

LA THERMOGRAPHIE INFRAROUGE

➤ Application à l'industrie automobile



➤ Par **Jean-Baptiste BLUMENFELD**, *technicien études essais, responsable de la mise en œuvre et du traitement des mesures par thermographie infrarouge*, et **Gilles DURIEUX**, *ingénieur essais non destructifs, Renault*.

Il est connu qu'un forgeron peut très bien juger de la température de l'acier d'après sa couleur (dégradés de rouges), du moins tant que la matière est à une température supérieure à 500 °C. En dessous de cette température, il n'y a plus rien à voir, le rayonnement n'est plus visible. Il y a pourtant une technique optique qui permet d'accéder sans aucun contact matériel à la température d'un objet n'émettant pas de rayonnement visible à l'œil : la thermographie infrarouge. Plus précisément, cette technique permet, à partir des rayonnements infrarouges émis par une scène thermique, d'obtenir la répartition spatiale et temporelle des températures de la scène observée. La caméra infrarouge est son instrument de mesure.

Le rayonnement infrarouge

Tous les corps, quel que soit leur état physique, émettent de l'énergie sous la forme d'ondes électromagnétiques. Ces radiations, de même nature que la lumière visible, ont une intensité et une énergie d'autant plus élevées que la température du corps est elle-même plus

importante. Suivant la longueur d'onde (λ), le rayonnement électromagnétique ne se manifeste pas de la même manière. La matière émet du rayonnement électromagnétique (la luminance) en fonction de sa température.

La loi de Planck donnée sous forme de faisceaux de courbes est la base de la mesure de température par analyse du rayonnement.

Sur la figure 1, on voit qu'à 30 °C, le maximum de rayonnement est émis vers 10 μm . À 500 °C, le maximum se situe vers 3,7 μm .

Un objet à -273 °C ne contient pas d'énergie. Si on lui en fournit, il en restitue une partie par rayonnement dans les longueurs d'onde de l'infrarouge puis dans

celles du visible ("histoire du forgeron"). Le filament de tungstène d'une lampe à incandescence est un exemple d'objet chauffé vers 3 000 °C par un courant électrique. Il émet du rayonnement visible et surtout du rayonnement infrarouge.

Le détecteur de la caméra infrarouge est sensible au flux total de rayonnement infrarouge dans un domaine spectral déterminé (de 3 à 5 μm ou de 8 à 12 μm). La figure 2 présente le spectre du rayonnement électromagnétique. La bande spectrale couverte par la thermographie infrarouge va de 2 à 15 μm .

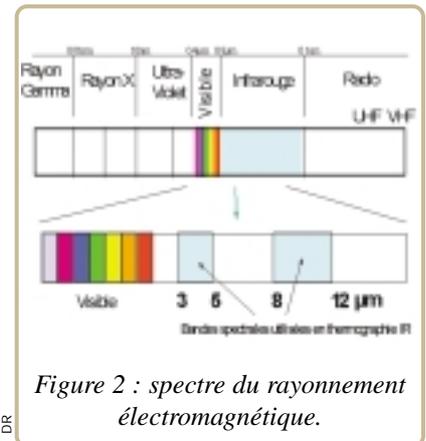


Figure 2 : spectre du rayonnement électromagnétique.

Le flux total ou bilan radiatif vu par la caméra infrarouge comporte plusieurs composantes dont certaines peuvent perturber la mesure (cf. figure 3) :

- l'émission thermique propre (ϵ) de l'objet visé, fonction de sa température (qu'on cherche à mesurer) et de son émissivité ;
- le flux émis par l'environnement (R) (lequel n'est pas à -273 °C) et réfléchi par la surface de l'objet visé en direction de la caméra infrarouge ;
- le flux émis par la couche de l'atmosphère (τ) séparant l'objet de la caméra. Cette dernière composante est négligeable dans beaucoup de cas.

