

Réalisation de défauts artificiels : un métier à part entière

Pour étalonner ou valider les capacités de détection d'un système de contrôle non destructif, une méthode consiste à créer des défauts typiques sur une pièce de référence pour s'assurer que le système CND employé les détectera correctement. La réalisation de tels défauts artificiels est un art maîtrisé par quelques spécialistes qui ont mis au point au fil du temps des procédés appropriés leur permettant de créer des défauts sur une grande variété de pièces. Avec les exigences accrues en termes de fiabilité et de sûreté des équipements, ces spécialistes ont progressivement affiné leurs outils et leurs méthodologies pour répondre à la demande de défauts de plus en plus petites dimensions. Initialement destinée aux pièces métalliques, cette activité s'étend aujourd'hui quelque peu aux matériaux composites.

Propos recueillis par Youssef BELGNAOUI



Jean-Louis CHÊNE
Expert en réalisation de défauts artificiels chez Aurema



Vincent STENGER
Président directeur général de Meirs



Emmanuel DUMONT
Directeur technique et commercial, groupe Luziesa-Exceldef



Christine CHEVALIER-APPAO
Dirigeante cogérante d'Appao

La réalisation de défauts artificiels en CND **en 11 questions**

- 1.** Quels sont les principaux secteurs industriels et applications qui ont recours à des défauts artificiels ? **54**
- 2.** Les défauts artificiels sont-ils réalisés pour vérifier la capacité de tous types de systèmes CND ? **54**
- 3.** Existe-t-il dans certains domaines industriels des normes qui encadrent la manière de réaliser des défauts artificiels ? **54**
- 4.** Quels sont les équipements les plus appropriés pour la réalisation de défauts artificiels ? **55**
- 5.** Quelles sont les principales contraintes de réalisation de défauts artificiels ? **56**
- 6.** Quels sont les savoir-faire nécessaires à la réalisation de défauts artificiels ? **56**
- 7.** Au fil des ans est-ce que les caractéristiques des défauts à réaliser ont évolué ? **57**
- 8.** Quelles sont les spécificités des défauts à réaliser sur des matériaux composites ? **57**
- 9.** Quels types de pièces composites sont concernées ? **58**
- 10.** La réalisation de défauts sur des composites présente-t-elle des particularités ? **58**
- 11.** Comment évolue la demande des industriels en matière de réalisation de défauts artificiels ? **58**

Réalisation de défauts artificiels en CND

1.

Quels sont les principaux secteurs industriels et applications qui ont recours à des défauts artificiels ?



Jean-Louis Chêne : Les industriels de l'aéronautique et du nucléaire sont certainement ceux qui sont les plus demandeurs pour la réalisation de défauts artificiels en vue d'étalonner des systèmes de contrôle non destructif. Cependant, les entreprises de l'aéronautique sont sans doute celles qui y ont davantage recours. Ces dernières nous ont déjà réclamé par exemple de réaliser des défauts artificiels sur des trains d'atterrissage, des pare-brise de cockpit, des hublots, des rivets ou encore des ailettes et des tambours de réacteurs. Dans le domaine du nucléaire, les défauts peuvent être effectués sur des éléments de robinetterie, de la tuyauterie, des fonds de cuve en acier avec un revêtement en inox, des gaines d'uranium ou encore des grappes à tubes de combustibles. Dans le secteur du pétrole et du gaz, il nous arrive également de devoir réaliser des défauts sur des tronçons de pipeline. Dans le ferroviaire, nous avons déjà créé des défauts sur des roues de TGV. Les industriels de l'automobile ont moins de contraintes en termes de sûreté que leurs homologues de l'aéronautique et du nucléaire. Du coup, la réalisation de défauts pour ce domaine est plus marginale. Mais il nous a déjà été demandé de réaliser des défauts sur des jantes ou des planchers de voitures. Certains fabricants de systèmes de contrôle non destructif peuvent aussi s'adresser à nous pour la conception des étalons qui permettront à leurs clients de calibrer leurs solutions de contrôle.



Vincent Stenger : Pour autant que nous ayons une vue complète sur ce marché, le secteur de la métallurgie et des procédés de seconde transformation constitue probablement le plus important consommateur de défauts artificiels. Les exigences normatives tirent la demande.



Emmanuel Dumont : L'ensemble des secteurs industriels du nucléaire, en passant par l'aéronautique jusqu'à la pétrochimie sont concernés par la réalisation de défauts artificiels pour la validation et l'étalonnage de systèmes de contrôle non destructif.



