

Procédure de comparaison et de classement pour une évaluation objective de méthodes d'END par thermographie IR

Daniel BALAGEAS^{1*}, Jean-Michel ROCHE², François-Henri LEROY²

¹ Institut de Mécanique et d'Ingénierie de Bordeaux I2M, Dép. TREFLE (ENSAM ParisTech - CNRS - Univ. de Bordeaux), Esplanade des Arts et Métiers, 33305 Talence cedex

² ONERA, Département Matériaux et Structures Composites, BP 72, 92322 Châtillon cedex

* correspondant : daniel.balageas@u-bordeaux.fr

Résumé - Le but du présent travail est l'établissement d'une procédure de comparaison et de classement multicritère des méthodes d'évaluation non destructive (END) thermographique, dans le but de réaliser un progrès significatif en termes d'objectivité par rapport aux rares études comparatives existant dans la littérature. La comparaison reposant sur l'utilisation de trois critères au lieu du seul rapport contraste-sur-bruit (C/B) et considérant plusieurs centaines de signatures de défauts, conduit par une suite de compressions de données à une note unique caractérisant le mérite de chacune des méthodes considérées. La procédure est illustrée par son application à la comparaison et au classement de quatre méthodes thermographiques bien connues appliquées à une expérience impulsionnelle en face avant d'une plaque de composite carbone-époxy contenant divers défauts artificiels simulant des délaminages.

Nomenclature

C_A	amplitude du contraste créé par le défaut	D_d/z_d	facteur de forme
D_d	extension latérale du défaut, m		<i>Symbole grec</i>
z_d	profondeur du défaut, m	Σ_s	écart-type du signal dans la zone saine

1. Contexte

Le choix objectif d'une méthode de traitement optimal des données issues d'un contrôle non destructif par thermographie infrarouge se pose tant pour le chercheur que pour l'industriel. En effet, si la mise en œuvre expérimentale de la thermographie stimulée est relativement maîtrisée, il n'en est pas de même de l'obtention d'images de qualité permettant de déterminer l'existence, l'emplacement, l'étendue, voire la nature de tous les défauts présents dans la structure inspectée. Ainsi, les mêmes thermogrammes bruts enregistrés expérimentalement peuvent mener, selon la méthode de traitement choisie, à des cartographies de qualité similaire à celle des images ultrasonores, ou, au contraire, à des images de peu d'utilité. La difficulté du choix de la meilleure méthode, tout du moins de la mieux adaptée au type de structures et de défauts à détecter, est d'autant plus grande que les méthodes de traitement sont nombreuses et font rarement l'objet d'études comparatives approfondies, objectives et proprement documentées.

2. Approche choisie

L'objectif de la présente étude est d'élaborer une méthodologie visant à comparer plusieurs méthodes d'END exploitant la réponse thermique d'une structure avec défauts, soumise à une sollicitation, ici de type flash, avec détection en face avant. La philosophie est la suivante : i) le diagnostic repose sur l'examen d'une ou plusieurs images en échelle de gris élaborées par ces diverses méthodes ; ii) les défauts sont multiples et représentatifs de la variabilité en taille, profondeur et sévérité de défauts réels de type délaminage ou décollement ; iii) les indicateurs de qualité des images sont au nombre de trois : rapport contraste-sur-bruit (C/B), netteté du contraste thermique créé par le défaut et représentativité de son extension latérale à mi-hauteur

pour une évaluation de sa dimension latérale ; iv) la comparaison conduit à l'attribution pour chaque méthode d'une note unique, et partant, à leur classement par ordre de mérite.

3. Les trois indicateurs de qualité des signatures de défauts

Pour caractériser la signature du défaut, la plupart des auteurs considèrent la valeur moyenne du contraste dans la zone du défaut, alors que les limites de cette zone deviennent rapidement difficiles à détecter lorsque la profondeur du défaut augmente. La présente approche analyse le profil de contraste le long de la ligne de l'image passant par le centre du défaut. Cette analyse consiste à évaluer les trois indicateurs détaillés dans la suite (voir Fig. 1a).

3.1. Rapport contraste-sur-bruit

Le rapport contraste-sur-bruit (C/B) est défini comme le rapport entre le carré du maximum de contraste ($C_{A_{max}}^2$) et l'écart-type du signal dans la zone saine au voisinage du défaut, (σ_s^2) : $C/B = (C_{A_{max}}/\sigma_s)^2$, soit, en décibels : $C/B|_{dB} = 10 \log_{10}[(C_{A_{max}}/\sigma_s)^2] = 20 \log_{10}(C_{A_{max}}/\sigma_s)$.

