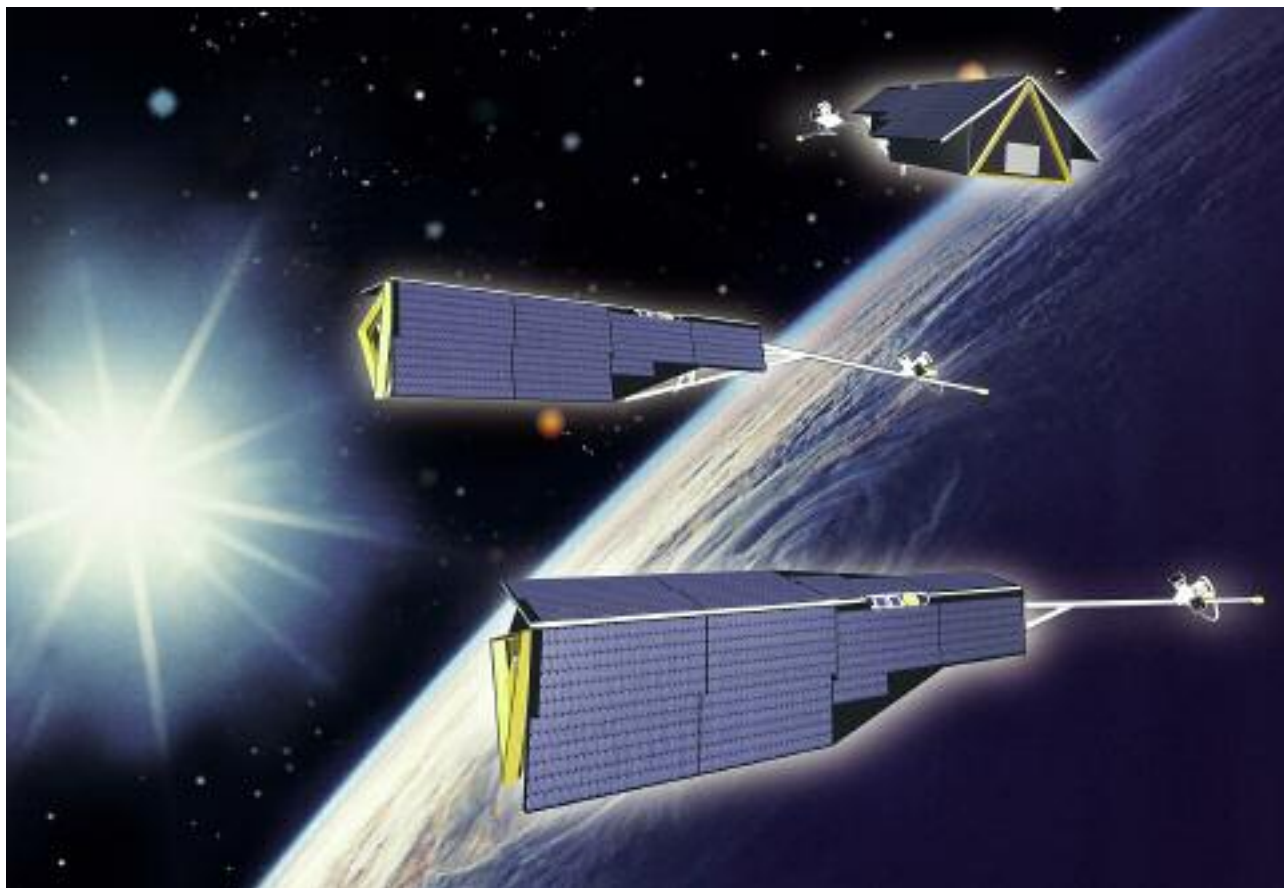
UNE MISSION POUR MIEUX COMPRENDRE LE FONCTIONNEMENT DE LA TERRE

Le champ magnétique qui enveloppe la Terre agit comme un véritable bouclier, en empêchant la partie dangereuse du rayonnement solaire d'atteindre la surface du globe. On sait aujourd'hui que l'activité du noyau de la planète, la géodynamo, est à l'origine d'une grande partie de ce champ. Mais d'autres sources, comme par exemple les roches composant la croûte terrestre, les ions de la ionosphère et même les marées océaniques, y contribuent eux aussi. Le problème des scientifiques est de distinguer ces différents contributeurs. C'est l'objectif de la mission Swarm de l'ESA. Les scientifiques ont eu l'idée d'envoyer dans l'espace 3 satellites identiques effectuant des mesures simultanées sur des orbites différentes. De cette façon, les composants du champ magnétique interne et externe pourront être isolés plus facilement. Cette étude - la plus minutieuse jamais réalisée - permettra aux scientifiques d'en apprendre davantage sur les différentes sources qui contribuent au champ magnétique. Les données obtenues serviront à mieux comprendre les processus à l'origine du champ magnétique et de ses évolutions, et aideront à mieux les simuler. Une modélisation très attendue, qui apportera de nouvelles connaissances sur la structure interne du globe.

Le CNES fournit à la mission Swarm de nouveaux instruments nécessaires à la mesure du champ magnétique: les magnétomètres absolus. Développés par le CEA/Leti*, ces instruments beaucoup plus précis que ceux fournis précédemment pour les missions Oersted et Champ, maintiennent une précision élevée de mesure du champ dans le temps et donnent ainsi une référence pour les autres magnétomètres embarqués. Le CNES est chargé de mettre au point les magnétomètres absolus pour une utilisation spatiale en collaboration avec le CEA/Leti et l'Institut de physique du Globe de Paris (IPGP). Le lancement est aujourd'hui prévu mi-2012 sur Rockot.

