Modélisation thermique des nanosatellites

par Walter Frei, COMSOL

Au cours des dernières années, le nombre de satellites en orbite a considérablement augmenté. Cette augmentation est due en grande partie à la taille réduite des nouveaux satellites. Bien que la plus grande structure en orbite, la Station Spatiale Internationale, soit plus grande qu'un terrain de football, la plupart des satellites en orbite aujourd'hui ont une taille beaucoup plus proche de celle d'un ballon de football. Cela s'explique en partie par la popularité de la forme CubeSat, un satellite de forme dite 1U, tenant dans une enveloppe de 10 cm x 10 cm x 10 cm. Cette petite taille permet de lancer plusieurs satellites à partir d'une seule fusée. Bien qu'envisagé à l'origine à des fins essentiellement académiques, il existe aujourd'hui un solide écosystème commercial proposant des solutions de conception allant de 1U à 24U - et l'utilisation des CubeSats est de plus en plus fréquente.

L'une des caractéristiques des modèles CubeSat (et d'autres modèles de petits satellites) est qu'ils sont très compacts. De nombreuses caméras miniaturisées, des capteurs, des instruments, des antennes, des batteries, des systèmes de contrôle d'attitude et d'autres composants électroniques sont regroupés dans un espace réduit et peuvent générer de la chaleur résiduelle. L'une des principales préoccupations des ingénieurs est de concevoir le satellite de manière à ce qu'il rayonne correctement cette chaleur dans l'espace environnant. Les ingénieurs doivent veiller à ce que les divers composants électroniques restent dans certaines plages de température, ce qui peut s'avérer difficile, car les gradients thermiques peuvent entraîner des déformations structurelles indésirables. Étant donné qu'il est très difficile d'effectuer des essais en vol véritablement réalistes, le processus de conception doit s'appuyer fortement sur la modélisation numérique.

Une fois le satellite en orbite, il peut être tentant de penser que le modèle numérique n'est plus nécessaire, mais ce n'est pas le cas. Il arrive que des composants tombent en panne, souvent pour des raisons inconnues : l'électronique restante peut alors avoir besoin d'être pilotée dans des configurations imprévues. L'opérateur du satellite a donc toujours besoin du modèle thermique pour prévoir le comportement dans de telles circonstances, dans le but d'augmenter la durée de vie opérationnelle.

Figure 1 : Simulation du transfert de chaleur d'un satellite en orbite, montrant la distribution de la température.
Crédit image de la Terre : Visible Earth et NASA.

TRAVAILLER AVEC DES MODÈLES NUMÉRIQUES

Les modèles numériques impliquent tous la résolution d'une approximation des équations régissant le transfert de chaleur. Cela peut aller de modèles très simples à des modèles presque complets qui incluent de nombreux aspects géométriques et physiques. Le modèle numérique

le plus simple réduirait la complexité géométrique de la structure du satellite et ne calculerait, selon une approche système, qu'une seule température au fil du temps pour le satellite. À partir de là, on pourrait s'efforcer d'introduire des variations de température dans divers sous-systèmes ou composants du satellite. Cela impliquerait que l'expert numéricien introduise de nombreuses approximations, hypothèses et calculs séparés dans son modèle.

En revanche, un modèle haute-fidélité est basé directement sur la conception CAO et suit la démarche inverse. En partant directement de la conception CAO, on évite la plupart des validations et vérifications manuelles fastidieuses que nécessiteraient les différentes simplifications utilisées dans un modèle réduit. Bien sûr, travailler directement avec la CAO va entraîner un coût de calcul plus élevé : un modèle numérique basé sur la CAO va subdiviser la géométrie du satellite en milliers, voire en millions, d'éléments de calcul distincts, ce qui implique de faire des compromis.

D'un point de vue historique, l'approche de la modélisation système présentait de nombreux avantages. Les ordinateurs étant relativement lents, il était important que l'expert numéricien s'efforce de réduire la complexité du calcul de manière semi-automatique pour obtenir des résultats rapidement. Cette approche est toujours pertinente pour la modélisation de très grandes structures comme la Station Spatiale Internationale, mais pour les nanosatellites - en particulier parce que les coûts de calcul continuent de baisser - il devient de plus en plus intéressant de commencer à l'autre bout du spectre de la modélisation.

