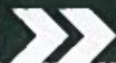


## Le contrôle non destructif

» RÉALISÉ PAR



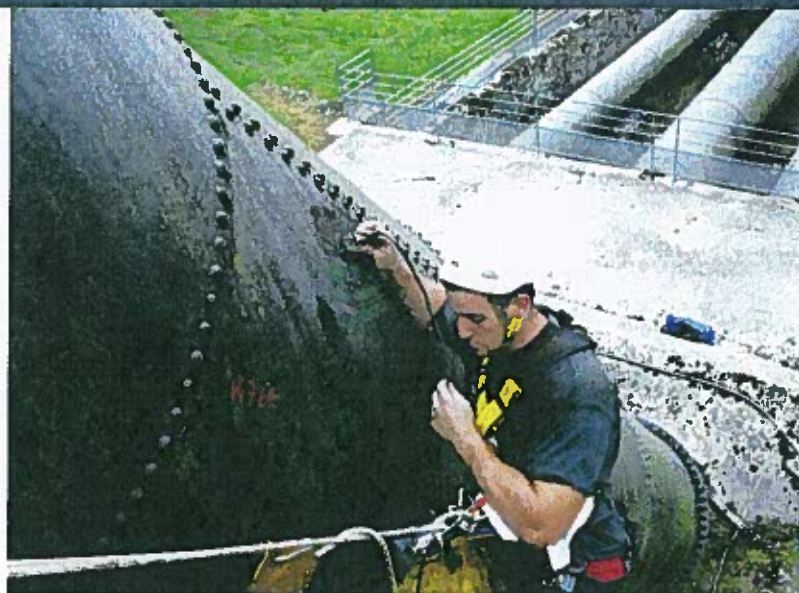
» HENRI WALASZEK

EXPERT RÉFÉRENT DU CETIM  
POUR LE CONTRÔLE  
NON DESTRUCTIF

Après avoir étudié la physique des ultrasons, Henri Walaszek a travaillé pendant dix ans dans l'industrie.

Il s'est d'abord consacré au développement d'appareils de contrôle automatique d'oléoducs par l'intérieur, avant de s'intéresser aux applications des ultrasons et des courants de Foucault chez un constructeur de matériel de contrôle non destructif.

Il a rejoint le Cetim il y a vingt ans. Il y est actuellement responsable du développement de techniques de contrôle non destructif innovantes.



Compte tenu du contexte économique et de la demande de qualité croissante, les industriels ont besoin de fiabilité et de traçabilité accrues dans les process de production de leurs compo-

sants, sans que cela n'affecte leur prix de revient! C'est pourquoi les contrôles non destructifs trouvent naturellement leur place, pour peu qu'ils soient rapides et précis.

Encore faut-il choisir la bonne méthode, d'autant que le renforcement des exigences relatives à la sécurité des personnes pousse les industriels à chercher des alternatives aux techniques de radiographie par rayonnements ionisants, de moins en moins bien tolérées.

C'est pourquoi les différentes méthodes basées sur l'utilisation des ultrasons, la thermographie et l'émission acoustique sont en forte progression. ✕



# Voir à l'intérieur de la matière

**Ultrasons multi-éléments, ultrasons TOFD, ondes guidées, thermographie infrarouge active, émission acoustique: les technologies de contrôle non destructif évoluent vers une meilleure efficacité. Il est important de choisir la bonne méthode en fonction des matériaux et de la configuration des composants et structures à contrôler. La montée en puissance de la simulation numérique de ces contrôles permet de mieux les préparer et de les optimiser.**

**L**es contrôles non destructifs font aujourd'hui partie intégrante des processus de production industriels pour garantir la qualité des structures et composants produits. On leur demande d'être à la fois rapides, simples à utiliser, précis et fiables, sans impacter le prix de revient des produits.

Une quadrature du cercle qui a imposé aux fabricants de matériels spécialisés d'innover pour faire face à ces demandes récentes. Leurs nouveaux produits sont souvent dérivés des techniques médicales, qui évoluent plus vite que le contrôle industriel, grâce à un marché d'un volume beaucoup plus important et homogène à l'échelle planétaire. Ainsi, le développement de détecteurs à capteurs multi-éléments, combinés à des numériseurs rapides et à la disponibilité de mémoires numériques de volume considérable a permis de créer des scanners à rayons X et des échographes ultrasonores pour l'industrie médicale, et ceci depuis près de trente ans... Des technologies équivalentes sont désormais disponibles en contrôle non destructif. Elles sont en cours de diffusion auprès des professionnels du secteur. Ceci se traduit par une offre importante, notamment en radiographie numérique et en systèmes de contrôle par ultrasons multi-éléments. D'autres applications bénéficient également de ces développements « numériques », tout en exploitant des capteurs analogiques. C'est par exemple le cas de la méthode ultrasonore de dimensionnement de fissure par mesure du temps de vol de l'onde diffractée (Time of-Flight Diffraction - TOFD).

