

Echanges convectifs naturels pour les montages électroniques inclinés équipés de QFN64

Abderrahmane BAÏRI*, Clara ORTEGA, David SAN MARTIN, Oriana HADDAD

Université Paris Ouest, Laboratoire Thermique Interfaces Environnement,
LTIE-GTE EA 4415, 50, rue de Sèvres, F-92410 Ville d'Avray, France

*auteur correspondant : abairi@u-paris10.fr

Résumé - Les QFN (Quad Flat Non-lead) sont des composants de plus en plus utilisés en électronique compte tenu de nombreux avantages bien connus. Le modèle QFN64 figure parmi les plus utilisés dans les applications. Leur fonctionnement correct est néanmoins lié à une thermorégulation adéquate respectant les préconisations de leurs fabricants, et tout particulièrement la température dite de jonction (source). Les plaques de circuit imprimé qui contiennent ces composants actifs sont installées dans des cavités de forme et dimensions différentes selon l'application envisagée. La convection naturelle utilisant l'air comme fluide caloporteur est privilégiée dans les applications. Le dimensionnement thermique de ces montages nécessite alors la parfaite maîtrise des échanges convectifs naturels qui se produisent sur toutes les surfaces. Les coefficients d'échange thermique par convection ne peuvent pas être déterminés correctement avec les corrélations classiques, compte tenu des très faibles dimensions et de l'importante puissance volumique que génèrent ces composants, pouvant atteindre plusieurs GWm^{-3} . Ce travail a pour objectif de qualifier les phénomènes aérothermiques naturels concernant ces montages et les quantifier par l'intermédiaire de corrélations simples d'utilisation selon la puissance générée par le QFN64 et l'angle d'inclinaison du montage par rapport à l'horizontale. Ces données sont utiles pour le contrôle thermique et le dimensionnement de ce montage électronique.

Nomenclature

a	diffusivité thermique (m^2s^{-1})	S_i	surf. d'échange du $i^{\text{ème}}$ élément (m^2)
C_p	Chaleur spécifique à pression constante ($\text{J kg}^{-1}\text{K}^{-1}$)	T_c	température de la cavité; température initiale du système (K)
\vec{e}_g	vecteur unitaire adimensionné opposé à la gravité	T_i	température du $i^{\text{ème}}$ élément (K)
g	accélération de la pesanteur (m.s^{-2})	T^*	température adimensionnelle (-)
h_i	coefficient de transfert convectif local ($\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$)	\vec{u}	vecteur vitesse
\bar{h}	coefficient de transfert convectif moyen ($\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$)	\vec{u}^*	vecteur vitesse adimensionné (-)
\bar{h}_Q	coefficient de transfert convectif global du QFN ($\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$)	V	volume du composant (m^3)
\bar{h}_B	coefficient de transfert convectif global de la plaque ($\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$)	<i>Symboles grecs</i>	
L	longueur caractéristique (m)	α	angle d'inclinaison de la plaque par rapport à l'horizontale ($^\circ$)
m	nombre d'éléments (-)	β	coef. de dilatation volumique (K^{-1})
P	puissance générée (W)	$\vec{\nabla}^*$	opérateur nabla adimensionnel (-)
p	pression (Pa)	∇^{*2}	Laplacien adimensionnel (-)
p^*	pression adimensionnée (-)	ϕ	densité de flux volumique (Wm^{-3})

Pr	Nombre de Prandtl (-)	λ	conductivité thermique ($\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$)
Ra	Nombre de Rayleigh (-)	μ	viscosité dynamique (Pa.s)
S_h	surface externe totale (m^2)	ρ	masse volumique (kg.m^{-3})

1. Introduction

L'intégration croissante des composants actifs dans les montages électroniques pose des problèmes thermiques importants dans les applications. Cela est d'autant plus important que les montages sont de plus en plus petits et de plus en plus puissants, entraînant des puissances volumiques pouvant atteindre plusieurs GW.m^{-3} . La thermorégulation des montages électroniques qui est essentielle pour leur fonctionnement correct exige une étude particulière pour chaque application.

