

Intégration de caloducs dans un équipement spatial

Ing. P. PICCICUTO
ISICht – Mons

Dans le cadre de l'envoi de satellites dans l'espace, les puissances thermiques à dissiper par les composants électroniques sont de plus en plus importantes. L'étude menée grâce à un modèle numérique et des simulations avec le logiciel d'éléments finis ANSYS envisage l'amélioration de l'implantation de ces équipements par l'intégration de caloducs.

Mots-clefs : Électronique - satellite – éléments finis – caloduc –dissipation thermique.

The thermal powers to dissipate by the electronic components in heavy satellites are increasingly significant. The study carried out thanks to a numerical model and simulations with the finite elements software ANSYS leads to comparison of different implantations of this equipment by integration of heat pipes.

Keywords : Electronic – satellite – finite element – heat pipe – thermal dissipation.

1. Introduction

1.1 Présentation du problème

Le travail principal des concepteurs de satellites consiste à rechercher les topologies (circuits) électroniques les plus adéquates aux fonctions désirées par les clients. Parmi tous les critères qui sont définis dans le cahier des charges, celui qui retient particulièrement l'attention est le rendement. En effet, toute perte dans la conversion d'énergie à partir des panneaux solaires ou des batteries jusqu'à l'application finale se transforme en production de chaleur.

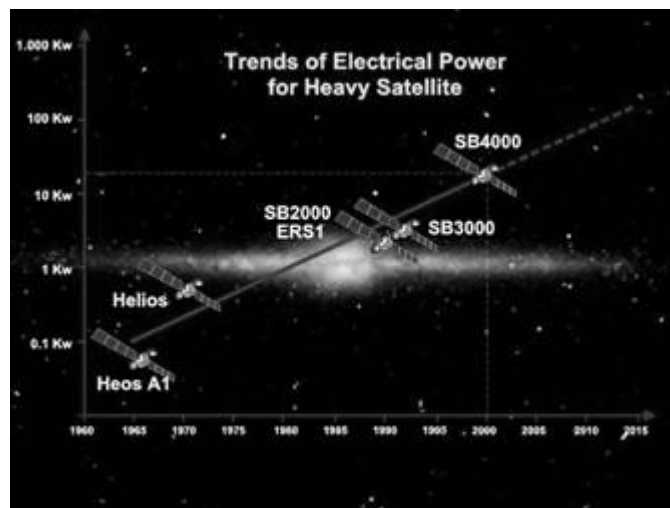


Figure 1 : Evolution des puissances des satellites

De plus, l'augmentation régulière des puissances électriques nécessaires à la réalisation des fonctionnalités et la miniaturisation de l'électronique toujours plus poussée induisent l'apparition de gradients thermiques de plus en plus importants.

A cause de ces gradients thermiques, les composants les plus dissipatifs doivent être placés au plus près de la source froide de manière à obtenir un refroidissement plus efficace.

De ce fait, l'espace mis à disposition des équipements n'est pas exploité entièrement.

1.2 Importance des problèmes thermiques

Tout dispositif ne présente un fonctionnement correct que dans un certain domaine de températures. En dehors de ce domaine, il y a risque de dégradation de ses performances, d'accélération de son vieillissement et, même, de destruction.

Il est donc nécessaire pour que le dispositif fonctionne normalement pendant sa durée de vie assignée, que les moyens d'évacuation de la chaleur produite présentent une efficacité suffisante pour que sa température ne dépasse jamais les valeurs admissibles.

La seule manière de résoudre ce problème réside dans l'adoption d'un nouveau système de refroidissement visant à garantir l'utilisation optimale des performances des équipements construits.

1.3 Solutions envisagées

- Boucle fluide diphasique à pompage mécanique
- Boucle fluide monophasique à pompage mécanique
- Boucle fluide diphasique à pompage capillaire
- Caloducs

1.4 Solution retenue

Le choix s'est porté sur les caloducs. Ces derniers peuvent transporter une quantité de chaleur égale à plusieurs centaines de fois celle transportée par un conducteur métallique solide et homogène de même volume.

Leur principe est basé sur la circulation d'un liquide en équilibre avec sa vapeur entre une zone chauffée (évaporateur) et une zone refroidie (condenseur) dans une enceinte étanche en l'absence d'air et de tout autre gaz.

