

SCIENCE ET INGÉNIERIE
DES MATÉRIAUX

Jean Perdijon

Matériaux sous surveillance

Spécification et contrôle de la qualité



Lavoisier
hermes

Matériaux sous surveillance

Spécification et contrôle de la qualité

Dans la même collection

Structure et morphologie des polymères

De la macromolécule au sphérolite (2020)

HAUDIN J.-M.

Extrusion réactive

Des aspects fondamentaux aux développements industriels (2019)

CASSAGNAU P., BOUNOR-LEGARE V., coord.

Ingénierie de la structure des produits alimentaires (2019)

ALMEIDA G., PANOUILLÉ M., coord.

Composites polymères et fibres lignocellulosiques

Propriétés, transformation et caractérisation (2017)

BERZIN F., coord.

Mécanique des solides indéformables (2014)

BOUZIDI R., LE VAN A., THOMAS J.-C.

Pour plus d'informations sur nos publications :



newsletters.lavoisier.fr/9782746249295

Jean Perdijon
Ingénieur civil des mines

Matériaux sous surveillance

Spécification et contrôle de la qualité

Lavoisier
hermes

Collection
Sciences et ingénierie des matériaux

dirigée par Bruno Vergnes

Directeur de recherches émérite, MINES ParisTech
CEMEF (Sophia Antipolis)

Les conflits d'intérêt sont consultables chez l'éditeur

Direction éditoriale : Jean-Marc Bocabeille

Édition et fabrication : Solène Le Gabellec

Couverture et composition : Nord Compo, Villeneuve d'Ascq

Image de couverture : Sakarin14, iStockphoto.com

© 2021, Lavoisier, Paris
ISBN : 978-2-7462-4929-5

Sommaire

Avant-propos.....	IX
Abréviations et acronymes	XIII

Chapitre 1 Qualité et contrôle

1. Le contrôle de la qualité	1
<hr/>	
1.1. Bref historique.....	1
1.2. Qualité d'une fourniture.....	3
1.3. Spécification de la qualité	3
1.4. Types de contrôle.....	4
1.5. Échantillon contrôlé	6
1.6. Efficacité du contrôle.....	8
1.7. Rentabilité du contrôle.....	9
2. Les qualités d'un matériau	10
<hr/>	
2.1. Définition d'un matériau	10
2.2. Caractères contrôlés	10
2.3. Grandeur et mesure.....	11

2.4. Spécification pour des pièces individuelles.....	13
2.5. Spécification pour un lot.....	15
3. La qualité du contrôle	16
<hr/>	
3.1. Épistémologie du contrôle.....	16
3.2. Qualités de la mesure.....	17
3.3. Surveillance de la mesure.....	19
3.4. Expression du résultat.....	22
3.5. Critère de rejet pour des pièces individuelles.....	23
3.6. Critère de rejet pour un lot.....	24
3.7. Spécification et acceptation (récapitulatif).....	26
3.8. Assurance de la qualité.....	27

Chapitre 2

Les contrôles destructifs

1. Les contrôles spécifiques	31
<hr/>	
1.1. Mesures physiques.....	31
1.2. Essais physico-chimiques.....	33
2. Les essais mécaniques	33
<hr/>	
2.1. Intérêt des essais mécaniques.....	33
2.2. Traction, compression.....	34
2.3. Flexion, torsion, pliage, emboutissage.....	36
2.4. Résilience.....	37
2.5. Dureté.....	38
2.6. Fluage, relaxation.....	39
2.7. Fatigue.....	41

3. L'examen de structure	42
3.1. Préparation des surfaces	42
3.2. Révélation de la structure	44
3.3. Microscopie optique	45
3.4. Microscopie électronique	47
3.5. Macrographie	50
3.6. Fractographie	50
3.7. Aides à l'examen	51

Chapitre 3

Les contrôles non destructifs

1. Méthodes de contrôle superficiel	55
1.1. Les contrôles non destructifs	55
1.2. Contrôle visuel	57
1.3. Ressuage	58
1.4. Méthodes magnétiques	59
1.5. Méthodes électriques	62
1.6. Méthodes thermiques	65
2. Le contrôle radiographique	66
2.1. Rayonnements X et gamma	66
2.2. Sources de rayonnement	68
2.3. Détection du rayonnement	71
2.4. Prise de vue	73
2.5. Image radiographique	76
2.6. Tomographie	76

2.7. Neutronographie.....	77
2.8. Sécurité, protections.....	79
3. Le contrôle par ultrasons	80
<hr/>	
3.1. Ondes ultrasonores.....	80
3.2. Oscillateur ultrasonore.....	82
3.3. Champ d'un transducteur.....	83
3.4. Transmission entre deux milieux.....	85
3.5. Écho ultrasonore.....	88
3.6. Appareil à ultrasons.....	91
3.7. Exploration de la pièce.....	93
3.8. Représentation des échos.....	95
Conclusion	101
Glossaire	103
Index.....	111

Avant-propos

Calculant enfin, d'après ces expériences, de combien la quantité d'eau que la couronne avait fait sortir était plus grande que celle que la masse d'or avait aussi fait sortir, il connut combien il y avait d'argent mêlé avec l'or et fit voir clairement ce que l'ouvrier en avait dérobé.