Le QFN (Quad Flat Non lead) est de nos jours un des composants les plus utilisés dans les montages électroniques et il concerne divers domaines de l'ingénierie. L'intérêt porté à ce composant est dû, entre autres, à ses performances thermiques et électriques, son coût intéressant et sa facilité de mise en œuvre. Ses faibles dimensions et poids permettent de l'installer dans des appareils de volume réduit, comme par exemple pour les ordinateurs portables. On trouve aussi le QFN dans plusieurs appareils utilisés dans la vie quotidienne: téléphones cellulaires portables et autres équipements ménagers (lave linge, lave vaisselle, climatiseur, chaudière...). Ses performances électriques permettent de l'intégrer dans les montages associés aux hautes puissances et fréquences. Ses qualités thermiques le rendent aussi compétitif par rapport à d'autres montages conventionnels. L'évolution des techniques de fabrication de ce composants le rend par ailleurs compétitif du point de vue coût et sa fiabilité est sans cesse accrue avec les nouvelles techniques de fabrication. Le QFN est ainsi appelé à se généraliser dans les applications si bien que plusieurs travaux sont effectués pour le développer et améliorer ses performances. Cependant, toutes ces qualités ne sauraient être exploitées si le composant n'est pas correctement thermorégulé durant son fonctionnement. La résolution des questions liées à la thermique du QFN constitue aujourd'hui une part importante des travaux scientifiques du domaine. Leurs caractéristiques techniques largement disponibles dans la littérature spécialisée sont contenues dans la note technique [1]. Des informations complémentaires et les normes les plus utilisées pour les tests thermiques sont contenues dans des notes techniques spécialisées telles [2,3]. Le point faible du QFN est sa faible fiabilité lorsqu'il subit plusieurs cycles thermiques, ce qui est le cas pour certaines applications. Ces sollicitations provoquent en effet souvent des pannes entraînant la mise hors service de l'assemblage électronique. Dans certains cas, les QFN ne peuvent pas être utilisés car les phénomènes thermiques conduisent à la destruction des circuits intégrés. Cela est essentiellement dû aux valeurs très différentes des coefficients de dilatation thermique des matériaux qui constituent les QFN et ceux des plaques de circuit imprimés sur lesquels ils sont soudés, comme le confirme l'étude [4]. L'opportunité de mise en place des QFN nécessite donc une étude préalable avec des cycles thermiques réels permettant de contrôler leur fiabilité en mode dynamique. Le travail [5] contient une technique permettant la prédiction de la fatigue et de la durée de vie de ces composants lorsqu'ils sont soumis à des cycles thermiques. Des tests ont été effectués en faisant varier plusieurs paramètres physiques pour englober différentes possibilités de fonctionnement réel. Les cycles thermiques sont effectués sur plusieurs types de QFN. Les tests sont faits dans une gamme de température variant entre -40 et $+150^\circ\text{C}$, couvrant les conditions de fonctionnement extrêmes de ces composants électroniques. Cette étude permet ainsi une détermination réaliste des performances de ces composants. Certaines étapes de fabrication du QFN posent aussi des problèmes d'origine

thermique liés aux caractéristiques thermo-mécaniques des matériaux qui constituent ce montage électronique (contraintes thermiques et températures maximales admissibles, dilatation thermique,...). Le cas particulier de la déformation du composant durant sa fabrication est traitée numériquement dans [6] au moyen de la méthode des éléments finis. Des températures excessives aux jonctions et contacts entre les composants et la plaque de circuit imprimé peuvent entraîner des dysfonctionnements du montage. Ce phénomène connu a été confirmé dans l'étude [7] consacrée aux amplificateurs de puissance utilisés dans le domaine des radio fréquence. L'étude montre que le dépassement de la température maximale seuil aux jonctions réduit sensiblement la fiabilité du montage et fatigue prématurément les composants.