Dans la pratique, deux cas sont possibles pour la recherche du maximum de contraste dans la zone défectueuse suivant que la signature du défaut présente un plateau (Fig. 1a), ou bien que son profil est de forme gaussienne (Fig. 1a'). Dans le premier cas, la ligne de base, le plateau et les bords sont localement lissés aux sens des moindres carrés par des polynômes, généralement de degré 1. La valeur lissée obtenue au centre du plateau est alors utilisée pour évaluer le contraste entre plateau et ligne de base. Lorsqu'on ne peut définir un plateau, un lissage par un polynôme de degré supérieur ou égal à 2 est réalisé et le contraste est évalué au maximum du profil lissé. Comme dans le premier cas, le bruit est assimilé au carré de l'écart-type de la ligne de base dans le voisinage de la signature du défaut, de part et d'autre de celle-ci.

3.2. Netteté des bords

La quasi-totalité des comparaisons quantitatives de méthodes d'END thermographique repose sur un unique critère, le rapport C/B , la netteté n'étant que très rarement prise en compte [1]. La difficulté de définir un critère pertinent en est peut-être la cause. Une seconde explication réside dans le fait que les comparaisons sont souvent réalisées en considérant des éprouvettes contenant des défauts de forme géométrique connue et simple (carrée ou circulaire) et de nature conduisant à des bords d'images de défauts bien marqués, ce qui facilite la détection et donne moins d'importance à la netteté de l'image. La Ref. [1] est pratiquement la seule à évaluer la netteté, l'assimilant à la valeur du gradient existant sur les bords du défaut. Les gradients sont calculés par différences finies à partir de l'intensité des pixels de cette zone frontière, suivant deux directions orthogonales (colonnes et lignes de l'image), et la netteté définie comme la racine carrée de la somme des carrés des gradients suivant ces deux directions. Cette évaluation est faite lorsque le contraste est maximum, de sorte que le rapport C/B et la netteté sont calculés au même instant. Dans le cas présent, l'indicateur de netteté est calculé à partir du profil lissé localement à l'aide de la formule donnée en Figure 1a. Cet indicateur est normalisé afin de faciliter les comparaisons entre les diverses signatures. Pour cela le saut d'amplitude entre le plateau lorsqu'il existe et la ligne de base est posé égal à l'unité pour chaque défaut. L'indicateur de calculée en considérant les deux bords du plateau pour une direction donnée (ligne ou colonne). Dans le cas d'une signature sans plateau (Fig. 1a') cet indicateur n'est pas calculable et sa valeur est supposée nulle.

3.3. Extension latérale

L'extension latérale du défaut est évaluée en l'assimilant à la largeur de la signature à mi-hauteur du plateau (voir Fig. 1a). Cette méthode ne fonctionne que si le plateau existe. En effet, son application au cas de signatures sans plateau conduit à des valeurs d'extension latérale trop erronées. Aussi, dans ce cas l'indicateur n'est pas calculé et mis égal à zéro.

L'indicateur choisi est une mesure de la précision avec laquelle l'extension latérale est ainsi évaluée. Il est égal au logarithme de l'inverse de l'erreur relative sur la dimension calculée : $\text{Log}_{10}(D_d/\Delta D_d)$.

