
**Matériaux métalliques — Tôles et
bandes — Détermination des courbes
limites de formage —**

**Partie 2:
Détermination des courbes limites de
formage en laboratoire**

iTeh STANDARD PREVIEW
(standards.iteh.ai)

*Metallic materials — Sheet and strip — Determination of forming-limit
curves —*

Part 2: Determination of forming-limit curves in the laboratory

<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/b6b7a7a9-1f65-444c-82a3-cdf8b03e835/iso-12004-2-2008>



PDF – Exonération de responsabilité

Le présent fichier PDF peut contenir des polices de caractères intégrées. Conformément aux conditions de licence d'Adobe, ce fichier peut être imprimé ou visualisé, mais ne doit pas être modifié à moins que l'ordinateur employé à cet effet ne bénéficie d'une licence autorisant l'utilisation de ces polices et que celles-ci y soient installées. Lors du téléchargement de ce fichier, les parties concernées acceptent de fait la responsabilité de ne pas enfreindre les conditions de licence d'Adobe. Le Secrétariat central de l'ISO décline toute responsabilité en la matière.

Adobe est une marque déposée d'Adobe Systems Incorporated.

Les détails relatifs aux produits logiciels utilisés pour la création du présent fichier PDF sont disponibles dans la rubrique General Info du fichier; les paramètres de création PDF ont été optimisés pour l'impression. Toutes les mesures ont été prises pour garantir l'exploitation de ce fichier par les comités membres de l'ISO. Dans le cas peu probable où surviendrait un problème d'utilisation, veuillez en informer le Secrétariat central à l'adresse donnée ci-dessous.

iTeh STANDARD PREVIEW
(standards.iteh.ai)

[ISO 12004-2:2008](https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/b6b7a7a9-1f65-444c-82a3-cdf8b03e835/iso-12004-2-2008)

<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/b6b7a7a9-1f65-444c-82a3-cdf8b03e835/iso-12004-2-2008>



DOCUMENT PROTÉGÉ PAR COPYRIGHT

© ISO 2008

Droits de reproduction réservés. Sauf prescription différente, 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 et les microfilms, sans l'accord écrit de l'ISO à l'adresse ci-après ou du comité membre de l'ISO dans le pays du demandeur.

ISO copyright office
Case postale 56 • CH-1211 Geneva 20
Tel. + 41 22 749 01 11
Fax + 41 22 749 09 47
E-mail copyright@iso.org
Web www.iso.org

Publié en Suisse

Sommaire

Page

Avant-propos	iv
Introduction	v
1 Domaine d'application	1
2 Symboles et termes abrégés	1
3 Principe	2
4 Éprouvettes et équipement	3
5 Analyse du profil de déformation et détermination des paires $\varepsilon_1 - \varepsilon_2$	10
6 Documentation	15
7 Rapport d'essai	16
Annexe A (normative) Dérivée seconde et dérivée seconde «filtrée»	17
Annexe B (normative) Calcul de la largeur de la fenêtre de fit	18
Annexe C (normative) Évaluation de la parabole inverse de meilleur fit sur la «courbe en cloche»	19
Annexe D (normative) Application/Mesure de la grille — Évaluation à la loupe ou au microscope	21
Annexe E (normative) Tableaux de données expérimentales pour la validation du programme de calcul	22
Annexe F (normative) Représentation et description mathématique de la CLF	23
Annexe G (normative) Exemples de données relatives à des sections critiques	24
Annexe H (normative) Logigramme relatif au passage de la distribution des déformations mesurées aux valeurs de la CLF	25
Bibliographie	27

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 (CEI) en ce qui concerne la normalisation électrotechnique.

Les Normes internationales sont rédigées conformément aux règles données dans les Directives ISO/CEI, Partie 2.

La tâche principale des comités techniques est d'élaborer les Normes internationales. Les projets de Normes internationales adoptés par les comités techniques sont soumis aux comités membres pour vote. Leur publication comme Normes internationales requiert l'approbation de 75 % au moins des comités membres votants.

L'attention est appelée 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.

L'ISO 12004-2 a été élaborée par le comité technique ISO/TC 164, *Essais mécaniques des métaux*, sous-comité SC 2, *Essais de ductilité*. (standards.iteh.ai)

Cette première édition de l'ISO 12004-2, conjointement avec l'ISO 12004-1, annule et remplace l'ISO 12004:1997, dont elle constitue une révision technique.