Le dimensionnement correct des montages électroniques utilisant des sources de chaleur localisées du type QFN nécessite la connaissance des échanges thermiques qui se produisent avec l'environnement. Lorsque la thermorégulation de ces montages repose sur la convection naturelle comme c'est souvent le cas dans les applications, l'ingénieur doit pouvoir déterminer le coefficient d'échange convectif naturel correspondant à chaque surface du QFN et de la plaque sur laquelle il est soudé. C'est l'objectif de la présente étude dans laquelle sont proposées des corrélations qui permettent de calculer le coefficient d'échange convectif global concernant le QFN64 et la plaque, en fonction de la puissance générée par le composant et l'angle d'inclinaison de la plaque par rapport à l'horizontale. Ils concernent plusieurs configurations obtenues en faisant varier l'angle d'inclinaison entre 0° (plaque horizontale) et 90° (plaque verticale) et la puissance dans la gamme 10-100mW.

2. Le cas étudié. Solution.

Le montage considéré dans ce travail est représenté Fig. 1. Il est constitué d'une plaque de circuit imprimé (époxy-cuivre, Fig. 1(a)) sur laquelle est soudé le QFN64 Fig. 1(a) détaillé Fig. 1(b-c), positionné de manière aléatoire. L'ensemble est disposé dans une cavité cubique fermée remplie d'air dont les dimensions sont suffisamment grandes par rapport à celles de la plaque pour ne pas perturber les écoulements de convection naturelle autour de cette plaque et en particulier autour du QFN. L'ensemble plaque-fluide est supposé isotherme à l'état initial ($T_c = 20^\circ\text{C}$). Nous ne reviendrons pas dans ce travail sur la composition du QFN et ses différents modèles utilisés dans la pratique. Le lecteur trouvera les caractéristiques de ce composant dans les documents spécialisés cités en introduction et dans les travaux [8-10]. Ces travaux examinent la convection naturelle concernant les montages équipés de QFN16 et 32, qui sont utilisés pour des applications particulières différentes de celles du QFN64. La source de chaleur du QFN64 génère durant son fonctionnement une densité de flux volumique $\phi = P/V$ constante, V et P représentant respectivement le volume et la puissance effectivement dissipée par la source, qui varie entre 0.01 (composant en veille, hors service) et 0.1W. La plaque peut être inclinée par rapport à l'horizontale d'un angle α variant entre 0° (plaque horizontale) et 90° (verticale), selon l'application considérée.

Les phénomènes convectifs naturels sont examinés tout autour de l'assemblage qui est décomposé en 4 surfaces distinctes détaillées Fig. 1 (i) le haut du QFN noté (Q_T); (ii) l'ensemble des 4 faces latérales du QFN noté (Q_S); (iii) l'ensemble de la face arrière de la plaque et ses 4 surfaces latérales, noté (B_{B+S}); (iiii) le haut de la plaque, diminué de la surface arrière du QFN, noté (B_T).

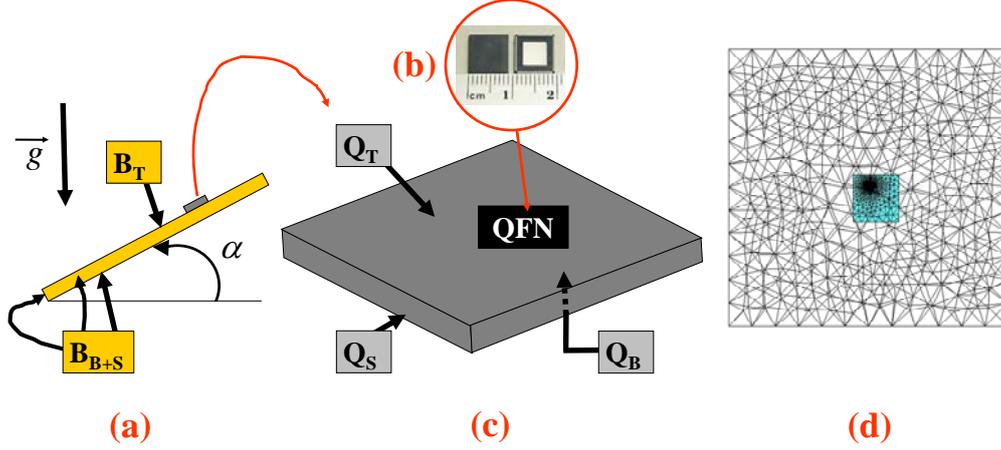


Figure 1. Le montage étudié (a) la plaque inclinée avec le QFN64 (b)-(c) détails du QFN64 et définition des surfaces d'échange (d) maillage QFN-Plaque-volume fluide

