Rapport technique

ISO/ASTM TR 52958

Fabrication additive de métaux — Fusion sur lit de poudre (PBF) — Surveillance par photodiode coaxiale in situ pour la détection de défauts de manque de fusion en PBF-LB

Additive manufacturing of metals — Powder bed fusion (PBF) — In-situ coaxial photodiode monitoring for lack of fusion flaw detection in PBF-LB

Sample Document
iTeh Standards (https://standards.iteh.ai)

Première édition
2026-05

Numéro de référence
ISO/ASTM TR 52958:2026(fr)

© ISO/ASTM International 2026

ISO/ASTM TR 52958:2026 • https://standards.iteh.ai/catalog/standards/iso/0a00a24b-2267-45e0-9e11-45b9add0c89f/iso-astm-tr-52958-2026

Sample Document

get full document from standards.iteh.ai



DOCUMENT PROTÉGÉ PAR COPYRIGHT

© ISO/ASTM International 2026

Tous droits réservés. Sauf prescription différente ou nécessité dans le contexte de sa mise en œuvre, aucune partie de cette publication ne peut être reproduite ni utilisée sous quelque forme que ce soit et par aucun procédé, électronique ou mécanique, y compris la photocopie, ou la diffusion sur l'internet ou un intranet, sans autorisation écrite soit de l'ISO à l'adresse ci-après, soit d'un organisme membre de l'ISO dans le pays du demandeur. Aux États-Unis, les demandes doivent être adressées à ASTM International.

ISO copyright office
Case postale 401 • Ch. de Blandonnet 8
CH-1214 Vernier, Genève
Tél.: +41 22 749 01 11

E-mail: copyright@iso.org
Web: www.iso.org

ASTM International
100 Barr Harbor Drive, PO Box C700
West Conshohocken, PA 19428-2959, USA
Tél.: +610 832 9634
Fax: +610 832 9635
E-mail: khooper@astm.org
Web: www.astm.org

Publié en Suisse

ISO/ASTM TR 52958:2026 • https://standards.iteh.ai/catalog/standards/iso/0a00a24b-2267-45e0-9e11-45b9add0c89f/iso-astm-tr-52958-2026

Sommaire

Page

Avant-propos ..... **iv**

1 Domaine d'application **1**

2 Références normatives **1**

3 Termes et définitions **1**

4 Portée et utilisation **2**

5 Conception des coupons **3**
5.1 Généralités 3
5.2 Défauts implantés intentionnellement 4
5.3 Défauts randomisés/stochastiques 5

6 Description du capteur **6**

7 Algorithmes de détection de défauts **7**
7.1 Généralités 7
7.2 Algorithmes statistiques 8
7.2.1 Généralités 8
7.2.2 Limites absolues (AL) 9
7.2.3 Fluctuations à court terme (STF) 11
7.2.4 Flux de travail 11
7.3 Approche d'apprentissage automatique: algorithme de regroupement 13
7.3.1 Carte auto-organisatrice (SOM) 14
7.3.2 *K*-moyennes 15

8 Mise en œuvre d'algorithmes personnalisés pour les composants présentant des défauts randomisés et leur voxélisation associée **16**

9 Étude de cas: mise en œuvre du mode opératoire et résultats de validation **19**

Bibliographie **25**

Sample Document
get full document from standards.iteh.ai

© ISO/ASTM International 2026 – Tous droits réservés

ISO/ASTM TR 52958:2026 • https://standards.iteh.ai/catalog/standards/iso/0a00a24b-2267-45e0-9e11-45b9add0c89f/iso-astm-tr-52958-2026

Avant-propos

L'ISO (Organisation internationale de normalisation) est une fédération mondiale d'organismes nationaux de normalisation (comités membres de l'ISO). L'élaboration des Normes internationales est en général confiée aux comités techniques de l'ISO. Chaque comité membre intéressé par une étude a le droit de faire partie du comité technique créé à cet effet. Les organisations internationales, gouvernementales et non gouvernementales, en liaison avec l'ISO participent également aux travaux. L'ISO collabore étroitement avec la Commission électrotechnique internationale (IEC) en ce qui concerne la normalisation électrotechnique.