** Laboratoire d'électronique des technologies de l'information*

Les 3 satellites de la mission européenne Swarm effectueront des mesures simultanées sur des orbites différentes, de façon à isoler les composants du champ magnétique interne et externe de la Terre.



© EADS ASTRIUM, 2005

L'autopsie du PWM



(1) Octobre 2009, découverte de la panne chez STEEL Électronique. Un vendredi noir pour Marc Marmouget, Rémi Lafourcade et Nicolas Baillargeau.



(2) Les électroniciens placent un socket en place du composant « présumé coupable » pour commencer les investigations. Leurs gestes sont comptés : le nombre d'intervention sur une carte modèle de vol est limité pour ne pas endommager les circuits.



(3) Isabelle Fratter, chef du projet Swarm au CNES et Daniel Chery, responsable assurance qualité, apprennent la mauvaise nouvelle. Il faut stopper la qualification en cours. Un sérieux coup de frein pour le projet.



(4) Quand les experts composants et design entrent en scène. De g. à d. Kevin Sanchez, Denis Schwander, Christian Rouzies, Jean Garnier, Thierry Battault, Nicolas Anduze et Christophe Denardi.



(5) Nicolas Anduze et Daniel Chery consultent les bases de données du CNES. Première étape de l'enquête : retracer le passé du composant incriminé.



(6) Une des premières expertises consiste en une inspection visuelle minutieuse de la carte électronique à l'aide d'une binoculaire grossissant jusqu'à 40 fois. Le but : détecter des défauts technologiques ou la présence de corps étrangers à l'origine de la panne. Dans notre cas, Thierry Battault ne décèle rien d'anormal, visible à l'œil et sous binoculaire...





(7) Après une première observation optique du PWM, Jean Garnier et Kevin Sanchez utilisent une machine traceuse de courbe pour tester électriquement le composant. Le court-circuit est confirmé.



(8) Cette fois le composant endommagé est ausculté sous un microscope à balayage laser. Le but : localiser le défaut avec une extrême précision.



(9) L'anomalie doit être ensuite comprise et caractérisée afin de déterminer la correction à mettre en œuvre. Christophe Denardi et Héléne Chauvin (Thales Security Systems) observent les zones de défaut réel et reproduit en haute résolution au microscope à balayage électronique.

