

PLUS DE PUISSANCE A VOTRE DISPOSITION !

UNE PUISSANCE PLUS ELEVEE DANS DES ENSEMBLES PLUS PETITS GRACE A DE NOUVELLES SOLUTIONS DE REFROIDISSEMENT DES ELEMENTS ELECTRONIQUES

KEVIN R. ANDERSON

Laboratoire de simulations multiphysiques FEA/CFD (Analyse non linéaire par éléments finis / Mécanique des fluides numérique), Département d'ingénierie mécanique, Université polytechnique de l'État de Californie

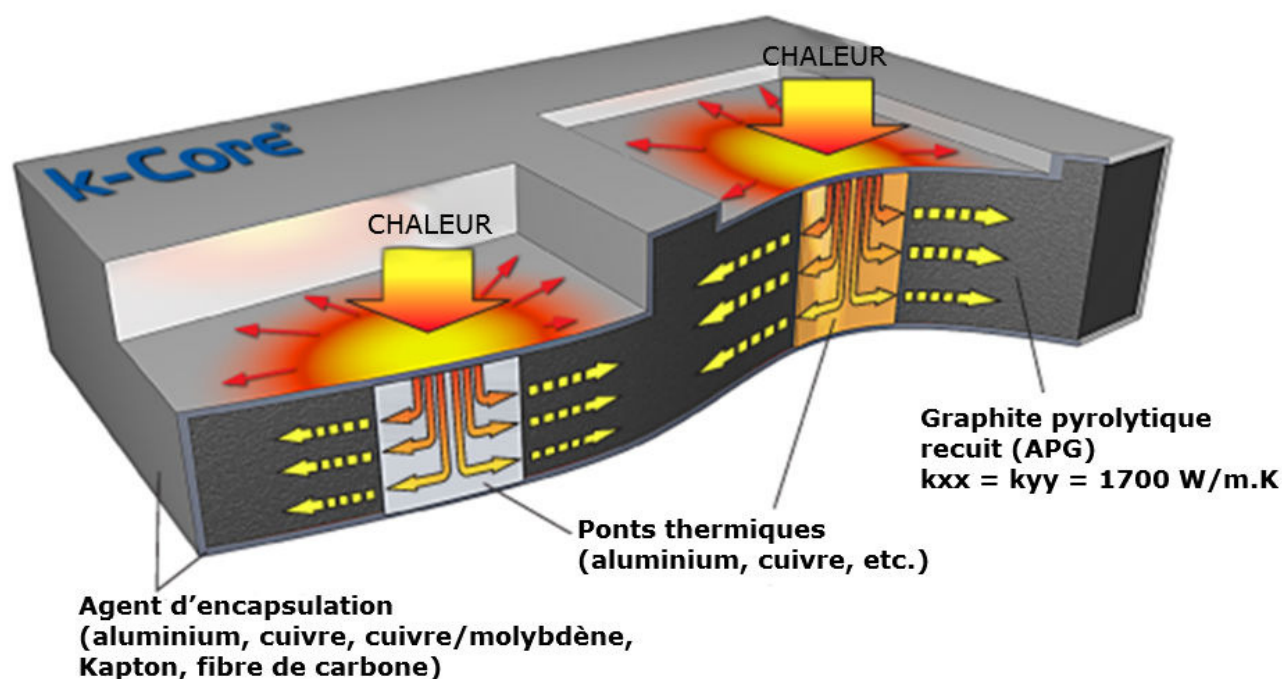
INTRODUCTION

Dans cet article, STAR-CCM+® est utilisé pour des simulations de transfert thermique et d'écoulement de fluide dans un nouvel échangeur de chaleur à plaque froide fabriqué avec un matériau type k-Core à haute conductivité thermique, en vue de concevoir un système de contrôle thermique adapté aux ensembles électroniques de taille intermédiaire ou compacte et ayant une forte densité de puissance. Les plaques froides de répartition thermique du type k-Core assurent un excellent transfert de la chaleur en l'absence de pièces mobiles et sont inappréciables dans les applications où les contraintes d'espace, de volume, de poids et d'intégration optimale du matériel imposent les solutions de conception thermique. Dans ce document [1], des études multidisciplinaires sont menées sur différents matériaux d'échangeur de chaleur à plaque froide, ainsi que sur différents scénarios de défaillance d'un système électronique type, afin d'illustrer les limites supérieures affectées au coefficient de transfert thermique par convection.

TECHNOLOGIE DE REPARTITION DE CHALEUR

Les plaques froides de répartition thermique du type k-Core absorbent physiquement la chaleur provenant de dissipateurs thermiques, comme les composants électroniques de puissance élevée, en la rejetant dans l'air ambiant ou dans des liquides de refroidissement. Ce type de plaques froides est bien adapté aux environnements difficiles. Pour le refroidissement d'applications à densité de puissance élevée (p. ex., semi-conducteurs, lasers, alimentation électrique, équipements médicaux, transports, électronique militaire, etc.) et d'autres applications exigeantes pour lesquelles le refroidissement à l'air n'est pas suffisant, le refroidissement par liquide est indispensable. Dans ce document, le transfert thermique dans des plaques thermiquement conductrices du type k-Core fournies par Thermacore, Inc. [2] est étudié conjointement avec une boucle de fluide à circulation forcée.