Christine Chevalier-Appaoo : Concernant la réalisation de défauts artificiels pour les CND, nous adressons tous les secteurs d'activité : l'automobile, le ferroviaire, l'aéronautique, le pétrole, le gaz, le nucléaire, et même l'aérospatial. Certains peuvent être plus demandeurs que d'autres, tout dépend de leur activité économique.

2.

Les défauts artificiels sont-ils réalisés pour vérifier la capacité de tous types de systèmes CND ?



Jean-Louis Chêne : En règle générale, la réalisation de défauts artificiels est demandée pour étalonner ou vérifier les capacités de détection de systèmes de contrôle non destructif exploitant les technologies par ultrasons ou par courant de Foucault. Les systèmes par ultrasons sont réputés pour leur précision et leur capacité à identifier des défauts de très faibles dimensions. De tels défauts sont donc créés pour valider leurs aptitudes et leurs performances. La réalisation de défauts artificiels est nécessaire pour étalonner tout aussi bien des systèmes CND utilisés lors de la fabrication des pièces et des équipements que lors de leur maintenance et leur surveillance tout au long de leur cycle de vie.



Vincent Stenger : Depuis que Meirs intervient sur ce secteur, nous fournissons des étalons pour la vérification et le calibrage des installations principalement basées sur les techniques de contrôle non destructif par courants de Foucault, par ultrasons et dans une moindre mesure par rayons X.



Emmanuel Dumont : Le recours aux défauts artificiels est nécessaire pour valider ou étalonner tous les types de systèmes de contrôle non destructif CND : ressuage, magnétoscopie, radiographie, courants de Foucault, ultrason, thermographie, et tomographie.



Christine Chevalier-Appaoo : Les défauts artificiels servent à étalonner les systèmes de contrôle non destructifs exploitant les technologies par ultrasons, par magnétoscopie ou par courant de Foucault. Ils permettent également aux industriels de mieux interpréter les résultats obtenus par les équipements de contrôle.

3.

Existe-t-il dans certains domaines industriels des normes qui encadrent la manière de réaliser des défauts artificiels ?



Jean-Louis Chêne : Nos clients s'appuient sur des normes françaises, européennes ou internationales relatives aux procédures de contrôle non destructif qu'ils doivent mettre en place et mettre en œuvre dans le domaine d'activité qui les concerne. Ces normes peuvent décrire la géométrie des défauts à identifier, la manière de le détecter, la sensibilité des sondes à employer, etc. De notre côté, nous ne faisons que répondre aux exigences de nos clients. Ces derniers nous fournissent des consignes très précises sur le nombre de défauts à réaliser, leur position, leurs dimensions ou encore leur forme (demi-lune, trou à fond plat, trou à fond sphérique, entaille, etc.).



Vincent Stenger : De nombreuses normes existent traitant des conditions de mise en œuvre des différentes techniques de contrôle non destructif appliquées à différents types de produits. Elles imposent souvent la forme, la dimension et la localisation des défauts artificiels nécessaires accompagnant leur exploitation. Pour autant, les détails de la réalisation, de la

« Les industriels de l'aéronautique et du nucléaire sont les plus demandeurs concernant la réalisation de défauts. »

Jean-Louis CHÊNE

mesure et de la caractérisation ne sont que rarement abordés et restent du domaine du savoir-faire du prestataire.



Emmanuel Dumont : L'importance de l'utilisation des défauts artificiels dépend des codes de construction appliqués. Les plus rigoureux sont le RCCM et l'ASME dans le cadre des constructions nucléaires. L'ASME et le CODAP pour tous appareils sous pression hors nucléaire. Toutes les normes aéronautiques sont principalement américaines. Il existe des normes qui encadrent la manière de réaliser les défauts, mais le dimensionne-

ment de chaque défaut n'est spécifié dans aucune norme. L'aspect le plus important est le contrôle dimensionnel et géométrique des défauts artificiels que nous réalisons et la validité des rapports de contrôle qui accompagnent systématiquement chaque défaut.



Christine Chevalier-Appaoo : Chaque secteur d'activité dispose de ses propres normes et de ses exigences spécifiques. Nous travaillons toujours à partir du plan fourni par le client et nous adaptons les processus selon la typologie et la nature des défauts artificiels qu'il souhaite que nous réalisons.

4.

Quels sont les équipements les plus appropriés pour la réalisation de défauts artificiels ?



