
**Matériaux métalliques — Tôles et
bandes — Détermination de la courbe
contrainte-déformation biaxiale
au moyen de l'essai de gonflement
hydraulique avec systèmes de mesure
optiques**

*Metallic materials — Sheet and strip — Determination of biaxial
stress-strain curve by means of bulge test with optical measuring
systems*

ISO 16808:2022

<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/e581d346-993a-467c-9465-31b116ab9890/iso-16808-2022>



iTeh STANDARD PREVIEW
(standards.iteh.ai)

ISO 16808:2022

<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/e581d346-993a-467c-9465-31b116ab9890/iso-16808-2022>



DOCUMENT PROTÉGÉ PAR COPYRIGHT

© ISO 2022

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 sur un intranet, sans autorisation écrite préalable. Une autorisation peut être demandée à l'ISO à l'adresse ci-après ou au comité membre de l'ISO dans le pays du demandeur.

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

Publié en Suisse

Sommaire

Page

Avant-propos	iv
1 Domaine d'application	1
2 Références normatives	1
3 Termes et définitions	1
4 Symboles et abréviations	1
5 Principe	2
6 Equipement d'essai	3
7 Système de mesure optique	5
8 Éprouvette	6
8.1 Généralités	6
8.2 Application de la grille	6
8.2.1 Type de grille	6
8.2.2 Application de la grille	6
9 Mode opératoire	6
10 Méthodes d'évaluation pour la détermination de la courbure et des déformations au niveau du dôme	7
11 Calcul des courbes contrainte-déformation biaxiales	8
12 Rapport d'essai	9
Annexe A (informative) Procédure d'essai pour une vérification de la qualité du système de mesure optique	11
Annexe B (informative) Estimation de la courbure sur la base d'une surface de réponse	14
Annexe C (informative) Détermination du point de contrainte équi-biaxiale de la zone d'écoulement et de la courbe d'écrouissage	16
Bibliographie	24

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'attention est attirée sur le fait que certains des éléments du présent document peuvent faire l'objet de droits de propriété intellectuelle ou de droits analogues. L'ISO ne saurait être tenue pour responsable de ne pas avoir identifié de tels droits de propriété et averti de leur existence. Les détails concernant les références aux droits de propriété intellectuelle ou autres droits analogues identifiés lors de l'élaboration du document sont indiqués dans l'Introduction et/ou dans la liste des déclarations de brevets reçues par l'ISO (voir www.iso.org/brevets).

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/avant-propos.

Le présent document a été élaboré par le comité technique ISO/TC 164, *Essais mécaniques des métaux*, sous-comité SC 2, *Essais de ductilité*, en collaboration avec le Comité Européen de Normalisation (CEN) comité technique CEN/TC 459/SC 1, *Méthodes d'essai des aciers (autres que les analyses chimiques)*, conformément à l'accord de coopération technique entre l'ISO et le CEN (accord de Vienne).

Cette deuxième édition annule et remplace la première édition (ISO 16808:2014), dont elle constitue une révision mineure. Les modifications sont les suivantes:

- la désignation de $r_{1,100}$ dans le [Tableau 1](#) a été modifiée;
- le titre de la Figure A.4 a été modifié;
- la [Formule B.2](#) a été modifiée;
- l'Annexe A a été supprimée et les autres annexes ont été renumérotées en conséquence;
- le statut de l'[Annexe A](#) (ancienne Annexe B) a été changé en informatif;
- des modifications rédactionnelles mineures ont été apportées pour s'aligner sur les directives ISO/IEC Partie 2, 2021.

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.

Matériaux métalliques — Tôles et bandes — Détermination de la courbe contrainte-déformation biaxiale au moyen de l'essai de gonflement hydraulique avec systèmes de mesure optiques

1 Domaine d'application

Le présent document spécifie une méthode pour la détermination de la courbe contrainte-déformation biaxiale sur tôles métalliques d'épaisseur inférieure à 3 mm en formage en expansion pure sans influence significative des frottements. En comparaison à des résultats d'essais de traction, des valeurs plus élevées de déformation peuvent être obtenues.

NOTE Dans le présent document le terme «la courbe de contrainte-déformation biaxiale» est utilisé pour simplifier la rédaction. En principe, «la courbe biaxiale contrainte vraie-déformation vraie » est déterminé dans l'essai.