Afin d'acquérir des connaissances dans le domaine du transfert de chaleur par les caloducs et d'intégrer ces derniers dans une nouvelle démarche de conception des équipements, un démonstrateur technologique intégrant ces caloducs a été réalisé et a servi de base dans l'étude des dissipations thermiques des composants électroniques.

1.5 Objectif de ce travail

Cette étude proposera une comparaison de différentes configurations d'intégration d'un caloduc au sein d'un équipement (le module de distribution) et une vérification de la tenue de ce dernier aux contraintes thermiques. La comparaison se fera sur base d'un modèle numérique et de simulations avec le logiciel d'éléments finis ANSYS.

Dans la phase d'intégration, plusieurs facteurs devront être pris en considération et un compromis entre ceux-ci devra être fait. Par exemple, l'implantation d'un caloduc peut engendrer un surcoût de production s'il nécessite une opération particulière et/ou une complication de la mécanique. Dans la suite de l'étude, des configurations d'intégrations différentes seront envisagées et certaines, privilégiées ; les choix y seront explicités en détail.

2. Technologie de refroidissement

Dans cette étude, le caloduc doit offrir un chemin thermique supplémentaire de faible résistance mais aussi augmenter la surface qui participe au transfert thermique.

2.1 Principe de fonctionnement

Un caloduc est constitué d'une enceinte étanche qui contient un liquide en équilibre avec sa vapeur en l'absence d'air ou de tout autre gaz.

Dans la zone chauffée (évaporateur), le liquide s'évapore et la vapeur va se condenser dans la zone refroidie (condenseur). Le condensat retourne vers l'évaporateur grâce à l'effet de capillarité développée dans un milieu poreux qui tapisse la paroi intérieure du caloduc.

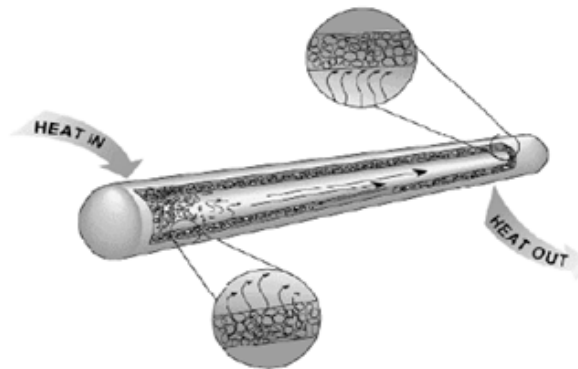


Figure 2 : Schéma de principe d'un caloduc

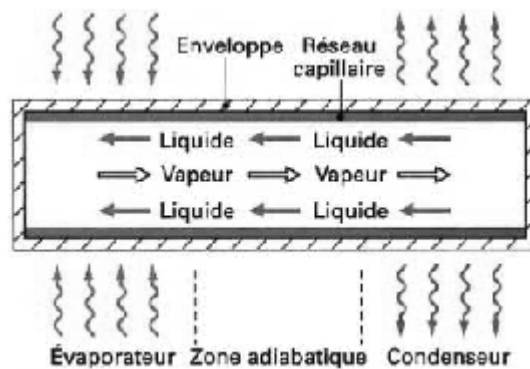


Figure 3 : Schéma de principe simplifié d'un caloduc

Ce réseau capillaire peut se présenter sous différentes formes :

- poudre frittée
- couches de tissus
- tapis de films métalliques
- rainures axiales
- rainures circonférentielles

Le transfert de chaleur est assuré de manière continue par transformation de l'énergie reçue en énergie de changement d'état (chaleur latente = variation d'enthalpie).

L'évaporateur et le condenseur sont séparés par une zone adiabatique (sans

échange de chaleur avec le milieu extérieur) de longueur très variable selon les applications.

Le fluide qui assure le transfert des calories au sein du caloduc est choisi selon la température de fonctionnement du caloduc.

2.2 Transfert de chaleur par circulation d'un fluide avec changement de phase

La conduction classique ne permet de transporter les flux de chaleur que sur des distances inférieures à quelques centimètres ; la circulation d'un fluide peut assurer cette fonction sur des distances quasi illimitées.

Lorsque, dans des conditions données de pression, on apporte un flux de chaleur suffisant à un liquide, sa température augmente jusqu'à atteindre la température d'ébullition et le liquide commence à changer de phase.