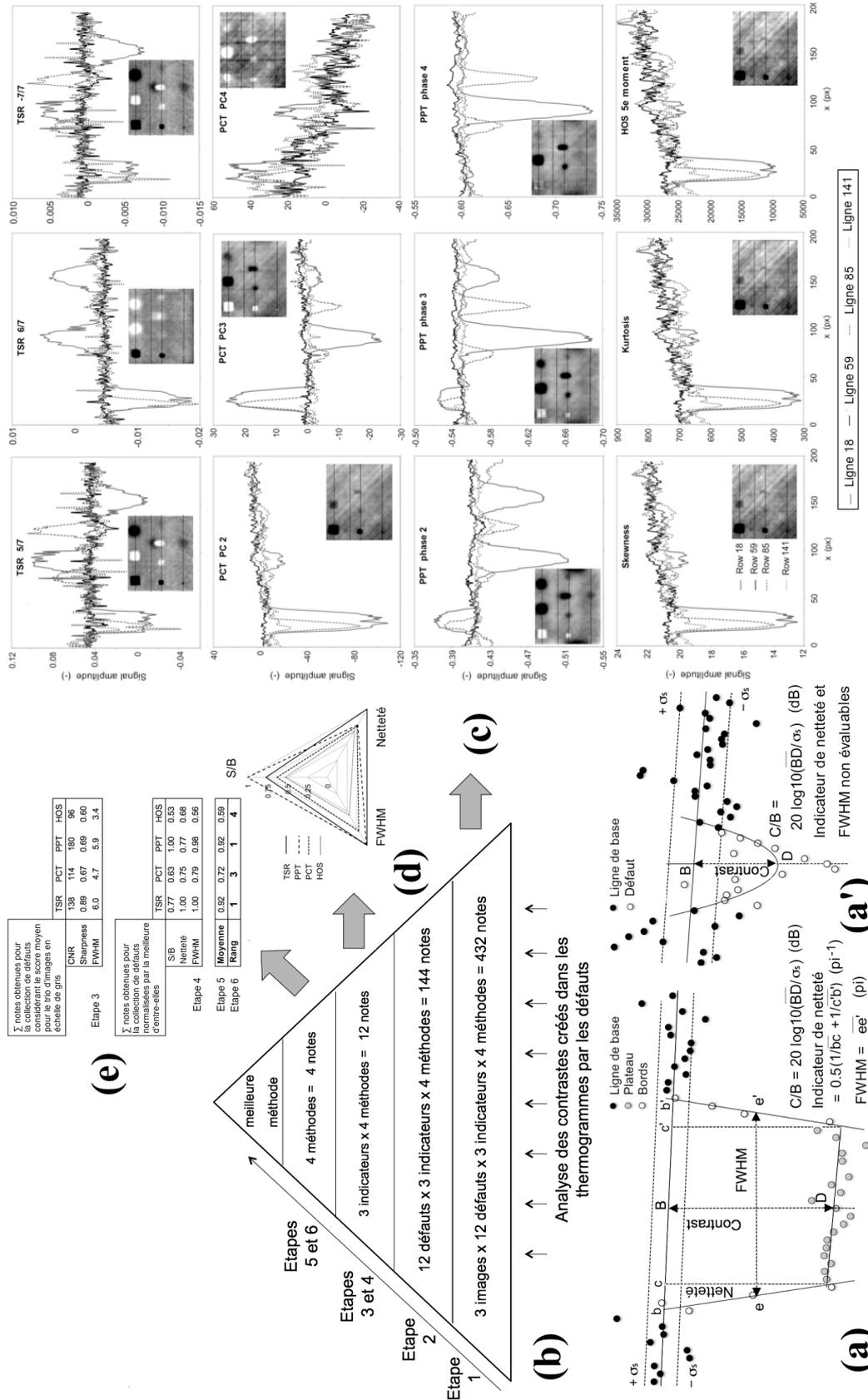


Figure 1 . Schéma général de la procédure de comparaison et de classement. (a) Analyse des signatures des défauts dans le cas d'un profil avec plateau ; (a') idem sans plateau ; (b) la compression de données en 6 étapes ; (c) les 432 signatures analysées ; (d) résultats en sortie d'étape 4 ; (e) résultats des étapes 3 à 6 conduisant au classement final.

3.4. Choix des directions dans lesquelles analyser les profils de contraste

Compte tenu de la nature des images, le plus simple est d'effectuer l'analyse des profils de contrastes suivant les lignes et les colonnes de pixels passant par le centre de chaque défaut. Cependant, afin de réduire le grand nombre d'analyses à effectuer dans le cas d'une éprouvette d'étude contenant un nombre important de défauts de toutes tailles et profondeurs, on a choisi de ne considérer que les lignes après avoir vérifié sur quelques exemples de défauts que l'analyse suivant les colonnes donnait des résultats équivalents (voir [2]).

4. Données exploitées

À titre d'illustration, la procédure est appliquée à la comparaison de quatre méthodes de traitement de données : la méthode des images de coefficients TSR (Thermographic Signal Reconstruction) [3], la méthode PPT (Pulse Phase Thermography) [4], la méthode PCT (Principal Component Thermography) [5] et la méthode HOS (Higher Order Statistics) [6]. Ces méthodes sont appliquées à un essai de thermographie impulsionnelle avec détection en face avant, sur une plaque de carbone/époxy contenant 12 inserts de Téflon. On suppose que le diagnostic est effectué par l'examen de trios d'images résultant de l'application de chacune des quatre méthodes précédentes : images de coefficients pour la méthode TSR, de composantes pour la PCT, de phases pour la PPT, et de moments statistiques pour l'approche HOS.