2 Références normatives

Le présent document ne contient aucune référence normative.

3 Termes et définitions

Aucun terme n'est défini dans le présent document.

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/>

4 Symboles et abréviations

Les symboles et désignations utilisés sont donnés dans le [Tableau 1](#).

Tableau 1

Symbole	Désignation	Unité
d_{die}	Diamètre (intérieur) de la matrice	mm
d_{BH}	Diamètre (intérieur) du serre-flan	mm
R_1	Rayon (intérieur) de la matrice	mm
h	Hauteur du flan embouti (surface extérieure)	mm
t_0	Épaisseur initiale de la tôle (du flan)	mm
t	Épaisseur instantanée de la tôle	mm
p	Pression dans la chambre	MPa
r_{ms}	Écart-type (moyenne quadratique)	—
ρ	Rayon de courbure	mm
r_1	Rayon de la surface pour la détermination de la courbure	mm

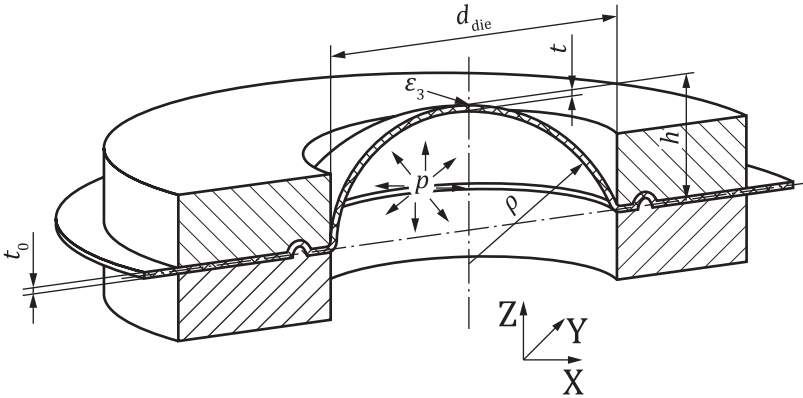
Tableau 1 (suite)

Symbole	Désignation	Unité
r_2	Rayon de la surface pour la détermination de la déformation	mm
r_{1_100}	Rayon de la surface pour la détermination de la courbure avec un diamètre de 100 mm	mm
a_i, b_i	Coefficients pour la surface de réponse	—
σ_B	Contrainte biaxiale	MPa
e	Déformation conventionnelle	—
ε_1	Déformation majeure vraie	—
ε_2	Déformation mineure vraie	—
ε_3	Déformation vraie dans l'épaisseur	—
ε_E	Déformation équivalente vraie	—
l_s	Coordonnées et longueur d'une section	mm
dz	Déplacement selon l'axe des z	mm
dz_{mv}	Déplacement après correction du mouvement	mm

5 Principe

Un flan circulaire est complètement enserré au niveau de son bord dans un outil entre une matrice et un serre-flan. Un dôme est formé par pression d'un fluide contre le flan jusqu'à ce que la rupture finale survienne (Figure 1). Pendant l'essai, la pression du fluide est mesurée et l'évolution de la déformation du flan est enregistrée par un système de mesure optique[1],[2],[3]. Sur la base de la déformation enregistrée du flan, les quantités suivantes sont déterminées près du centre du flan: la courbure locale, les déformations vraies au niveau de la surface, et, en supposant une déformation incompressible du matériau, l'épaisseur instantanée du flan. De plus, en supposant que l'état de contrainte au centre du flan est celui d'un récipient sous pression, sphérique à paroi mince, la contrainte vraie est calculée à partir de la pression du fluide, l'épaisseur et le rayon de courbure.

NOTE En complément des procédures d'essai de gonflement hydraulique avec des systèmes de mesure optiques mentionnés dans la Référence [1] et décrits dans ce qui suit, il existe également des systèmes laser [4],[5],[6] ou des systèmes tactiles [7],[8],[9] valables pour les examens liés à l'essai de gonflement hydraulique, qui ne sont pas couverts dans le présent document.