ILLUSTRATION 1 : Technologie Thermacore k-Core [2]



Le concept physique de la technologie de transfert thermique k-Core de Thermacore est expliqué dans l'Illustration 1. À l'aide de graphite pyrolytique recuit (APG) encapsulé, il est possible de réaliser un répartiteur thermique avec un puits de chaleur intégré sur un côté et un labyrinthe de tubes pour une boucle de fluide à circulation forcée sur le côté opposé. Comme l'APG est anisotrope pour la conductivité thermique et que les composantes x et y de la conductivité thermique sont très grandes par rapport à la composante z, le puits de chaleur / répartiteur thermique APG améliore grandement le transfert thermique global par l'optimisation de la répartition thermique. L'Illustration 2 montre la dépendance de la conductivité thermique de l'APG par rapport à la température.

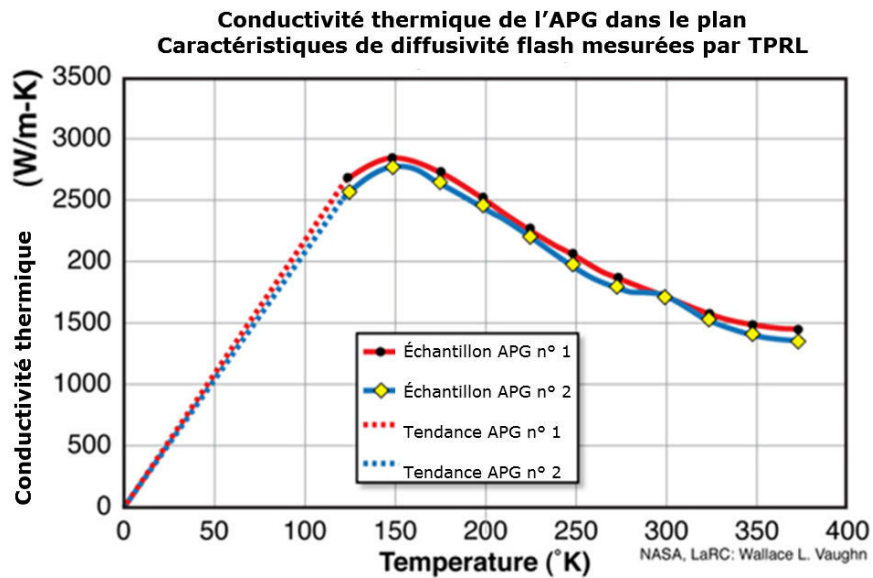


ILLUSTRATION 2 : Conductivité thermique pour le matériau APG [2]

DESCRIPTION DU MATERIEL DU SYSTEME

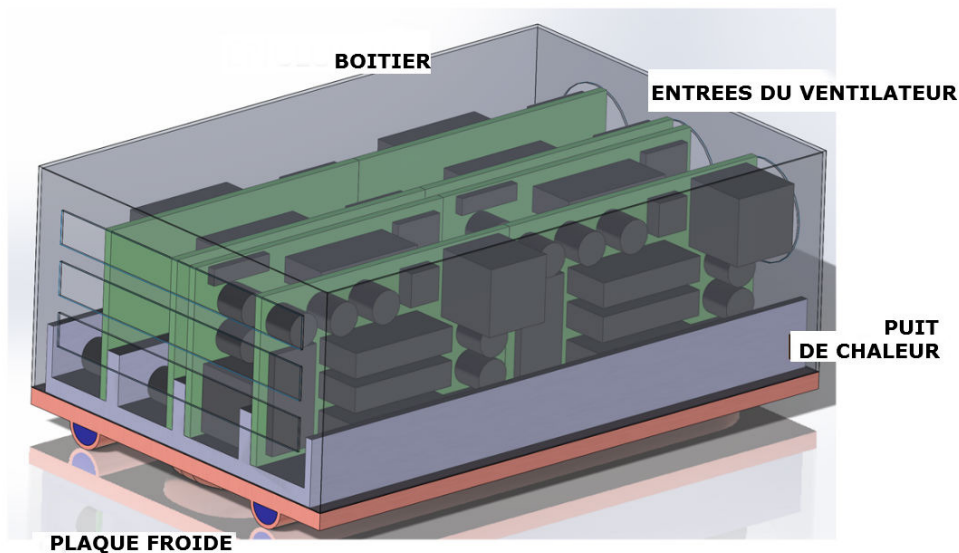


ILLUSTRATION 3 : Composants du système électronique

La configuration de l'illustration 3 a été choisie pour représenter une application électronique à densité de puissance élevée de taille moyenne. Le système global comprend un très grand boîtier comportant huit sous-modules identiques disposés de manière à minimiser le volume du système global. Les sous-modules abritent chacun différents composants, au nombre de 12 par sous-module. Le système de contrôle thermique comprend trois composants importants : le puits de chaleur, la plaque froide et l'enceinte des ventilateurs de convection forcée / du boîtier. L'enceinte a à peu près les dimensions d'un casier ($l \times L \times H = 0,5 \text{ m} \times 1,0 \text{ m} \times 0,5 \text{ m}$).