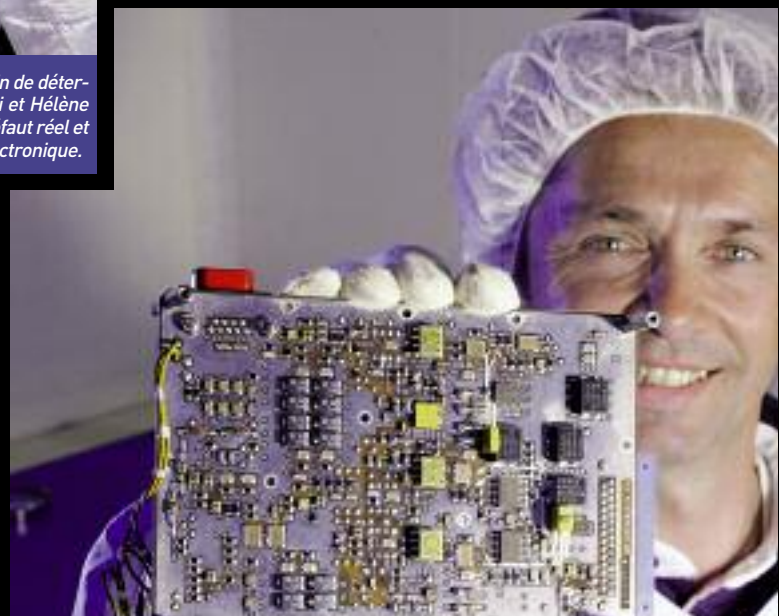


© CNES/H. PIRAUD, 2009

(10) Tout au long de ces 4 mois, une commission d'enquête s'est réunie régulièrement pour faire le point sur les investigations en cours et donner les instructions pour les étapes suivantes. Un outil fédérateur pour toute l'équipe.



(11) Denis Schwander et Christian Rouzies ont « maltraité » une cinquantaine de composants avant de pouvoir reproduire le défaut sur la carte électronique. L'anomalie du PWM restera pour eux loin d'un « cas d'école ». « Accumuler autant de circonstances marginales qui conduisent à une panne reste très rare ».



(12) Avril 2010 chez STEEL Électronique. Thierry Battault valide les réparations effectuées par les électroniciens de cette PME toulousaine. La carte a enfin retrouvé ses couleurs et l'équipe son sourire...

Où se cache le défaut ?

L'étape suivante va consister à localiser plus précisément le défaut dans les entrailles du composant. Mais pour cela il faut commencer par l'ouvrir. « Moyens mécaniques, rayons X, chimie ou ablation laser : nous avons plusieurs façons de nous y prendre, explique Kevin. Là nous avons procédé de façon mécanique, en cassant le scellement du boîtier céramique. » Une opération délicate qui nécessite un certain tour de main. À ce stade, les observations optiques menées sous microscope à l'intérieur du boîtier ne révèlent toujours aucune zone d'agression. Il faut donc utiliser une technique d'observation plus fine : la stimulation thermique laser [8]. « Cette technique nous a permis de déceler des zones sensibles et de localiser avec précision la zone de court-circuit, explique Kevin. Le défaut était le même pour les 3 composants défectueux, ce qui nous autorisait à pencher pour une cause de défaillance unique. » Mais de quoi finalement est « mort » le PWM ? Pour le savoir les experts doivent faire parler les entrailles du composant, en utilisant deux techniques différentes : la déstratification, qui consiste à retirer les couches supérieures du composant une à une, et la micro-section, pratiquée directement sur la zone de défaut. « C'est un peu comme si on cherchait à localiser une tumeur », résume Kevin. « Ces analyses nous ont permis d'identifier très clairement la création d'un canal conducteur par fusion du silicium au sein du transistor [9]. Cette signature est révélatrice du passage d'un courant très intense sur une durée très courte. » La corrélation de ces informations avec

La dernière phase de l'autopsie consiste à pouvoir reproduire le défaut.

une analyse en rétro-ingénierie permettent alors d'en savoir plus sur le mode de défaillance.

Un cas d'école ?