Légende

- h

hauteur du flan embouti (surface extérieure)
- p

pression dans la chambre
- ε_3

déformation vraie dans l'épaisseur (au sommet du dôme)
- d_{die}

diamètre (intérieur) de la matrice
- ρ

rayon de courbure
- t_0

épaisseur initiale de la tôle (du flan)
- t

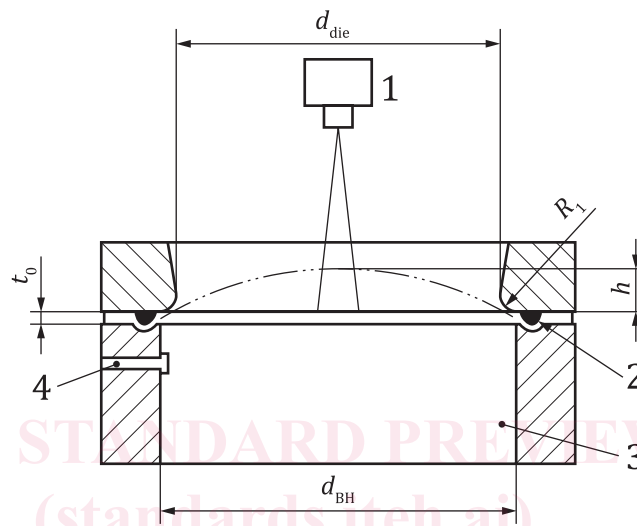
épaisseur instantanée de la tôle

Figure 1 — Principe de l'essai de gonflement hydraulique

L'origine des coordonnées doit se situer au centre du serre-flan. Il convient que le plan XY soit parallèle à la surface du serre-flan (parallèle à la tôle métallique enserrée avant formage). Ici, l'axe des x correspond à la direction de laminage. L'axe des z doit être perpendiculaire à la tôle métallique enserrée avant formage, les valeurs positives se trouvant du côté du capteur optique.

6 Équipement d'essai

6.1 L'essai de gonflement hydraulique doit être réalisé sur une machine équipée d'une matrice, d'un serre-flan et d'une chambre à fluide. L'équipement proposé est illustré à la [Figure 2](#).



Légende

- | | | | |
|---|-------------------------------------|---|----------------------------------|
| 1 | système de mesure de la déformation | 3 | chambre avec fluide |
| 2 | jonc de blocage | 4 | système de mesure de la pression |

Figure 2 — Proposition d'équipement d'essai (dessin de principe)

6.2 La disposition de l'équipement d'essai doit être telle qu'il soit possible de mesurer en continu la surface extérieure de l'éprouvette pendant l'essai, c'est-à-dire qu'il permette de déterminer la déformation de la géométrie en enregistrant l'évolution des coordonnées X , Y , Z d'une grille de points à la surface du flan soumis à gonflement hydraulique, de façon à calculer la forme et les déformations vraies dans la zone centrale examinée avant que la rupture survienne.

6.3 Pendant l'essai, le système doit être capable de mesurer par méthode optique (sans contact) les coordonnées X , Y , Z d'une grille de points déposée sur la surface soumise à gonflement hydraulique de l'éprouvette. À partir de ces coordonnées, les déformations vraies ε_1 et ε_2 pour chaque point de la zone choisie, la déformation dans l'épaisseur ε_3 et le rayon de courbure ρ pour le sommet du dôme sont calculés.

6.4 Il convient que le système soit équipé d'un système de mesure de la pression du fluide de la chambre. Un système de mesure indirecte est également possible. À partir de 20 % de la valeur maximale de la pression mesurée, il convient que l'exactitude soit de 1 % de la valeur effective mesurée.

