

# Mise en place de modèles d'extrapolation de température pour divers équipements de la nacelle d'un ensemble propulsif

Benjamin REMY<sup>1/\*</sup>, Alain DEGIOVANNI<sup>1</sup> et Olivier VERSEUX<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire d'Energétique et de Mécanique Théorique et Appliquée (L.E.M.T.A)  
U.M.R - C.N.R.S 7563 – U.H.P-Nancy I, Institut National Polytechnique de Lorraine.  
02, avenue de la Forêt de Haye - B.P 160, 54 516 Vandœuvre-lès-Nancy Cedex, France  
Ecole Nationale Supérieure d'Electricité et de Mécanique (E.N.S.E.M)

<sup>2</sup> AIRBUS, Powerplant Center of Competence / EET5  
316 route de Bayonne – B.P M0112/5 31060 TOULOUSE Cedex 09

\*(auteur correspondant : [benjamin.remy@ensem.inpl-nancy.fr](mailto:benjamin.remy@ensem.inpl-nancy.fr))

**Résumé** – Dans le cadre de l'intégration des systèmes propulsifs sur les avions, la société AIRBUS est amenée à extrapoler les températures des équipements aux cas extrêmes de l'enveloppe de vol qui représente toutes les conditions de température susceptibles d'être rencontrées au cours d'un vol. Pour la certification des moteurs, ces extrapolations sont actuellement réalisées à l'aide de la méthode dite du "1°C pour 1°C". Elle s'avère simple et rapide à mettre en œuvre mais est souvent conservatrice. Le but de cette étude est d'évaluer la pertinence et le champ d'application de nouvelles méthodes d'extrapolation mises en place à partir de bilans thermiques simples.

## 1. Introduction

Cette étude rentre dans le cadre d'un projet initié par Airbus, le projet "*I-Temps*" comme Improved Temperature Extrapolation Methods for Powerplant Systems, auquel participe le LEMTA. Airbus réalise pour chaque avion et pour chaque équipement de nombreux essais, au sol ou en vol. La Figure 1 montre un exemple de diagramme "Pression-Température" dont les limites représentent l'enveloppe de vol qui englobe l'ensemble des conditions de vol susceptibles d'être rencontrées. Airbus doit garantir, qu'en tout point de cette enveloppe la température de chacun des équipements doit être inférieure à la température critique correspondante. A l'intérieur de l'enveloppe de vol, il y a une ligne brisée (appelée "droite" ISA : International Standard Altitude) qui correspond à des conditions moyennes de température (+15°C à l'altitude 0) dans l'atmosphère. Pour pouvoir valider la température de chaque équipement dans l'enveloppe de vol, il faudrait disposer d'essais réalisés aux frontières. Or, tous les essais en vol sont confrontés aux contraintes climatiques et opérationnelles qui ne permettent pas d'explorer tout le domaine. C'est pourquoi Airbus a besoin d'élaborer des méthodes d'extrapolation de température, de manière à prédire le comportement thermique des matériaux et des équipements dans les conditions les pires. Ces méthodes sont validées à l'aide d'essais existants, réalisés avec des  $\Delta_{ISA}$  élevés ( $\Delta_{ISA}$  différence entre la température extérieure mesurée et la température ISA à même altitude). Ces extrapolations sont actuellement réalisées soit par des méthodes simples à mettre en œuvre mais souvent conservatrices (méthode du "1°C pour 1°C" ou d'efficacité), soit par des modèles numériques tridimensionnels précis mais dont le temps de déploiement est parfois incompatible avec les jalons d'un programme avion. La méthode du "1°C pour 1°C" est celle qui est actuellement utilisée. C'est la méthode minimum imposée par les autorités de certification (référence JAR/FAR 25.1043). Elle consiste à mesurer la température de l'équipement étudié et la température extérieure mesurée lors d'un vol dédié aux aspects

thermiques, puis à répercuter directement sur la température de l'équipement l'écart de température extérieure avec la température à la frontière de l'enveloppe de vol à l'altitude donnée. Mais cette méthode peut s'avérer trop imprécise notamment si l'équipement est traversé par un fluide caloporteur. L'objectif dans "*I-Temps*" est donc de bâtir des règles d'extrapolation plus performantes que la règle du "1°C pour 1°C" et applicable à différents types d'équipements (passage d'un fluide caloporteur, présence de capacité thermique, ...). On s'imposera comme contrainte de faire en sorte que ces règles restent assez faciles et rapides à mettre en œuvre.

