

# L'analyse statistique des faciès de rupture : la science de la donnée au service de l'analyse de défaillance

Nicolas Auvray, Naman Negi, Simon Trancart et Laurent Ponson, Tortoise

Ces dernières années ont vu l'émergence d'une nouvelle technique de l'ingénieur qui repose sur l'analyse statistique du relevé topographique d'une surface de rupture. Si celle-ci s'inscrit dans la lignée de la fractographie, science développée au milieu du siècle dernier pour interpréter les formes créées lors de la rupture d'une pièce, elle en repousse les limites. En apportant des informations jusqu'ici inaccessibles sur les propriétés mécaniques d'un matériau et les conditions de sa rupture, elle permet dorénavant de remonter pas à pas le fil d'une avarie pour en déterminer ses causes. Et ainsi guider le développement de matériaux et de structures plus sûres.

Comprendre les avaries mécaniques revêt un enjeu majeur pour l'industrie. La fractographie, technique sur laquelle s'appuient les experts pour interpréter les formes créées par la rupture d'une pièce, est un outil indispensable pour l'analyse de ces défaillances. Toutefois, les techniques conventionnelles de fractographie ne fournissent qu'une information limitée, le plus souvent qualitative. Les données extraites par l'analyse statistique de la topographie des faciès de rupture complètent les informations recueillies par les méthodes traditionnelles. Elles enrichissent ainsi la panoplie des experts pour la détermination des causes racines d'une défaillance. Dans cet article, nous inscrivons cette nouvelle technique de fractographie statistique dans une perspective historique, en commençant par décrire les méthodes plus traditionnelles, avant de décrire la nature des données qu'elle produit et son potentiel en termes de champs applicatifs.

## La fractographie standard

La fractographie est l'étude des surfaces de rupture des matériaux rompus, de manière contrôlée ou accidentelle<sup>[1,2]</sup>. Intimement liée à la mécanique des matériaux, elle n'émerge véritablement qu'après la seconde guerre

mondiale. Cette technique était considérée comme une spécialité mineure, jusqu'à ce que l'industrie aéronautique comprenne l'intérêt d'observer les faciès de rupture lors de l'étude des accidents. C'est en 1944 que Carl Zapffe introduit pour la première fois le terme fractographie au cours de la 26<sup>e</sup> *Convention Annuelle de l'American Society for Metals*<sup>[3]</sup>. Il faut toutefois attendre 30 ans supplémentaires pour que soit publié l'ouvrage *Fractography and Atlas of Fractography* dans *Metals Handbook* [4], qui est entièrement consacré à cette technique nouvelle. La fractographie devient alors une méthode incontournable pour comprendre la rupture inopinée d'une pièce. Dans les années soixante-dix, la fractographie s'émancipe des laboratoires exclusivement dédiés à l'analyse des défaillances et s'introduit dans d'autres activités industrielles. La compréhension fine du mode de rupture d'une pièce devient une composante importante du développement de produits plus fiables. Des secteurs comme l'aéronautique et l'automobile l'adoptent alors pour étudier les ruptures provoquées lors de la phase de conception. Les géophysiciens la mettent à profit pour interpréter les observations de fissures effectuées sur le terrain. Initialement appliquée aux matériaux métalliques, cette technique s'utilise aujourd'hui pour des matériaux aussi

divers que les céramiques et les verres<sup>[5]</sup> ou encore les roches<sup>[6]</sup> et les polymères. Certaines entreprises choisissent d'avoir leur propre laboratoire d'analyse, quand d'autres choisissent de l'externaliser à des laboratoires spécialisés. Dans les deux cas, les analyses sont confiées à un expert, souvent spécialiste d'un type de matériau.

Dans la pratique, l'observation de la surface de rupture se fait à l'œil nu ou à l'aide d'un microscope binoculaire. De plus en plus souvent, l'échantillon est analysé à l'aide d'un Microscope Électronique à Balayage (MEB). L'observation à différentes échelles permet d'obtenir des informations complémentaires, les échelles les plus fines permettant parfois la mise en évidence de défauts microscopiques à l'origine de la rupture. Complétant ces observations par des mesures de la composition chimique et de la microstructure du matériau, les experts sont à même de déterminer, du moins qualitativement, le scénario d'une avarie et les circonstances ayant donné lieu à la rupture.