Les matériaux constituant le QFN sont supposés isotropes pour les phénomènes conductifs purs. Leurs conductivités thermiques sont en outre supposées indépendantes de la température dans la gamme concernée par cette étude. Ce n'est pas le cas pour la plaque vu qu'elle est constituée d'un substrat (époxy) et de cuivre dont les conductivités thermiques sont très différentes. On distinguera alors une conductivité équivalente dans le plan de la plaque différente de celle qui concerne son épaisseur. Les mêmes conductivités utilisées dans [8-10] sont considérées dans le présent travail. La surface d'échange thermique S_h est constituée de m éléments dont la surface d'échange et la température correspondantes sont notées respectivement S_i et T_i ($i=1,m$).

Le système adimensionnel classique considéré dans cette approche numérique 3D est

$$\begin{cases} \vec{\nabla}^* \cdot \vec{u} = 0 \\ (\vec{u}^* \cdot \vec{\nabla}^*) \vec{u}^* = -\vec{\nabla}^* p^* + Pr \nabla^{*2} \vec{u}^* + Ra Pr T^* \vec{e}_g \\ \vec{u}^* \cdot \vec{\nabla}^* T^* = \nabla^{*2} T^* (\text{air}) \\ \nabla^{*2} T^* + 1 = 0 (\text{source active du QFN}) \end{cases} \quad (1)$$

avec

$$p^* = \frac{L^2 p}{\rho a^2} ; Pr = \frac{\mu C_p}{\lambda} ; x^*, y^*, z^* = \frac{x, y, z}{L} ; \vec{u}^* = \frac{\vec{u} L}{a}$$

Dans le processus de calcul, le système entier est initialement isotherme à la température T_c et le fluide est à l'arrêt. La condition d'adhérence du fluide aux parois est imposée. Les calculs sont effectués en imposant une densité volumique constante ϕ à la source du QFN. Les caractéristiques thermophysiques de l'air sont évaluées à la température moyenne de chaque volume élémentaire et l'approximation de Boussinesq est appliquée. Dans ce travail, le rayonnement thermique n'est pas considéré. Cette opération simplifie les calculs en ne considérant que les échanges convectifs naturels en surface, objectif de ce travail. Le nombre de Rayleigh $Ra = g\beta L^5 \rho \phi / \mu a \lambda$ est basé sur le côté du QFN (longueur caractéristique L) et sur la puissance volumique générée ϕ . Les calculs sont effectués au moyen du code commercial Ansys-Fluent [11] basé sur la méthode des volumes finis et l'algorithme SIMPLE. Ce code est néanmoins associé à un code spécifique développé au LTIE, destiné à la

détermination des grandeurs recherchées dans cette étude. Le gradient thermique aux parois conduit à la connaissance du coefficient de transfert convectif local $h_i = -\lambda(\partial T / \partial n) / (T - T_c)_i$; ($i = 1, m$), dont l'intégration à travers la surface totale S_h permet de connaître le coefficient d'échange convectif moyen \bar{h} sur la surface considérée, pour une combinaison spécifique (P, α) . Les coefficients globaux d'échange \bar{h}_Q et \bar{h}_B qui concernent respectivement le QFN et la plaque sont par suite déterminés en pondérant les valeurs de \bar{h} par les surfaces correspondantes. Le maillage est constitué d'une combinaison d'éléments et cellules de type tétraédrique (prédominant), hexaédrique, pyramidal, quadrilatéral. Un raffinement du type exponentiel est effectué aux parois, majoritairement au niveau du QFN, source de l'activité énergétique. Cette précaution est nécessaire pour la détermination précise des gradients thermiques autour de l'assemblage. Un exemple de maillage est présenté Fig. 1(d). La structure du maillage a été optimisée dans le volume fluide et pour chacune des 4 surfaces décrites précédemment, pour distinguer les échanges convectifs qui leur correspondent. Le maillage est considéré optimisé lorsque la variation de la valeur de \bar{h} est inférieure à 3% pour deux calculs successifs, alors que le maillage a été augmenté de 2%. Cette condition est associée à un critère de convergence de 10^{-5} pour les composantes de la vitesse et 10^{-6} pour l'énergie. Ces conditions sont atteintes avec un maillage de 522487 cellules pour la configuration (P, α) la plus défavorable. Un bilan thermique et de masse est effectué pour chaque cas aux fins de contrôler la convergence des calculs.