Dans la pratique, un spécialiste de la thermique voudra travailler quelque part entre un modèle réduit et un modèle de haute fidélité. Par exemple, il peut être souhaitable de remplacer la description CAO de chaque vis et fixation par une résistance thermique équivalente à la surface entre les composants assemblés. De même, il peut être judicieux de remplacer un composant électronique tel qu'une puce ou une batterie par un bloc de matériau avec des propriétés moyennes et une dissipation interne.

ELEMENTS IMPORTANTS A PRENDRE EN COMPTE EN MATIÈRE DE MODÉLISATION

Quelle que soit l'approche de modélisation adoptée, certains aspects doivent être pris en compte, notamment :

- La description géométrique du satellite
- L'émissivité des surfaces exposées
- L'orbite du satellite
- L'orientation du satellite
- Les propriétés radiatives de la Terre et du Soleil
- Les dissipations électriques des composants

Examinons ces points plus en détail.

La description géométrique du satellite. La conception CAO et les propriétés thermiques (conductivité thermique, densité et chaleur spécifique) des matériaux utilisés dans chaque composant déterminent la masse thermique totale du satellite ainsi que le transfert de chaleur par conduction entre les pièces. L'orientation relative des faces du satellite détermine

également les facteurs de vue, qui décrivent dans quelle mesure une surface peut voir une autre surface. Ces facteurs sont nécessaires pour calculer le transfert de chaleur par rayonnement. La conception CAO s'accompagne d'informations supplémentaires liées à la géométrie. Par exemple, les surfaces de contact entre deux pièces peuvent être recouvertes d'une fine couche ou d'une colle modifiant la résistance thermique de contact. La résistance totale peut également être fonction de la pression de contact, déterminée par les éléments de fixation.

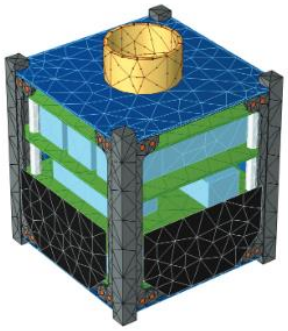

Figure 2 : Géométrie CAO importée et maillage d'éléments finis obtenu après correction et simplification.

L'émissivité des surfaces exposées. L'émissivité (ou l'absorptivité) est une mesure de la capacité d'une surface à émettre et à absorber le rayonnement thermique. Elle peut être fonction de la longueur d'onde, de la température et de l'angle d'incidence. Les facteurs de vue et les émissivités des surfaces sont combinés pour calculer l'échange de chaleur par rayonnement. Le rayonnement est présent à la fois sur les surfaces externes et internes du satellite. Les surfaces externes subissent également des charges thermiques environnementales, telles que les irradiations thermiques du Soleil et de la Terre. Il est important de considérer la question de la dépendance à la longueur d'onde de l'émissivité. Le Soleil est la principale source de chaleur et la seule source d'énergie électrique, via les cellules solaires. La lumière du Soleil est classée comme une *lumière de courte longueur d'onde*, dont l'intensité maximale se situe à 500 nm et dont la majeure partie de l'énergie se trouve dans la gamme des longueurs d'onde inférieures à 5 nm. Le satellite lui-même est beaucoup plus froid que le Soleil et émet un rayonnement thermique à des longueurs d'onde beaucoup plus grandes, principalement supérieures à 2 µm. Pour cette raison, il est très courant d'utiliser des revêtements thermiques qui dépendent fortement de la longueur d'onde. Un revêtement ayant une faible émissivité à des longueurs d'onde plus courtes réduira le réchauffement solaire, mais si ce même revêtement a une émissivité plus élevée à des longueurs d'onde plus grandes, il diffusera plus efficacement la chaleur.

L'orbite du satellite. Définie par les éléments orbitaux képlériens standard, l'orbite du satellite détermine la façon dont le satellite se déplace autour de la Terre et quand il entre et sort de l'éclipse. Lorsque le satellite entre en éclipse, il n'y a plus d'irradiation solaire, ce qui entraîne généralement des baisses de température significatives sur les surfaces externes. Pour les besoins de la modélisation thermique, l'orbite elle-même peut généralement être traitée comme périodique, en particulier dans le contexte des petits satellites en orbite terrestre basse.