Les conditions expérimentales, la description de la plaque et celle des défauts, ainsi que les images élaborées par chacune des méthodes et retenues pour l'élaboration du diagnostic sont données dans des publications antérieures, en particulier dans la Ref. [3]. On ne rappelle ici, en Fig. 2, que l'implantation et les caractéristiques des défauts et l'ensemble des images en échelle de gris ainsi obtenues qui seront analysées pour comparaison.

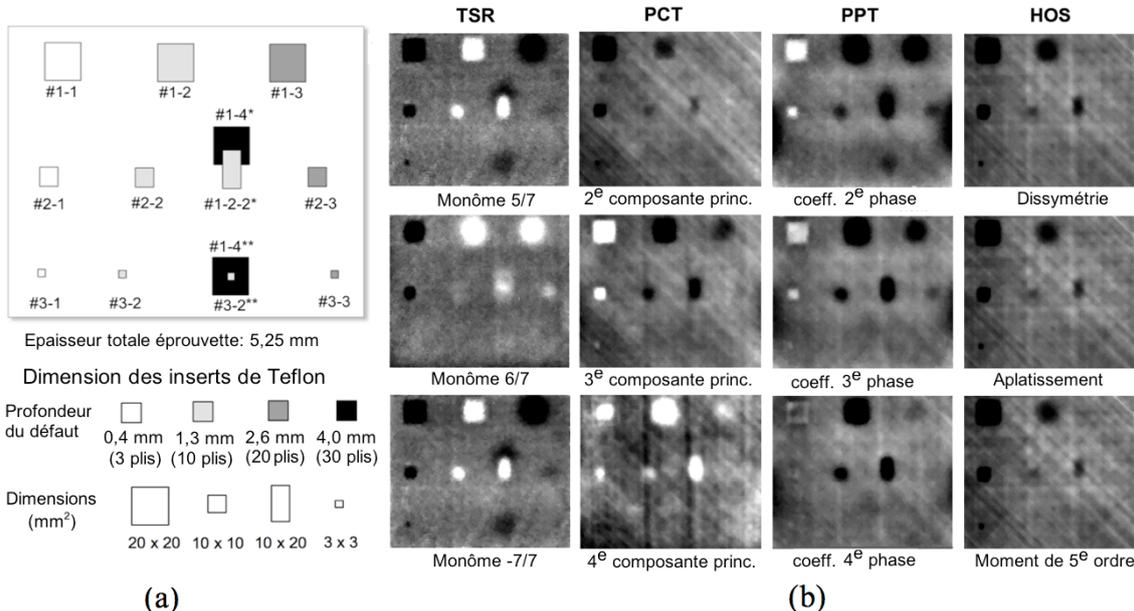


Figure 2 : (a) Plaque de carbone-époxy avec ses défauts ; (b) trios d'images obtenues par les quatre méthodes de traitement de données étudiées.

5. Description de la procédure de comparaison et de classement

5.1. Etape 1

La première étape (voir la première ligne de la Fig. 1b) consiste à évaluer les trois indicateurs par l'analyse des signatures (contrastes) des 12 défauts, et ce pour les 3 images de chacune des 4

méthodes ($3 \times 12 \times 3 \times 4 = 432$ signatures en tout) – voir Fig. 1c. Les résultats sont présentés en Fig. 3. Chaque graphe, de type radar, y donne les valeurs d'un indicateur pour l'ensemble des défauts. Chaque courbe correspond à une des trois images. La courbe enveloppe y est également présentée. Les défauts sont distribués dans le sens des aiguilles d'une montre pour des facteurs de forme décroissants, de 50 à 1,2. En pratique, dans le cas présent, les valeurs des indicateurs sont nulles pour des facteurs de forme $\leq 2,3$. Ceci ne signifie pas que ces défauts ne sont pas détectables à l'œil nu sur les images, mais que leurs indicateurs n'ont pu être calculés tant leurs signatures sortaient à peine du bruit et/ou ne présentaient pas de plateau (voir Section 3).