Les procédures utilisées pour élaborer le présent document et celles destinées à sa mise à jour sont décrites dans les Directives ISO/IEC, Partie 1. Il convient, en particulier, de prendre note des différents critères d'approbation requis pour les différents types de documents ISO. Le présent document a été rédigé conformément aux règles de rédaction données dans les Directives ISO/IEC, Partie 2 (voir www.iso.org/directives).

L'ISO attire l'attention sur le fait que la mise en application du présent document peut entraîner l'utilisation d'un ou de plusieurs brevets. L'ISO ne prend pas position quant à la preuve, à la validité et à l'applicabilité de tout droit de brevet revendiqué à cet égard. À la date de publication du présent document, l'ISO n'avait pas reçu notification qu'un ou plusieurs brevets pouvaient être nécessaires à sa mise en application. Toutefois, il y a lieu d'avertir les responsables de la mise en application du présent document que des informations plus récentes sont susceptibles de figurer dans la base de données de brevets, disponible à l'adresse www.iso.org/brevets. L'ISO ne saurait être tenue pour responsable de ne pas avoir identifié tout ou partie de tels droits de brevet.

Les appellations commerciales éventuellement mentionnées dans le présent document sont données pour information, par souci de commodité, à l'intention des utilisateurs et ne sauraient constituer un engagement.

Pour une explication de la nature volontaire des normes, la signification des termes et expressions spécifiques de l'ISO liés à l'évaluation de la conformité, ou pour toute information au sujet de l'adhésion de l'ISO aux principes de l'Organisation mondiale du commerce (OMC) concernant les obstacles techniques au commerce (OTC), voir www.iso.org/iso/fr/avant-propos.html.

Sample Document
get full document from standards.iteh.ai

Le présent document a été élaboré par le comité technique ISO/TC 261, *Fabrication additive*, en coopération avec l'ASTM F 42, *Technologies de fabrication additive*, dans le cadre d'un accord de partenariat entre l'ISO et ASTM International dans le but de créer un ensemble commun de normes ISO/ASTM sur la fabrication additive, en collaboration avec le comité technique CEN/TC 438, *Fabrication additive*, du Comité Européen de Normalisation (CEN), conformément à l'Accord de coopération technique entre l'ISO et le CEN (Accord de Vienne).

Il convient que l'utilisateur adresse tout retour d'information ou toute question concernant le présent document à l'organisme national de normalisation de son pays. Une liste exhaustive desdits organismes se trouve à l'adresse www.iso.org/fr/members.html.

© ISO/ASTM International 2026 – Tous droits réservés

ISO/ASTM TR 52958:2026 • https://standards.iteh.ai/catalog/standards/iso/0a00a24b-2267-45e0-9e11-45b9add0c89f/iso-astm-tr-52958-2026

Fabrication additive de métaux — Fusion sur lit de poudre (PBF) — Surveillance par photodiode coaxiale in situ pour la détection de défauts de manque de fusion en PBF-LB

1 Domaine d'application

Le présent document fournit un flux de travail intégrant des modes opératoires expérimentaux et des algorithmes de détection des défauts destinés à localiser les défauts dans les pièces produites par le procédé de fusion laser sur lit de poudre métallique (PBF-LB). Il met l'accent sur l'utilisation de la surveillance *in situ* basée sur des photodiodes coaxiales et d'algorithmes statistiques et de regroupement par apprentissage automatique, en particulier pour détecter des défauts induits par un manque de fusion. Le flux de travail délimite les seuils de définition pour la détection statistique et la détermination du nombre de grappes pour les algorithmes d'apprentissage automatique, en utilisant des défauts implantés intentionnellement dans les pièces. Les modes opératoires de validation sont fournis par des données scannées par tomographie informatisée. Les limitations matérielles et les considérations relatives aux procédés multi-laser sont abordées, en soulignant les problèmes potentiels.