Dans l'analyse de défaillance, l'expert joue indéniablement un rôle central. Tel le médecin examinant son patient, son objectif est de diagnostiquer les causes d'une rupture à partir de l'analyse de la pièce rompue. Le contexte et l'environnement de la pièce au moment de sa défaillance sont autant d'informations précieuses qui permettent de mettre l'expert sur la bonne piste. Celle-ci est ensuite confrontée aux examens fractographiques et à l'analyse de la microstructure. La pression sur ces experts croît évidemment avec les enjeux industriels. Pourtant, les conclusions reposent majoritairement sur l'observation des faciès et sur l'interprétation subjective qui en est faite. À

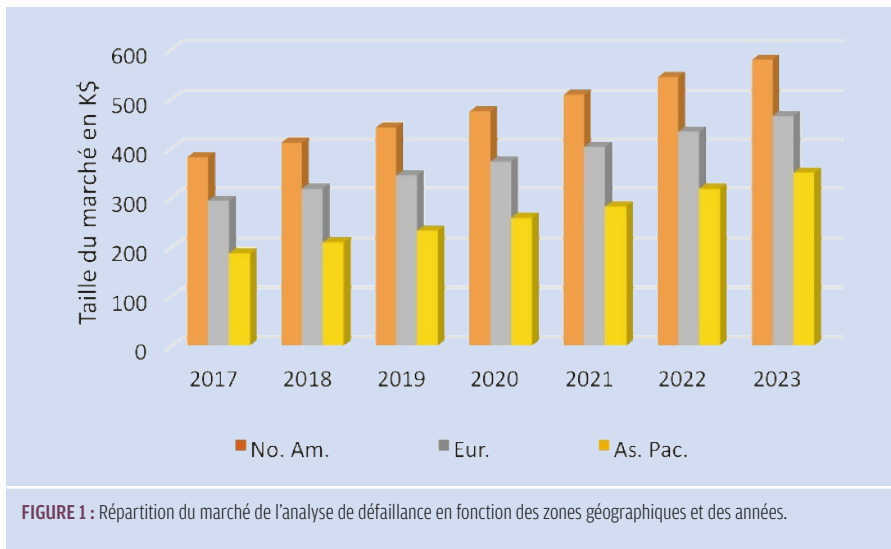


FIGURE 1 : Répartition du marché de l'analyse de défaillance en fonction des zones géographiques et des années.

cette difficulté s'ajoutent souvent des phénomènes qui endommagent la surface de rupture, et font disparaître les preuves, comme la corrosion ou le matage. La qualité des analyses fractographiques classiques est donc fortement liée aux compétences et à l'expérience de l'expert.

### L'analyse de défaillance : un marché en essor

Aussi bien d'un point de vue technique que commercial, l'analyse de défaillance a pris une place significative dans l'industrie. Le marché de l'analyse de défaillance est estimé à plus d'un milliard de dollars par an au niveau mondial [7]. Sa croissance annuelle, aux alentours de 8 %, est soutenue par l'Asie, où elle dépasse les 10 %. La prise de conscience autour de son intérêt s'est généralisée dans de nombreux secteurs industriels. La part principale de ce marché se situe en Amérique du Nord (35 % du marché mondial), puis en Europe, qui représente 28 % (figure 1). L'aéronautique et l'énergie demeurent les domaines où l'analyse de

défaillance est la plus prisée. Mais d'autres secteurs comme l'automobile et le ferroviaire, ou celui des semi-conducteurs, sont également largement concernés. Certains laboratoires spécialisés dans l'analyse de défaillance ont d'ailleurs vu leur chiffre d'affaires augmenter significativement ces dernières années [7]. Cette activité de service prend de l'ampleur et l'impact des analyses de défaillance auprès des décideurs grandit. Si le rôle de l'expert devient de plus en plus important, les outils mis à sa disposition (MEB mise à part) ont relativement peu évolué jusqu'à l'apparition récente de la fractographie statistique, qui repose sur le traitement statistique de la topographie des surfaces de rupture.