5.2. Etape 2

Dans un deuxième temps, la *valeur moyenne* des indicateurs pour chaque trio d'images est calculée, réduisant le nombre de données à $432/3 = 144$. Ces résultats, présentés sur la Fig. 4a, donnent un aperçu général et rapide des performances comparées des quatre méthodes examinées. Ces performances sont très variables suivant l'indicateur utilisé. Ainsi, la méthode TSR n'est pas la meilleure si l'on considère le rapport contraste sur bruit, mais elle obtient les meilleurs résultats en ce qui concerne la netteté des bords et la précision des évaluations des dimensions latérales des défauts à partir de la largeur à mi-hauteur des contrastes.

Notons qu'une variante est possible au niveau de cette deuxième étape. Elle consiste à ne pas considérer la valeur moyenne des indicateurs pour chaque trio d'images, mais plutôt la *valeur maximale*. Ce choix est mieux adapté à l'établissement d'un diagnostic élaboré sur l'examen du trio complet d'images. En effet, dans ce cas, le défaut est détecté et caractérisé même s'il n'apparaît que sur une seule des trois images. Dans le cas où l'on utiliserait la projection du trio d'images dans une base RGB, méthode nouvelle proposée dans la Ref. [3], il est plus difficile de savoir quelle variante est la meilleure. La réponse à cette question suppose une analyse adaptée aux images couleurs, ce qui nécessiterait l'utilisation d'autres indicateurs que ceux ici considérés. Notons enfin que cette question ne se pose pas dans le cas où l'on appliquerait la procédure à des méthodes conduisant chacune à une seule image en échelle de gris. Dans ce cas, valeur moyenne et valeur maximale se confondent. La Fig. 4b présente les résultats obtenus par cette variante en fin d'étape 2. Les valeurs des indicateurs sont nettement supérieures à celles obtenues en considérant les valeurs moyennes.

5.3. Etapes 3 à 6

Dans l'étape 3, la somme des notes obtenues pour la collection entière de défauts est évaluée, pour chaque méthode et chaque indicateur (12 données). Elles sont ensuite normalisées pour chaque indicateur, en les divisant par la meilleure d'entre elles (étape 4). À l'étape 5, les moyennes des valeurs normalisées sont calculées, conduisant à 4 valeurs, chacune caractérisant une méthode. L'étape ultime consiste à établir un classement sur la base de ces notes, définissant ainsi l'ordre de mérite de chacune des méthodes. Ces notes sont présentées table 1. Dans le cas présent, les méthodes TSR et PPT sont classées premières ex-æquo devant les méthodes PCT puis HOS. En utilisant pour la deuxième étape la valeur maximale obtenue pour chaque trio d'images au lieu de la valeur moyenne, on obtient des résultats proches : méthode TSR en tête et PPT en 2^e position, le reste du classement restant inchangé.

Afin d'atténuer le côté catégorique d'un simple classement, il peut être intéressant de le présenter accompagné de la visualisation graphique des résultats de l'étape 4. C'est ce qui est fait sur la Fig. 5 qui présente pour chaque indicateur les sommes des notes obtenues pour l'ensemble des défauts, normalisées par la note de la meilleure méthode pour l'indicateur considéré. Cette représentation met en valeur les points faibles et forts de chacune des trois méthodes par la position des sommets de chaque triangle et leur mérite global associé à la taille des triangles.