Jean-Louis Chêne : Il existe deux manières de réaliser des défauts artificiels. Pour les plus gros défauts (de 10 à 20 millimètres), on utilise un centre d'usinage traditionnel. Pour les défauts de faibles dimensions, nous recourrons à des machines d'électroérosion. Elles permettent de réaliser des petites entailles de 30 μm jusqu'à 1 mm de largeur ou des petits trous de 20 μm de diamètre sur 1/10° de profondeur. Il existe aujourd'hui des machines d'électroérosion destinées à d'autres applications industrielles qui permettent de réaliser des défauts d'aussi petite taille. Elles sont cependant très coûteuses. Chez ●●●



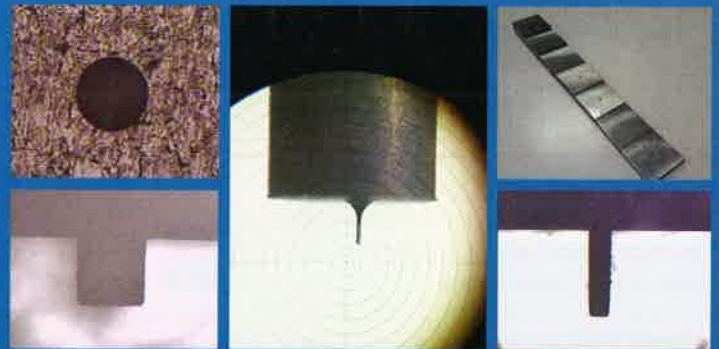
MEIRS

Fournisseur de progrès

Des défauts de précision

Route de Semur - 21500 CREPAND - Tél. 03 80 89 40 33

www.meirs.fr



MEIRS, société de mécanique de précision, compte 35 ans de service à l'industrie métallurgique dans les domaines de la conception et de la réalisation d'outillages, du rechargement MIG/TIG, des prestations de bureau d'études et de métrologie.

En parallèle de cette activité, l'entreprise a développé, depuis plus de 15 ans, des compétences dans la réalisation de défauts calibrés destinés aux activités de contrôles non destructifs (CND). Cette activité est en fort développement depuis 10 ans ; la production moyenne journalière de défauts artificiels a été multipliée par 5 toutes catégories confondues (entailles, trous à fond plat,

génératrices, défauts spécifiques) représentant aujourd'hui environ 2 000 défauts/an.

Pour répondre à cette demande croissante, tant en précision qu'en délai de réalisation, MEIRS a renforcé sa capacité de production et peut ainsi s'appuyer sur un parc adapté de machines d'électroérosion et de micro-électroérosion piloté par 3 techniciens formés à ces travaux délicats.

Les moyens de micro-érosion et de métrologie, associés aux moyens de mécanique de précision, permettent la réalisation de micro-défauts sur les produits destinés au contrôle en ligne, de blocs étalons, de maquettes, de cales, comprenant

l'usinage et l'implantation de défauts spécifiques. Des dimensions caractéristiques de 50 μm sont maîtrisées avec un niveau de précision de 5 μm . La photo centrale montre, à titre d'illustration, la taille d'une électrode cylindrique de \varnothing 0,010 destinée à la réalisation d'un μ -trou de \varnothing 0,020.

Certifiée ISO 9001 depuis 2014 et bénéficiant d'agréments spécifiques, MEIRS intègre l'exigence de contrôle en proposant une rédaction détaillée et si besoin commentée de ses PV permettant, le cas échéant, d'expliquer les méthodes employées. La métrologie des défauts repose sur une chaîne de mesure régulièrement calibrée en référence à un micro-mètre-objet certifié par le LNE.

Réalisation de défauts artificiels en CND

Aurema, nous employons des machines à électroérosion que j'ai modifiées pour les adapter à cette application. Lorsque j'ai débuté dans ce domaine il y a 40 ans, il n'existait pas de solutions prêtes à l'emploi. J'ai réalisé des recherches, et au fil des ans, j'ai modifié pas à pas la configuration des machines, tout en développant et en améliorant les procédés de réalisation de défauts. Pour obtenir les meilleurs résultats, j'ai même fait modifier l'électronique de la commande numérique d'une machine d'électroérosion.



Vincent Stenger : La plupart des défauts artificiels spécifiés présentant des formes borgnes et devant être réalisés dans des conditions d'accessibilité souvent délicates par exemple à l'intérieur d'un tube, la technique la plus couramment utilisée est l'électroérosion par enfonçage. Suivant la taille et la précision géométrique souhaitées, des machines de production peuvent suffire, mais la tendance générale à vouloir simuler des défauts de plus en plus petits conduit à devoir s'équiper de matériels plus spécifiques.