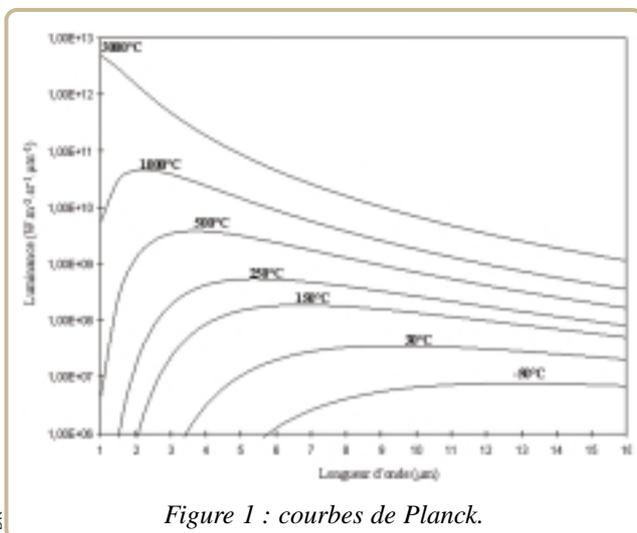


Figure 1 : courbes de Planck.

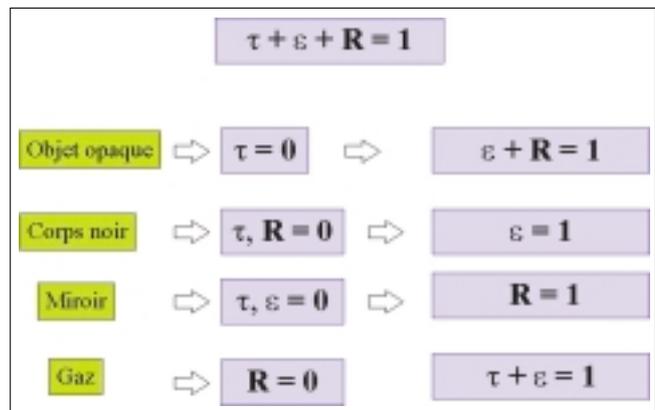
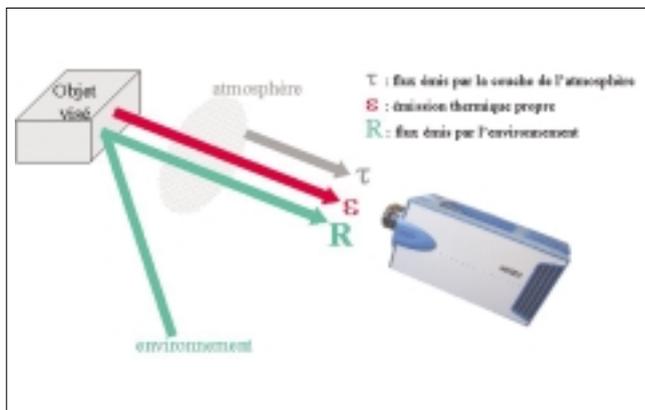


Figure 3 : loi du bilan radiatif (loi de Kirchoff).

L'émissivité correspond au rapport entre l'énergie rayonnée par le matériau à la température T et l'énergie rayonnée par un corps noir à la même température. Un corps noir est un corps qui absorbe tout rayonnement incident et ce à n'importe quelle longueur d'onde. Son émissivité est égale à 1.

$$\epsilon = L_{\text{obj}}/L_{\text{cn}}$$

L_{obj} = luminance de l'objet mesuré

L_{cn} = luminance du corps noir

L'émissivité, qui varie entre 0 et 1, dépend de la nature du matériau, de son état de surface, de la longueur d'onde et de l'angle d'observation. Sa connaissance est indispensable pour calculer la température absolue à partir du signal électrique délivré par la caméra. Dans le cas des **matériaux non métalliques opaques** aux infrarouges, elle s'approche le plus souvent 0,9. En revanche, pour les **matériaux métalliques**, elle est souvent faible (< 0,5). Dans ce cas, le facteur de réflexion est élevé, ce qui perturbe la mesure par des flux issus de l'environnement (effet miroir de renvoi). À noter que l'oxydation ou la rugosité des surfaces augmentent l'émissivité.

L'instrument de mesure

Les systèmes de mesure en thermographie infrarouge sont constitués d'un capteur (caméra infrarouge) et d'une unité d'enregistrement et de traitement du signal permettant l'interprétation des images (transcription en niveaux de température).

Cet ensemble permet d'enregistrer la distribution spatiale des températures sur l'objet examiné ainsi que l'évolution

temporelle de cette distribution.

La caméra infrarouge est constituée d'une optique en germanium (matériau transparent aux infrarouges, contrairement au verre) et d'une matrice de détecteurs sensibles au rayonnement infrarouge dans la bande spectrale 3-5 μm ou 8-12 μm .