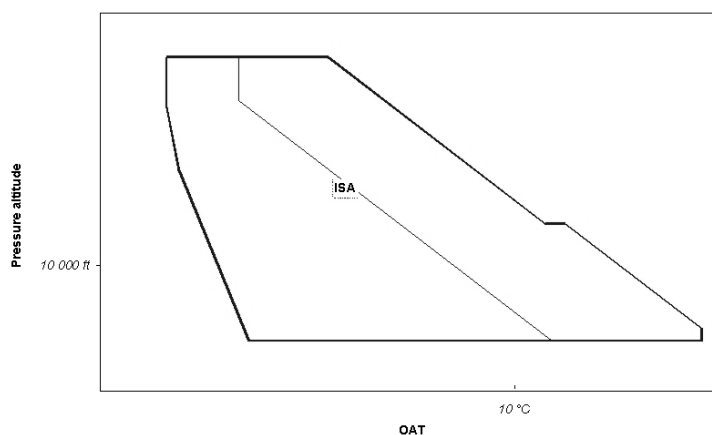


Figure 1 : *Enveloppe de vol*

## 2. Démarche adoptée pour l'extrapolation de température

Pour cela, nous avons opté pour une méthode enthalpique. Elle consiste à établir un bilan thermique sur l'équipement (générateur électrique, vanne, boîtier électronique,..) avec son environnement afin de tenir compte de l'ensemble de ses échanges, que ce soit par conduction, par convection ou par rayonnement. On calibre alors le modèle obtenu sur l'un des vols connus (vol de calibrage) en estimant les paramètres par une méthode de type «moindres carrés» (identification de modèle) pour ensuite extrapoler ce modèle à d'autres vols (vérification du modèle). Idéalement, ce sont des vols effectués dans des conditions assez différentes. Les outils stochastiques permettent après la phase d'identification d'étudier la pertinence du modèle proposé en terme d'intervalle de confiance et d'incertitudes sur les températures extrapolées en prenant en compte les erreurs stochastiques liées au bruit de mesure sur les capteurs [1] mais aussi les éventuels biais de modèles. Nous pouvons distinguer deux types d'équipements : les équipements avec un effet capacitif faible comme l'IDG/VFG (*Integrated Drive Generator / Variable Frequency Generator*) qui assurent la production d'énergie électrique de l'avion à partir de la puissance disponible sur la boîte à engrenages du moteur et ceux avec un effet capacitif non négligeable comme le FADEC (*Full Authority Digital Engine Controller*) qui permet de réguler le fonctionnement du moteur. Dans ce travail, nous allons plus particulièrement nous focaliser sur l'étude de l'IDG.

## 3. Présentation de l'IDG et mise en place de la méthode enthalpique

L'IDG est situé dans le compartiment FAN, entouré des capots et carter FAN (FAN COWL et FAN CASE) (voir Figure 2). On effectue ensuite un bilan global sur cet équipement.<sup>1</sup> Celui-ci est équipé d'un circuit interne d'huile qui sert à le refroidir, en dissipant une partie de la chaleur produite par le mouvement en rotation des pièces mécaniques. Un échangeur de chaleur huile/air externe à l'IDG permet de refroidir cette huile.

<sup>1</sup> Pour des raisons de confidentialité, nous avons souhaité indiquer ni le type de moteur, ni le type d'avion correspondant aux essais présentés.