La dernière phase de l'autopsie consiste à pouvoir reproduire le défaut. Selon Kevin, « cette étape est indispensable pour être certain d'avoir décelé les causes racines de la panne et proposer les bonnes corrections ». Plusieurs reproductions du défaut [11] ont pu être obtenues sur maquette et sur le modèle de vol MV1B déclassé. « Nous avons soumis le convertisseur à des conditions marginales et/ou extrêmes et mis plusieurs semaines avant de pouvoir reproduire correctement le défaut, se souvient Denis Schwander, expert en design. Finalement, c'est grâce à un montage contraire aux règles de l'art que nous avons été mis sur la bonne piste. Nous avons commencé à suspecter une sensibilité du PWM à des sollicitations électriques transitoires très rapides, de l'ordre de quelques dizaines de nanose-

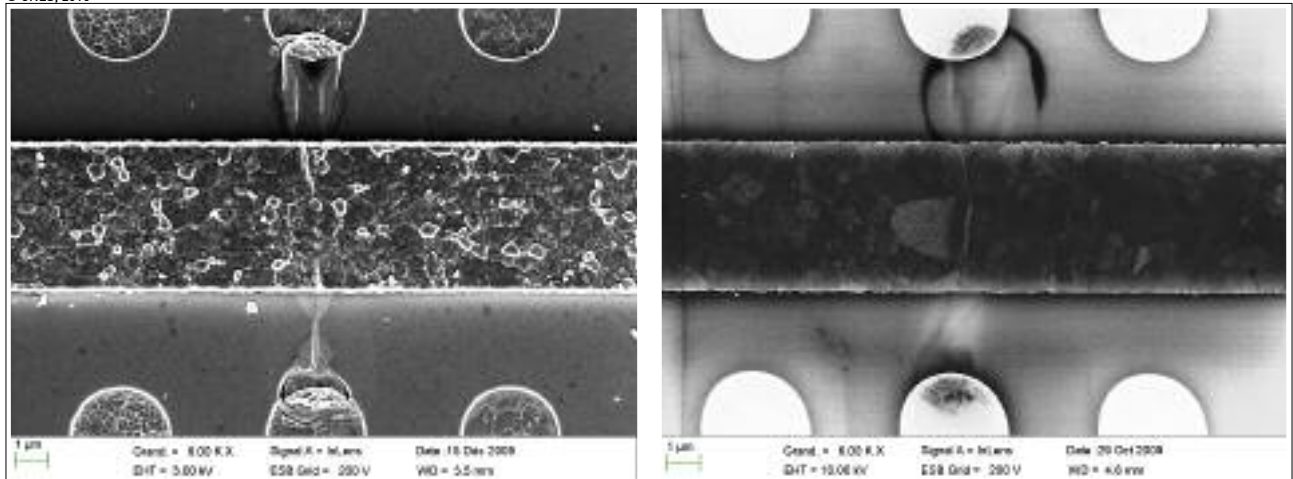
condes. Cette piste a été confirmée, mais pour nous cela est loin d'être un cas d'école tant les conditions nécessaires à la panne semblaient difficiles à réunir. Nous avons aussi compris pourquoi la panne était si difficile à reproduire : les sondes de courant autour du PWM et le socket utilisés lors des investigations constituaient un filtre vis-à-vis des sollicitations transitoires du démarrage, protégeant de fait le PWM. »

La panne étant caractérisée, restait encore à apporter les modifications nécessaires autour du PWM pour que la carte du magnétomètre puisse à nouveau fonctionner correctement. « Pour éviter des pointes de surtension, nous avons soigné le filtrage de l'alimentation du PWM, explique Christian Rouzies. Nous avons également recommandé pour le futur d'éviter, autant que faire se peut, l'utilisation de ce PWM particulièrement sensible à ces sollicitations électriques transitoires au profit d'autres PWM du même fabricant présentant plus de marge. »

6 avril 2010, retour à Martres Tolosane chez STEEL Électronique. Aujourd'hui Thierry Battault vient expertiser la carte réparée par l'industriel. Après avoir conseillé STEEL Électronique sur la méthodologie à mettre en place pour effectuer les modifications nécessaires, il contrôle la conformité de la réparation pour que la carte puisse reprendre sa vie normale dans le flot de qualification [12]. Grâce à ce précieux sésame, l'intégration des modèles de vol du magnétomètre Swarm a pu reprendre son cours et la qualification du modèle proto-vol a pu démarrer. Affaire classée pour les experts Toulouse. ■



© CNES, 2010



À gauche le vrai défaut sur le composant défaillant, à droite sa reproduction effectuée au CNES. Positions au sein du composant, signatures électriques et faciès des défauts concordent. L'hypothèse d'une cause unique est renforcée, sans pouvoir être totalement affirmée.