Chaque détecteur délivre un courant électrique qui dépend de l'intensité du rayonnement infrarouge, plus précisément du nombre de photons frappant chaque détecteur. Le courant électrique est amplifié, puis numérisé et retranscrit en niveaux de température via la courbe d'étalonnage obtenue à partir d'un corps

noir. Un logiciel spécifique permet la saisie de l'émissivité et sa prise en compte pour corriger les niveaux apparents des températures.

Les détecteurs sont refroidis par un micro-compresseur (Stirling) jusqu'à la température de -196 °C de façon à minimiser le bruit de mesure.

Les caméras infrarouges de 1^{ère} génération (balayage mécanique par un seul détecteur) étaient refroidies par azote liquide versé, ce qui représentait des difficultés importantes pour les mesures réalisées sur différents sites.

La performance du système de mesure de thermographie infrarouge repose sur



Figure 4 : performances des caméras infrarouges nouvelle/ancienne génération.

Détecteur	Caméra matricielle	Caméra à balayage
Format	matrice de détecteurs (320*240 éléments InSb)	Monodétecteur InSb
Réponse spectrale	3-5 μm	3-5 μm
Performance imagerie	Caméra matricielle	Caméra à balayage
Fréquence image	150 Hz (matrice entière)	30 Hz
Résolution thermique	0,02 °C	0,1 °C
Résolution spatiale (à 200 mm de l'objet)	0,14 mm	0,5 mm
Mesure	Caméra matricielle	Caméra à balayage
Exactitude	+/- 2 °C	+/- 5 °C
Plage de mesure	20 °C - 950 °C	20 °C - 950 °C

Les applications dans l'industrie automobile

Les principaux avantages de la thermographie infrarouge sont un examen à distance et sans contact par une méthode globale rapide.

Outre les applications liées à la maintenance industrielle (contrôle des armoires électriques en usine), la thermographie infrarouge est utilisée dans le cadre du développement des projets véhicules ou comme une aide à la mise au point des procédés de fabrication. La thermographie infrarouge s'applique à la caractérisation thermique (mesure de températures), mais aussi à la caractérisation de certaines propriétés mécaniques (mesure de champs de contraintes par thermoélasticimétrie).

Les mesures de températures

Les applications sont nombreuses et variées, comme l'attestent les exemples suivants :

➤ Mise au point des paramètres de chauffage par induction des pignons de 6° de la boîte de vitesses PK6 avant fretage à chaud sur l'arbre primaire (cf. figure 5).

Il s'agit de trouver un compromis entre la puissance et la durée de chauffage de l'inducteur pour dilater suffisamment l'alésage du pignon en évitant la surchauffe qui risquerait de modifier ses propriétés mécaniques. Une instrumentation par thermocouple serait perturbée par le champ magnétique de l'inducteur, tandis que la thermographie infrarouge fournit, par un examen à distance et sans contact, un résultat instantané de la répartition des températures en surface du pignon et permet de suivre la diffusion de la chaleur au cours du temps. Le choix des paramètres d'induction est alors fait par comparaison des cartographies de température résultant des différents essais de chauffage.

➤ Fabrication des ailes plastiques (cf. figure 6).

Les ailes sont mises en forme dans des presses d'injection composées d'une matrice et d'un poinçon. Chaque élément de la presse est parcouru par un circuit

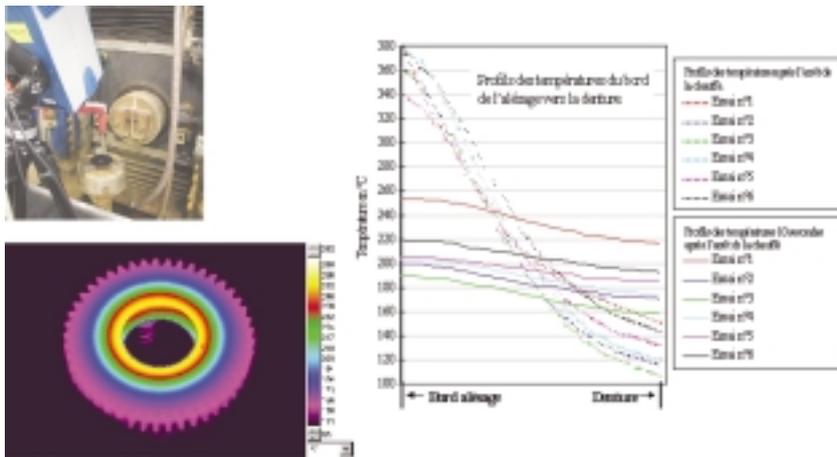


Figure 5 : mise au point des paramètres de chauffage par induction des pignons de 6° de la boîte de vitesses PK6 avant fretage à chaud sur l'arbre primaire - Cléon.