Les exigences de fiabilité et de sécurité rendent de plus en plus nécessaire l'utilisation de méthodes non destructives de contrôle pour « voir » à l'intérieur de la matière, c'est-à-dire examiner son hétérogénéité, vérifier sa santé, qualifier ses composants et déterminer son aptitude au service. En effet, les composants mécaniques sont poten-

## Les méthodes de contrôle non-destructif

### MÉTHODE SURFACIQUE

- Contrôle visuel ● Ressuage ● Magnétoscope ● Courants de Foucault
- Thermographie ● Thermographie infrarouge ● Bruit ferromagnétique

### MÉTHODE VOLUMIQUE

- Radiographie ● Ultrasons

### MÉTHODE GLOBALE

- Émission acoustique

Les contrôles non-destructifs regroupent une multitude de méthodes. Nous avons rassemblé dans ce dossier celles qui ont connu récemment le plus d'avancées. Elles sont indiquées en rouge.

tiellement l'objet d'anomalies et de dispersion de caractéristiques de natures diverses. Ces anomalies peuvent consister soit en la présence de défauts ou d'impuretés dans la matière, soit dans des écarts métrologiques (perte d'épaisseur).

Les méthodes de contrôle non destructif permettent de diagnostiquer l'état des composants à différents stades: en fabrication, en cours d'utilisation, ou enfin au cours d'expertises quand survient une avarie. Ces méthodes sont indirectes, c'est-à-dire qu'elles ne donnent pas accès, comme la métrologie, aux caractéristiques dimensionnelles des anomalies. Le dimensionnement des anomalies dans la matière peut donc se faire selon des pratiques qui font l'objet de normalisation. Ainsi les méthodes de contrôle non destructif représentent un outil important pour aider les industriels à qualifier leurs composants mécaniques et leurs équipements et déterminer leur aptitude à l'emploi. On les classe en différents groupes, selon que l'on inspecte la surface du composant, son volume, ou que l'on recherche un contrôle global de la structure. Elles permettent de détecter une signature appelée « indication », qui révèle des anomalies du composant (fissure, corrosion, inclusion, délaminage...). La mise en regard des caractéristiques, notamment géométriques ou dimensionnelles, avec les critères d'acceptation normalisés permet ou non de qualifier l'indication en défaut.

Certaines de ces méthodes ont fait l'objet d'avancées notables dernièrement, que nous avons positionnées dans le paysage des contrôles non destructifs.

## 1. LA RADIOGRAPHIE

### Pour détecter et positionner en 3D une anomalie

La radiographie permet, comme en médecine, de détecter par transparence les anomalies dans les composants contrôlés. L'information est restituée sous forme de projection plane, sur un film radiographique, ou sous forme d'image numérisée. La méthode permet de dimensionner dans une certaine mesure les indications, mais ne permet pas de positionner facilement ces indi-



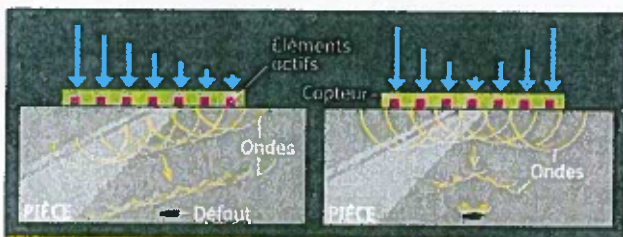
cations en profondeur. La tomographie, quant à elle, est une évolution de la radiographie, qui permet de positionner les indications en trois dimensions dans la structure de la pièce. Ces techniques trouvent leur limitation dans les épaisseurs inspectables dans le cas des métaux denses, tels que l'acier.