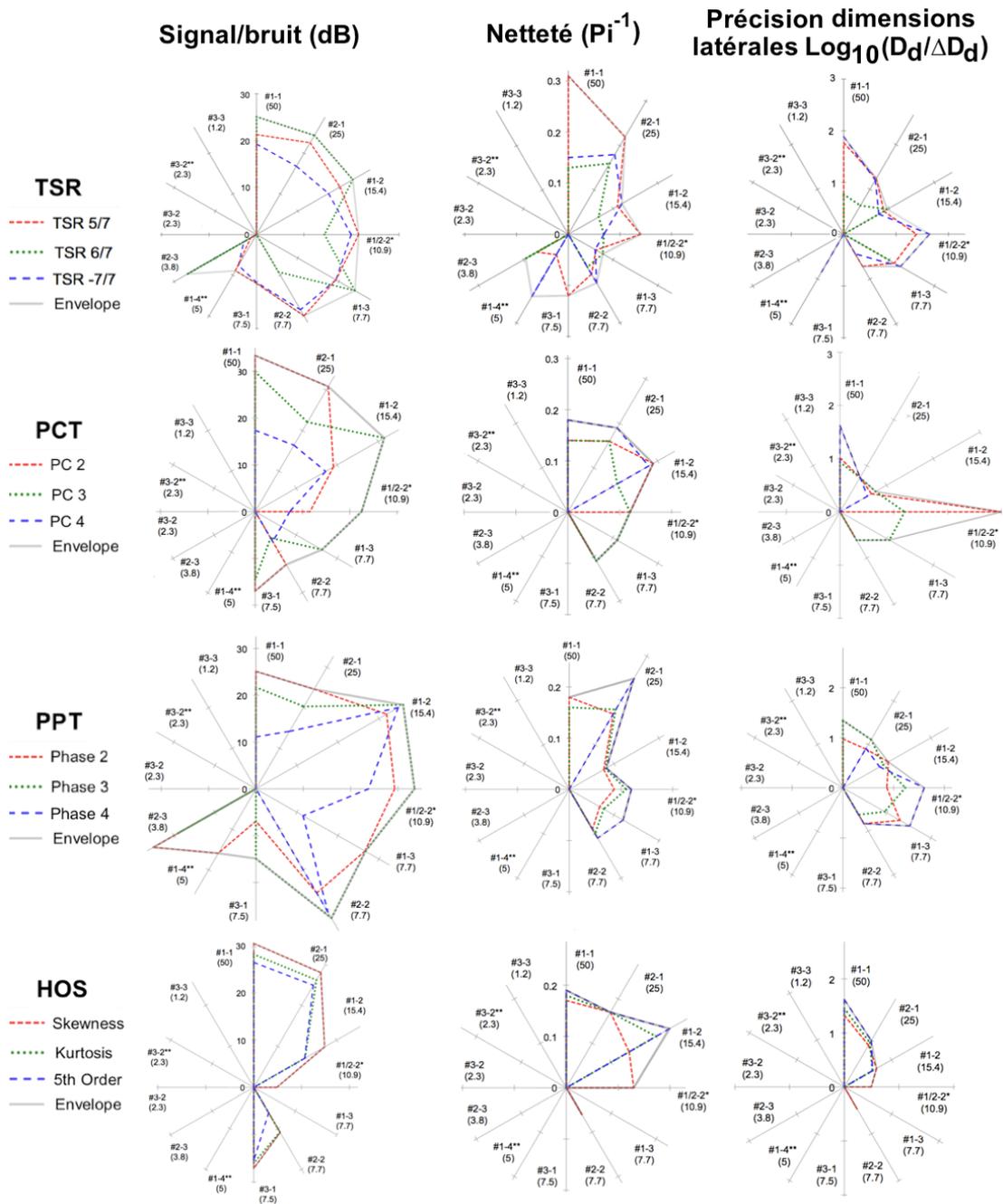


Figure 3 : Valeurs calculées des trois indicateurs pour les 432 signatures de défauts de la figure 1c.

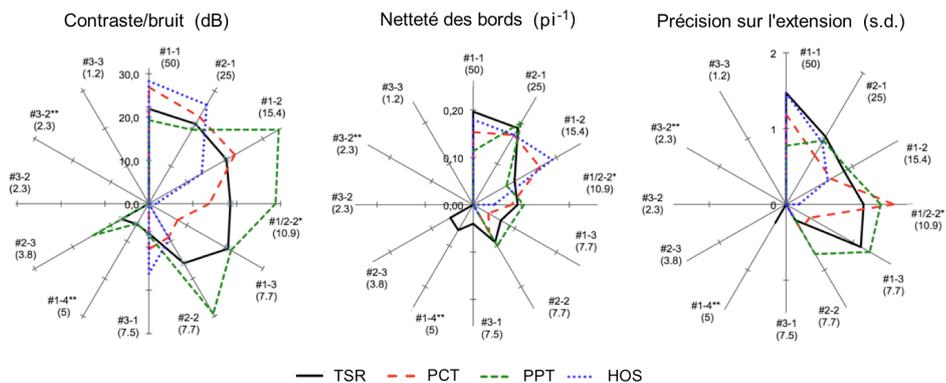


Figure 4a : Deuxième étape : évaluation de la moyenne des indicateurs pour chaque trio d'images