MODELE CFD ET ETUDE DE LA GRILLE

Le maillage pour les simulations avec STAR-CCM+ consistait en un maillage non structuré polyédrique avec cinq couches prismatiques pour résoudre la couche périphérique sur toutes les interfaces solide – fluide (Illustration 4).

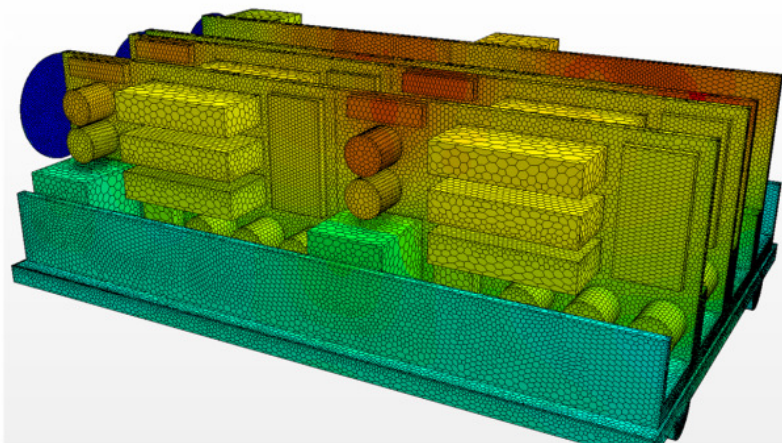


ILLUSTRATION 4 : Maillage CFD utilisé pour les simulations

Le nombre type de cellules pour le modèle de niveau de système CFD était de l'ordre de 2,5 millions ; la taille choisie pour le maillage a été obtenue après plusieurs essais destinés à déterminer la taille optimale de maillage qui permet d'obtenir des réponses précises aussi rapidement que possible. Le temps CPU sur une station de travail à quatre cœurs 64 bits était de l'ordre de six heures.

Les simulations incluaient un transfert thermique conjugué totalement 3D, une convection forcée d'air externe, une boucle de liquide de refroidissement interne à circulation forcée, une conduction par solide, et un rayonnement de corps gris de surface à surface. Pour reproduire les ventilateurs de refroidissement disponibles dans le commerce (COTS), la courbe de ventilateur [pour un ventilateur de débit nominal 850 L/min (30 cfm) avec une pression statique de 50 Pa] de l'Illustration 5 a été utilisée dans les simulations.

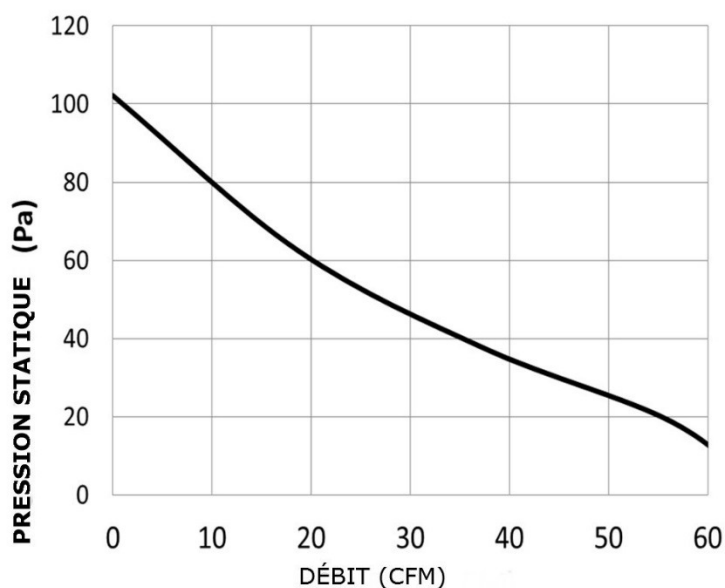


ILLUSTRATION 5 : Caractéristiques de la courbe du ventilateur pour les simulations du matériel de contrôle thermique

RESULTATS DE REFERENCE

Les résultats de la simulation de référence montrant la distribution de température et les filets d'air apparaissent dans l'Illustration 6. Les paramètres pour chacun des sous-composants du matériel de la simulation ont été établis pour que la densité de puissance au niveau de la plaque froide liquide soit de $1,6 \text{ kW/m}^2$, ce qui correspond à une application à densité de puissance très élevée. Après obtention des résultats de référence, des analyses multidisciplinaires ont été réalisées pour déterminer la sensibilité du système.