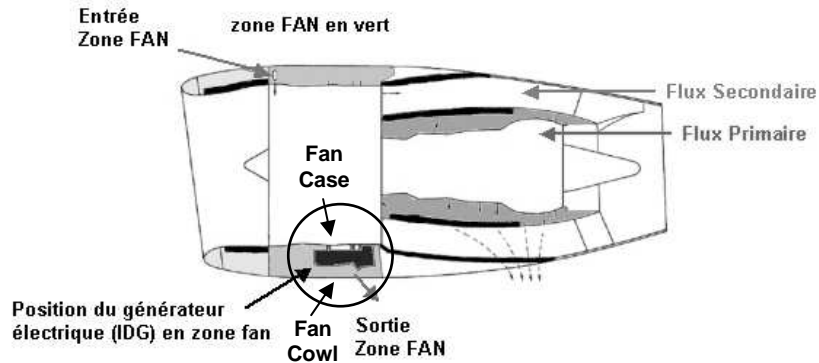


Figure 2 : Zone d'étude

L'inertie de la carcasse est négligeable, comparativement à celle de l'huile traversant l'IDG. L'IDG et son environnement ont été modélisés par un modèle en régime glissant. On notera  $T_{amb}$  la température de l'air ambiant (température extérieure). Les températures qui serviront dans la suite figurent sur le schéma suivant.

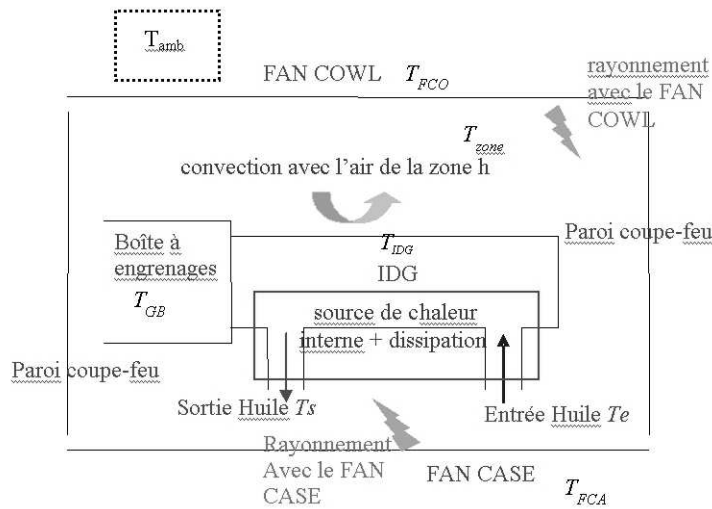


Figure 3 : Modélisation de l'IDG et des transferts avec l'environnement

Les échanges thermiques par rayonnement entre les parois coupe-feu et l'IDG sont négligeables du fait des faibles facteurs de forme (d'un côté, il y a la boîte à engrenages, et de l'autre, il y a des équipements). Les transferts thermiques à prendre en compte sont donc la source de chaleur  $P$  (dissipation thermique), la conduction à travers le joint présent entre la boîte à engrenages et l'IDG, la convection externe (naturelle ou forcée) entre la surface mouillée externe de l'IDG et l'air au voisinage de celui-ci, l'échangeur, les transferts radiatifs entre l'IDG et le FAN COWL, le FAN CASE et la pompe à huile. Le bilan enthalpique s'écrit:

$$0 = P + \Phi_{cond(boîte\ engrenages \rightarrow IDG)} + \Phi_{conv(zone \rightarrow IDG)} + \Phi_{conv(huile \rightarrow IDG)} + \Phi_{ray(FCO \rightarrow IDG)} + \Phi_{ray(FCA \rightarrow IDG)} + \Phi_{ray(pompe\ huile \rightarrow IDG)} \quad (1)$$