Vitruve (*De l'architecture*)

Âge de la pierre, âge du bronze, âge du fer... Les matériaux sont les indicateurs des mutations technologiques de l'humanité. Nous les définirons ici comme des produits solides utilisés pour la fabrication d'objets industriels. Pour concevoir et réaliser de nouveaux objets, l'ingénieur a besoin de connaître précisément les propriétés de ces produits : c'est la « science des matériaux » (Quéré, 1988 ; Bailon et Dorlot, 2000 ; Kurz *et al.*, 2002 ; Dequatremare et Devers, 2012 ; Dupeux, 2018). Elle repose expérimentalement sur une *caractérisation des qualités* générales d'un matériau donné (par exemple, acier 316 Ti ou Téflon) ; une telle analyse fine nécessite des équipements complexes existant seulement dans des laboratoires de recherche (comme la diffraction des neutrons ou l'analyse par radioactivation). Par opposition, il ne sera question ici que du *contrôle de la qualité* particulière du matériau constituant un produit donné ; une telle vérification doit pouvoir être mise en œuvre sans trop de difficultés dans des laboratoires ou des ateliers industriels, tout spécialement à l'occasion de la réception du produit.

La qualité d'un produit est souvent définie comme étant son aptitude à satisfaire les besoins de ses utilisateurs. Cependant, une telle définition, qui fixe un but plutôt que des moyens, donne au qualicien à peu près autant de pouvoir sur le produit que peut en avoir le météorologue sur le temps : ce qui ne se mesure pas n'est en effet que philosophie et conduit trop souvent à des déclarations où les bonnes intentions et la langue de bois tiennent lieu de données techniques vérifiables de façon contradictoire. Pour devenir « opératoire », la qualité doit porter sur des grandeurs définies avant la fabrication, avec des tolérances clairement annoncées. Ainsi, *la notion de qualité se confond avec celle de conformité à des exigences spécifiées* : oui, le produit est conforme, il est acceptable ; non, le produit n'est pas conforme, il est rejetable.

La « gestion de la qualité » est l'ensemble des dispositions prises par l'entreprise pour donner confiance en la qualité de son produit (Fey et Gogue, 1981 ; Ishikawa, 2002). Parmi ces dispositions, deux se sont révélées depuis longtemps très efficaces : il s'agit de la surveillance des processus et du contrôle de conformité. Mais les contrôles sont coûteux et la logique du système conduit à remplacer de plus en plus les contrôles par des procès-verbaux établis sur documents du fabricant. C'est ainsi que les n radiographies des soudures d'un oléoduc aux États-Unis ou d'une centrale nucléaire en France ont été remplacées par n tirages de la même radiographie d'une soudure saine ; voilà qui est plus vite contrôlé et on risque moins d'avoir à faire des réparations ! Cela montre qu'on n'est jamais trompé que par ce en quoi on a confiance ; paraphrasant un illustre avocat (Henri Barboux, 1834-1910) affirmant qu'« il y a trois moyens d'égarer la justice : le serment, l'enquête et l'expertise », on peut dire qu'il y a trois moyens d'égarer la qualité : le PAQ (programme d'assurance de la qualité), l'audit et la certification.

La meilleure garantie de qualité est donc donnée par un « contrôle de conformité ». Un tel contrôle est indispensable pour tout produit auquel sont attachés des impératifs de sécurité et de disponibilité. C'est ainsi que l'utilisation de matériaux dans des conditions de plus en plus sévères a conduit à analyser leur composition et à contrôler leurs caractéristiques de manière de plus en plus approfondie. La plupart des propriétés importantes d'un produit ne peuvent être déterminées que de façon destructive, donc sur un prélèvement. Pour que le jugement sur ce prélèvement puisse être étendu à l'ensemble du produit, il faut que ce prélèvement soit suffisamment important pour constituer un échantillon représentatif, auquel on peut appliquer les méthodes d'inférence statistique ; cependant, les techniques de contrôle non destructif, comme la radiographie ou les ultrasons, permettent de se contenter d'un échantillon restreint, en vérifiant l'homogénéité du produit par rapport au prélèvement.

Dans la nouvelle culture de la qualité, le mot « produit » désigne aussi bien un service qu'une matière première plus ou moins transformée ou un objet manufacturé. Nous nous limiterons au *contrôle de la qualité des matériaux* ; le contrôle portera donc sur la substance et non sur la forme ou les dimensions. Une qualité importante du matériau est sa composition chimique, mais on parle alors d'« analyse » et le domaine de la chimie analytique est bien trop vaste pour être abordé ici. Après un premier chapitre où sont regroupées les considérations qui s'appliquent à tous les types de contrôle (spécification de la qualité, constitution d'un échantillon, étalonnage de l'appareil de mesure, critère de rejet), nous étudierons dans un deuxième chapitre les principales techniques utilisées en contrôle destructif (essais mécaniques, examens de structure), puis dans un dernier chapitre celles pour le contrôle non destructif (ressuage, magnétoscopie, courants de Foucault, radiographie, ultrasons). Une première version de cet ouvrage avait fait l'objet d'un « Que sais-je ? » en 1996 (*Le Contrôle des matériaux*, n° 815).