## 2. LES ULTRASONS

### Pour dimensionner les défauts dans la matière

Les ultrasons permettent de contrôler les matériaux jusqu'à plusieurs centaines de millimètres d'épaisseur et transparents acoustiquement, tels que la plupart des métaux, ainsi que de nombreux plastiques et composites. Ils permettent de dimensionner les indications et de les positionner dans le volume de la pièce. La limitation des ultrasons réside dans la nécessité d'avoir

**Fig. 1**  
Le principe du capteur multi-élément



Chaque capteur est constitué d'une série d'éléments actifs - piézoélectriques ou piézocomposites - électriquement et acoustiquement indépendants. En jouant sur le moment d'envoi du signal par chaque élément et son intensité (en haut), on peut faire varier l'angle de réfraction et modifier la distance focale du capteur. On dispose ainsi virtuellement d'un grand nombre de capteurs mono-éléments, ce qui accélère le contrôle. L'arrangement des capteurs multi-éléments peut prendre de multiples

formes (en bas) suivant le type de contrôle et la configuration de la zone à contrôler. Ils sont caractérisés par leur nombre, leurs dimensions et leur espacement.



#### » CE QU'IL FAUT RETENIR

- » **Les évolutions technologiques** dans les domaines des capteurs, de l'acquisition des mesures, et de leur traitement ont profondément modifié l'offre en matière de contrôle non destructif. Elles permettent d'imager les composants contrôlés.
- » **Les capteurs multi-éléments** affinent les investigations et offrent des possibilités innovantes de contrôle, avec des prix qui baissent et des capacités mémoires qui explosent.
- » **Le développement du numérique** facilite l'apparition d'une offre de simulation permettant d'optimiser la préparation des contrôles dès la phase de conception des équipements.

de bons états de surfaces pour appliquer les sondes ultrasonores, et celle d'utiliser un gel de couplage pour transmettre les ultrasons au composant inspecté. Les géométries complexes des pièces peuvent représenter une limitation d'usage plus forte qu'en radiographie.

#### A. Les multi-éléments cartographient les formes complexes

La technique des ultrasons multi-éléments (en anglais Phased Array), qui est une évolution des ultrasons conventionnels, permet de réduire les temps d'inspection et d'améliorer la traçabilité des données grâce à la réalisation de cartographies. Les ultrasons multi-éléments sont utilisés plus particulièrement pour le contrôle de structures de formes complexes, ou de zones difficilement accessibles, à la fois en fabrication et en maintenance. La technique trouve notamment des applications dans le contrôle de soudures, de tubes, d'arbres à sections multiples ou encore la cartographie d'épaisseur (recherche de corrosion).

##### » PRINCIPE DU CONTRÔLE (Fig. 1)

L'examen ultrasonore par capteurs multi-éléments repose sur les mêmes principes physiques que le contrôle par ultrasons conventionnels. Il consiste à mettre en évidence et à exploiter les signaux renvoyés par des discontinuités dans la pièce contrôlée. La particularité de l'examen, par rapport à un examen ultrasonore conventionnel, repose sur l'utilisation de capteurs ultrasonores multi-éléments.

Ainsi, grâce à l'électronique, la technologie multi-éléments permet notamment, de faire varier l'angle de réfraction et de modifier la distance focale du capteur en appliquant différentes lois de retards au réseau d'éléments. Elle permet donc, avec un seul capteur multi-éléments, de disposer virtuellement d'un grand nombre de capteurs mono-élément. Les capteurs multi-éléments sont définis selon l'agencement des éléments constituant le réseau, par exemple linéaire, matriciel, annulaire ou







encerclant. L'arrangement le plus courant est le traducteur à réseau linéaire, pour lequel les éléments sont agencés selon une ligne droite.

**B. Les TOFD repèrent des fissures sur des pièces en acier de 6 à 300 mm**

La méthode ultrasonore de dimensionnement de fissures par mesure du temps de vol de l'onde diffractée (Time-of-Flight Diffraction - TOFD) permet le dimensionnement et la caractérisation des anomalies dans un matériau.

La technique repose sur l'exploitation des signaux diffractés. Elle est moins sensible que les ultrasons traditionnels au type, à l'emplacement, à la géométrie et à l'orientation des anomalies. Cette technique peut être mise en œuvre sur tous les aciers au carbone faiblement alliés. Elle s'applique aux pièces d'épaisseur comprise entre 6 et 300 mm, pour lesquelles son efficacité a été prouvée. En dehors de cette page, une démonstration est nécessaire.