A partir de ce bilan général, il est ensuite possible d'explicitier chacun des flux en fonction des différentes températures des éléments du système et d'en déduire une expression théorique de la température de l'IDG. En cherchant à conserver l'ensemble de ces termes, nous avons été confrontés à des difficultés dues au nombre trop important de paramètres à identifier dont certains sont peu sensibles et d'autres peu corrélés. Par une étude de sensibilité et de corrélation mais aussi une analyse quantitative de chaque flux, nous avons pu montrer que le flux conductif entre l'IDG et la boîte était très faible et donc qu'il était préférable de ne pas chercher à l'identifier avec l'ensemble des autres paramètres. De même pour les flux radiatifs

qui sont négligeables ou linéarisables et qui peuvent être pris en compte par un coefficient d'échange équivalent dans les flux convectifs correspondants. Les autres termes de dissipation thermique  $P$ , flux échangé avec l'air  $\Phi_{conv(zone \rightarrow IDG)}$  et avec l'échangeur à huile  $\Phi_{conv(huile \rightarrow IDG)}$  restent à prendre en compte. La fonction de l'IDG étant de produire de l'énergie électrique à partir de l'énergie mécanique qu'il reçoit sur son arbre, il dissipe de la chaleur du fait des frottements mécaniques. Cette puissance  $P$  non constante est proportionnelle à la puissance électrique  $P_{elec}$  et est quadratique en fonction de la rotation de l'arbre moteur  $N_3$  (voir relation (2)). Le flux dissipé par l'échangeur huile/air peut être modélisé soit comme la différence d'enthalpie entre l'entrée et la sortie de l'échangeur, soit comme un flux convectif entre la température moyenne d'huile  $T_{oilave} = (T_e + T_s)/2$  et la température de l'IDG :  $\Phi_{conv(huile \rightarrow IDG)} = \dot{m}C_p(T_e - T_s) = p_1(T_{oilave} - T_{IDG})$ . La bonne approche consiste à retenir la modélisation avec  $T_{oilave}$  car la température  $T_{IDG}$  que l'on cherche à évaluer apparaît explicitement dans le modèle. Avec l'autre approche, on ne peut remonter à  $T_{IDG}$  qu'à travers le flux convectif avec l'air :  $\Phi_{conv(air \rightarrow IDG)} = p_2(T_{zone} - T_{IDG})$ . Ce flux étant beaucoup plus faible que le flux échangé avec l'huile, le modèle est moins adapté pour l'évaluation de  $T_{IDG}$ . Enfin, la température de zone  $T_{zone}$  n'est pas systématiquement mesurée dans tous les vols. Même si certains modèles d'Airbus permettent de l'évaluer, nous avons préféré nous en affranchir en l'exprimant en fonction de températures connues dont elle dépend indirectement,  $T_{oilave}$  et la température extérieure ou ambiante  $T_{amb}$ . Le bilan simplifié s'écrit alors:

$$T_{IDG} = \frac{1}{p_1 + p_2} \left( \underbrace{kP_{elec} + (a_1 \cdot N_3 + a_2 \cdot N_3^2)}_{\text{Puissance } P \text{ dissipée}} + p_1 T_{oilave} + p_2 \underbrace{(\alpha T_{oilave} + (1 - \alpha) T_{amb})}_{=T_{zone}} \right) \quad (0 \leq \alpha \leq 1) \quad (2)$$

$$\text{ou } T_{IDG} = k' P_{elec} + (a_1' \cdot N_3 + a_2' \cdot N_3^2) + p_1' T_{oilave} + p_2' \underbrace{(\alpha T_{oilave} + (1 - \alpha) T_{amb})}_{=T_{zone}} \quad \text{avec : } \sum_i p_i' = 1 \quad (3)$$

On peut remarquer que le modèle proposé est bien physique puisque la conservation de l'énergie est assurée. Si  $P_{elec} = N_3 = 0$  (moteur à l'arrêt), les températures  $T_{IDG} = T_{oilave} = T_{amb}$  sont égales et (2) est bien vérifiée. Bien qu'ici le modèle soit issu directement d'un bilan, des outils spécifiques ont été développés pour sélectionner directement, parmi l'ensemble des données mesurées en vol, les températures utiles à la mise en place du modèle de l'équipement. Ils permettent d'aboutir à la même forme de modèles que le modèle (2).