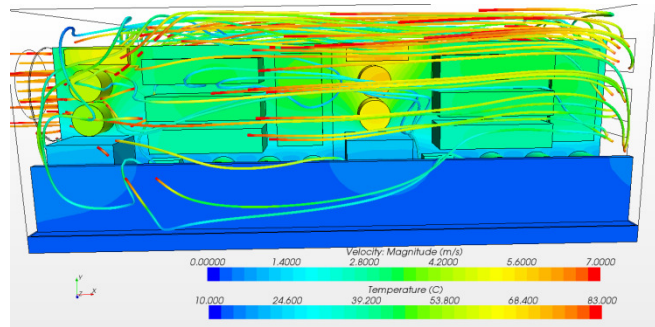


ILLUSTRATION 6 : Filets d'air colorés en fonction de leur vitesse et composants électroniques en fonction de leur température

EFFET DE LA CONDUCTIVITE SUR LE TRANSFERT THERMIQUE

L'objectif principal de ce document est de démontrer les caractéristiques de répartition thermique du matériau APG k-Core par comparaison avec les matériaux traditionnels des puits de chaleur. Pour y parvenir, la conductivité thermique du puits de chaleur / de la plaque froide a été ajustée d'une valeur très basse (aluminium nu) à une valeur très haute (APG k-Core). Les résultats de cette étude de paramètres sont indiqués dans l'illustration 7 qui montre la variation linéaire attendue de la température du système en fonction de la conductivité thermique du puits de chaleur / de la plaque froide.

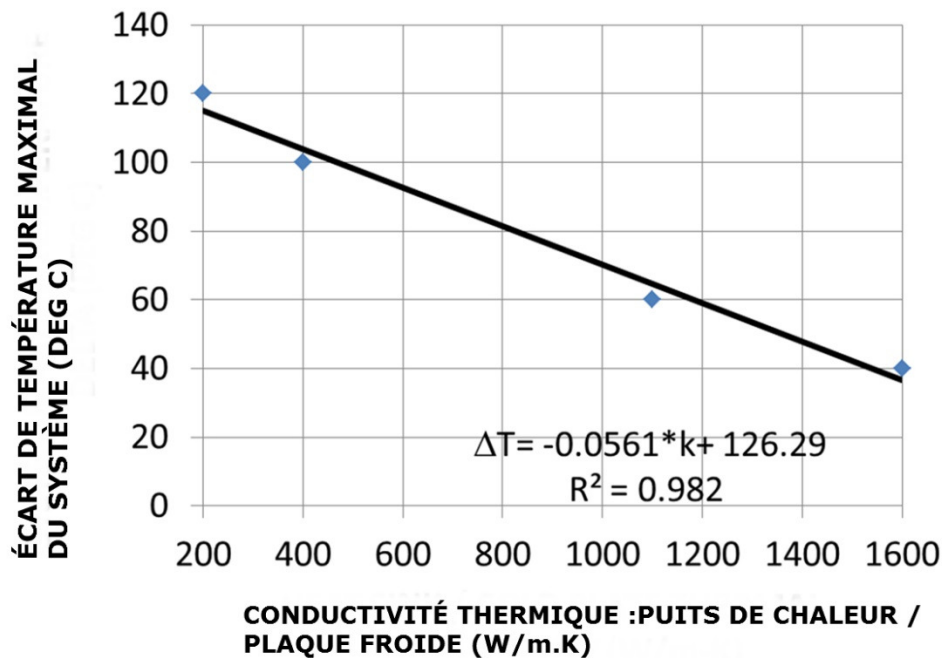


ILLUSTRATION 7 : Effet de la conductivité thermique sur la répartition de chaleur dans les simulations CFD

EFFET DE LA VITESSE DE L'AIR ASSUREE PAR LE VENTILATEUR EN ENTREE

La performance thermique d'un système varie de manière importante en fonction du débit assuré par le ventilateur, et une manière efficace de mesurer la variation consiste à utiliser le coefficient de transfert thermique par convection. L'illustration 8 montre les valeurs du coefficient de transfert thermique par convection pour une simulation CFD type. Elles correspondent aux valeurs données par les références bibliographiques [3] pour les systèmes de cette catégorie.

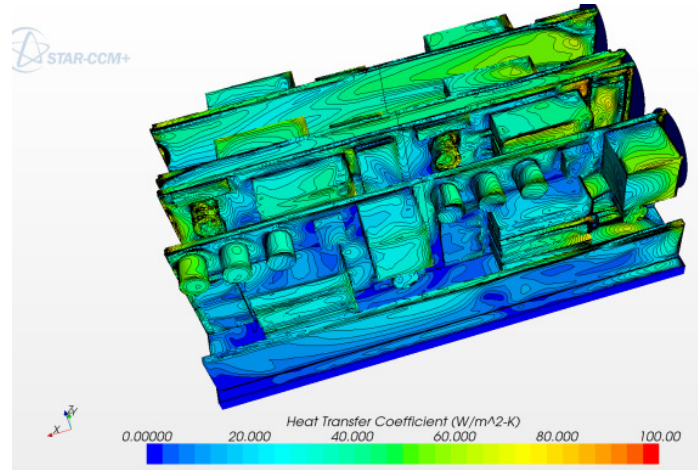


ILLUSTRATION 8 : Courbes de niveau du coefficient de transfert thermique par convection

Pour quantifier l'effet de la vitesse de l'air assurée par le ventilateur en entrée sur le coefficient de transfert thermique, une série de simulations a été réalisée avec différents débits correspondant à différentes vitesses moyennes en sortie du ventilateur. L'illustration 9 montre les résultats des simulations par comparaison avec Ellison [4].