DR

2 critères principaux : la résolution thermique et spatiale.

La résolution thermique est l'aptitude de la caméra à discerner de faibles écarts de températures sur une même image. Elle est essentiellement limitée par le bruit électronique de l'ensemble "détecteurs/chaîne de traitement du signal". Le refroidissement extrême des détecteurs est nécessaire pour réduire ce niveau de bruit.

La résolution spatiale est l'aptitude de la caméra à faire apparaître la distinction entre des valeurs de température très voisines. Elle est limitée par la qualité de l'optique et le temps de réponse de toute la chaîne électronique.

Un critère secondaire est la résolution temporelle qui caractérise la fréquence-image du système. Les caméras matricielles permettent des fréquences-images de plusieurs centaines de Hertz (150 Hz en utilisant la matrice entière et jusqu'à 499 Hz en fenêtrant sur 8*8 pixels).

Le tableau de la figure 4 donne les performances des caméras matricielles comparées à celles des caméras à balayage.

La maîtrise de la situation de mesure

La préparation d'une campagne de mesure demande de connaître avec précision les besoins du client afin de préparer les bonnes configurations de la caméra et les

bons équipements annexes (montages spécifiques pour positionner la caméra infrarouge, utilisation de filtres pour les mesures à hautes températures, etc.)

Il faut déterminer les grandeurs d'influence à prendre en compte et leurs valeurs (réflexions parasites, émissivité, température ambiante, angle de visée, distance entre la caméra et l'objet visé, etc.) Sur site, il faut procéder à un examen visuel des scènes thermiques, de l'atmosphère séparant la scène observée de la caméra, afin de déterminer les éventuels rayonnements parasites dus à la proximité d'une source chaude.

Ce type de source est observable sur l'objet visé par réflexion. Si l'on déplace la direction d'observation en bougeant la caméra, l'image de la source chaude se déplace, ce qui prouve qu'elle n'est pas liée à la scène thermique. La mesure de température de l'objet perturbé est possible en intercalant un écran thermique. Si l'on ne peut pas déplacer la caméra, on cherche à masquer les rayonnements en provenance de la source chaude. On "éteint" la source chaude en la masquant.

Dans la pratique, pour les matériaux présentant des faibles valeurs d'émissivité et afin d'avoir une valeur connue de l'émissivité, le dépôt d'une fine couche de peinture noire mat d'émissivité élevée (0,95) convient.

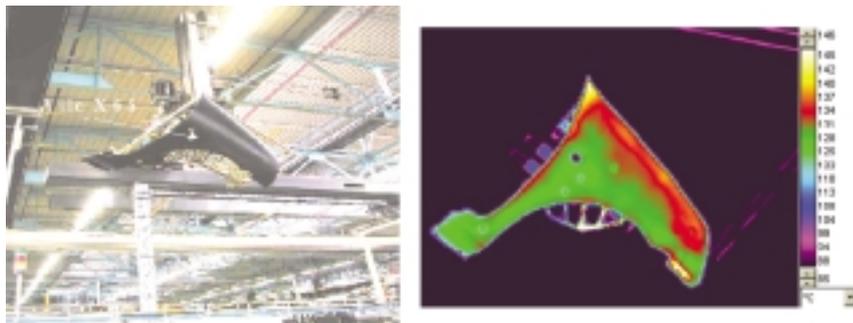


Figure 6 :
fabrication des ailes plastiques - Injection plastique - Flins.

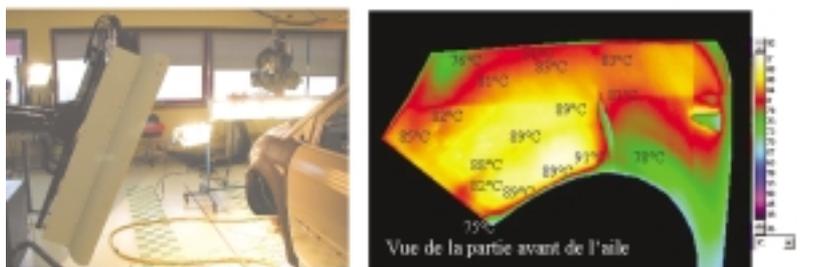


Figure 7 :
ensoleillement artificiel des ailes plastiques ou des planches de bord.