L'orientation du satellite. Cette information détermine quelles sont les faces qui sont tournées vers le Soleil, la Terre ou l'espace lointain. Le satellite peut pointer dans une direction

particulière, tourner autour de ses axes, ou même présenter des parties qui tournent et se déplacent par rapport à la structure du satellite. Ces informations influencent l'irradiation des faces exposées. L'orientation, contrairement à l'orbite, peut ne pas être périodique. Par exemple, l'antenne d'un satellite peut être orientée vers une station terrestre seulement pour quelques orbites.

Les propriétés radiatives de la Terre et du Soleil. Le flux solaire varie tout au long de l'année, et ce flux solaire est à la fois directement incident sur le satellite et réfléchi de manière diffuse par la Terre. L'ampleur de cette réflexion, appelée *albédo*, peut varier à la surface de la planète. La Terre elle-même est également un émetteur de lumière infrarouge, et ce flux rayonné peut être fonction de la latitude et de la longitude. Bien que le flux solaire soit bien connu, l'albédo et le rayonnement infrarouge de la Terre varient également de manière significative à la surface de la planète et au fil du temps.

Les dissipations électriques des composants. Les cellules solaires convertissent la lumière incidente en énergie électrique, qui est utilisée pour charger les batteries qui alimentent l'électronique. Ces divers composants électroniques dissipent tous de la chaleur lorsqu'ils fonctionnent, et ces composants peuvent être allumés en permanence, à des heures spécifiques prédéterminées, ou en réponse à des conditions particulières. Par exemple, un chauffage peut être contrôlé par un thermostat pour maintenir un composant dans une plage de température souhaitée.

La prise en compte de tous ces éléments lors de la modélisation nécessite l'utilisation d'un logiciel de simulation multiphysique efficace et fiable, tel que COMSOL Multiphysics®.

Figure 3 : Visualisation d'un satellite en orbite, montrant la position et l'orientation par rapport au Soleil et à la Terre, ainsi que l'irradiation sur les faces exposées du satellite.
Crédit image de la Terre : Visible Earth et NASA.

MODÉLISATION DE SATELLITES DANS COMSOL®

Le module *Heat Transfer*, un produit complémentaire de COMSOL Multiphysics®, comprend une interface utilisateur dédiée à la modélisation de satellites : l'interface *Chargements thermiques en orbite* (*Orbital thermal loads*). Basée sur une approche hybride combinant les éléments finis à la méthode de radiosité, cette interface permet aux ingénieurs d'utiliser une approche centrée sur la CAO pour construire des modèles de petits satellites très proches de la réalité. L'interface est parfaitement intégrée à la suite logicielle COMSOL et offre un moyen simple de définir les propriétés des matériaux, les chargements et les conditions aux limites, d'extraire les résultats et de définir les couplages physiques pour les simulations

multiphysiques. Le module *Heat Transfer* dispose également de fonctionnalités pour la modélisation des fluides, des matériaux à changement de phase, des radiateurs et des effets thermoélectriques, ainsi que pour la modélisation de systèmes réduits.

L'interface *Chargements thermiques en orbite* offre un moyen pratique de définir et de vérifier l'orbite et l'orientation, ainsi que les propriétés du Soleil et de la planète. À partir de là, elle calcule l'irradiation solaire, l'albédo et l'irradiation infrarouge de la Terre à l'aide d'un modèle de rayonnement à deux bandes, avec une division des bandes solaires (courtes longueurs d'onde) et ambiantes (longues longueurs d'onde) pouvant être choisie par l'utilisateur. Cela permet de spécifier une émissivité différente dans les différentes bandes de longueur d'onde. Un modèle à bande unique offre en outre une approche simplifiée. Si un niveau de détail encore plus élevé est nécessaire, il est possible d'utiliser un modèle de rayonnement multibande.

COMSOL® peut lire des formats CAO neutres ou être relié de manière bidirectionnelle aux logiciels CAO les plus répandus, de sorte que toute modification apportée au modèle CAO sera instantanément mise à jour dans le modèle numérique. Cette géométrie CAO peut être nettoyée à l'aide d'outils de correction ou simplifiée à l'aide de la fonctionnalité native avant d'être maillée. Il est également possible de créer des géométries dans le logiciel.