2 Références normatives

Les documents suivants sont cités dans le texte de sorte qu'ils constituent, pour tout ou partie de leur contenu, des exigences du présent document. Pour les références datées, seule l'édition citée s'applique. Pour les références non datées, la dernière édition du document de référence s'applique (y compris les éventuels amendements).

ISO/ASTM 52900, *Fabrication additive — Principes généraux — Fondamentaux et vocabulaire*

3 Termes et définitions

Pour l'application du présent document, les termes et définitions donnés dans l'ISO/ASTM 52900, ainsi que les suivants, s'appliquent:

L'ISO et l'IEC tiennent à jour des bases de données terminologiques destinées à être utilisées en normalisation, consultables aux adresses suivantes:

— ISO Online browsing platform: disponible à l'adresse https://www.iso.org/obp

— IEC Electropedia: disponible à l'adresse https://www.electropedia.org/

3.1
algorithme de regroupement
méthodes d'apprentissage automatique non supervisées avec des données d'entrée non étiquetées regroupées par similarité

3.2
agencement de photodiode coaxiale
type d'agencement de capteur sur la machine de fusion laser sur lit de poudre aligné sur le trajet du faisceau laser

© ISO/ASTM International 2026 – Tous droits réservés

ISO/ASTM TR 52958:2026 • https://standards.iteh.ai/catalog/standards/iso/0a00a24b-2267-45e0-9e11-45b9add0c89f/iso-astm-tr-52958-2026

3.3
tomographie informatisée
TI
technique d'examen non destructif capturant des projections radiographiques d'un objet à différents angles de rotation, suivi d'une reconstruction mathématique pour produire un ensemble de données de volume tridimensionnel ou une ou plusieurs images de section transversale bidimensionnelle

3.4
alignement des données
procédé de transformation de différents ensembles de données géométriques ou temporelles en un système de coordonnées global unique

3.5
enregistrement des données
mode opératoire d'alignement des données et d'attribution d'une identification persistante à l'ensemble de données aligné

3.6
analyse ex situ
mode opératoire de mesurage réalisé après l'achèvement du cycle de fabrication

3.7
indicateur de défaut
indicateur correspondant à l'emplacement des défauts prédits par l'algorithme de détection des défauts

3.8
manque de fusion
type de porosité induite par le procédé avec des particules de poudre non entièrement fondues ou fusionnées sur le substrat préalablement déposé

[SOURCE: ASTM E3166-20, 3.4.7]

Sample Document
Get full document from standards.iteh.ai

3.9
caractéristique de référence
encoche, rainure ou caractéristique similaire ajoutée à la géométrie dans un coupon à défaut implanté pour faciliter l'alignement des données et l'enregistrement des emplacements de porosité pour l'analyse *ex situ* par balayage TI

3.10
défaut implanté intentionnellement
fait de créer intentionnellement des défauts par conception assistée par ordinateur ou manipulation de paramètres de traitement désignés, qui entraîne la mise en place du défaut prévu ou le fait de créer intentionnellement un défaut par l'insertion d'un objet artificiel

4 Portée et utilisation

Un flux de travail pour la détection indirecte des défauts et la documentation de l'analyse pendant le PBF-LB est fourni en utilisant les signaux reçus d'une photodiode coaxiale qui peut détecter les défauts, y compris le manque de fusion, dans les composants fabriqués.