3. Résultats

Plusieurs configurations ont été considérées, en combinant (i) les angles d'inclinaison α de la plaque entre 0° et 90° au pas de 30° ; (ii) entre 8 et 10 valeurs de la densité de flux générée correspondant aux puissances variant entre 0.01W et 0.1W. Les lignes de courant sont présentées Fig. 2 à la puissance maximale $P = 0.1W$, pour les positions horizontale et verticale de la plaque. En position horizontale, l'écoulement contourne la plaque. Le fluide est quasiment stagnant sur (B_{B+S}) ainsi que sur une grande partie de sa surface libre supérieure. Un écoulement existe néanmoins du côté de la face supérieure à la verticale du package. Il prend naissance dans la zone où se rejoignent les lignes de courant, et cette zone reste continue quoique diminuant jusqu'à la partie supérieure de l'enceinte. Cette activité fluidique est relativement éloignée des surfaces du composant électronique et l'écoulement est faible au voisinage immédiat du composant, sur les surfaces (Q_T) et (Q_S) . La quasi totalité de la surface (B_{B+S}) est isotherme, proche de T_c . Seule la zone autour du QFN du côté supérieur est réchauffée par conduction à travers les pattes. La chaleur est en effet drainée vers la couche supérieure en cuivre de la plaque, assurant ainsi un meilleur refroidissement du composant. L'échauffement n'atteint que faiblement les surfaces latérales de la plaque et la température des coins inférieurs du composant est proche de la température minimale T_c . Les isothermes quasiment parallèles dans le milieu fluide montrent une stratification de la température qui n'est que légèrement déformée par l'écoulement convectif naturel dans la zone au dessus du composant. Ces observations restent valables quelle que soit la position du QFN sur la plaque.

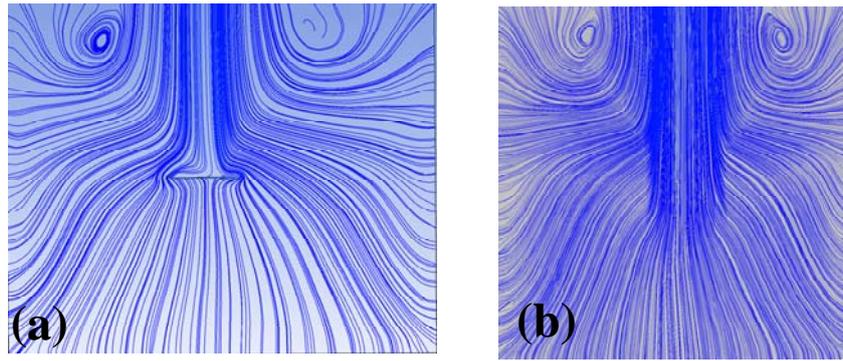


Figure 2. Lignes de courant pour la plaque en position (a) horizontale; (b) verticale. $P = 0.1W$

Lorsque la plaque est verticale, l'écoulement convectif est concentré au voisinage du composant. La vitesse moyenne dans cette zone augmente à mesure que la puissance générée augmente, et l'écoulement s'accélère à mesure que l'air remonte la plaque. L'air stagne sur le bord inférieur de la plaque et rejoint ensuite la plaque en la suivant parallèlement. Les phénomènes de couche limite qui se développent sur la paroi verticale améliorent les échanges convectifs mais pas de manière sensible par rapport à la position horizontale. La température maximale toujours atteinte au centre est néanmoins plus faible pour la position verticale, ce qui est dû aux phénomènes dynamiques décrits précédemment. La distribution de la température sur la face haute (Q_T) du composant ne subit pas de modification notable par rapport celle de la position horizontale. Seule la valeur absolue de la température les distingue, inférieure dans tous les cas dans la position verticale. L'angle d'inclinaison α influe sur l'écoulement autour du composant et sur son état thermique. L'obstacle de la face basse de (Q_S) devient moins sensible à mesure que l'inclinaison augmente, la face haute est plus balayée par l'air. La distribution du coefficient d'échange convectif local et les valeurs moyennes \bar{h} ont été déterminées pour toutes les combinaisons (P, α) et sur chaque surface. Les résultats sont présentés Fig. 3(a) pour le QFN (surfaces (Q_T) et (Q_S)) et en Fig. 3(b) pour la plaque (surfaces (B_T) et (B_{B+S})).