Emmanuel Dumont : La méthode la plus appropriée pour la réalisation de défauts artificiels est l'électroérosion. Elle fournit les meilleurs résultats en termes de précision, de géométrie, de rugosité, etc. D'autres procédés reposant sur des technologies laser existent également pour la réalisation de tout petits défauts.



Christine Chevalier-Appaoo : Les défauts que nous devons réaliser étant le plus souvent de très faibles dimensions, nous utilisons essentiellement des machines de microélectroérosion. Mais il nous arrive parfois d'employer des moyens d'usinage, tels que le fraisage ou le tournage, pilotés par commande numérique.

5.

Quelles sont les principales contraintes de réalisation de défauts artificiels ?



Jean-Louis Chêne : Pour chaque défaut, il faut fabriquer l'électrode appropriée qui sera employée par la machine d'électroérosion. Plus les dimensions du défaut sont faibles, plus l'électrode sera fragile et difficilement réalisable. De plus, les entailles ou les trous de faibles dimensions seront limités en profondeur. Car plus l'électrode s'enfonce dans la matière, plus les particules métalliques ont des difficultés à être évacuées à la surface de la pièce. Les procédés d'électroérosion sont cependant très bien adaptés à tous les matériaux conducteurs par exemple l'Inconel, l'acier, le titane, le magnésium ou encore l'aluminium. D'ailleurs, plus le métal est dur, meilleure est sa conductivité, et mieux ça vaut. L'électroérosion s'applique très bien par exemple sur de l'aluminium, mais il faut mettre en place des sécurités, car si un court circuit survient lorsque les particules restent collées à l'électrode, la machine s'arrête. Avec le magnésium, il faut être tout aussi attentif, car le matériau peut notamment prendre feu.



Vincent Stenger : Le défaut artificiel est un étalon qui engage la responsabilité du prestataire et qui généralement permet de situer la performance de la méthode de contrôle finale. À cette contrainte de grande fiabilité dans la réalisation et la caractérisation peut s'ajouter, par exemple, une exigence de réalisation dans des délais courts dans le cas de procédés de contrôle en ligne.



Emmanuel Dumont : Les contraintes et les difficultés de la réalisation de défauts artificiels sont liées au type de matériau concerné, à la géométrie des pièces traitées, à la rugosité et aux contraintes internes au matériau, et la profondeur du défaut. Les défauts doivent parfois être réalisés dans des zones difficilement accessibles sur une pièce. Ce qui rend les opérations de fabrication délicates et complexes.



Christine Chevalier-Appaoo : À chaque défaut, ses difficultés et ses contraintes de réalisation. Il faut bien entendu prendre en compte la particularité de la matière de la pièce dans laquelle nous créons des défauts. Mais il faut également adapter le procédé de fabrication aux caractéristiques spécifiques du défaut telles que son emplacement, sa forme, et ses dimensions.

6.

Quels sont les savoir-faire nécessaires à la réalisation de défauts artificiels ?



Jean-Louis Chêne : Plus ça va, plus les industriels nous demandent de réaliser des défauts de plus en plus petits. Pour la réalisation de défauts de très faibles dimensions avec des machines d'électroérosion traditionnelles, la première difficulté est de fabriquer l'électrode spécifique aux caractéristiques du défaut. Cela réclame un savoir-faire particulier que j'ai acquis au fil des ans et des projets. La fabrication de l'électrode à partir d'une feuille de cuivre est une méthode tout à fait artisanale que j'ai mise au point. L'épaisseur de l'électrode peut se situer entre 20 et 30 μm d'épaisseur alors que les feuilles de cuivre les plus fines sur le marché présentent une épaisseur de 1/10^e. J'ai donc développé mon propre procédé permettant d'en réduire l'épaisseur. Par exemple, il faut compter un à deux jours de préparation et dix heures d'électroérosion pour réaliser un défaut longitudinal et un défaut transversal (0,8 mm de longueur, 0,1 mm de largeur et de profondeur) dans un tube de 1 mm de diamètre.