Ces défauts peuvent avoir des effets néfastes sur les performances mécaniques des pièces fabriquées. Le flux de travail du présent document fournit un mode opératoire pour identifier la plage de seuils supérieur et inférieur nécessaire aux algorithmes de détection statistique pour détecter les défauts stochastiques de manque de fusion induits durant le processus. Il fournit un mode opératoire pour identifier le nombre de grappes requises pour les algorithmes de détection d'apprentissage automatique. Lors du mode opératoire de validation, les ensembles de données collectés à partir d'un scanner TI qui sont enregistrés et voxélisés peuvent être utilisés. Il est à noter que la taille du défaut détectable, telle que déterminée par le mode opératoire décrit dans le présent document, dépend de la résolution et de la fréquence du matériel utilisé, en particulier la photodiode coaxiale et sa carte d'acquisition de données associée. Par exemple, en cas d'utilisation d'une photodiode couramment disponible avec une fréquence de 60 kHz, le mode opératoire

© ISO/ASTM International 2026 – Tous droits réservés

ISO/ASTM TR 52958:2026 • https://standards.iteh.ai/catalog/standards/iso/0a00a24b-2267-45e0-9e11-45b9add0c89f/iso-astm-tr-52958-2026

et les algorithmes spécifiés dans le présent document sont incapables de détecter des défauts inférieurs à 100 µm.

En général, une photodiode *in situ* installée coaxialement fournit des informations à partir de la signature du procédé et des défauts. Cependant, il est nécessaire de corriger les données enregistrées *in situ* pour supprimer la distorsion chromatique et monochromatique. Les données corrigées sont analysées par deux algorithmes principaux pour identifier les défauts:

a) statistiquement, et

b) par apprentissage automatique.

Ces algorithmes peuvent être systématiquement optimisés et personnalisés pour détecter des défauts de manque de fusion. À cette fin, des défauts implantés intentionnellement sont d'abord ajoutés à la conception assistée par ordinateur (CAO) des coupons afin de régler les paramètres des algorithmes. Ensuite, l'algorithme personnalisé est soumis à l'essai en détectant les défauts randomisés/stochastiques créés par fusion laser sur lit de poudre avec une densité d'énergie intentionnellement réduite. La comparaison des résultats de détection a pu être analysée par des algorithmes avec les données de TI appliquées par une approche volumétrique pour identifier les défauts randomisés/stochastiques. Un organigramme illustrant la progression dans le présent document est illustré sur la Figure 1.