Mes remerciements vont à MM. Jean Boudaille, Francis Claisse et Michel Sladkoff, qui ont pris la peine de contrôler mes matériaux, et à toute l'ancienne équipe du Laboratoire de contrôle industriel des combustibles (COGEMA et CEA) qui, pendant plus de trente ans, a participé au progrès des techniques ici décrites.

Indications pratiques :

1. La bibliographie est indiquée au fur et à mesure dans le texte et les références précises sont données en fin de chapitre. On a cité quelques-uns des ouvrages, de préférence en langue française, qui sont peu nombreux à traiter de l'une des techniques de contrôle des matériaux. On a surtout donné la référence, indispensable au praticien, des principales normes actuellement en vigueur en France (*voir* le site www.afnor.org) : il s'agit de normes françaises (NF), européennes (EN) ou internationales (ISO). Leur titre est parfois un peu abrégé et l'année indiquée est celle du premier fascicule quand il y en a plusieurs ; on s'est pratiquement limité à l'acier en ce qui concerne les contrôles destructifs.
2. On a utilisé exclusivement le Système international d'unités avec, en particulier, le newton (N), le joule (J), et le pascal (Pa) ; on rappelle que les principaux préfixes des multiples et sous-multiples sont pico ($p = 10^{-12}$), nano ($n = 10^{-9}$), micro ($\mu = 10^{-6}$), milli ($m = 10^{-3}$), kilo ($k = 10^3$), méga ($M = 10^6$), giga ($G = 10^9$) et téra ($T = 10^{12}$).
3. Par « contrôleur », il faut bien sûr entendre aussi les contrôleuses, très nombreuses.

Références Bibliographiques

- Baïlon JP, Dorlot JM (2000). *Des matériaux*. Montréal, Presses internationales Polytechnique.
- Dequatremare M, Devers T (2012). *Précis des matériaux*. Paris, Dunod.
- Dupeux M (2018). *Science et génie des matériaux*. Malakoff, Dunod.
- Fey R, Gogue JM (1981). *La Maîtrise de la qualité*. Paris, Les Éditions de l'organisation.
- Ishikawa K (2002). *La Gestion de la qualité*. Paris, Dunod.
- Kurz W, Mercier JP, Zambelli G (2002). *Introduction à la science des matériaux*. Lausanne, Presses polytechniques et universitaires romandes.
- Quéré Y (1988). *Physique des matériaux*. Paris, Ellipses.

Abréviations et acronymes

AFNOR	association française de normalisation
AVG	<i>Abstand Verstärkung Grösse</i> (distance-gain-taille)
CAD	correction amplitude-distance
CCD	<i>charge coupled device</i> (capteur à transfert de charge)
CND	contrôle non destructif
CR	<i>computed radiography</i>
DATR	directement affecté à des travaux sous rayonnements
DIN	<i>deutsches Institut für Normung</i>
DR	<i>digital radiography</i>
EN	european norm
IQI	indicateur de qualité d'image
ISO	<i>international organization for standardization</i> (organisation internationale de normalisation)
LICET	limite inférieure de contrôle pour l'écart-type
LICM	limite inférieure de contrôle pour la moyenne
LSCET	limite supérieure de contrôle pour l'écart-type
LSCM	limite supérieure de contrôle pour la moyenne
MEB	microscope électronique à balayage
MET	microscope électronique à transmission
NF	norme française
NQA	niveau de qualité acceptable
PAQ	plan d'assurance qualité
PZT	titanate zirconate de plomb
TOFD	<i>time of flight diffraction</i> (diffraction en temps de vol)

L'utilisation des matériaux dans des conditions de plus en plus sévères rend indispensable leur conformité à des spécifications précises. Les procès-verbaux présentés par le fournisseur ne suffisent pas, comme l'ont montré certains faits récents. Seul un contrôle de conformité peut apporter la confiance nécessaire à la sûreté des installations.

Alors qu'il n'existe guère sur le sujet que des cours de formation, techniques et d'un accès difficile, l'auteur présente ici une vue d'ensemble. Il expose d'abord les éléments du **contrôle de la qualité**, indispensables à la rédaction des spécifications mais qu'on trouve rarement rassemblés. Puis il décrit avec de nombreux schémas le principe et la mise en œuvre des contrôles : les **essais mécaniques**, les **examens de structure** et les techniques modernes de **contrôle non destructif**, en insistant sur la radiographie et les ultrasons.

Matériaux sous surveillance s'adresse aux étudiants, ingénieurs, chercheurs et industriels intéressés par le contrôle de la qualité.

Ingénieur civil des mines, Jean Perdijon a dirigé un laboratoire de contrôle des matériaux au CEA et enseigné à l'École de physique de Grenoble. Il est l'auteur de manuels techniques, dont Le contrôle non destructif par ultrasons publié chez le même éditeur, et d'une quinzaine d'essais sur les sciences, dont une Histoire de la physique.