« Les détails de la réalisation, de la mesure et de la caractérisation des défauts restent du domaine du savoir-faire du prestataire. »

Vincent STENGER



Vincent Stenger : Pour ne parler que de l'électroérosion, c'est un domaine où l'expérience conjuguée d'un mécanicien professionnel, de sa connaissance des possibilités de l'équipement et de la situation particulière d'exécution sont déterminantes pour la maîtrise dimensionnelle du défaut artificiel. À titre d'illustration, certains secteurs d'activité spécifient des intervalles de tolérance pouvant descendre à 0,01 mm voire 0,005 mm soit 5 µm, imposant le recours à un personnel qualifié et très expérimenté.



Emmanuel Dumont : La réalisation de défauts artificiels nécessite de disposer d'une très bonne connaissance des matériaux et de la métallurgie. Il faut également posséder une expertise des procédés de soudage, et des différentes méthodes de contrôle non destructif.



Christine Chevalier-Appaoo : La réalisation de défauts artificiels réclame une bonne connaissance des procédés de micro électroérosion. Il faut également maîtriser les systèmes de contrôle microscopique qui nous permettent de qualifier la géométrie et les dimensions des défauts que nous réalisons. Nous disposons de dix-sept ans d'expérience en la matière. Dans certaines situations, notamment pour les centrales nucléaires, il faut être à même de se rendre chez le client pour usiner des pièces de très grandes dimensions. Nous travaillons alors sur site avec des moyens portatifs.

7.

Au fil des ans est-ce que les caractéristiques des défauts à réaliser ont évolué ?



Jean-Louis Chêne : Les industriels cherchent à déceler et à mesurer des défauts de plus en plus fins. Il y a quelques années, la largeur des défauts les plus petits était de l'ordre du 1/10°. Aujourd'hui, on nous réclame couramment de descendre à 5/100°. Nous sommes capables de réaliser des défauts

« La réalisation de défauts artificiels nécessite une très bonne connaissance des matériaux et de la métallurgie. »

Emmanuel DUMONT

de 2/100° à 3/100° en largeur et en longueur, mais pas en profondeur suffisante. Nous sommes arrivés à un seuil technologique. On atteint aujourd'hui les limites des procédés par électroérosion. Pour l'instant, je ne vois pas d'autres solutions alternatives, à part peut-être les technologies laser. Mais je n'ai pas encore suffisamment étudié le sujet pour savoir si celles-ci peuvent être adaptées à ces applications.



Vincent Stenger : Il semble assez clair qu'une tendance générale à la diminution de la taille des défauts coïncide avec une exigence croissante sur la fiabilité et la durée de vie des produits et des équipements inspectés. Certaines demandes sortent maintenant du champ des possibilités des techniques standard et posent un réel problème de faisabilité par exemple pour la simulation de microfissures.



Emmanuel Dumont : Les codes et normes qui régissent la surveillance et le contrôle des pièces et des équipements, notamment dans les domaines de l'aéronautique et du nucléaire évoluent en termes d'exigence de sécurité. Par conséquent, les défauts à réaliser et à caractériser sont de dimensions de plus en plus faibles.



Christine Chevalier-Appaoo : Les moyens de contrôle non destructifs sont aujourd'hui plus performants et plus précis. Ils permettent la détection de défauts de dimensions de plus en plus petites. C'est pourquoi nous devons améliorer sans cesse nos procédés de fabrication pour répondre aux exigences de nos clients afin qu'ils puissent étalonner leurs moyens de contrôle non destructif ou nous assurer qu'ils disposent des capacités de détection appropriées, en s'appuyant sur les défauts artificiels que nous réalisons sur des pièces de référence ou sur des éprouvettes.

8.

Quelles sont les spécificités des défauts à réaliser sur des matériaux composites ?



Jean-Louis Chêne : Ce ne sont pas les mêmes genres de défauts qui sont recherchés sur les pièces et les assemblages en composites. Les industriels cherchent notamment à contrôler qu'il n'y a pas de délaminage entre les différents plis de composite. Ils souhaitent donc réaliser des trous de 2 à 20 mm de diamètre simulant un problème de collage. La réalisation de ce type de défaut ne demande pas d'expertise spécifique. Elle est à la portée de toute personne capable de piloter un centre d'usinage de précision. En revanche, nous pouvons être amenés à réaliser de tels défauts pour des laboratoires qui ne disposent pas de machine d'usinage ou pour des industriels dont les outils de production ne sont pas disponibles pour ce genre d'opérations.



Vincent Stenger : L'électroérosion, qui est la principale technique mise en œuvre pour la réalisation de défauts artificiels, n'est utilisable que sur des matériaux conducteurs. Notre entreprise n'a pas d'expérience dans le domaine des pièces en composite.