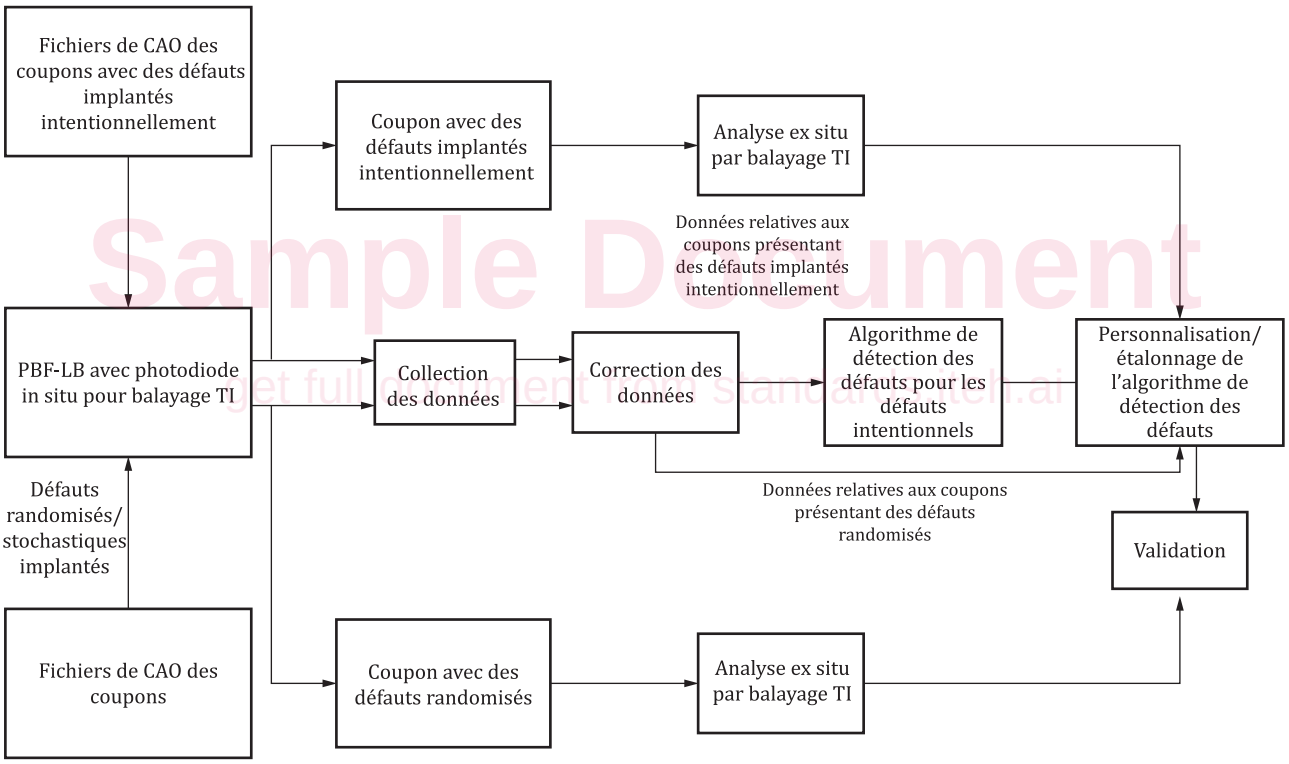


Figure 1 — Représentation schématique du flux d'étalonnage nécessaire à la détection des défauts de manque de fusion

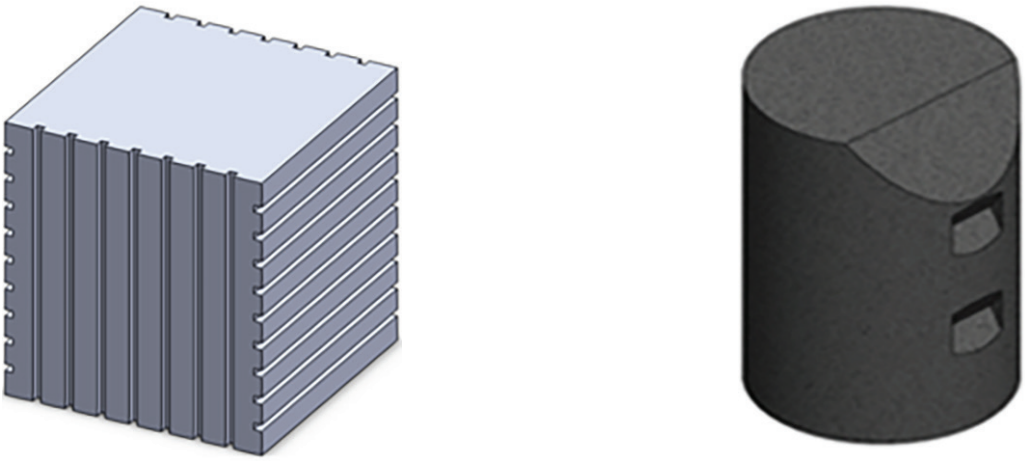
5 Conception des coupons

5.1 Généralités

Pour personnaliser et étalonner systématiquement les algorithmes de détection, deux jeux de coupons sont proposés. Des éléments de référence peuvent également être ajoutés à la géométrie pour faciliter l'alignement des données et l'enregistrement des données des emplacements de porosités dans l'analyse *ex situ* qui correspond au balayage TI dans cette pratique. La Figure 2 représente quelques suggestions pour les encoches/rainures du repérage.