Dès ce moment, tout apport d'une quantité de chaleur supplémentaire augmente la proportion de vapeur par rapport à celle du liquide, la température reste sensiblement constante durant le changement de phase.

La quantité de chaleur nécessaire à cette transformation de l'unité de masse est la chaleur de vaporisation.

Ce phénomène est réversible et, lors du retour à l'état liquide, cette quantité de chaleur est restituée.

Le principe de fonctionnement des caloducs se base sur la circulation d'un fluide entre deux points, à l'état de vapeur dans un sens et à l'état liquide dans l'autre sens, ce qui permet donc un transfert de chaleur de l'un à l'autre.

3. Module de distribution

Cette étude entre dans le cadre d'une phase d'avant-projet ; pour cette raison, il n'existe pas de photos. Les seules informations dont on dispose sont les plans qui aident à se faire une idée du module de distribution et de ses différents composants.

Afin de faciliter la compréhension du distributeur dans sa globalité, une vue éclatée est proposée à la figure 4 reprenant les appellations et les fonctions des différents éléments constitutifs.

Le module de distribution a pour tâche de distribuer les puissances

électriques venant des panneaux solaires et des batteries.
Son circuit imprimé (PCB) est composé de l'électronique de commande qui gère toutes les tâches à accomplir durant une mission.

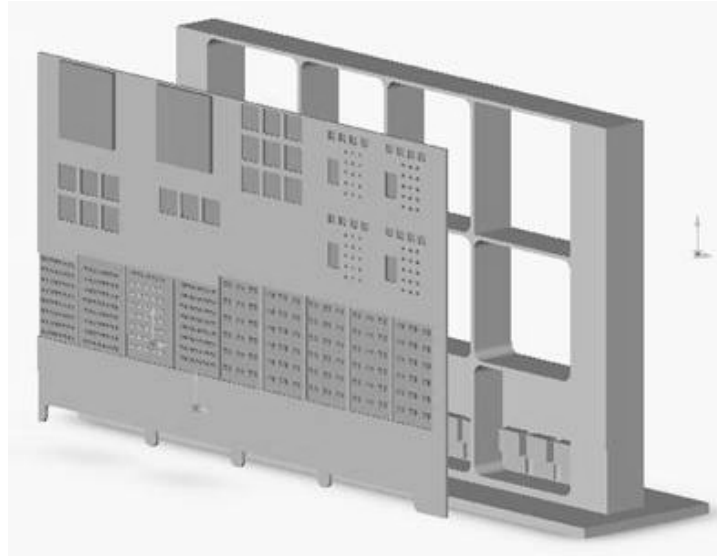


Figure 4 : Module de distribution

Le module de distribution est constitué de différents éléments :

- Une structure en aluminium 298 mm × 185 mm × 24 mm servant de support aux différents composants électroniques et au circuit imprimé.
- D'un circuit imprimé (PCB) contenant l'ensemble de l'électronique de commande qui gère la puissance distribuée aux différentes applications embarquées à bord.

D'une plaque de base sur laquelle repose les modules de distribution de l'équipement électronique.

4. Analyse des configurations d'implantation du caloduc

4.1 Etude thermique des puissances injectées

4.1.1. Fonctionnement nominal

Afin de visualiser les apports de l'implantation du caloduc, on impose une température de 0°C aux éléments de connexion de l'interface plaque de base-satellite. Cette opération ne modifie pas les résultats, elle les décale sur l'échelle des températures.

Un premier cas montre le champ de température du module de distribution lors de son fonctionnement nominal. On constate la présence d'une température élevée (35.13°C) sur le voile de la structure où sont disposés les composants dissipatifs. La différence de température entre les régions chaudes et froides est d'environ 33°C. On suppose dans le cas présent qu'aucun composant n'est défectueux.