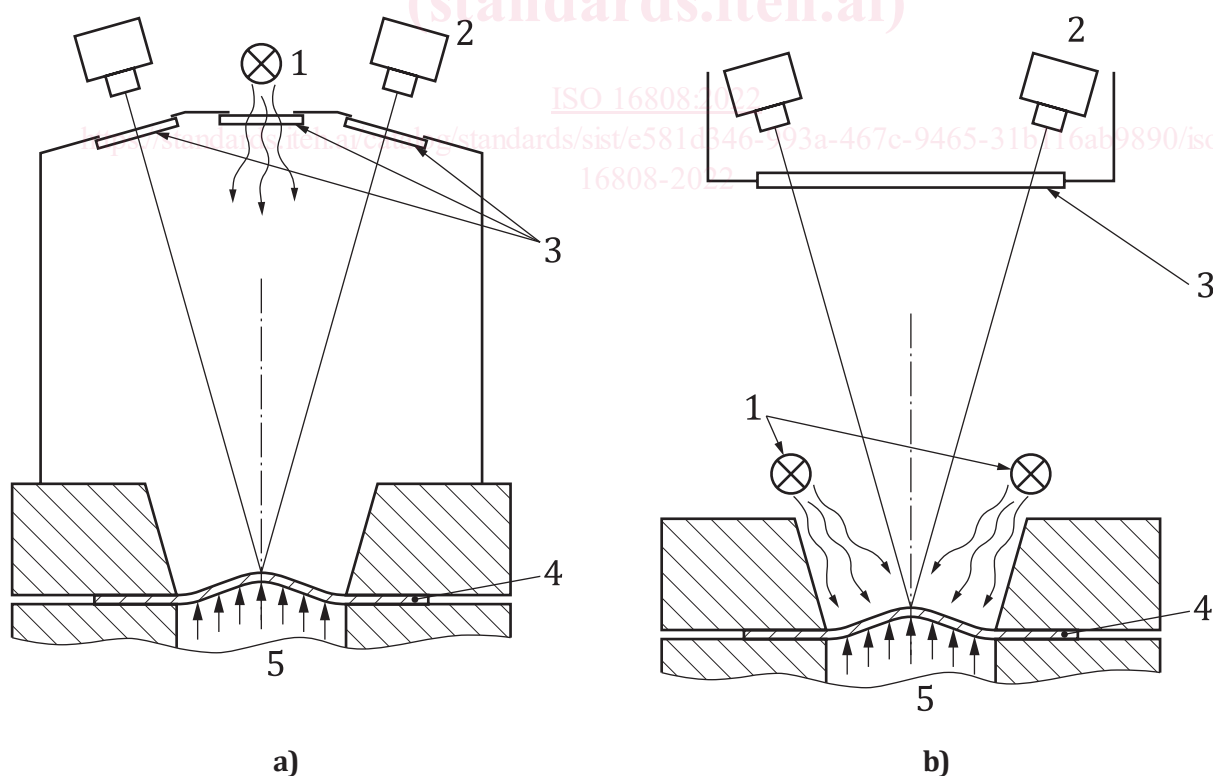
6.5 La matrice, le serre-flan et la chambre à fluide doivent être suffisamment rigides pour minimiser la déformation pendant les essais. La force exercée par le serre-flan doit être suffisamment élevée pour garder le serre-flan fermé. Il convient que tout mouvement de l'éprouvette entre le serre-flan et la matrice soit empêché. Typiquement pendant l'essai de gonflement hydraulique, la pression est appliquée sur les pièces constitutives du serre-flan réduisant la force effective du serre-flan. Cela doit être pris en considération lors de la définition de la force nécessaire du serre-flan.

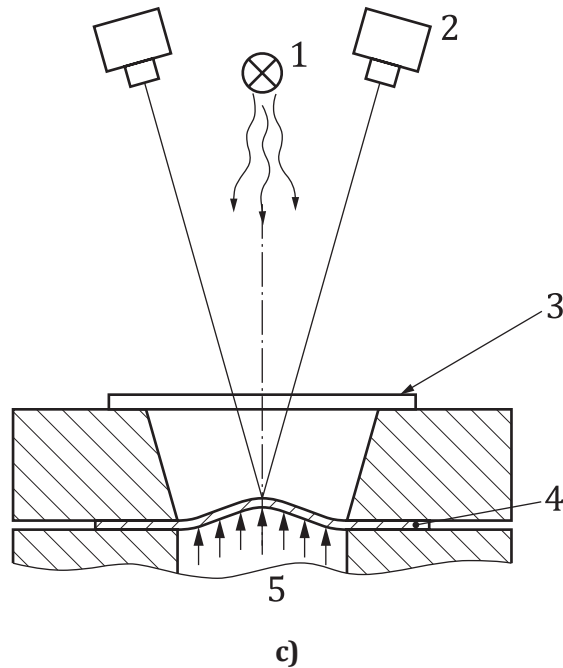
6.6 Le fluide doit être en contact avec la surface du flan (sans bulles d'air) pour prévenir le stockage d'énergie pendant l'essai au travers de bulles d'air comprimées qui conduiraient à une restitution d'énergie plus grande et à une asperersion d'huile à la rupture plus importante. Du fluide ne doit pas être perdu à travers le serre-flan, la matrice et la tôle ou en tout autre endroit pendant l'essai jusqu'à ce que la rupture survienne.