#### 4. Identification de modèles et extrapolation de températures

Il reste à identifier les paramètres qui apparaissent dans ce modèle  $\{k, a_i, p_i\}$ . Nous avons utilisé une méthode de type moindres carrés en prenant soin de vérifier que quel que soit l'algorithme employé (Levenberg-Marquardt, Newton ou Gradient conjugué) et les valeurs initiales choisies pour l'estimation, la solution est unique. Pour cet IDG, nous disposons de 4 vols d'essais. Un ou 2 vols sont utilisés pour l'identification et les deux autres vols pour valider par extrapolation le modèle proposé. Les études précédentes nous ont montré que pour des raisons de sensibilité, il était préférable d'utiliser pour l'identification de paramètres un vol à forte charge (V1) et présentant les plus grandes variations de température. A partir du modèle identifié, on cherche ensuite à extrapoler les températures IDG sur les trois autres vols et à les comparer aux températures IDG mesurées. Les résultats sont donnés sur Figure 4. On peut observer des résidus importants sur les extrapolations, notamment sur le vol à très faible charge. Pour réduire les résidus, il faut prendre en compte la conduction entre la boîte à engrenages  $T_{GB}$  et l'IDG. La relation (2) devient (4) et peut aussi s'écrire comme (3). De même, l'échange avec l'air  $T_{zone}$  peut-être modélisé comme dans (2):

$$T_{IDG} = \frac{1}{p_1 + p_2 + p_3} \left( k \cdot P_{elec} + (a_1 \cdot N_3 + a_2 \cdot N_3^2) \right) + p_1 T_{oilave} + p_2 T_{zone} + p_3 T_{GB} \quad (4)$$