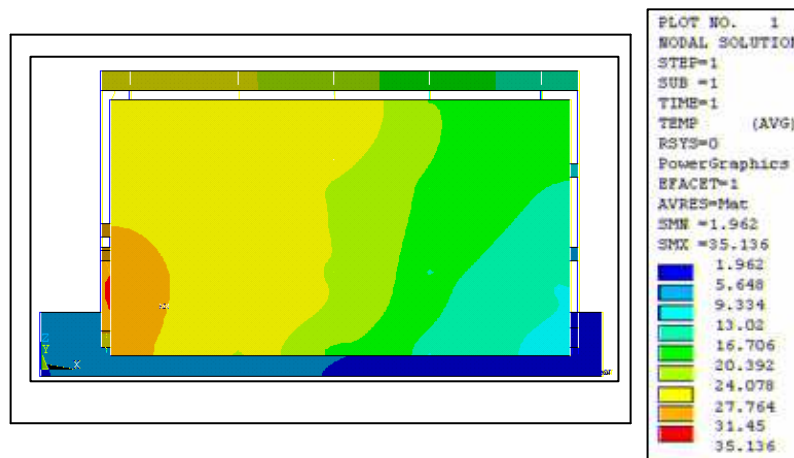


Figure 5 : Champ thermique lors du fonctionnement nominal du module de distribution

4.1.2. Fonctionnement en cas de panne

Cette configuration simule un cas de panne d'un composant, ce dernier ne réalise plus sa fonction et se met à dissiper de manière anormalement élevée. Le composant en panne étant fixé au PCB, la température au droit du composant va augmenter considérablement, ainsi que celle de l'ensemble du PCB et de la structure.

La conséquence de cette dissipation est l'apparition d'un nouveau gradient thermique au niveau du composant en panne.

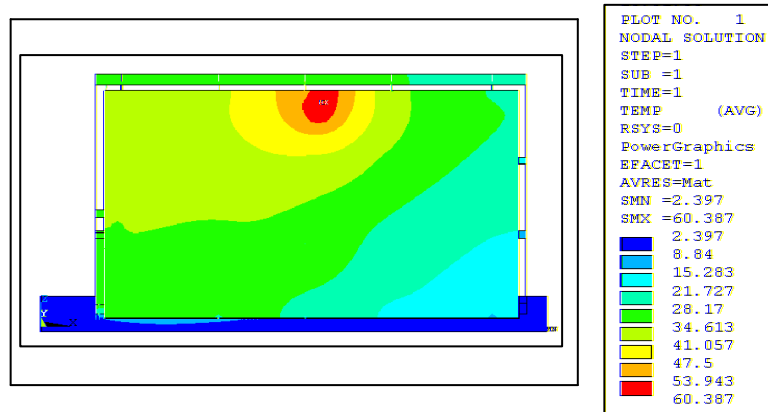


Figure 6 : Champ thermique lors d'un cas de panne d'un composant

On constate le déplacement du gradient thermique maximum. En effet, en fonctionnement nominal, le point chaud se situait sur le voile de la structure. En cas de panne, la dissipation est maximale au droit du composant défectueux. De plus la température maximale est maintenant de 60.3°C, soit 30°C de plus que lors du fonctionnement nominal.

Il s'agit maintenant de venir intégrer un caloduc qui devrait éliminer le point chaud et drainer la chaleur vers la source froide (la plaque de base).

4.2 Module de distribution avec caloduc

4.2.1. Schéma de l'implantation du caloduc

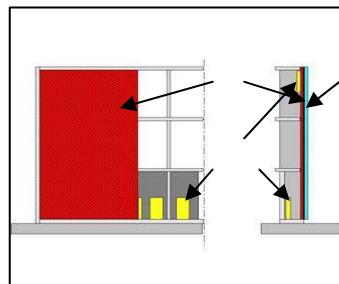


Figure 7 : Schéma du module de distribution

On implante un caloduc sur le composant dissipatif. Le caloduc repose sur toute sa longueur sur le PCB et y est fixé par l'intermédiaire d'une colle.

4.2.2. Analyse par éléments finis

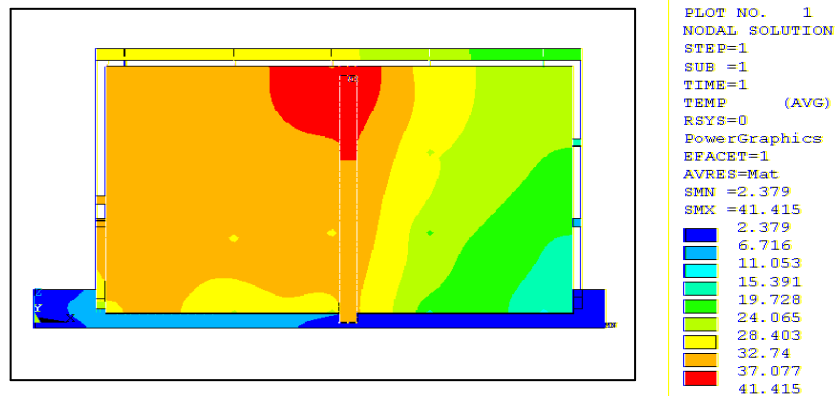


Figure 8 : Champ thermique lors de l'implantation d'un caloduc

Le gain apporté par le caloduc est clairement observable sur le champ thermique ; le gradient thermique n'a pas disparu mais a vu sa valeur maximale baisser d'un peu moins de 20°C.