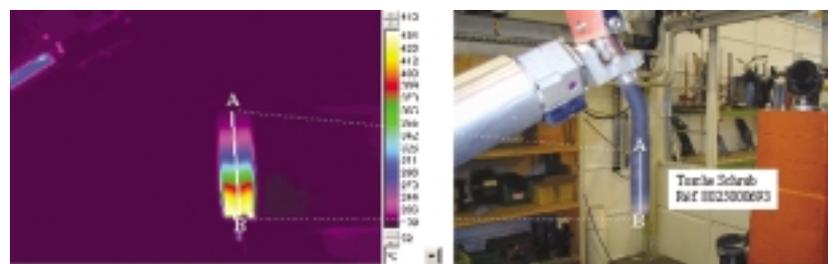
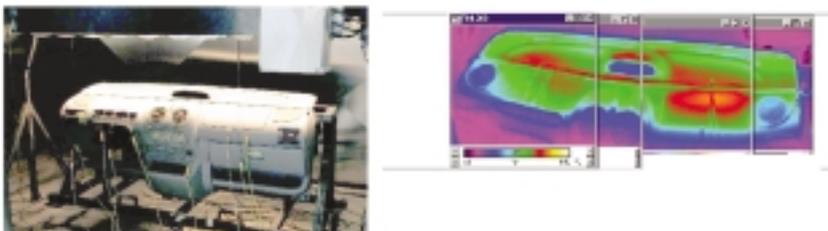


Figure 8 : tenue à la température des torches de soudage.

de refroidissement afin d'éviter ou de limiter les phénomènes de déformations résiduelles des ailes, dues à une répartition hétérogène des températures en surface du moule.

La thermographie est utilisée pour visualiser la répartition des températures de l'aile à sa sortie de la presse. Le refroidissement de l'aile étant relativement lent et l'émissivité du matériau élevée (0,9), la cartographie des températures mesurées sur l'aile donne une image des gradients de températures en surface de la matrice et du poinçon du moule.

Ceci met en évidence les défauts éventuels de refroidissement et constitue un excellent outil d'aide pour les metteurs au point chargés d'apporter des corrections dans des zones mal refroidies.

➤ Ensoleillement artificiel des ailes plastiques ou des planches de bord (cf. figure 7).

L'aile plastique montée sur un prototype est soumise à un ensoleillement artificiel par lampes halogènes et infrarouges. La cartographie des températures mesurées à la surface de l'aile ensoleillée est utilisée pour corréler les valeurs de température obtenues par simulation numérique tenant compte de la puissance des lampes, de leur inclinaison et de la distance les séparant de l'aile.

➤ Tenue à la température des torches de soudage (cf. figure 8).

La thermographie infrarouge est utilisée dans le but de comparer le comportement thermique de différentes torches de soudage comprenant chacune un circuit de refroidissement propre à son concepteur. La procédure de validation consiste à réaliser des cordons de soudure successifs pendant plus de 10 minutes. La meilleure torche est celle qui s'échauffe le moins au cours du cycle de soudure.

➤ Répartition spatiale des températures en surface de la plaque d'une soudeuse pour plastiques (cf. figure 9).

Dans cette étude, la thermographie infrarouge a mis en évidence un défaut d'uniformité du chauffage par résistance de la plaque, qui pouvait avoir des conséquences néfastes sur la qualité de la soudure.

► Optimisation du refroidissement d'un carter de boîte de vitesses en essai d'endurance (cf. figure 10).

L'objectif de cette étude était de localiser les points chauds en surface du carter d'une boîte de vitesses fonctionnant sur un banc d'essais à Lardy dans le but d'optimiser son refroidissement en jouant sur le positionnement et l'orientation des conduits d'air pulsé.