6.7 Un jonc de blocage (ou géométrie comparable sur la surface circulaire), conçu de façon à supprimer tout avalement du matériau, est recommandé. Le jonc de blocage ne doit pas amorcer de fissures dans le matériau. Le jonc de blocage doit être placé entre le serre-flan et la matrice. Un positionnement proche du rayon de la matrice est recommandé. Il convient que la géométrie du jonc de blocage évite une courbure et une ondulation du flan lors de la fermeture de l'outillage et prévienne le glissement du flan pendant l'essai.

6.8 Il est recommandé de placer des plaques de verre devant les lentilles et la source de lumière pour protéger le système de mesure optique de l'huile aspergée lors de la rupture [7],[12]. Les plaques peuvent être fixées sur le serre-flan (verre épais) ou à proximité des lentilles et de la source de lumière (verre plus fin); voir [Figure 3](#). La protection insérée ne doit pas perturber la qualité du mesurage optique (voir [Article 7](#)). Après chaque essai, les plaques de verre doivent être bien nettoyées sans les abîmer ou les rayer et doivent être repositionnées avec précision pour ne pas modifier l'étalonnage. Typiquement, un étalonnage du système optique incluant la protection accroît la qualité du mesurage.

6.9 Il convient que le plus petit diamètre de la matrice recommandé présente un rapport diamètre de la matrice sur épaisseur initiale $d_{\text{die}} / t_0 \geq 33$ (voir [Figure 2](#)). Il convient que le rayon de la matrice ne conduise pas à la formation de fissures dans le flan pendant l'essai. Une valeur de $(5 \times t_0)$ à $(15 \times t_0)$ (maximum 15 mm) est recommandée.





Légende

- | | | | |
|---|------------------|---|------------|
| 1 | lampe | 4 | éprouvette |
| 2 | caméras | 5 | fluide |
| 3 | plaques de verre | | |

Figure 3 — Exemples de dispositions possibles des plaques de protection contre l'huile et des lampes

7 Système de mesure optique

Pour la détermination du rayon de courbure, ρ , et des déformations vraies ε_1 et ε_2 , un système optique de mesure du champ de déformations présentant les caractéristiques suivantes est recommandé.

- Capteur optique utilisant au moins deux caméras.
- Aire de mesure avec $d_{\text{aire de mesure}} \geq 1/2 d_{\text{die}}$.

Il convient que l'aire de mesure utilisée soit plus grande que l'aire d'un cercle concentrique au serre-flan et de diamètre égal à la moitié du diamètre du serre-flan. Il convient que cette aire puisse être observée pendant la totalité du processus de formage pour toutes les hauteurs du flan déformé.

- Résolution locale (taille de grille entre les points de mesure indépendants): Il convient que l'espacement g_{max} entre deux points adjacents du flan non déformé respecte l'exigence:

$$g_{\text{max}} \leq \frac{d_{\text{die}}}{50}$$

- La détermination de la courbure requiert une exactitude des coordonnées sur l'axe des z dans une zone de diamètre $1/2 d_{\text{die}}$ concentrique au serre-flan égale à:

$$rms(dz)_n = \frac{rms(dz) \times 100 \text{ mm}}{d_{\text{die}}} \leq 0,015 \text{ mm}$$

NOTE L'exactitude de la mesure de la forme peut être vérifiée par un essai du système optique de mesure (voir [Annexe A](#)).

Exactitude pour le mesurage de la déformation: $rms(\varepsilon_1) = 0,003$ $rms(\varepsilon_2) = 0,003$

Pour chaque valeur vraie de la déformation pour la valeur $rms(\varepsilon)$ mentionnée ci-avant, les valeurs acceptables des mesurages sont:

$\varepsilon_{\text{real}} = 0$ intervalle de mesurages acceptables: $-0,003 \dots 0,003$

$\varepsilon_{\text{real}} = 0,5$ intervalle de mesurages acceptables: $0,497 \dots 0,503$

- Points de mesure manquants: De façon à éviter des approximations déséquilibrées de la courbure, seule l'absence de moins de 5 % des points de mesure dans la zone concentrique de diamètre égal à $1/2 d_{\text{die}}$ est acceptable (sans interpolation). Si des points adjacents manquent, le cercle inscrit de cette zone ne doit pas être plus grand que deux points.