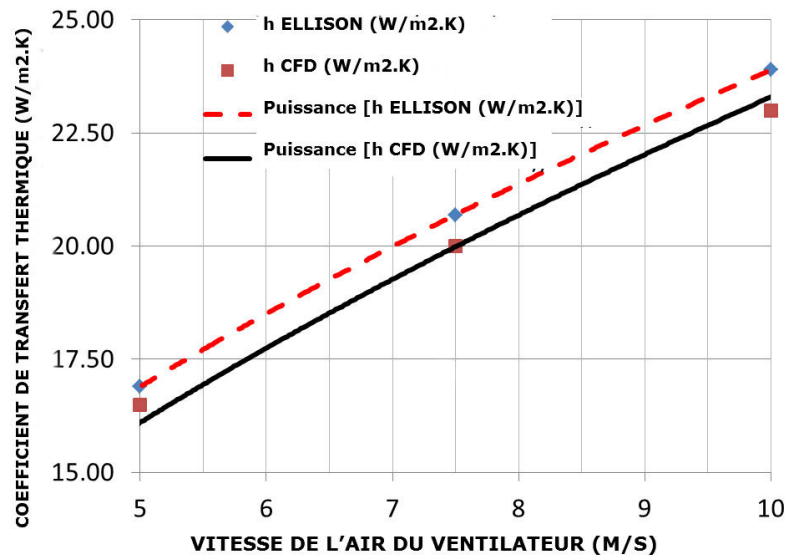


ILLUSTRATION 9 : Coefficient de transfert thermique en fonction de la vitesse d'air assurée par le ventilateur

La corrélation avec Ellison est prudente, comme attendu, et correspond à des corrections standard issues de références bibliographiques avec une incertitude type de 25 %. Les données issues de notre étude CFD correspondent également sur le plan qualitatif aux simulations et corrélations obtenues par la recherche de [5] et [6].

Le coefficient de transfert thermique du système est ensuite tracé en fonction de l'écart de température du système (voir Illustration 10). Les points de données CFD sont reliés à une courbe qui dépend de la puissance et comparés à la corrélation produite par [7].

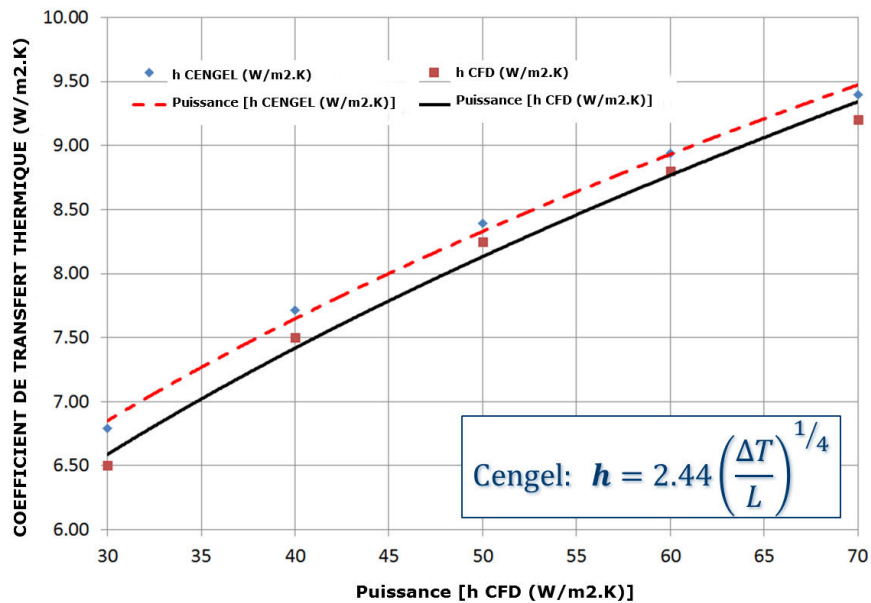


ILLUSTRATION 10 : Comparaison des coefficients de transfert thermique

Une fois de plus, la corrélation avec les références bibliographiques surestime le coefficient de transfert thermique. Comme indiqué plus haut, les corrélations de transfert thermique subissent une incertitude d'au moins 25 %. Les résultats CFD indiqués dans les Illustrations 9 et 10 sont contenus dans cette plage d'incertitude.

EFFET DU DEBIT DU FLUIDE DE REFROIDISSEMENT

Par la suite, une série de simulations CFD a été réalisée en modifiant le débit d'entrée d'eau dans la plaque froide. Le coefficient de transfert thermique du système global est tracé en fonction du débit (voir Illustration 11).