© ISO/ASTM International 2026 – Tous droits réservés

ISO/ASTM TR 52958:2026 • https://standards.iteh.ai/catalog/standards/iso/0a00a24b-2267-45e0-9e11-45b9add0c89f/iso-astm-tr-52958-2026



a) Rainures de repérage verticales et horizontales ajoutées

b) Encoches inclinées ajoutées

Figure 2 — Ajout de rainures de repérage et d'encoches inclinées à la géométrie du coupon

5.2 Défauts implantés intentionnellement

L'effet des défauts de manque de fusion peut être reproduit en incorporant délibérément des inserts/vides dans les coupons. Selon l'ISO/ASTM TR 52906[1], pour créer ces inserts, diverses tailles, distributions et géométries d'inserts peuvent être ajoutés à la conception assistée par ordinateur. Deux formes de défauts sphériques et cylindriques implantés intentionnellement peuvent être considérées, la taille des défauts sphériques étant identifiée par leur diamètre et la taille des défauts cylindriques par leur diamètre de section transversale et leur hauteur. Noter que la taille minimale du défaut intentionnel est dictée par les restrictions du PBF-LB. Il est toutefois recommandé que la taille des éléments de défauts soit définie dans le modèle de conception assistée par ordinateur selon trois classes différentes:

La taille minimale possible à réaliser par le PBF-LB (par exemple 100 µm pour le diamètre des sphères et 100 µm pour la hauteur et le diamètre des cylindres) en fonction de la résolution et de la taille du point laser:

a) la valeur minimale plus 50 µm (par exemple 150 µm pour les paramètres mentionnés ci-dessus);

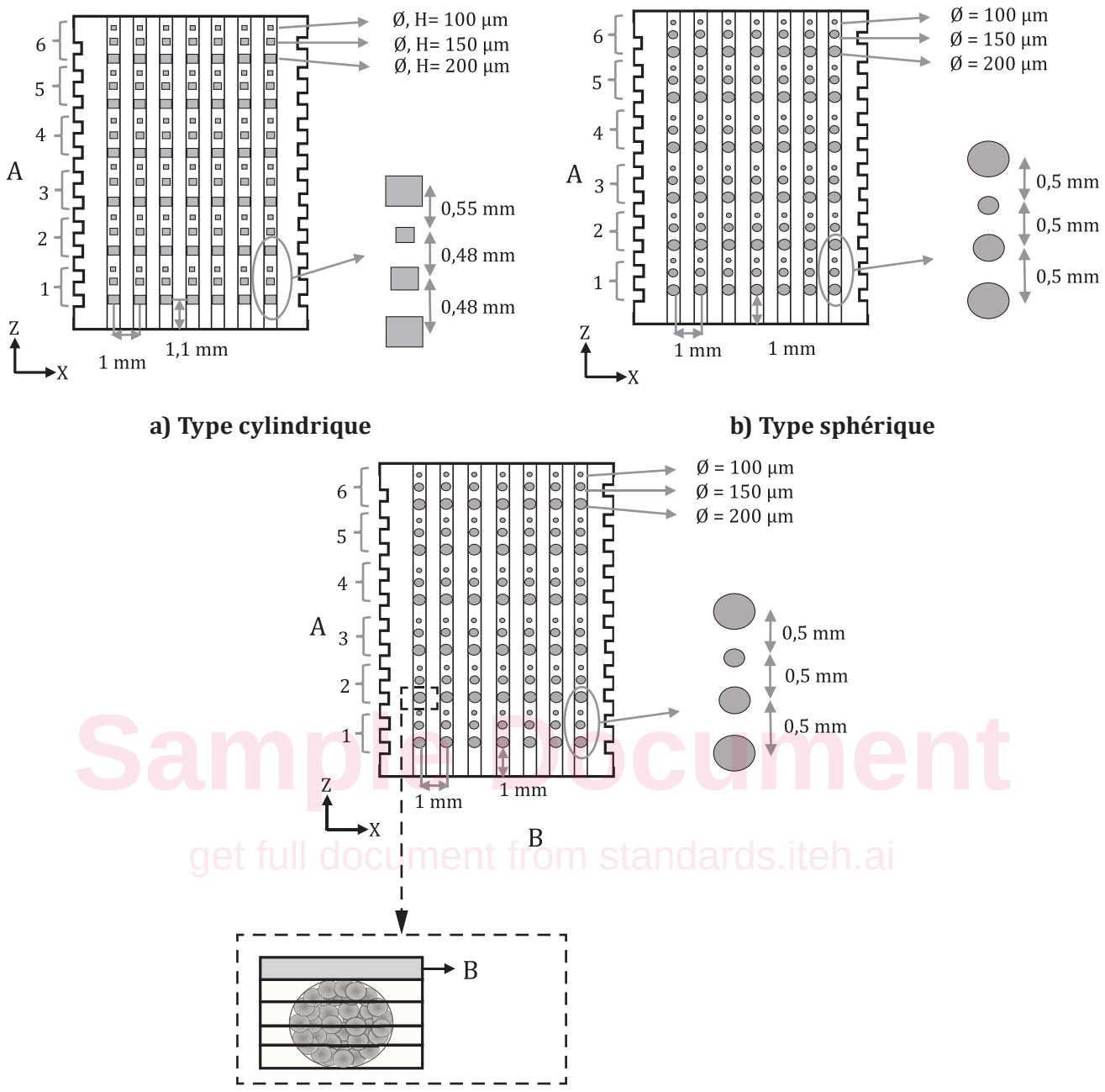
b) la valeur minimale plus 100 µm (par exemple 200 µm pour les paramètres mentionnés ci-dessus).