L'ISO 12004 comprend les parties suivantes, présentées sous le titre général *Matériaux métalliques — Tôles et bandes — Détermination des courbes limites de formage*:

- *Partie 1: Mesurage et application des diagrammes limites de formage dans les ateliers d'emboutissage*
- *Partie 2: Détermination des courbes limites de formage en laboratoire*

Introduction

Un diagramme limite de formage (DLF) est un diagramme contenant les points de mesure pour les déformations majeure/mineure sur une pièce formée.

Un DLF permet de faire la distinction entre points bons et points en striction ou correspondant à une rupture. La frontière entre points bons et points correspondant à une rupture est définie par la courbe limite de formage (CLF).

Pour déterminer la limite de formage de matériaux, deux voies différentes sont possibles:

- 1) Une analyse des déformations d'éléments emboutis en atelier et rompus pour déterminer des CLF dépendant de l'élément et du processus:

Dans les ateliers d'emboutissage, les chemins de déformation pour obtenir ces points ne sont généralement pas connus. Une telle CLF dépend du matériau, de l'élément et des conditions de formage choisies. Cette méthode est décrite dans l'ISO 12004-1.

- 2) Détermination des CLF dans des conditions de laboratoire bien définies:

Pour évaluer la formabilité, une CLF unique pour le matériau donné est nécessaire. La détermination de la CLF doit être spécifique et il est nécessaire d'utiliser des chemins de déformation linéaires différents. Il convient d'utiliser cette méthode pour la caractérisation du matériau comme cela est décrit dans la présente partie de l'ISO 12004.

Pour la présente partie de l'ISO 12004 (concernant la détermination des courbes limites de formage au laboratoire), les conditions suivantes sont également valables.

- Les courbes limites de formage (CLF) sont déterminées pour des matériaux spécifiques afin de définir le niveau auquel ils peuvent être déformés par emboutissage, par rétreint ou par expansion ou toute combinaison d'emboutissage et de rétreint ou d'expansion. Cette capacité est limitée lorsqu'une rupture ou une striction localisée se produit. De nombreuses méthodes existent pour déterminer la limite de formage d'un matériau, toutefois il convient de noter que les résultats obtenus au moyen de différentes méthodes ne peuvent pas être utilisés à des fins de comparaison.
- La CLF caractérise la limite de déformation d'un matériau dans l'état obtenu après un traitement thermo-mécanique donné et pour l'épaisseur analysée. Pour porter un jugement sur sa formabilité, une connaissance supplémentaire des caractéristiques mécaniques et de l'histoire du matériau avant l'essai de CLF est importante.

Pour comparer la formabilité de différents matériaux, il est important non seulement de porter un jugement sur la CLF mais également sur les paramètres suivants:

- a) caractéristiques mécaniques au moins dans la direction principale;
- b) allongement proportionnel en pourcent à la force maximale, conformément à l'ISO 6892-1;
- c) coefficient r pour une gamme donnée de déformations, conformément à l'ISO 10113;
- d) coefficient n pour une gamme donnée de déformations, conformément à l'ISO 10275.

iTeh STANDARD PREVIEW
(standards.iteh.ai)

ISO 12004-2:2008

<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/b6b7a7a9-1f65-444c-82a3-cdf8b03e835/iso-12004-2-2008>

Matériaux métalliques — Tôles et bandes — Détermination des courbes limites de formage —

Partie 2:

Détermination des courbes limites de formage en laboratoire

1 Domaine d'application

La présente partie de l'ISO 12004 spécifie les conditions d'essai à utiliser pour la construction d'une courbe limite de formage (CLF) à la température ambiante et au moyen de chemins linéaires de déformation. Le matériau considéré est plat, métallique et d'épaisseur comprise entre 0,3 mm et 4 mm.

NOTE La limitation en épaisseur à 4 mm est proposée, donnant un rapport maximal admissible épaisseur/diamètre du poinçon.

Pour les tôles d'acier, une épaisseur maximale de 2,5 mm est recommandée.

iTeh STANDARD PREVIEW

2 Symboles et termes abrégés (standards.iteh.ai)

Pour les besoins du présent document, les symboles et termes abrégés donnés dans le Tableau 1 s'appliquent.