8 Éprouvette

8.1 Généralités

L'éprouvette doit être plane et de forme telle que le flan est maintenu et que l'avalement du matériau est arrêté. L'utilisation de joncs de blocage est recommandée. Le bord du flan doit se situer en dehors du jonc de blocage.

La préparation du flan n'influence pas les résultats tant que la surface de l'éprouvette n'a pas été altérée (rayures, polissage). La forme des bords extérieurs peut être arrondie (de préférence) ou angulaire.

8.2 Application de la grille

8.2.1 Type de grille

Pour les dispositifs optiques de mesure plein champ, la grille doit remplir deux objectifs:

- a) la détermination du rayon de courbure de la surface des éprouvettes;
- b) le calcul des déformations du matériau.

8.2.2 Application de la grille

Il convient que les grilles déterministes (par exemple carrés, cercles, points) présentent un fort contraste et soient appliquées sans effet d'entaille et/ou changement de la microstructure. Quelques techniques usuelles d'application sont:

- attaque électrochimique, attaque photochimique, impression offset et transfert de grille,
- motifs stochastiques (speckle) qui peuvent être appliqués par pulvérisation de peinture à la surface de l'éprouvette. Il convient de vérifier l'adhérence de la peinture à la surface après déformation. Il est possible de pulvériser en premier lieu une couche fine d'apprêt blanc, mat pour réduire les réflexions à partir de la surface des éprouvettes puis un nuage de points noirs répartis de manière aléatoire (par exemple peinture noire pulvérisée ou graphite). Le film doit être à la fois élastique et suffisamment résistant pour qu'il ne se fissure pas ou ne se pèle pas pendant la déformation. La répartition aléatoire des points fins pulvérisés permet la détermination de chaque point de la grille virtuelle sur l'éprouvette. Il convient que le motif présente une densité noir/blanc suffisante et des caractéristiques dimensionnelles appropriées dans chaque zone de recherche de la position des points comme requis par le système optique utilisé.

9 Mode opératoire

9.1 L'essai doit être réalisé à température ambiante de $(23 \pm 5) ^\circ\text{C}$.

9.2 Déterminer l'épaisseur initiale de l'éprouvette à 0,01 mm près.

9.3 Serrer l'éprouvette entre le serre-flan et la matrice. Eviter les bulles d'air entre l'éprouvette et le fluide pour prévenir la formation d'air comprimé pendant les essais, conduisant à une aspersion d'huile plus conséquente lors de la rupture.

9.4 Une vitesse de déformation constante de $0,05 \text{ s}^{-1}$ est recommandée. S'il n'est pas possible d'appliquer une vitesse de déformation constante, il convient de garantir une vitesse de formage constante du piston ou du fluide. De façon à éviter de grandes influences sur la courbe contrainte-déformation biaxiale pour des matériaux sensibles à la température ou à la vitesse de déformation, il convient que l'essai de gonflement hydraulique soit réalisé en 2 min à 4 min. Cet intervalle de temps garantit de faibles et acceptables vitesses de déformation et un temps d'essai à coût maîtrisé.

Le tracé de la vitesse déformation en fonction du temps est recommandé.

9.5 Mesurer la pression du fluide pendant l'essai.

9.6 Mesurer les coordonnées X, Y, Z de la grille à la surface de l'éprouvette pendant l'essai.

9.7 Les données relatives à la pression du fluide et les données de formage doivent être mesurées et sauvegardées avec la même échelle de temps. Un minimum de 100 valeurs est recommandé. De façon à représenter le développement complet de la déformation et de la pression, au moins 100 images des essais de gonflement hydraulique sont recommandées.

9.8 La rupture de l'éprouvette doit être considérée comme obtenue lorsqu'une fissure traversante, c'est-à-dire une fissure qui se propage dans toute l'épaisseur de l'éprouvette, est apparue. La rupture est détectée par une chute de pression du fluide ce qui définit la fin de l'essai.