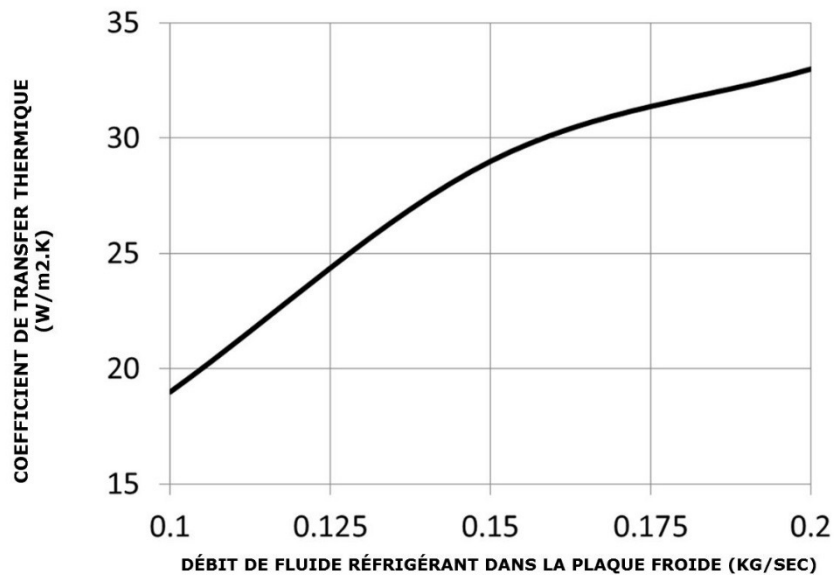


ILLUSTRATION 11 : Coefficient de transfert thermique en fonction du débit dans la plate-forme

Comme on peut l'observer dans l'Illustration 12, l'ensemble échangeur de chaleur / plaque froide conserve une température relativement constante. C'est le principal intérêt d'utiliser un système de plaque froide avec fluide circulé, car il permet de maintenir pratiquement l'isothermie en périphérie dans un système thermique actif.

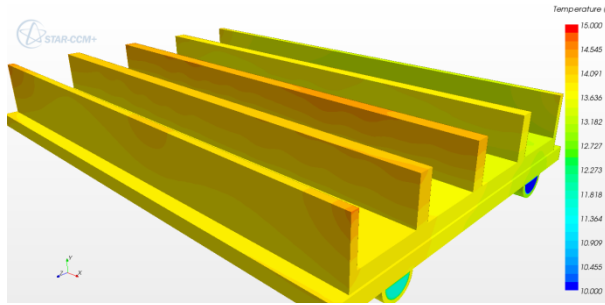


ILLUSTRATION 12 : Températures du puits de chaleur / de la plaque froide

EFFET DE LA RESISTANCE DE CONTACT

Une étude multidisciplinaire a été réalisée sur le matériau de l'interface thermique qui assure la conductance thermique entre les différents composants du système. Les simulations ont été effectuées pour plusieurs coefficients de transfert thermique par contact pour des matériaux types d'interfaces thermiques utilisés dans l'industrie du refroidissement de l'électronique (allant d'une interface thermique « très bonne » à une interface thermique « très faible »). Dans l'illustration 13 est tracée la température maximale dans le système en fonction de la résistivité de contact. Comme la théorie le prévoit, la tendance est linéaire.

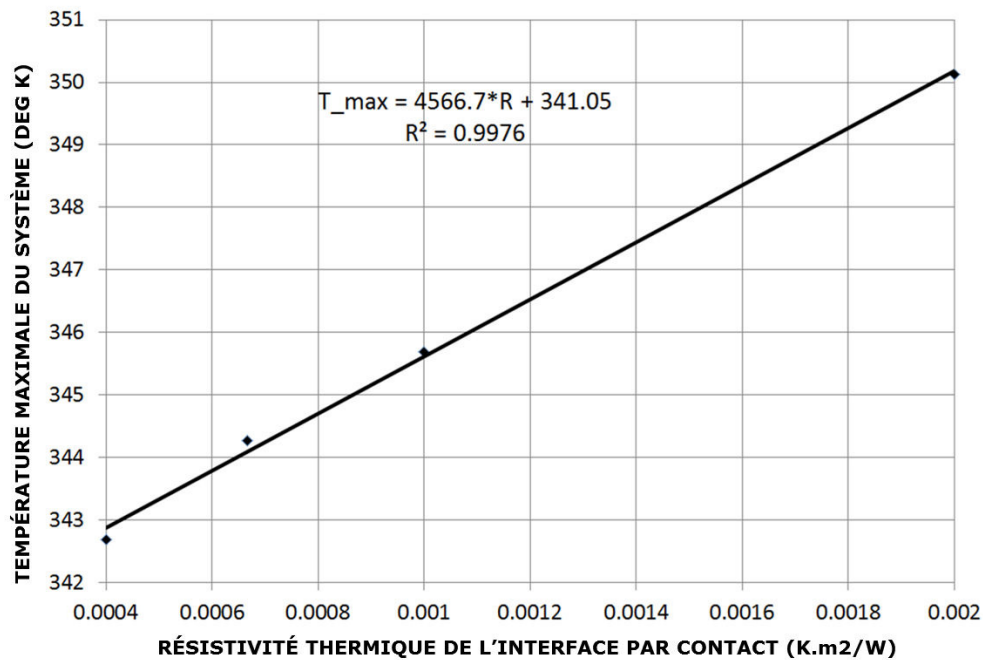


ILLUSTRATION 13 : Résistivité thermique de l'interface par contact en fonction de la température maximale

L'illustration 14 montre les lignes isothermes pour un sous-module ayant une interface de contact thermique très faible. L'image montre une plage étendue de températures, la température la plus basse correspondant à l'endroit où la carte de circuit imprimé (PCB) est en contact avec l'ensemble puits de chaleur / plaque froide, et la plus élevée sur le composant de la PCB se trouvant à proximité du flux d'air. Dans ce cas, l'impact d'un mauvais contact thermique à l'interface est déterminant et conduit à un gradient de température élevé sur ce sous-module particulier.