### Dechiffer la géométrie des surfaces de rupture

La fractographie statistique naît véritablement en 1975, quand Benoit Mandelbrot [8] met en évidence l'aspect fractal des surfaces de rupture : leur rugosité, observée à des échelles différentes, présente des propriétés semblables, si bien qu'il est presque impossible de déterminer la taille d'un cliché d'une surface de rupture si on n'y fait pas figurer une barre d'échelle.

Au début des années quatre-vingt-dix, Élisabeth Bouchaud [9] revisite les travaux effectués par Mandelbrot et met en évidence un résultat étonnant : non seulement les surfaces de rupture sont fractales, mais l'exposant fractal qui caractérise cette géométrie varie très peu d'un matériau à l'autre (figure 2). Pour tester son hypothèse, elle génère par ordinateur des surfaces fractales avec un exposant identique aux surfaces expérimentales. Et elle s'empresse de montrer ses reproductions à ses collègues qui peinent à les identifier : alors que l'expert des alliages d'aluminium y reconnaît un faciès d'alliage d'aluminium, l'expert des

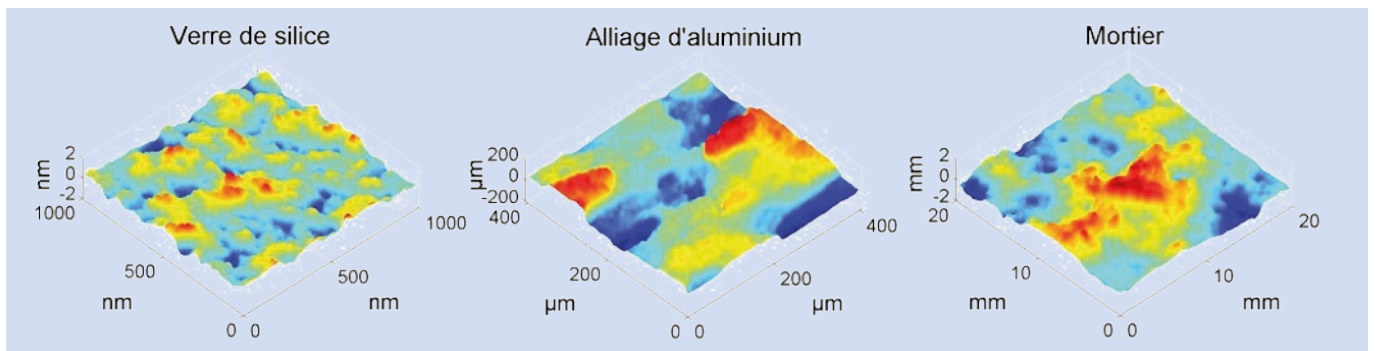


FIGURE 2 : Trois surfaces de rupture de trois matériaux très différents. Malgré leur apparente diversité, leur rugosité partage des propriétés statistiques fractales similaires.

alliages de titane y voit au contraire la surface de rupture d'un alliage de titane. Les propriétés géométriques des faciès de rupture sont dorénavant connues. Mais reste-t-il encore à les déchiffrer.

Stéphane Vernède, Laurent Ponson et Jean-Philippe Bouchaud ne trouveront la clé que près de vingt ans plus tard [10,11]. En s'inspirant des outils utilisés en analyse financière, ils posent un autre regard sur la géométrie des surfaces de rupture, en étudiant le champ de ses pentes locales. De nouvelles propriétés universelles émergent. Mais à une échelle de longueur près ; si bien qu'une fois les axes  $x$  et  $y$  (parallèles au plan moyen de la surface) normalisés par cette longueur, toutes les surfaces et leurs champs de pente locale apparaissent identiques. Et le faciès d'un alliage d'aluminium ressemble à celui d'un alliage de titane... voir celui d'un mortier ou d'une céramique. Cette longueur, baptisée  $\xi$ , est alors interprétée comme la taille caractéristique du mécanisme élémentaire de fissuration des matériaux qui repose sur la nucléation, la croissance et la coalescence de cavités d'endommagement. Ces cavités étant situées à différentes hauteurs, leur rencontre laisse des marches sur le faciès de rupture que l'on identifie aisément à partir du champ des pentes locales. La taille de ces « falaises » fixe la longueur  $\xi$ . Mais comment utiliser ces résultats académiques pour analyser une défaillance ou caractériser un matériau ? Un autre verrou est levé en 2017 par Laurent Ponson et Naman Negi qui établissent un lien direct entre la longueur  $\xi$  mesurable à partir de l'analyse statistique d'un faciès de rupture, et la résistance à la rupture d'un matériau, que l'on quantifie par sa ténacité  $K_{Ic}$  (figure 3). Autrement dit, il est désormais possible de mesurer post-mortem la résistance d'un matériau, c'est-à-dire après sa rupture, via l'analyse du faciès d'un seul fragment de petite taille (typiquement  $1 \text{ mm}^2$  pour un alliage métallique). Il devient ainsi possible d'estimer le niveau de chargement mécanique ayant conduit à sa rupture. Pour l'analyse de défaillance, il s'agit d'un aboutissement que l'on osait à peine espérer.