Conformément aux attentes, le caloduc crée un court-circuit et permet le drainage du flux thermique des parties à hautes températures jusqu'aux parties à basses températures sans élever les températures des différentes zones du module de distribution.

D'autres configurations d'implantations vont être étudiées afin d'améliorer les performances de refroidissement. La température du condenseur du caloduc joue un rôle important dans sa capacité de refroidissement. C'est pourquoi différentes manières de créer un contact avec une source froide sont envisagées.

4.3 Module de distribution avec caloducs et équerre

4.3.1. Schéma de l'implantation du caloduc

L'équerre permet d'ajouter un contact avec la source froide au bas du caloduc et assure également le soutien de ce dernier contre le PCB.

L'équerre vient s'implanter directement dans la plaque de base, cette configuration est difficilement réalisable du point de vue pratique. Il s'agirait de venir usiner la base du module afin de fixer le bas de l'équerre. Cette implantation présente néanmoins l'avantage de mettre en avant les performances du caloduc dans un cas idéal, on peut considérer cette implantation comme une référence au point de vue performance.

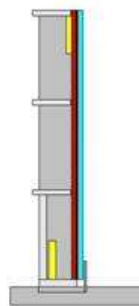


Figure 9 : Implantation du caloduc avec une équerre

4.3.2. Analyse par éléments finis

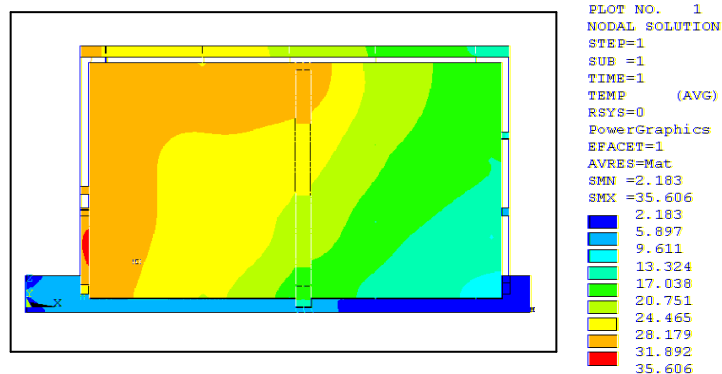


Figure 10 : Champ thermique lors de l'implantation du caloduc et d'une équerre

On voit clairement apparaître l'effet d'un contact (équerre) avec une source froide (plaque de base). Si l'on observe la température au droit du composant en panne, on constate une diminution de la température d'environ 10°C. De plus, cette configuration permet d'éliminer le gradient thermique présent sur le module de distribution sans caloduc lors d'une

situation de panne. Le gradient thermique le plus important se situe maintenant sur le voile de la structure en aluminium où sont implantés les composants dissipatifs.

	Tcomposant en panne (°C)
Module sans caloduc (cas de panne)	53,9
Module avec caloduc	37,7
Module avec caloduc+équerre	28,2

Tableau 1 : Récapitulatif des températures au droit du composant en panne

Les résultats d'un contact avec une source froide ne sont guère négligeables comme le montre le champ de température de la figure. C'est pourquoi d'autres moyens de contact entre le caloduc et une source froide vont être étudiés.

4.4 Module de distribution avec caloduc coudé sur la structure

4.4.1. Schéma de l'implantation

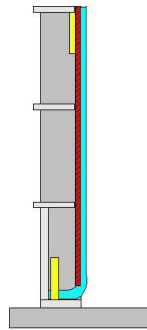


Figure 11 : Implantation du caloduc coudé

Il est actuellement possible de trouver sur le marché des caloducs de section rectangulaire qui sont malléables. Avant, seuls les caloducs de section circulaire offraient la possibilité d'une implantation avec des parties pliées. Avec les nouveaux types de caloducs, on peut envisager un nouveau moyen de contact avec une source froide. Il s'agit dans le cas présent de couder la

partie condenseur du caloduc et de la fixer sur la structure du module de distribution.