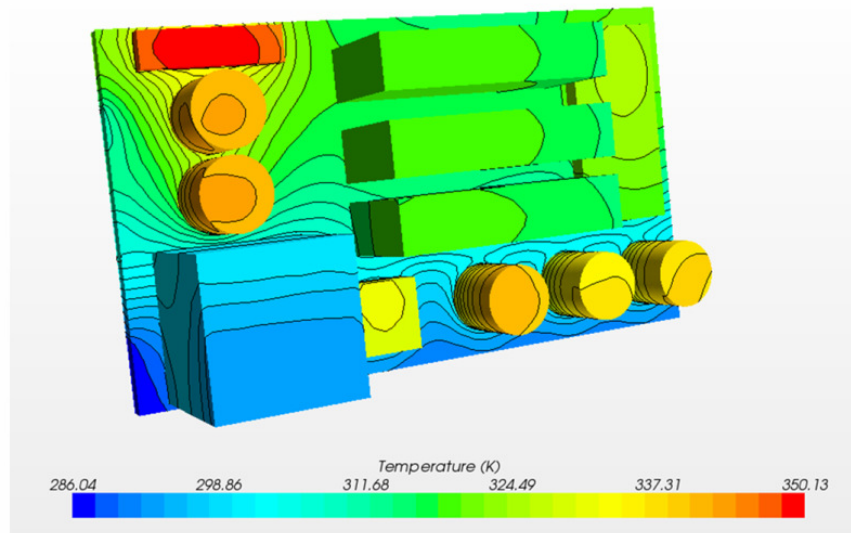


ILLUSTRATION 14 : Effet d'une faible résistance de contact thermique

EMBALLEMENT THERMIQUE ET PANNE DU VENTILATEUR

L'emballement thermique provoqué par des composants défectueux dans le système est facilement prévisible avec cette approche de simulation. L'Illustration 15 montre les effets d'un mauvais composant (p. ex., suite à un défaut de fabrication ou un court-circuit interne) sur une PCB particulière. Dans l'Illustration 15, le composant qui subit l'emballement thermique est immédiatement identifié comme une zone aberrante ayant une température très élevée.

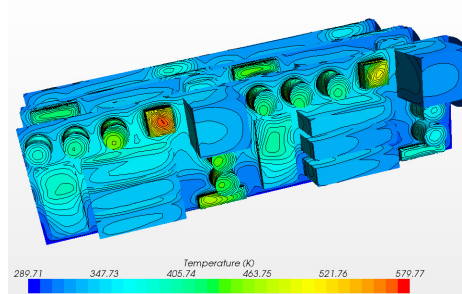


ILLUSTRATION 15 : Simulation d'un défaut thermique lié à une puce défectueuse

Une cause classique de défaillance dans les systèmes électroniques thermiquement contrôlés est la panne du ventilateur. Cela oblige le concepteur à utiliser un système redondant, c'est-à-dire des ventilateurs de secours. Pour appréhender les conséquences d'une panne de ventilateur, différentes simulations CFD ont été réalisées avec différents débits d'air. L'Illustration 16 représente l'évolution de la température maximale dans le système pour un composant / une puce en fonction de la vitesse d'air assurée par le ventilateur. La tendance correspond à la prévision : lorsque la vitesse d'air assurée par le ventilateur est proche de zéro, les différents composants et PCB dans les sous-modules voient leur température fortement augmenter. Les résultats confirment les tendances observées dans l'étude de [5] et [6].