<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/b6b7a7a9-1f65-444c-82a3-cdf8b03e835/iso-12004-2-2008>

Tableau 1 — Symboles et termes abrégés

Symbole	Anglais	Français	Allemand	Unité
e	Engineering strain	Déformation conventionnelle	Technische Dehnung	%
ε	True strain (logarithmic strain)	Déformation vraie (déformation logarithmique)	Wahre Dehnung (Umformgrad, Formänderung)	—
ε_1	Major true strain	Déformation majeure vraie	Grössere Formänderung	—
ε_2	Minor true strain	Déformation mineure vraie	Kleinere Formänderung	—
ε_3	True thickness strain	Déformation vraie en épaisseur	Dickenformänderung	—
σ	Standard deviation	Écart-type	Standardabweichung	—
D	Punch diameter	Diamètre du poinçon	Stempeldurchmesser	mm
D_{bh}	Carrier blank hole diameter	Diamètre du trou du contre-flan	Lochdurchmesser des Trägerblechs	mm
$X(0), X(1)$ $X(m), \dots, X(n)$	X-position	Position en X	X-Position	mm
$f(x) = ax^2 + bx + c$	Best-fit parabola	Parabole de meilleur fit	Best-Fit-Parabel	—

Tableau 1 (suite)

Symbole	Anglais	Français	Allemand	Unité
$f(x) = 1/(ax^2 + bx + c)$	Best-fit inverse parabola	Parabole inverse de meilleur fit	Inverse Best-Fit-Parabel	—
S(0), S(1)...S(5)	Section	Section	Schnitt	—
n	Number of X-positions	Nombre de points en X	Nummer der X-Positionen	—
m	Section number of the failure position	Numéro de la section correspondant à la rupture	Nummer des Schnittes zum Riss	—
w	Width of the fit window	Largeur de la fenêtre de fit	Breite des Fit-Fensters	mm
t_0	Initial sheet thickness	Épaisseur initiale de la tôle	Ausgangsblechdicke	mm
r	Plastic strain ratio	Coefficient d'anisotropie plastique	Senkrechte Anisotropie	—

Le Tableau 2 donne une comparaison des symboles utilisés dans différents pays.

Tableau 2 — Comparaison des symboles utilisés dans différents pays

Anglais	Français	Allemand	Symbole allemand	Symbole anglo-américain	Format	Unité
Engineering strain	Déformation conventionnelle	Technische Dehnung	ϵ	e	—	%
True strain (logarithmic strain)	Déformation vraie (Déformation logarithmique)	Wahre Dehnung (Umformgrad Formänderung)	ϕ	ϵ	Décimal	—
$\epsilon = \ln(1 + e)$	$\epsilon = \ln(1 + e)$	$\phi = \ln(1 + \epsilon)$	—	—	—	—

Le symbole utilisé pour la déformation dans les pays parlant l'anglais est « ϵ » ; dans les pays parlant l'allemand, le symbole « ϕ » est utilisé pour la déformation vraie.

Dans les pays parlant allemand, le symbole « ϵ » est utilisé pour définir les allongements.

La notation pour les déformations vraies utilisée dans ce texte est « ϵ », suivant en cela la définition anglo-américaine.

3 Principe

La CLF est destinée à représenter la limite pratiquement intrinsèque d'un matériau en déformation, en supposant un chemin de déformation proportionnelle. Pour déterminer la CLF avec exactitude, il est nécessaire de se trouver dans un état quasiment sans frottement dans la zone d'évaluation.

Une grille déterministe de dimensions précises ou un motif stochastique est appliqué à la surface plane et non déformée d'un flan. Ce flan est alors déformé en appliquant la procédure Nakajima ou la procédure Marciniak jusqu'à la rupture, moment auquel l'essai est arrêté.