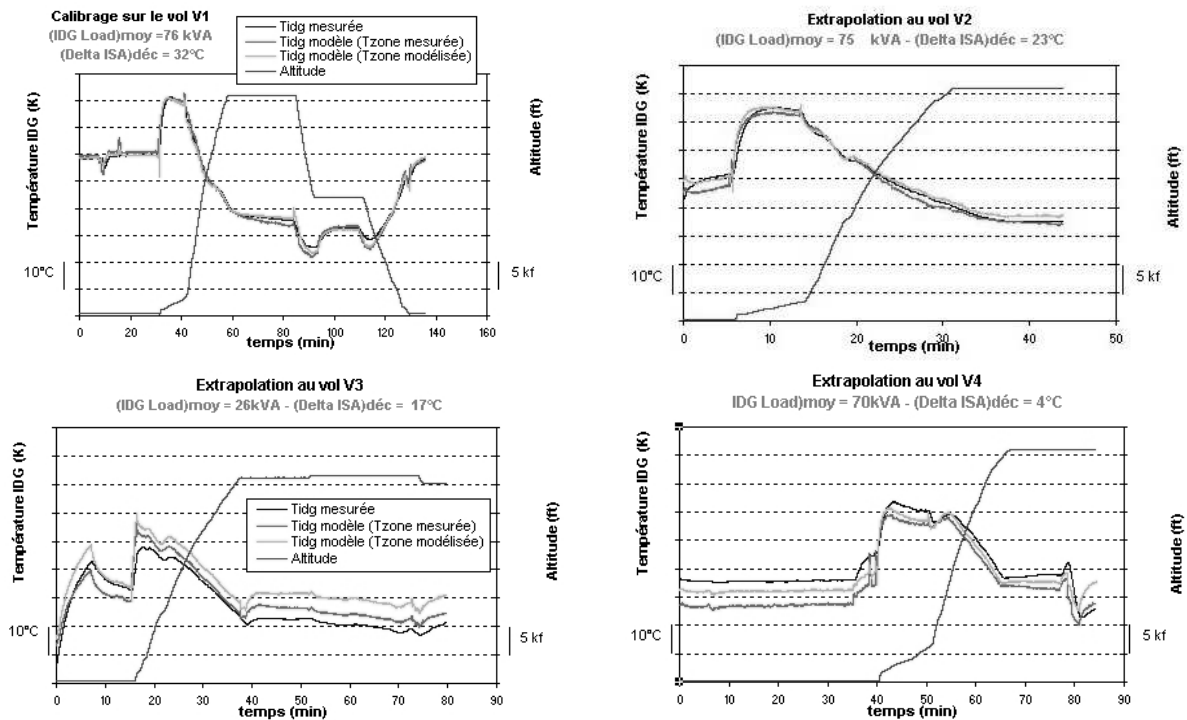


Figure 4 : Calibration et extrapolation de la température IDG

Cependant, l'ajout de cette nouvelle température, même si elle permet de réduire les résidus, rend difficile l'estimation des paramètres car sa sensibilité est faible. Pour remédier à ce problème, nous avons procédé à une estimation des paramètres du modèle en deux étapes. Lors de la première étape, nous cherchons à identifier, toujours sur le vol à plus forte charge, uniquement les paramètres les plus sensibles  $\{k, a_1, a_2, p_1\}$  en imposant  $\{p_2, p_3\} = \{0, 0\}$ . La seconde étape consiste ensuite à identifier à l'aide d'un second vol d'essai les deux autres paramètres restants  $\{p_2, p_3\}$  en gardant constants les paramètres identifiés dans l'étape 1  $\{k, a_1, a_2, p_1\}$ . Ce second vol est choisi de telle manière que la corrélation entre les résidus et la  $T_{Zone}$ , température de l'air mesurée (ou extrapolée à partir de données "Deck") à proximité de l'équipement, soit la plus forte (vol V2). Les résultats en terme d'extrapolation sont meilleurs, en particulier sur les maxima et le vol V3 à faible charge (voir Figure 5). Ceci s'explique non seulement parce que nous utilisons deux vols au lieu d'un seul pour l'identification mais aussi par la méthodologie d'estimation mise en place.

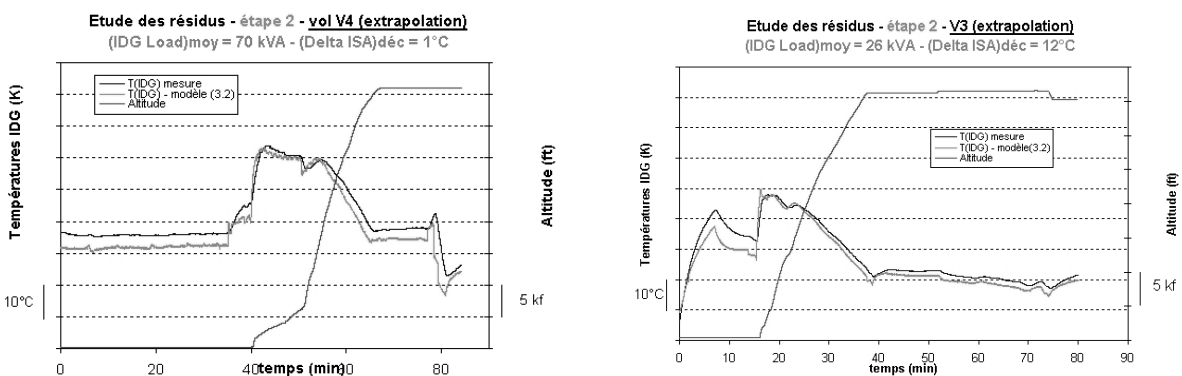


Figure 5 : Calibration et extrapolation de la température IDG – Estimation en 2 étapes

On pourrait aussi chercher à identifier l'ensemble des paramètres en une seule étape, simultanément sur ces deux vols. Une étude spécifique a été menée en ce sens et a montré que cela était possible mais sans nécessairement un gain significatif sur les résultats. Par ailleurs, elle ne peut pas remplacer la procédure à 2 étapes qui reste indispensable car c'est elle qui permet, à l'issue de la première étape, de sélectionner le second vol optimal de calibrage.