Les mesures de contraintes

Une caméra infrarouge permet également de déterminer des champs de contraintes sur une pièce de véhicule ou un organe soumis à une sollicitation mécanique périodique. En effet, lors d'essais d'endurance, les déformations des pièces induisent de très faibles variations de température qui sont relevées en temps réel par la caméra infrarouge et permettent de remonter aux contraintes par exploitation de l'effet thermoélastique. Il s'agit d'un phénomène physique de couplage entre la contrainte appliquée à un matériau et sa température. Une éprouvette ou une pièce de véhicule soumise à une variation sinusoïdale de contrainte est le siège d'une variation sinusoïdale de température, correspondant à la variation de contraintes et proportionnelle à la somme des contraintes principales :

$$\Delta T = -K_m \cdot T \cdot (\Delta \sigma_x + \Delta \sigma_y)$$

où K_m est la constante thermoélastique, dépendante des propriétés thermiques du matériau, T est la température absolue et $\Delta \sigma_x + \Delta \sigma_y$ est la somme des contraintes principales, également appelée pression hydrostatique. Le signe (-) de cette équation traduit le fait qu'une mise en compression s'accompagne d'un échauffement, alors qu'une mise en traction s'accompagne d'un refroidissement. Ainsi, une variation d'amplitude 1 MPa en contraintes génère une variation d'amplitude 1 mK en température pour de l'acier et de 3 mK d'amplitude pour un alliage d'aluminium.

La calibration des cartographies de températures pour la conversion en cartographies de contraintes se fait généralement par comparaison avec le niveau de contrainte obtenu à l'aide d'une jauge de

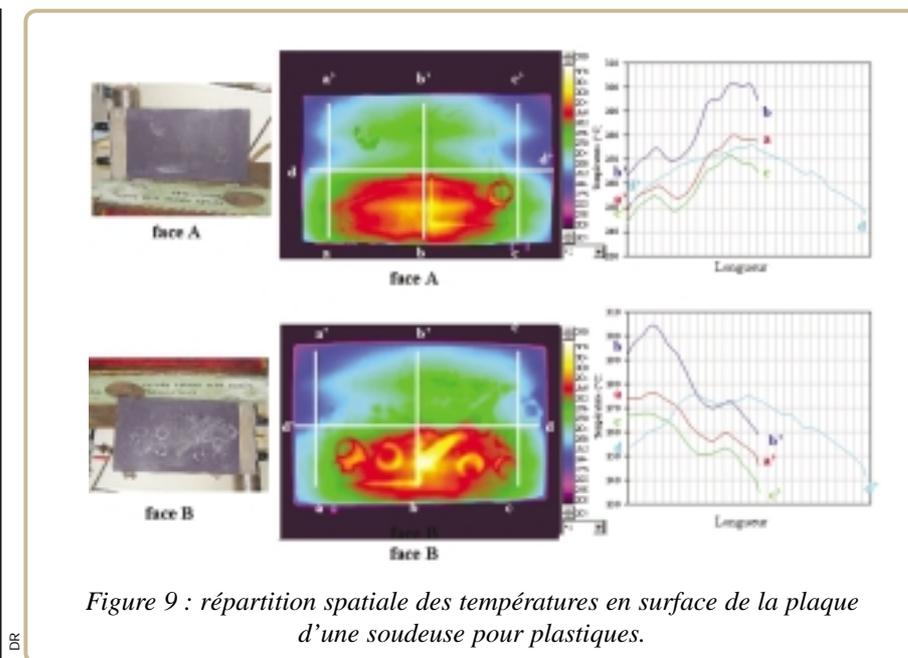


Figure 9 : répartition spatiale des températures en surface de la plaque d'une soudeuse pour plastiques.