CALCUL DES RÉSULTATS

Une fois que toutes ces informations sont rassemblées et intégrées dans un modèle numérique thermique, les résultats obtenus donnent accès à la variation de la température au fil du temps. Pour un modèle très simplifié, il peut s'agir simplement d'une température globale. Pour un modèle plus fidèle, la variation spatiale de la température à l'intérieur de tous les composants est calculée (figure 4). Cette information peut être utilisée pour vérifier que les limites thermiques de fonctionnement sont respectées au sein du satellite. À partir de là, il est possible de passer à d'autres types d'analyses, comme le calcul des déformations structurelles dues aux gradients thermiques, afin de déterminer comment ces déformations modifient les performances optiques d'un télescope. Ce type de modélisation numérique approfondie réduit la nécessité de procéder à des essais réels et peut permettre aux ingénieurs en charge des satellites de s'assurer de la fiabilité de leurs conceptions avant le lancement.

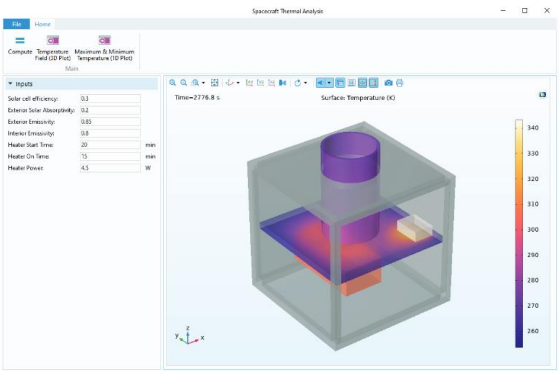

Figure 4 : Une application de simulation montrant la variation de température calculée d'un satellite cube.

Étant donné que l'irradiation solaire, l'albédo et l'irradiation infrarouge de la Terre peuvent être considérés comme quasi périodiques entre les orbites, l'irradiation totale sur une orbite

peut être calculée en amont du calcul transitoire thermique, qui s'étend généralement sur plusieurs orbites. De cette façon, il est plus facile de tester des scénarios hypothétiques, tels que différentes combinaisons d'émissivités de surface. Tout au long des étapes de conception, il est possible d'exploiter les capacités de calcul *Batch paramétrique* sur des ordinateurs individuels puissants, ou d'*Analyse paramétrique sur cluster* pour des ressources informatiques de type cluster ou cloud.

Une fois la conception achevée et le satellite prêt à être livré, le modèle numérique COMSOL peut être mis à disposition de l'opérateur du satellite sous forme d'une application autonome afin qu'il puisse tester si nécessaire des conditions de fonctionnement imprévues (figure 5).

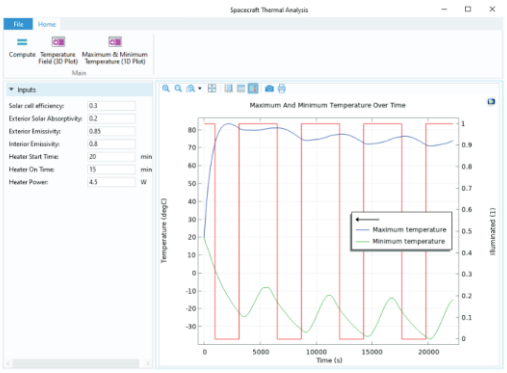

Figure 5 : Une application autonome peut être fournie à un opérateur de satellite pour mener des analyses supplémentaires pendant l'exploitation. Cette application de simulation montre les températures maximales et minimales de la surface d'un satellite au fil du temps. L'exposition du satellite au Soleil est représentée par la courbe rouge.

CONCLUSION

La gestion thermique des satellites constitue un travail de conception complexe, et l'environnement opérationnel est difficile à reproduire par des essais réels. Par exemple, certaines variables ne peuvent être prédites qu'à l'aide d'une simulation, comme les variations de température qui peuvent se produire lorsque les satellites se déplacent en orbite ou la chaleur que les équipements embarqués peuvent eux même générer. Avec COMSOL Multiphysics®, une plateforme logicielle de simulation complète intégrant des fonctionnalités dédiées à l'analyse thermique des satellites, les ingénieurs peuvent rapidement itérer et améliorer les conceptions, vérifier les conditions opérationnelles et partager leurs modèles numériques sous forme d'applications de simulation avec leurs collègues et leurs clients.

COMSOL et COMSOL Multiphysics sont des marques déposées de COMSOL AB.