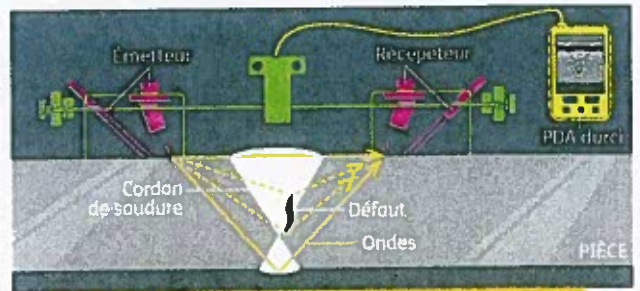
Les deux principales applications du TOFD sont le contrôle de soudures et la recherche de corrosion. Néanmoins, l'application du TOFD la plus usuelle aujourd'hui concerne le contrôle de joints soudés à pleine pénétration de géométrie simple sur plaques, tubes et récipients. Le stockage des données sous forme de cartographies B-Scan est un avantage indéniable du contrôle TOFD, puisqu'il permet une bonne traçabilité des données.

► PRINCIPE DU CONTRÔLE (Fig. 2)

L'examen ultrasonore TOFD utilisant la diffraction ultrasonore comme méthode de détection de défauts consiste à mettre en évidence et à exploiter les signaux diffractés par des discontinuités dans la pièce contrôlée.

Lorsque l'onde ultrasonore rencontre une discontinuité (fissure par exemple), une partie de l'énergie incidente est réfléchiée, tandis qu'une autre partie de l'énergie, beaucoup plus faible, est diffractée par les bords de la discontinuité. C'est cette partie diffractée qui est exploitée dans la technique TOFD. Généralement, un contrôle TOFD est effectué avec deux transducteurs piézo-électriques à ondes de compression et à faisceau de grande ouverture : un émetteur et un récepteur placés symétriquement par rapport au cordon de soudure.

**Fig. 2**  
**Le principe de TOFD**



Le contrôle TOFD est effectué avec un émetteur et un récepteur piézo-électriques à ondes de compression et à faisceau de grande ouverture placés symétriquement par rapport au cordon de soudure. Lorsque l'onde ultrasonore rencontre un défaut (en pointillé), une partie de l'énergie incidente est réfléchiée tandis qu'une autre partie de l'énergie, beaucoup plus faible, est diffractée par les bords de la discontinuité. C'est cette partie diffractée qui est exploitée dans la technique TOFD. L'émetteur et le récepteur, solidarisés par un mécanisme qui maintient une distance et un alignement constant entre eux, sont déplacés parallèlement à l'axe de la soudure. Les pics sur la courbe indiquent la présence d'un défaut.



**C. Les ondes guidées contrôlent les structures de grande longueur**

La technologie des ondes guidées permet de réaliser l'inspection complète de tubes, pipes, câbles ou plaques de grandes dimensions. Cette technique est plus dédiée au contrôle en maintenance quand les défauts détectés sont dus à la corrosion ou à l'érosion. La mise en place du système est rapide. Cela permet, par exemple, de contrôler un tube de 60 mètres en quelques minutes seulement.

Les sondes sont placées en contact sur toute la circonférence du tube et émettent sur 360°. La direction de

INFOGRAPHIE - F. ROBERT, D.R.

**Détection de défauts de surface sur un moyeu forgé par thermographie active**



- a. Avec excitation par lampe flash - défaut sur la face plane
- b. Avec excitation par induction - défaut sur la face plane
- c. Avec excitation par lampe flash - défaut dans le congé de raccordement



propagation des ondes est choisie par l'opérateur. Conséquence : pour une position de sonde donnée, le contrôle peut se faire dans deux directions. Le contrôle est effectué en mode pulse-écho, c'est-à-dire par analyse des échos provenant de la réflexion, comme en ultrasons classique).

► PRINCIPE DU CONTRÔLE (Fig. 3)

Les ondes ultrasonores guidées sont générées par effet piézoélectrique ou par effet magnétostrictif et se propagent suivant l'épaisseur (entre les parois) de la canalisation ou de la plaque. La gamme de fréquences utilisée pour ce type d'ondes va de quelques dizaines à quelques centaines de kilohertz.

### 3. LA THERMOGRAPHIE INFRAROUGE ACTIVE

#### Pour révéler des défauts surfaciques ou sub-surfaciques

Parmi les méthodes de contrôle non destructif avancées, on retrouve également la thermographie, qui est une méthode surfacique permettant un contrôle global et sans contact sur des matériaux métalliques ou composites. La thermographie infrarouge s'est imposée comme la méthode de référence dans de nombreuses applications telles que le contrôle d'installations électriques ou encore le contrôle de l'isolation thermique des bâtiments. Ces dernières années, les évolutions du matériel et des outils informatiques ont permis également le développement de la thermographie en tant que méthode de contrôle non destructif à part entière.