### Remonter quantitativement le fil d'une avarie

Les surfaces de rupture ont d'autres secrets à révéler. Le champ des pentes locales étant anisotrope, son analyse statistique fournit la direction et le sens de propagation de la rupture (figure 4d). Cela permet ainsi de remonter

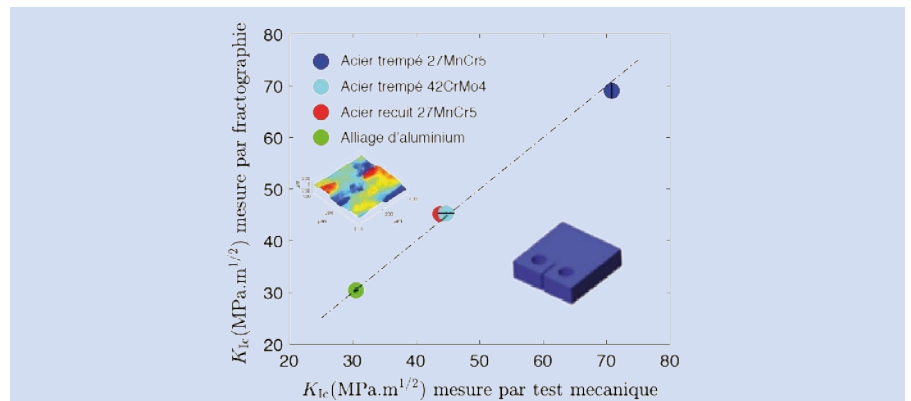


FIGURE 3 : Comparaison réalisée à l'aveugle des valeurs de ténacité mesurées par test mécanique et par fractographie statistique sur quatre alliages métalliques différents. [12]