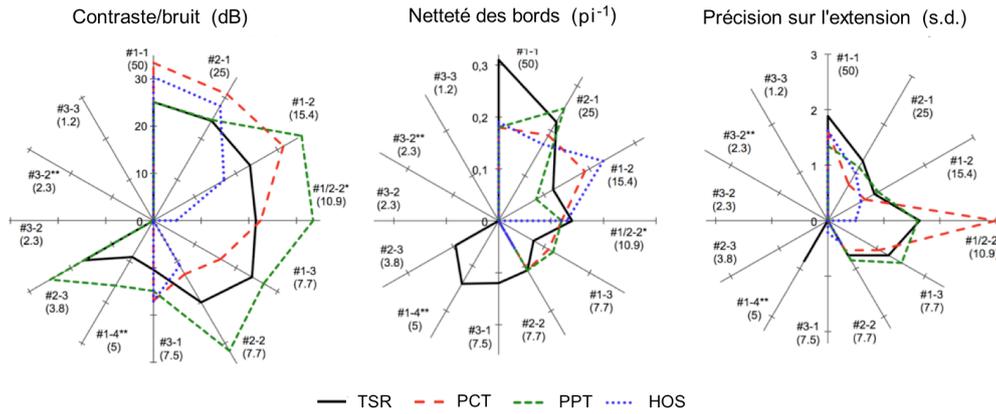


Figure 4b : Variante de la 2^e étape : évaluation du maximum des indicateurs pour chaque trio d'images.

Procédure considérant la note maximale de chaque trio		Méthodes évaluées			
Etape 3		TSR	PCT	PPT	HOS
Etape 3	C/B	174	165	234	108
	Netteté	1.33	0.90	0.86	0.78
	FWHM	8.5	7.8	7.4	4.5

Procédure considérant la note moyenne de chaque trio		Méthodes évaluées			
Etape 3		TSR	PCT	PPT	HOS
Etape 3	C/B	138	114	180	96
	Netteté	0.89	0.67	0.69	0.60
	FWHM	6.0	4.7	5.9	3.4

Procédure considérant la note maximale de chaque trio		Méthodes évaluées			
Etape 4		TSR	PCT	PPT	HOS
Etape 4	C/B	0.75	0.70	1.00	0.46
	Netteté	1.00	0.68	0.65	0.59
	FWHM	1.00	0.91	0.87	0.52

Procédure considérant la note moyenne de chaque trio		Méthodes évaluées			
Etape 4		TSR	PCT	PPT	HOS
Etape 4	C/B	0.77	0.63	1.00	0.53
	Netteté	1.00	0.75	0.77	0.68
	FWHM	1.00	0.79	0.98	0.56

Procédure considérant la note maximale de chaque trio		Méthodes évaluées			
Etape 5		TSR	PCT	PPT	HOS
Etape 5	Moyenne	0.92	0.77	0.84	0.52

Procédure considérant la note moyenne de chaque trio		Méthodes évaluées			
Etape 5		TSR	PCT	PPT	HOS
Etape 5	Moyenne	0.92	0.72	0.92	0.59

Procédure considérant la note maximale de chaque trio		Méthodes évaluées			
Etape 6		TSR	PCT	PPT	HOS
Etape 6	Classement	1	3	2	4

Procédure considérant la note moyenne de chaque trio		Méthodes évaluées			
Etape 6		TSR	PCT	PPT	HOS
Etape 6	Classement	1	3	1	4

Table 1 : Valeurs des notes attribuées au cours des étapes 3 à 6 et classement final des méthodes comparées, avec les deux variantes concernant les notes attribuées aux trios d'images (notes moyennes ou maximales) lors de la seconde étape.

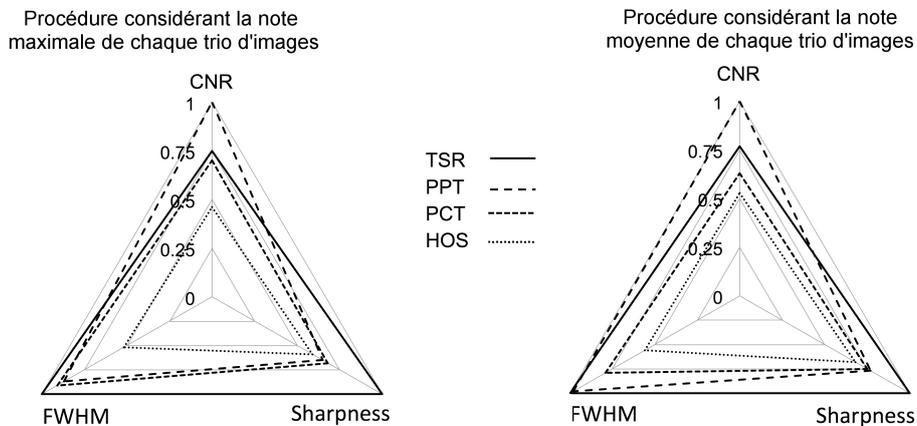


Figure 5 : Notes normalisées obtenues par chacune des méthodes pour l'ensemble des défauts, en considérant chacun des 3 indicateurs et la note maximale de chaque trio d'images (a) ou la note moyenne (b).