Emmanuel Dumont : Pour les pièces en composites, le procédé d'électroérosion ne fonctionne plus. Il faut donc se tourner vers les solutions d'usinage classique en employant des outils dédiés à l'usinage des matériaux composites.



Christine Chevalier-Appaoo : Les procédés d'électroérosion ne peuvent pas être mis en ●●●

« Les performances accrues des moyens de contrôle non destructifs nécessitent la réalisation de défauts de plus en plus petits. »

Christine CHEVALIER-APPAOO

œuvre sur les matériaux composites puisque ces derniers ne sont pas conducteurs. Nous employons donc des machines à commande numérique comme des rectifieuses par exemple qui offrent cependant moins de précision et de souplesse d'utilisation.

9.

Quels types de pièces composites sont concernées ?



Jean-Louis Chêne : Ce sont souvent des pièces composites pour le secteur aéronautique tels que des gouvernes ou des aérofreins. Certains assemblages comprennent une partie en aluminium et une autre en matériau composite. Le composite se répand de plus en plus sur des pièces d'aérostructure. Ainsi, le fuselage des derniers programmes d'avions de ligne tels que l'Airbus A350 et le Boeing 777 généralise le composite. Il faudra forcément réaliser des défauts artificiels pour ce type de pièce afin d'étalonner leurs systèmes de contrôle non destructifs. Quoi qu'il en soit, cela restera de défauts de plus grande taille que ceux des pièces en alliage.



Emmanuel Dumont : Toutes les pièces composites sont concernées dans une très grande diversité de secteurs industriels au premier rang desquels on trouve l'aéronautique, mais également le spatial, l'armement (ballistique), la construction navale, le pétrolier et la pétrochimie (tronçons de tuyauterie).



Christine Chevalier-Appaoo : Nous réalisons des défauts artificiels sur des prototypes de pièce

que nous fournissons nos clients qui opèrent dans une grande variété de domaines industriels : l'automobile, le ferroviaire, l'aéronautique, le pétrole, le gaz, le nucléaire, et même l'aérospatial.

10.

La réalisation de défauts sur des composites présente-t-elle des particularités ?



Jean-Louis Chêne : Pour réaliser des défauts sur des matériaux composites, on utilise les mêmes outils coupants que ceux employés traditionnellement par les machines de micro-usinage. La seule difficulté est que les matériaux composites peuvent être très abrasifs. Ces matériaux peuvent contenir du verre qui émousse les outils. Du coup, il faudra employer des fraises en carbure ou en diamant.



Emmanuel Dumont : Les outils à employer pour le composite et l'acier sont différents de par la nature de chaque composite. La dureté, l'usure des outils, et le fibrage constituent les principales contraintes concernant la réalisation de défauts artificiels sur des pièces en matériaux composites.



Christine Chevalier-Appaoo : Le composite étant un matériau relativement récent et qui se distingue par sa variabilité, nous avons encore peu de recul sur son usinage. Nous ne pouvons l'usiner qu'avec des rectifieuses par exemple qui présentent cependant moins de précision et de souplesse de mise en œuvre que les machines de microélectroérosion.

11.

Comment évolue la demande des industriels en matière de réalisation de défauts artificiels ?



Jean-Louis Chêne : Les exigences dans le domaine du nucléaire et de l'aéronautique sont toujours plus élevées, tant en termes de sûreté de fonctionnement que de disponibilité des équipements. Les contrôles des équipements se multiplient et se renforcent en conséquence. Ce qui induit une augmentation de la demande de réalisation de défauts artificiels de la part des industriels.



Vincent Stenger : L'exigence de maîtrise du risque au sens large de notre société ne peut que soutenir les développements technologiques visant à comprendre et prévenir les modes de défaillance de nos installations. Est-ce suffisant pour prédire une croissance toujours aussi soutenue de la demande ? On peut légitimement s'interroger sur l'impact que ne manqueront pas d'avoir des outils de simulation de plus en plus performants nécessitant moins de calages expérimentaux ainsi que des travaux normatifs visant à harmoniser les pratiques et à construire des référentiels plus larges.



Emmanuel Dumont : La demande concernant la réalisation de défauts artificiels est en augmentation, car cela permet notamment la justification des méthodes de contrôles. Les industriels ont tendance à nous demander de créer des défauts de plus en plus petits avec de très grandes précisions ●