► PRINCIPE DU CONTRÔLE (Fig. 4)

En soumettant l'élément à contrôler à une excitation extérieure maîtrisée et en analysant la propagation de la chaleur dans la zone examinée, il est possible de mettre en évidence des défauts surfaciques ou sub-surfaciques telles que des fissures, des délaminages ou de la corrosion. On parle alors de thermographie infrarouge active.

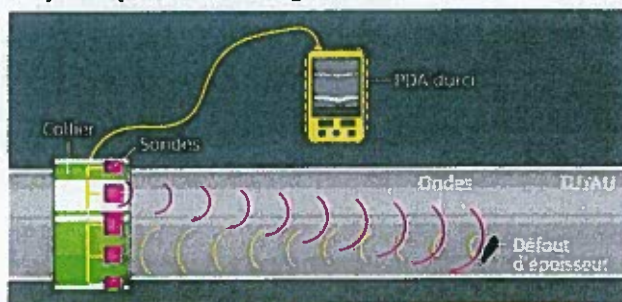
### 4. L'ÉMISSION ACOUSTIQUE

#### Pour suivre la progression de l'endommagement en temps réel

Enfin, on retrouve dans les méthodologies avancées les méthodes dites globales telle l'émission acoustique (EA). Elle est bien adaptée aux applications de vérification de l'intégrité des grandes structures en minimisant fortement les temps d'intervention et les arrêts coûteux. C'est une technique passive, qui permet de suivre la progression de l'endommagement en temps réel d'un composant en fonctionnement ou soumis à une sollicitation mécanique.

INFOGRAPHIE : F. ROBERT, D.R.

Fig. 3  
Le principe des ondes guidées

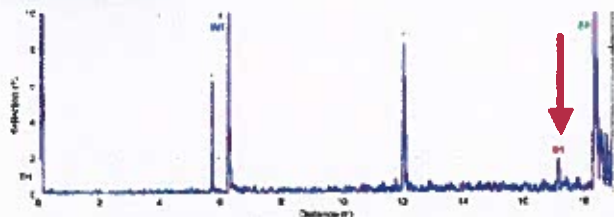


Un collier portant les sondes vient entourer l'élément de tuyauterie à contrôler. Les ondes ultrasonores, générées par effet piézoélectrique ou magnétostrictif, se propagent dans l'épaisseur de la canalisation.

La présence d'une perte d'épaisseur induit une réflexion de l'onde.

L'analyse des signaux reçus (temps de parcours et amplitude) permet de repérer les zones suspectes.

La courbe ci-dessous montre ainsi une perte d'épaisseur de moins de 1 % de la section d'un tube (12,75 pouces, épaisseur 7,1 mm) à 17 mètres de la sonde.



► PRINCIPE DU CONTRÔLE (Fig. 5)

La technique consiste à appliquer des sondes acoustiques ultrasonores à la surface du composant inspecté, avec un écartement dépendant de la propagation acoustique dans le composant. La mise en contrainte de la structure provoque l'émission d'ultrasons par les défauts « évolutifs ». Ces ultrasons sont détectés par les sondes qui maillent la surface du produit et un calcul par triangulation va permettre de repérer les zones émissives.

### 5. LE DÉVELOPPEMENT DE LA SIMULATION

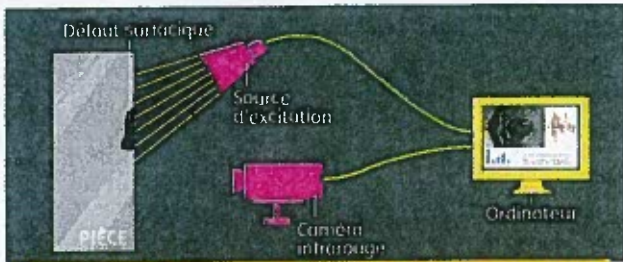
#### Pour prévoir dès sa conception le contrôle adapté à un composant

L'évolution des méthodes de contrôle vers le « numérique » se traduit également par le développement d'une offre en matière de simulation. Objectif : prévoir la réponse du composant contrôlé à la méthode de contrôle envisagée. La simulation s'est beaucoup développée. Elle existe désormais au stade industriel, notamment en courants de Foucault, ultrasons et radiographie X.