6. Discussion-conclusion

Il est clair que les scores obtenus dépendent des conditions expérimentales (performances de la caméra, puissance des sources, cadence image et durée de l'enregistrement...), des propriétés du matériau et du type de défauts. Tout changement de ces paramètres peut affecter les valeurs absolues de ces scores. Il paraît cependant raisonnable de penser que leur influence sur les notes normalisées et le classement serait limité.

Une autre source possible de variation des scores obtenus et du classement final est le choix, fait ici arbitrairement, de donner le même poids à chacun des trois indicateurs. Ainsi, le fait de ne considérer que le rapport contraste-sur-bruit aurait conduit à classer l'approche PPT devant la méthode TSR. Ce point ne pourrait être éclairci sans que l'on prenne en compte la physiologie de la vue et du traitement d'image effectué par le cerveau de l'observateur lorsque le diagnostic repose sur l'examen visuel des images thermiques. Dans une telle opération quels sont le rôle et l'importance des indicateurs choisis ? Voici sans doute une direction dans laquelle affiner la recherche si l'on veut optimiser la procédure proposée. Notons également que le choix de ne considérer qu'une seule image par méthode au lieu de trois pourrait amener des conclusions différentes.

Quoiqu'il soit, dans le cas présent, notons que le classement établi place la méthode TSR seule en tête, ou première ex-æquo avec la méthode PPT ; suivent les approches PCT et HOS, respectivement troisième et quatrième. Ces résultats recourent les conclusions qualitatives d'une étude antérieure traitant les mêmes données expérimentales [3].

En conclusion, la procédure ici proposée constitue une amélioration dans la façon de comparer et classer par ordre de mérite des méthodes d'END thermographique. Elle assure une objectivité accrue et une flexibilité par la prise en compte de trois indicateurs (rapport contraste-sur-bruit, netteté des bords et précision sur le dimensionnement des défauts) au lieu du seul rapport contraste-sur-bruit, classiquement utilisé.

L'illustration qui en est faite s'intéresse au cas particulier où le diagnostic est réalisé à partir d'un trio d'images indépendantes du temps, obtenues par quatre méthodes différentes, interprétant la même réponse thermique impulsionnelle d'une plaque de carbone-époxy avec défauts. La procédure pourrait cependant s'appliquer à d'autres configurations, par exemple lorsque l'ensemble de l'information est contenue dans une seule image au lieu de trois, ou pour des sollicitations thermiques différentes. Elle pourrait également être utile dans l'optimisation d'une méthode unique. A l'inverse, elle pourrait servir à comparer entre elles des techniques d'imagerie très différentes, par exemple ultrasonores, magnétiques et thermiques.

Références

- [1] Usamentiaga R, Venegas P, Guerediaga J, Vega L, López I. A quantitative comparison of stimulation and post-processing thermographic inspection methods applied to aeronautical carbon fibre reinforced polymer. *Quant. Infrared Thermogr. J.* 2013;10(1):55-73.
- [2] D.L. Balageas, J.-M. Roche, H.-H. Leroy. A procedure for the comparative assessment of thermal NDE data processing techniques: application to TSR, PPT, PCT and HOS methods. Soumis à *Mat. Eval.*, 2016.
- [3] J.-M. Roche, F.-H. Leroy, D.L. Balageas, Images of thermographic signal reconstruction coefficients: a simple way for rapid and efficient detection of discontinuities. *Mat. Eval.* 2014;72(1): 73-82.
- [4] X. Maldague, S. Marinetti. Pulse phase infrared thermography, *J. Appl. Phys.*, 1996;79:2694-2698.
- [5] N. Rajic. Principal component thermography for flaw contrast enhancement and flaw depth characterisation in composite structures, *Comp. Struct.*, 2002;58(4):521-528.
- [6] F.J. Madruga, C. Ibarra-Castanedo, O.M. Conde, J.M. López-Higuera, X. Maldague, Infrared thermography processing based on higher-order statistics, *NDT&E Int.*, 2010;43:661-666.