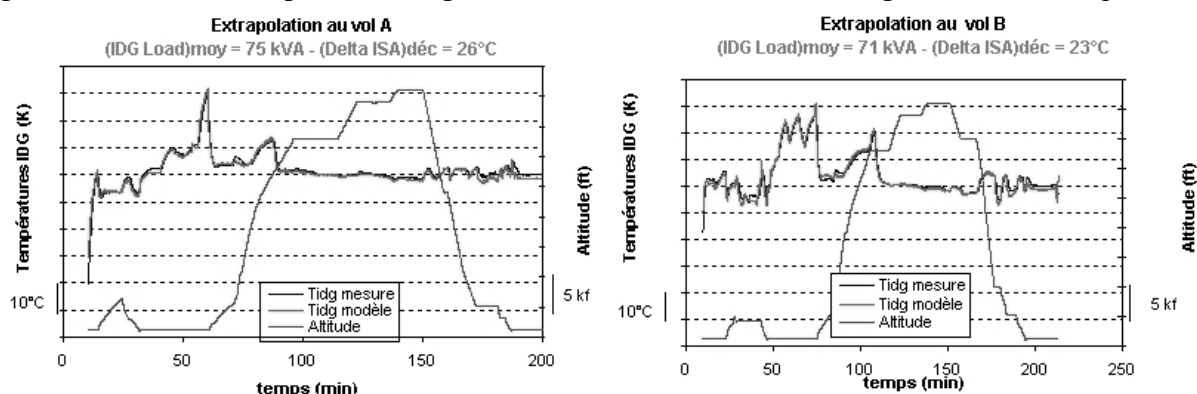


Figure 6 : Calibration et extrapolation de la température IDG d'un autre ensemble propulsif

La même procédure a été appliquée pour l'IDG d'un autre ensemble propulsif. Nous avons donné les résultats de calibration et d'extrapolation sur la Figure 6. Les résultats obtenus sont très bons. Pour se convaincre de l'efficacité de la méthode, nous avons cherché ensuite à comparer ces résultats avec la méthode du "1°C pour 1°C". Le calibrage a été réalisé sur un vol froid ( $\Delta_{Isa} = -1^\circ\text{C}$  au décollage) et l'extrapolation dans des conditions plus chaudes ( $\Delta_{Isa} = 26^\circ\text{C}$ ). On monte alors que les erreurs de température sont nettement plus petites avec "I-Temps" qu'avec la méthode "1°C pour 1°C".

Points	Vol C (calibration)		Vol A (extrapolation)					
	Delta ISA	$T_{IDG}$ mesure	Delta ISA	$T_{IDG}$ mesure	1°C pour °C		ITEMPS	
					$T_{IDG}$	erreur	$T_{IDG}$	erreur
Ralenti sol	-0.75°C	365K	+26.2°C	362K	392K	+30°C	361K	-1°C
Décollage	-1.75°C	371K	+25.7°C	388K	398K	+10°C	392K	+4°C
Fin décollage	-3.75°C	356K	+22°C	363K	382K	+19°C	364K	+1°C

Tableau I : Comparaison d' "I-Temps" avec la méthode du "1°C pour 1°C"

## 5. Conclusions

Cette étude vise à élaborer une méthodologie complète permettant d'établir par méthodes enthalpiques des modèles d'extrapolation sur différents équipements de différents ensembles propulsifs (IDG, VFG, Fadec, Vannes, ...) pour lesquels la méthode du "1°C pour 1°C" est conservative. L'intérêt de la méthode ayant été démontré sur différents équipements et moteurs, nous rentrons actuellement dans une phase de validation de la méthodologie. Cette étude sur l'IDG a montré que la méthode proposée dans "I-Temps" permettait d'obtenir un modèle d'extrapolation de température de qualité supérieure à la méthode du "1°C pour 1°C". Elle apparaît être un bon compromis entre la précision des résultats, nécessaire en vue d'une certification, et les contraintes de mise en œuvre. Enfin, une étude de résidus est en cours pour améliorer la détermination de l'intervalle de confiance des températures extrapolées qui ne se fait actuellement que sur l'aspect stochastique sans prendre en compte les biais de modèle.

## Références

- [1] J.V. Beck et K.J. Arnold, *Parameter Estimation in Engineering and Science*, John Wiley & Sons, New-York (1977).