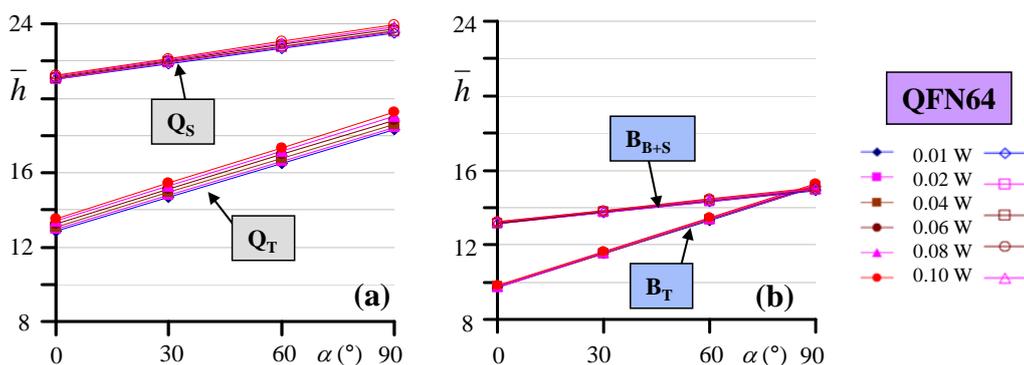


Figure 3. Evolution du coefficient de transfert convectif moyen

(a) sur (Q_T) et (Q_S); (b) sur (B_T) et (B_{B+S})

Pour la position verticale, les valeurs de \bar{h} sont différentes sur les quatre faces de (Q_S), en accord avec les aspects dynamiques décrits précédemment. Les valeurs maximum et minimum de \bar{h} concernent la face inférieure et supérieure de (Q_S) respectivement, et la valeur

intermédiaire est localisée sur les deux faces latérales, avec une légère prédominance pour la face la plus proche du bord de la plaque. L'échange moyen sur ces deux faces latérales de (Q_s) est proche de celui de la face supérieure (Q_T) pour cette position verticale alors qu'il est quasiment identique sur les quatre faces latérales pour la position horizontale. L'échange moyen sur les deux surfaces réunies (Q_T) et (Q_s) est plus important pour la position verticale et il augmente pour les deux cas lorsque la puissance générée augmente. Pour toutes les inclinaisons traitées, l'échange convectif concernant la plaque est concentré sur sa face supérieure libre autour du package, qui est réchauffée par conduction à travers les pattes du composant.

Les résultats pour la gamme particulière de puissance $0.01 \leq P \leq 0.1W$ conduisent aux corrélations suivantes. Elles permettent de déterminer les coefficients globaux d'échange convectif naturel \bar{h}_Q et \bar{h}_B pour le QFN et pour la plaque respectivement selon la puissance considérée P et l'angle d'inclinaison α de la plaque:

$$\begin{cases} \bar{h}_Q = 12.8 + 0.06\alpha + (7.4 + 0.034\alpha)P \\ \bar{h}_B = 11.5 + 0.04\alpha + (1.3 + 0.004\alpha)P \end{cases}; \text{Valable pour } \begin{cases} \text{QFN64} \\ 0 \leq \alpha \leq 90^\circ \\ 0.01 \leq P \leq 0.1W \end{cases} \quad (2)$$

L'évolution de ces coefficients est présentée Fig. 4. en fonction de P et de α .