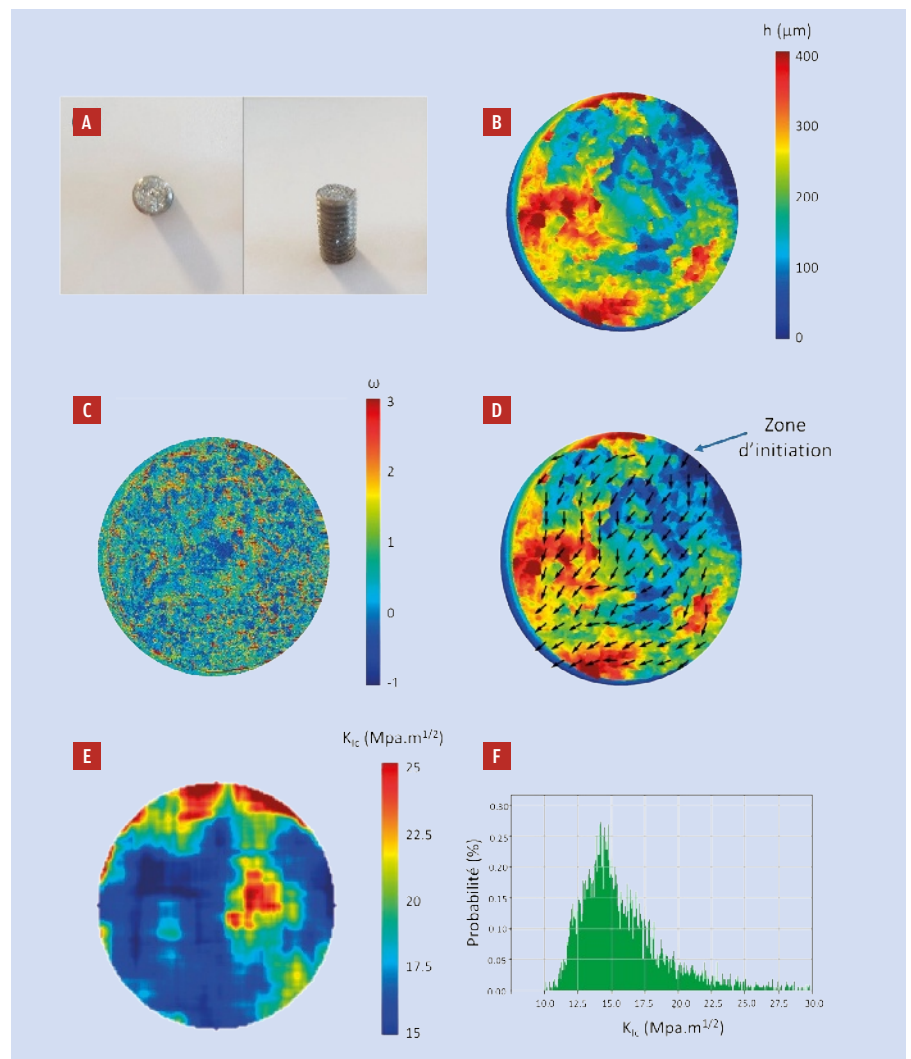


FIGURE 4 : Exemple de données extraites d'une analyse de fractographie statistique réalisée sur une vis rompue (a) à partir des outils décrits dans la référence 11. Le relevé topographique (b) du faciès de rupture sert de données d'entrée. Il est tout d'abord utilisé pour calculer le champ (c) des pentes locales. L'anisotropie de ce champ permet la détermination de la direction et du sens de propagation de la rupture (d). Les falaises visibles sur le champ (c) permettent la mesure de la longueur  $\xi$  et in fine, le champ de ténacité (e) de l'échantillon. La figure (f) fournit la dispersion des valeurs de ténacité locale, quantifiant ainsi le degré d'homogénéité du matériau.

## Bibliographie

- [1] D. Hull, *Fractography*, Cambridge University Press (1999).
- [2] J. L. Gonzalez-Velazques, *Fractography and Failure Analysis*, Springer (2018).
- [3] C. A. Zapffe et M. Clogg, *Fractography: A new tool for metallurgical research*, American Society for Metals 36 (1944).
- [4] H. E. Boyer, *Metals Handbook : Fractography and Atlas of Fractographs*, American Society for Metals 9, (1974).
- [5] G. D. Quinn, *Fractography of ceramics and glasses*, NIST (2007).
- [6] M. S. Ameen, *Fractography: Fracture topography as a tool in fracture mechanics and stress analysis*, Geological Society Special Publication (1995).
- [7] Mordor Intelligence, *Custom Report : Global Mechanical Failure Analysis Market*, (2018).
- [8] B.B. Mandelbrot, D. E. Passoja et A. J. Paullay, *Fractal character of fracture surfaces of metals*. Nature 308, 721-722 (1984).
- [9] E. Bouchaud, G. Lapasset et J. Planès, *Fractal dimension of fractured surfaces: A universal value?* Europhysics Letter 13, 73-79 (1990).
- [10] S. Vernède, L. Ponson et J.-P. Bouchaud, *Turbulent fracture surfaces: A footprint of damage percolation?* Phys. Rev. Lett. 141, 215501 (2015).
- [11] S. Vernède et L. Ponson, *Procédé de caractérisation du mécanisme de fissuration d'un matériau à partir de sa surface de rupture*. Brevet FR3026843 (2014).
- [12] Étude comparée - Fractographie quantitative. Rapport CET 147440, Cetim (2018).

quantitativement le fil d'une avarie, en identifiant la zone où s'est amorcée la rupture, puis son évolution dans le matériau.

Avec les méthodes de fractographie classique, une telle information est parfois disponible à partir d'images obtenues par microscopie électronique à balayage. Mais ce travail est fastidieux, et reste assujéti à l'interprétation de l'expert. Au contraire, la fractographie statistique fournit une méthode systématique, objective et rationnelle, qui repose sur le traitement par des algorithmes de la carte des hauteurs du faciès de rupture.