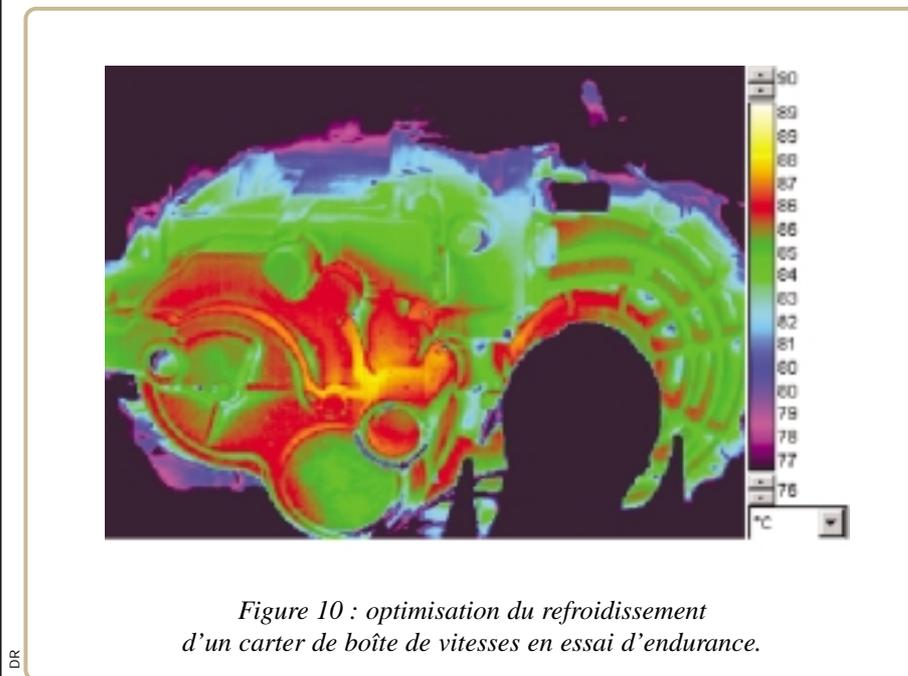


Figure 10 : optimisation du refroidissement d'un carter de boîte de vitesses en essai d'endurance.

déformation collée dans une zone de déformation uniforme. L'incertitude de mesure est généralement de l'ordre de ± 10 MPa. La thermoélasticimétrie est particulièrement intéressante dans le cas de caractérisations d'assemblages (points soudés, collage) où la complexité géométrique nécessiterait une instrumentation lourde et coûteuse avec des jauges de déformation. C'est une méthode rapide (durée d'acquisition de l'ordre de la minute) et performante pour quantifier des niveaux de contraintes et localiser les zones de concentrations de contraintes.

Toutefois, il convient de rester prudent lors de l'interprétation de cartographies de contraintes car, comme le montre l'équation caractéristique de l'effet thermoélastique ci-avant, la thermoélasticimétrie ne donne pas accès au cisaillement. Autrement dit, cette technique ne rend compte que de l'axe des abscisses du diagramme de Dang Van. On ne pourra donc pas distinguer une zone de cisaillement pur d'une zone sans contraintes. Pour avoir accès au cisaillement, il faudra compléter l'approche thermographique par l'interférométrie

de Speckle, dont l'intérêt est de fournir toutes les composantes des contraintes, mais dont l'inconvénient est de ne couvrir qu'une petite zone d'analyse (intérieur d'un cercle de 15 mm de diamètre).

Parmi les exemples d'applications récentes, donnés figures 11 à 16, la thermoélasticimétrie s'est avérée particulièrement intéressante dans deux cas :
- lors de la mise au point d'un essieu

arrière (cf. figure 15) pour lequel les calculs EF, très sensibles aux conditions aux limites, n'avaient pas rendu compte des concentrations de contraintes présentes sur les pièces prototypes, alors qu'elles avaient été mises en évidence par la thermoélasticimétrie ;
- dans la comparaison de différentes versions de moyeux de disques de freins (cf. figure 13) où les cartographies de

contraintes se sont très bien corrélées avec les résultats de durée de vie en fatigue. C'est la raison pour laquelle, en tenant compte des réserves liées à l'insensibilité aux contraintes de cisaillement, la thermoélasticimétrie est tout à fait recommandée pour réduire le nombre d'essais de fatigue par une présélection de solutions techniques en phase exploratoire de développement d'organes.

La thermoélasticimétrie : quelques applications

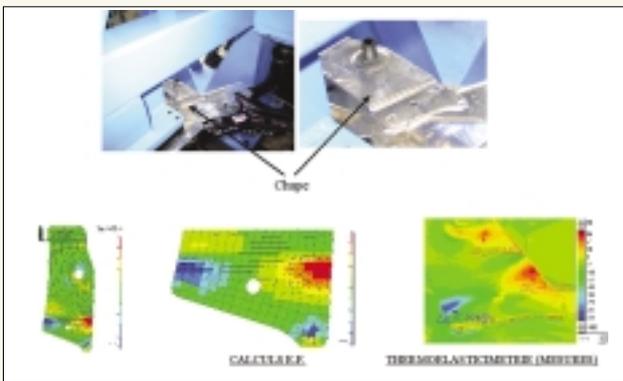


Figure 11 : berceau-moteur.