9.9 Il convient de préparer un nombre suffisant d'éprouvettes pour réaliser au moins trois essais valables.

10 Méthodes d'évaluation pour la détermination de la courbure et des déformations au niveau du dôme

Pour l'explication suivante du calcul de la courbure et des déformations, on suppose une surface de forme sphérique à proximité du dôme (sphère correspondant au meilleur ajustement possible). Sur la dernière image avant la rupture telle que définie au 9.8, la zone du dôme présentant la déformation la plus élevée est choisie et définie comme l'emplacement où déterminer la contrainte vraie et la déformation équivalente vraie dans l'épaisseur ε_3 . Pour obtenir un rayon de courbure stable du dôme, une sphère correspondant au meilleur ajustement possible peut être calculée sur la base d'une zone de points choisie. Pour ce choix, un rayon r_1 est défini autour du sommet du dôme pour la dernière image avant éclatement et l'ajustement est réalisé pour tous les stades de formage avec le même choix de points (Figure 4).

Un certain nombre des premiers stades de formage (images) sont rejetés, étant donné que l'éprouvette est encore trop plane pour une détermination fiable de la sphère correspondant au meilleur ajustement possible, et que le rayon de cintrage est très élevé et l'ajustement n'est pas stable. Pour des valeurs robustes de la déformation vraie et de l'amincissement au niveau du sommet, on prend la valeur moyenne calculée à partir d'un nombre de points choisis. Par conséquent, une deuxième zone est définie par un rayon r_2 de manière similaire (voir Figure 4).

Sur la base de cette procédure, pour tous les stades de formage (images), le rayon de courbure, les déformations moyennes dans l'épaisseur, de même que l'épaisseur correspondante et les valeurs de la contrainte au sommet du dôme sont calculées. Cette évaluation peut être réalisée pour différentes valeurs de r_1 et r_2 (voir Figure 4).

Pour une bonne convergence et des valeurs robustes, les intervalles recommandés pour r_1 et r_2 sont définis:

$$r_1 = (0,125 \pm 0,025) \times d_{\text{die}} \quad (1)$$

$$r_2 = (0,05 \pm 0,01) \times d_{\text{die}} \quad (2)$$

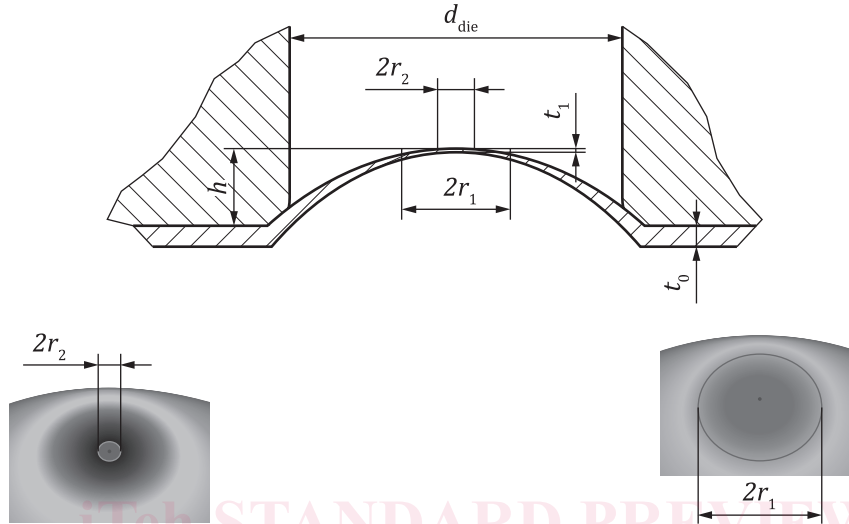


Figure 4 — Choix de r_1 et r_2 pour le calcul de la contrainte vraie et de la déformation vraie pour chaque étape de formage

Une proposition alternative pour le calcul de la courbure et des déformations est donnée en [Annexe B](https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/e581d346-993a-467c-9465-31b116ab9890/iso-16808-2022).

11 Calcul des courbes contrainte-déformation biaxiales

Pour le calcul des courbes contrainte-déformation biaxiales, on suppose un état de contraintes de membrane simple d'un récipient sous pression sphérique à paroi mince au centre du flan. Cela implique les simplifications suivantes:

- a) état de contraintes équi-biaxial:

$$\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_B \quad (3)$$

- b) représentation de la courbure par le rayon de courbure moyen:

$$\rho = \left[\frac{1}{2} (1/\rho_1 + 1/\rho_2) \right]^{-1} \quad (4)$$