4.4.2. Analyse par éléments finis

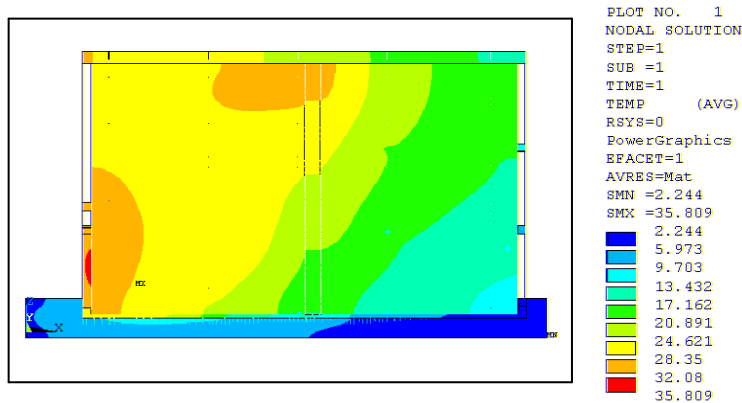


Figure 12 : Champ thermique lors de l'implantation du caloduc coudé sur la structure du module de distribution

Globalement, les résultats obtenus sont semblables aux résultats de l'implantation avec une équerre.

Cette configuration est un peu moins efficace que la précédente, ceci peut s'expliquer par le fait que la partie coudée du caloduc (condenseur) est fixée à la structure dont la température est plus élevée que la base plate.

On ne peut pas comparer ces deux implantations (équerre et caloduc coudé) car la source froide est différente.

Afin que le caloduc offre les meilleures performances, il est nécessaire que son condenseur soit « accroché » à la source la plus froide possible, c'est ce paramètre qui fixe l'efficacité du caloduc.

De manière à visualiser la différence entre le module de distribution avec le caloduc soutenu par l'équerre et l'intégration d'un caloduc coudé, il faut placer les condenseurs dans des situations identiques.

4.5 Module de distribution avec caloduc coudé sur la plaque de base

4.5.1. Schéma de l'implantation

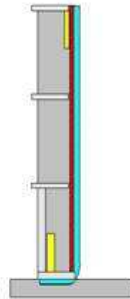


Figure 13 : Implantation du caloduc coudé sur la plaque de base

Il est actuellement possible de trouver sur le marché des caloducs de section rectangulaire qui serait malléable. Jusqu'à peu, seuls les caloducs de section circulaire offraient la possibilité d'une implantation avec des parties pliées. Avec les nouveaux types de caloducs, on peut envisager un nouveau moyen de contact avec une source froide. Il s'agit dans le cas présent de couder la partie condenseur du caloduc et de la fixer sur la structure du module de distribution.

4.5.2. Analyse par éléments finis

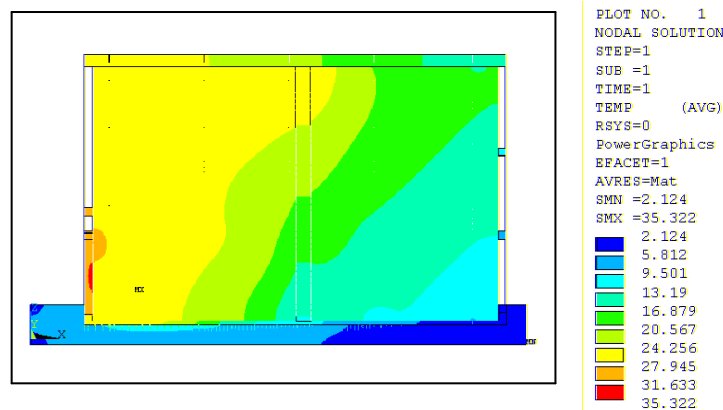


Figure 14 : Champ thermique lors de l'implantation du caloduc coudé sur la plaque de base du module de distribution

La solution montre que « l'accrochage » du caloduc à la source la plus froide du module de distribution (base plate) diminue la température maximale du gradient thermique.

La partie coudée du caloduc est collée directement sur la base plate qui a une température inférieure au bas de la structure. On peut donc confirmer l'hypothèse que la température « d'accrochage » du caloduc régit son efficacité de refroidissement.