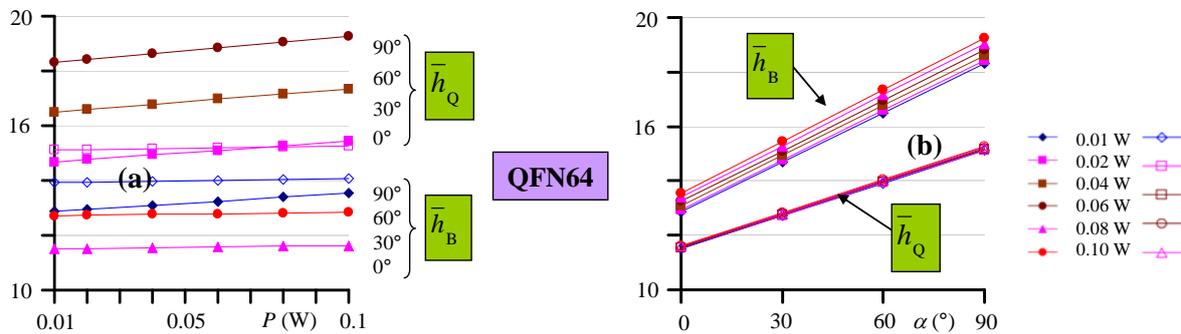


Figure 4. Evolution du coefficient de transfert convectif global \bar{h}_Q pour le QFN et \bar{h}_B pour la plaque (a) en fonction de P ; (b) en fonction de α .

4. Conclusions

Les phénomènes aérothermiques qui se produisent autour d'un montage électronique équipé d'un QFN64 ont été qualifiés dans ce travail. Les échanges thermiques convectifs naturels sont par ailleurs quantifiés pour le composant électronique et pour la plaque de circuit imprimé sur laquelle est soudé le QFN. Les corrélations proposées permettent de déterminer les coefficients globaux d'échange convectif naturel selon l'angle d'inclinaison de la plaque par rapport à l'horizontale et pour une puissance générée variant entre 0.01 et 0.1W. Ces gammes d'angle et de puissance correspondent à des applications particulières dans le domaine de l'électronique embarquée, mais elles peuvent être utilisées pour le dimensionnement thermique de ce montage électronique largement utilisé dans divers secteurs de l'ingénierie.

Références

- [1] Trinamic application note 005, Rev. 1.01, <http://www.trinamic.com>, 2013.
- [2] Integrated Circuits Thermal Test Method Environmental Conditions - Natural Convection (Still Air), Jedec Solid State Technology Association, JESD51-2A, 2008.
- [3] Guidelines for Reporting and Using Electronic Package Thermal Information, Jedec Solid State Technology Association, JESD51-12, 2005.
- [4] J. de Vries, M. Jansen, W. van Driel., Solder-joint reliability of HVQFN-packages subjected to thermal cycling, *Microelectronics Reliability* 49 (2009) 331–339.
- [5] T.Y. Tee, H.S Ng, D. Yap, Z. Zhong, Comprehensive board-level solder joint reliability modeling and testing of QFN and power QFN packages, *Microelectronics Reliability* 43 (2003) 1329–1338.
- [6] D.G. Yang, K.M.B. Jansen, L.J. Ernst, G.Q. Zhang, W.D. van Driel, H.J.L. Bressers, J.H.J. Janssen, Numerical modeling of warpage induced in QFN array molding process, *Microelectronics Reliability* 47 (2007) 310–318.
- [7] Z Radivojevic, K. Andersson, J.A. Bielen, P.J. van der Wel, J. Rantal, Operating limits for RF power amplifiers at high junction temperatures, *Microelectronics Reliability* 44 (2004) 963-972.
- [8] A. Baïri, Thermal design of tilted electronic assembly with active QFN16 package subjected to natural convection, *International Communications in Heat and Mass Transfer* 66 (2015) 240–245
- [9] A. Baïri, Natural convection on inclined QFN32 electronic package generating constant volumetric heat flux, *International Communications in Heat and Mass Transfer* 66 (2015) 133-139.
- [10] A. Baïri, O. Haddad, Detailed correlations on natural convective heat transfer coefficients for QFN32 electronic device on inclined PCB, *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*, in press (2016), DOI 10.1080/10407782.2015.1090850.
- [11] Fluent-Ansys, Elements Reference, Release 13.0 (2010), Swanson Analysis Systems, Inc.