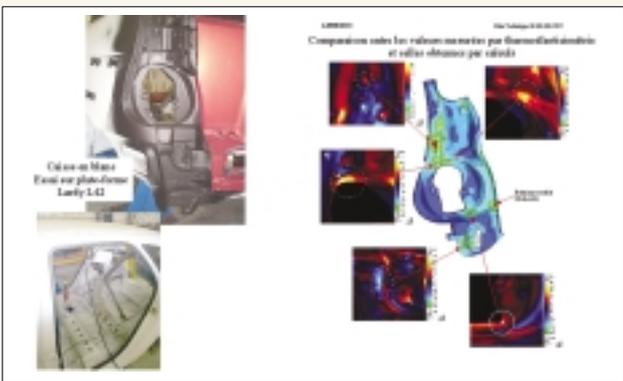


Figure 12 : caisse en blanc.

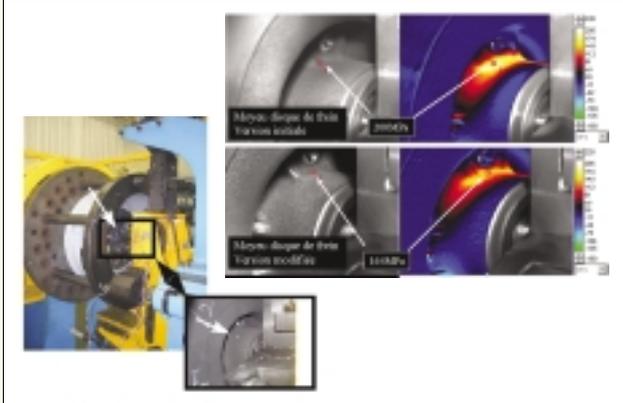


Figure 13 : deux moyeux de disques de freins.

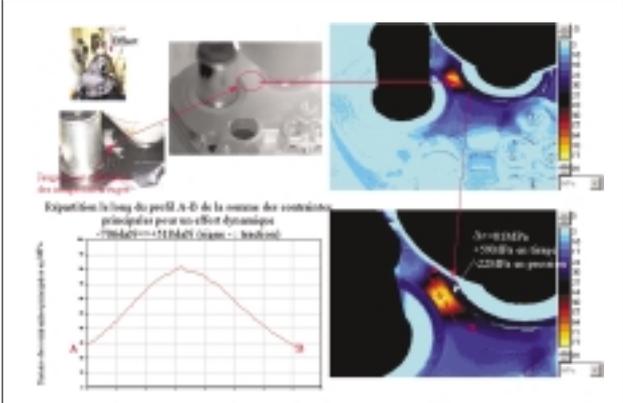


Figure 14 : jumelles d'un carter de boîte de vitesses.

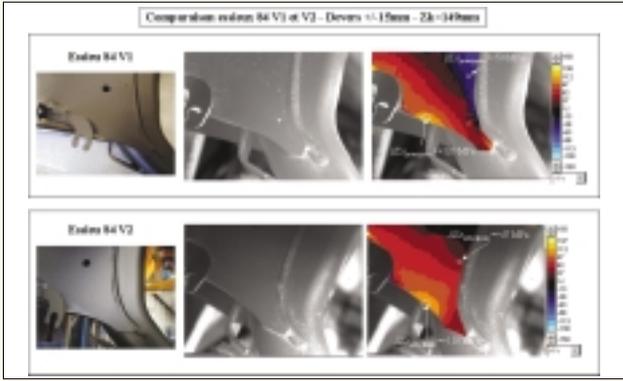


Figure 15 : deux essieux.

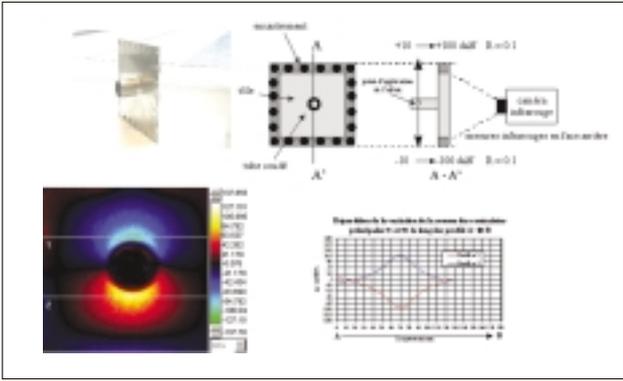


Figure 16 : assemblage soudé.

DR