Noter que dans les couches dans lesquelles des défauts intentionnels sont réalisés, un paramètre de contre-dépouille optimal est utilisé pour supporter l'intégrité mécanique du défaut intentionnel. La couche supérieure, cependant, ne peut pas avoir de paramètre de contre-dépouille.

Deux exemples de défauts implantés intentionnellement sont illustrés sur la Figure 3. La Figure 3 a) et b) représente des sections transversales bidimensionnelles d'échantillons montrant la distribution des défauts implantés intentionnellement (cylindriques et sphériques), respectivement. La Figure 3 a) représente six ensembles nominalement identiques de trois tailles de défauts cylindriques (Ø, *H* = 200 µm, Ø, *H* = 150 µm et Ø, *H* = 100 µm); la Figure 3 b) représente six ensembles nominalement identiques de trois tailles de défauts sphériques (Ø = 200 µm, Ø = 150 µm et Ø = 100 µm), où Ø est le diamètre et *H* est la hauteur, en microns; la Figure 3 c) représente la couche supérieure des défauts sphériques.

© ISO/ASTM International 2026 – Tous droits réservés

ISO/ASTM TR 52958:2026 • https://standards.iteh.ai/catalog/standards/iso/0a00a24b-2267-45e0-9e11-45b9add0c89f/iso-astm-tr-52958-2026



a) Type cylindrique

b) Type sphérique

c) Schéma des défauts sphériques montrant la couche supérieure

Légende

A ensembles (vides intentionnels regroupés)

B couche supérieure

NOTE 1 Toutes les dimensions sont dans le système de coordonnées SI.

NOTE 2 Figures 3 a) et 3 b) publiées sous une licence BY 4.0 en libre accès CC.

Figure 3 — Sections transversales bidimensionnelles d'échantillons montrant la distribution des différents types de défauts implantés intentionnellement

5.3 Défauts randomisés/stochastiques

Les défauts randomisés/stochastiques peuvent être réalisés normalement en raison d'anomalies de procédé ou suite à une modification des paramètres du procédé, entraînant des défauts de manque de fusion par

Sample Document
get full document from standards.iteh.ai

© ISO/ASTM International 2026 – Tous droits réservés

ISO/ASTM TR 52958:2026 • https://standards.iteh.ai/catalog/standards/iso/0a00a24b-2267-45e0-9e11-45b9add0c89f/iso-astm-tr-52958-2026