	Tcomposant en panne (°C)
Caloduc coudé sur la structure	28,4
Caloduc coudé sur la baseplate	24,3

Tableau 2 : Comparatif des températures au droit du composant

Si l'on compare le cas présent avec implantation du caloduc maintenu par une équerre, on constate une température maximale inférieure dans cette configuration. On peut expliquer cela par la résistance thermique du joint de colle.

4.6 Récapitulatif des résultats

Le tableau ci-dessous présente les températures au droit du composant en panne lorsque la température du satellite est de 50°C. De ce fait, on se rend mieux compte des objectifs atteints.

Implantations	Tmax (°C)	Tcomposant (°C)
Module de distribution sans caloduc	110,4	119,6
Module de distribution avec caloduc	91,4	100,7
Module de distribution avec caloduc + équerre	85,6	94,9
Module de distribution avec caloduc coudé sur structure	85,8	95,1
Module de distribution caloduc coudé sur baseplate	85,3	94,6

Tableau 3 : Récapitulatif des températures maximales

5. Conclusions

L'étude consistait avant tout en l'étude de l'implantation d'un nouveau système de refroidissement, un caloduc, au sein d'un équipement fonctionnel.

Afin d'étudier l'influence de l'introduction d'un caloduc, un modèle numérique a été élaboré ainsi que des simulations avec le logiciel d'éléments finis Ansys. Les éléments représentés sont une structure en aluminium, un circuit imprimé (PCB), et une baseplate. Cette base simule la partie inférieure de la PCDU.

L'efficacité du caloduc a été mise à l'épreuve lorsqu'un composant tombe en panne et commence à dissiper anormalement.

Une première configuration d'implantation du caloduc a été envisagée : l'introduction d'un caloduc collé au circuit imprimé du module de distribution. Déjà les premiers résultats ont démontré les performances du caloduc ; la température maximale du module de distribution est passé de +/-60°C à +/- 40°C, soit une diminution d'environ 20°C. Cependant, le point chaud provenant de l'augmentation de la température du composant en panne subsiste.

Des études préliminaires ont montré que la capacité de refroidissement d'un caloduc augmentait si le condenseur de celui-ci était « accroché » à une source froide. Un ensemble de contacts entre le condenseur et une source a été étudié :

- caloduc maintenu par une équerre et fixé à la baseplate
- caloduc coudé et fixé à la structure
- caloduc coudé et fixé à la base plate
- caloduc fixé au voile de la structure
- caloduc coudé et fixé au voile de la structure

La première constatation, valable pour l'ensemble des configurations d'intégration, est la disparition du gradient thermique provenant du composant défectueux. Le gain apporté par un contact avec une source froide est une diminution de la température de 25°C.

Une différence au niveau du champ thermique du module de distribution et du circuit imprimé a été remarquée. Cette différence peut s'avérer importante pour des composants électroniques qui ne peuvent pas être exposés à des températures trop élevées sous peine de diminuer leur durée de vie.

Toutes les implantations ne sont pas réalisables d'un point de vue pratique ; certaines ont servi à évaluer le caloduc dans des conditions idéales.

Il a été décidé que la configuration d'intégration la plus favorable est celle où le caloduc est soudé sur la structure du module de distribution.

6. Références bibliographiques

- [1] HOLMAN J-P., *Heat transfert*, McGraw-Hill International Editions, Mechanical Engineering Series.
- [2] MAITRE Claude, *Thermodynamique MP*, Série Le Hir / Maruani, Masson.
- [3] DEGIOVANNI Alain, *Transmission de l'énergie thermique*, Technique de l'ingénieur, traité génie énergétique.
- [4] KLAUS-JÜRGEN Bathe, *Finite element procedures in engineering analysis*.
- [5] *ANSYS User's Manual*, Volume 1, Procedures. ANSYS, Inc.
- [6] *ANSYS User's Manual*, Volume 2, Commands. ANSYS, Inc.
- [7] *ANSYS User's Manual*, Volume 3, Elements. ANSYS, Inc.
- [8] SENTE B., *Physique générale I*. HERB (ISICht).
- [9] DEMOULIN B., *Thermodynamique appliquée*, HERB (ISICht).
- [10] BRICARD A. – CHAUDOURNE S., *Caloducs*, Technique de l'ingénieur, traité génie énergétique.