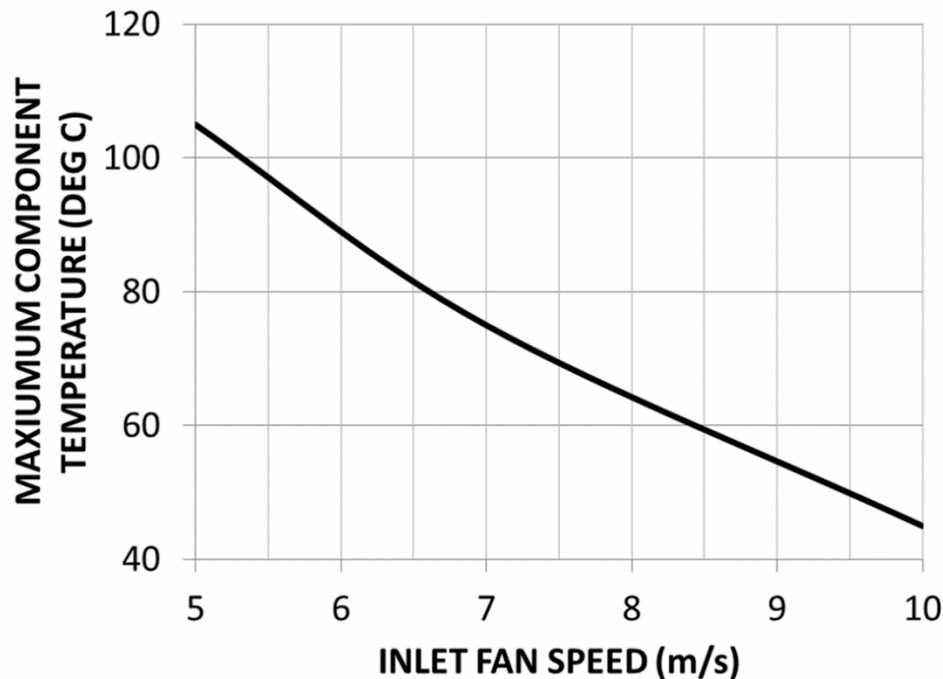


ILLUSTRATION 16 : Température maximale d'un composant / d'une puce en fonction de la vitesse d'air assurée par le ventilateur en entrée.

CONCLUSION

Les simulations STAR-CCM+ du comportement thermique et de l'écoulement du fluide dans un ensemble électronique de taille moyenne subissant des dissipations de puissance très importantes ont permis l'étude de nouvelles stratégies de contrôle thermique au niveau du système. Les résultats étaient conformes aux études précédentes, et l'approche utilisée a démontré qu'elle permettait une évaluation rapide et économique des scénarios « cause et effet » pour imaginer de nouvelles solutions de refroidissement de l'électronique. Cette étude répond aux exigences constamment renouvelées de puissances plus élevées dans des ensembles plus petits.

RÉFÉRENCES

- [1] K.R. Anderson, M. Devost, W. Pakdee, N. Krishnamoorthy: "STAR-CCM+ CFD Simulations of Enhanced Heat Transfer in High-Power Density Electronics Using Forced Air Heat Exchanger and Pumped Fluid Loop Cold Plate Fabricated from High Thermal Conductivity Materials," Journal of Electronics Cooling and Thermal Control, 2013, 3, 144-154
- [2] "Thermacore k-Core Data Sheet," 2013: <http://www.thermacore.com/products/kcore.aspx>
- [3] F. P. Incropera & D. P. Dewitt: "Heat Transfer," Mc- Graw-Hill, New York, 1991
- [4] G. Ellison: "Thermal Computations for Electronics - Conductive, Radiative, and Convective Air Cooling," CRC Press, Boca Raton, 2011
- [5] I. Tari & Y. Fidan-Seza: "CFD Analyses of a Notebook Computer Thermal Management System and a Proposed Passive Cooling Alternative," IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, Vol. 33, No. 2, 2010, pp. 443-452
- [6] M. A. Ismail, M. Z. Abdullah & M. A. Mujeebu: "A CFD Based Analysis on the Effect of Free Stream Cooling on the Performance of Micro Processor Heat Sinks," International Communications in Heat and Mass Transfer, Vol. 35, No. 6, 2008, pp. 771-778
- [7] Y. A. Cengel: "Heat Transfer - A Practical Approach," McGraw-Hill, New York, 2010

ILLUSTRATION 1 : Technologie Thermacore k-Core [2]

ILLUSTRATION 2 : Conductivité thermique pour le matériau APG [2]

ILLUSTRATION 3 : Composants du système électronique

ILLUSTRATION 4 : Maillage CFD utilisé pour les simulations

ILLUSTRATION 5 : Caractéristiques de la courbe du ventilateur pour les simulations du matériel de contrôle thermique

ILLUSTRATION 6 : Filets d'air colorés en fonction de leur vitesse et composants électroniques en fonction de leur température

ILLUSTRATION 7 : Effet de la conductivité thermique sur la répartition de chaleur dans les simulations CFD

ILLUSTRATION 8 : Courbes de niveau du coefficient de transfert thermique par convection

ILLUSTRATION 9 : Coefficient de transfert thermique en fonction de la vitesse d'air assurée par le ventilateur

ILLUSTRATION 10 : Comparaison des coefficients de transfert thermique

ILLUSTRATION 11 : Coefficient de transfert thermique en fonction du débit dans la plate-forme

ILLUSTRATION 12 : Températures du puits de chaleur / de la plaque froide

ILLUSTRATION 13 : Résistivité thermique de l'interface par contact en fonction de la température maximale

ILLUSTRATION 14 : Effet d'une faible résistance de contact thermique

ILLUSTRATION 15 : Simulation d'un défaut thermique lié à une puce défectueuse

ILLUSTRATION 16 : Température maximale d'un composant / d'une puce en fonction de la vitesse d'air assurée par le ventilateur en entrée.