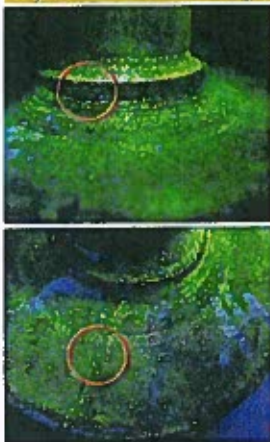




**Fig.4**  
**Le principe de la thermographie infrarouge**



Un flux de chaleur généré par méthode optique, acoustique, électrique ou par déformation mécanique « éclaire » l'élément à contrôler.



L'analyse de la propagation de la chaleur dans la zone examinée met en évidence des défauts superficiels ou subsurfaceux telles que fissures, délaminages ou corrosion. La méthode d'échauffement choisie, le positionnement de la source et la durée de l'échauffement sont fonction du matériau à inspecter, de son épaisseur ainsi que de la nature, de la position et de l'orientation du défaut attendu. Les photos mettent en évidence des fissures vues par magnétoscopie sur la face plane d'un moyeu forgé et dans le congé de raccordement.



On peut citer le logiciel Civa, développé par le CEA-List et commercialisé par Extend. Il permet la simulation des principales techniques de contrôle non destructif et sera aussi bientôt utilisable pour les techniques des ondes guidées et de l'émission acoustique. Ces deux modules permettent les calculs de champs ultrasonores (visualisation du faisceau émis par un transducteur, de la couverture de zone lors d'un contrôle) et la réponse des défauts (étude de l'interaction du faisceau avec des défauts, prédiction numérique des résultats d'un contrôle).

La simulation permet notamment les gains en termes d'optimisation de la préparation des contrôles, de réduction ou de suppression de la nécessité de maquettes représentatives de la pièce et d'intégration du contrôle dans la phase de conception.

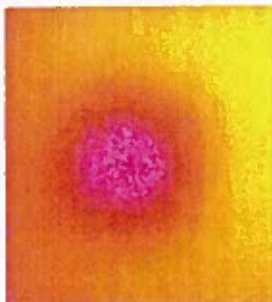
## 6. LES ÉVOLUTIONS TECHNOLOGIQUES ATTENDUES

### La compréhension des résultats des contrôles à portée des non-spécialistes

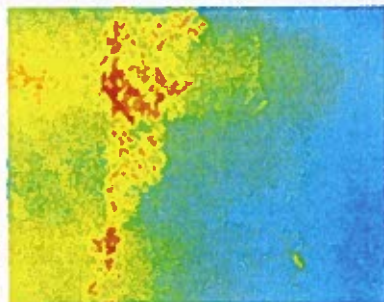
Les efforts de normalisation et de certification des opérateurs actuellement en cours devraient contribuer à la généralisation du recours aux technologies de contrôle non destructif.

Les méthodes de contrôle utilisées couramment dans l'industrie telles que la magnétoscopie, le ressuage, les ultrasons « traditionnels » sans imagerie, la méthode ultrasonore TOFD, et la radiographie sont normalisées au niveau Européen. Des travaux sont en cours au niveau européen pour normaliser le contrôle ultrasonore « multi-élément », ce qui aura pour effet d'augmenter son attractivité, notamment pour le contrôle des appareils à pression. On citera dans ce contexte le rôle

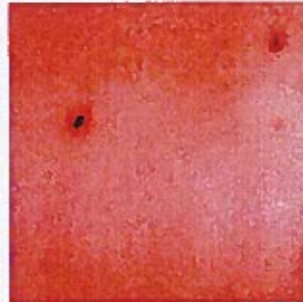
### Application de la thermographie infrarouge pour le contrôle de matériaux composites



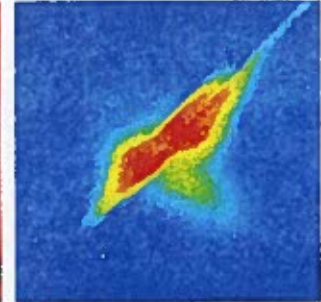
a. Défaut de collage dans une structure nid d'abeilles ou nid d'abeilles écrasé.



b. Manque de résine dans un composite à renforts en fibres de carbone (CFRP).



c. Infiltration d'eau dans une structure nid d'abeilles en Normex méta-aramide de DuPont.



d. Délaminage dans un composite à renforts en fibres de carbone (CFRP) après impact.