Enfin, il est aussi possible grâce à une analyse automatique et intelligente de la donnée de différencier les zones de la surface ayant subi de la corrosion ou un matage important des zones exploitables. Ce filtre permet d'extraire des informations de qualité à partir de faciès de rupture inexploitable par les méthodes traditionnelles.

## Quantifier les hétérogénéités des matériaux

Puisque la mesure de la longueur caractéristique  $\xi$  à partir d'un faciès de rupture permet de déterminer la ténacité d'un matériau, elle fournit une information similaire à celle obtenue par des tests mécaniques standards. Toutefois, elle présente de nombreux avantages en comparaisons aux méthodes conventionnelles de caractérisation des propriétés mécaniques des matériaux. En effet, un seul faciès de quelques mm<sup>2</sup> généré par rupture brutale suffit à l'analyse. Nul n'est donc besoin de recourir à l'usinage d'un échantillon calibré de plusieurs cm<sup>3</sup> et à sa rupture dans des conditions contrôlées sur un équipement équipé de capteurs de force et de déplacement comme l'exigent les normes actuelles. Si la surface du faciès de rupture est de l'ordre du cm<sup>2</sup>, l'analyse fournit plusieurs milliers de valeurs de ténacité, alors que l'essai classique n'en fournit qu'une seule. La dispersion des valeurs obtenues permet ainsi de quantifier les variations de propriétés mécaniques d'une pièce. Et d'aller un cran plus loin dans la caractérisation de la résistance des matériaux (**figure 4e** et **4f**). Dans le cas d'une analyse de défaillance, cette approche permet la mesure de la ténacité d'un matériau au niveau de la zone d'amorçage de la rupture. Ce qui permet de mettre éventuellement en évidence une faiblesse dans le matériau à l'origine de sa défaillance. La possibilité de remonter à la ténacité du matériau au niveau de la zone d'amorçage, couplé avec les outils théoriques de la mécanique de

la rupture, permet d'estimer le chargement subi par la pièce au moment de sa rupture. Une information précieuse quand on cherche à identifier la cause racine d'une défaillance.

## Obtenir le scénario complet d'une défaillance

Un exemple simple d'analyse de défaillance d'une vis rompue est présenté sur la **figure 4**. La pièce est dans un premier temps scannée grâce à un profilomètre qui fournit le relevé topographique du faciès de rupture (**figure 4b**). Celui-ci est ensuite utilisé pour calculer le champ des pentes locales (**figure 4c**), qui met en évidence des falaises dont la taille caractéristique fournit la valeur de  $\xi$  à différentes positions sur le faciès. On en déduit les valeurs locales de ténacité, à partir desquelles est construit le champ de ténacité locale représentée sur la **figure 4e**. La **figure 4d** montre les directions et sens de propagation de la rupture, déterminés à partir du champ des pentes locales en tirant profit de son anisotropie.

Cette approche fournit une information riche et quantitative, permettant d'envisager des analyses de défaillance plus rapides et plus complètes. Par ailleurs, le temps alloué à l'observation des faciès étant réduit, l'expert peut se concentrer sur l'interprétation et l'utilisation des données fournies par la fractographie statistique, sur lesquelles il peut s'appuyer avec une plus grande certitude.

## De nombreuses perspectives

La fractographie statistique n'en est certainement qu'à ses débuts. Des applications commencent à émerger en géotechnique pour la caractérisation des roches à partir d'échantillons prélevés en profondeur. Son application sur les polymères et les matériaux du génie civil est encore balbutiante, mais offre des perspectives intéressantes. Enfin, cette approche permet de démultiplier le nombre de mesures de la résistance d'un matériau, dans l'espace, mais aussi dans le temps. En raison de la petite surface de rupture requise pour l'analyse, cela laisse entrevoir la possibilité de suivre l'évolution de la résistance d'une pièce en service, et ainsi prévenir sa rupture pour des applications en maintenance prédictive. Tous les champs applicatifs de cette nouvelle technique de l'ingénieur ne sont probablement pas identifiés à l'heure actuelle mais elle constitue déjà un outil puissant pour aller plus loin et plus vite dans l'analyse d'une avarie. Mise entre les mains des experts, elle constitue un outil au niveau des défis auxquels ils sont confrontés.