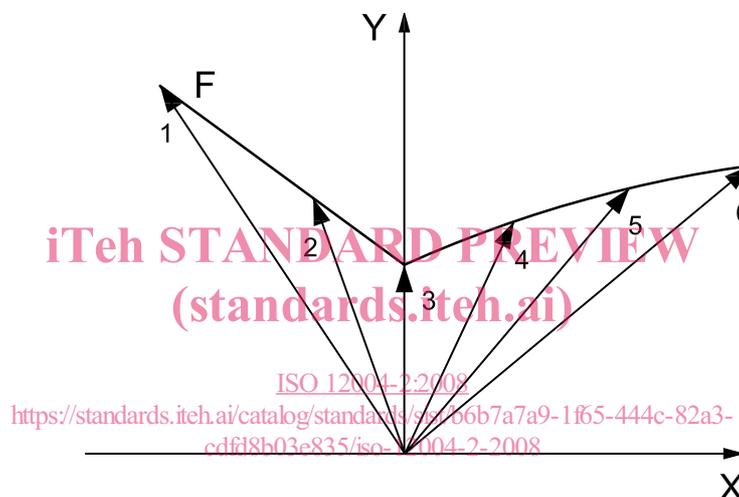
Il convient que la mesure soit réalisée au moyen d'une méthode «dépendant de la position» (voir 5.2).

NOTE Une méthode «dépendant du temps» est en cours de développement.

La déformation de l'éprouvette déformée est déterminée et les déformations mesurées sont exploitées de telle manière que la zone avec striction ou rupture soit éliminée des résultats. La déformation maximale qui peut être imposée sur le matériau sans rupture est alors déterminée par interpolation. Ce maximum de la courbe interpolée est défini comme la limite de formage.

Les limites de formage sont déterminées pour plusieurs chemins de déformation (rapports entre ε_1 et ε_2 différents). Les chemins de déformation déterminés vont de la traction uniaxiale à l'expansion biaxiale (emboutissage en expansion). La courbe reliant les limites de formage pour différents états de déformation donne la courbe limite de formage. La courbe est présentée en fonction des deux déformations vraies, ε_1 et ε_2 , dans le plan de la tôle et est tracée sur un diagramme, le diagramme limite de formage. Les déformations mineures vraies, ε_2 , sont portées sur l'axe des X et les déformations majeures vraies, ε_1 , sont portées sur l'axe des Y (voir Figure 1).

Des formules courantes de conversion permettent le calcul des déformations majeures vraies (ε_1) et des déformations mineures vraies (ε_2). Dans ce qui suit, le mot déformation implique la déformation vraie qui est également appelée déformation logarithmique.



Légende

- X déformation mineure vraie, ε_2
- Y déformation majeure vraie, ε_1
- F CLF
- 1 traction uniaxiale, $\varepsilon_2 = -[r/(r+1)]\varepsilon_1$
- 2 déformation en traction intermédiaire
- 3 déformation plane
- 4 état intermédiaire de déformation en expansion
- 5 état intermédiaire de déformation en expansion
- 6 expansion biaxiale équilibrée (= état de déformation en expansion) $\varepsilon_2 = \varepsilon_1$

Figure 1 — Illustration de six chemins de déformation différents

4 Éprouvettes et équipement

4.1 Éprouvettes

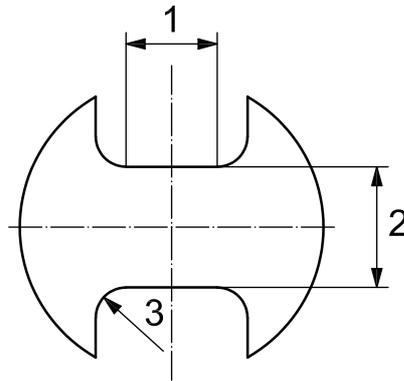
4.1.1 Épaisseur des éprouvettes

Ce mode opératoire concerne les tôles métalliques planes d'épaisseur comprise entre 0,3 mm et 4 mm.

4.1.2 Géométrie des éprouvettes

Les géométries suivantes sont recommandées:

flans échancrés avec une partie centrale calibrée de longueur supérieure à 25 % du diamètre du poinçon (pour un poinçon de 100 mm: longueur de la partie centrale égale de préférence à 25 mm à 50 mm, rayon de raccordement 20 mm à 30 mm) (voir Figure 2).



Légende

- 1 longueur de la partie centrale
- 2 largeur de flan restante
- 3 rayon de raccordement = $R = 20 \text{ mm à } 30 \text{ mm}$

iTeh STANDARD PREVIEW
(standards.iteh.ai)

Figure 2 — Géométrie de l'éprouvette échancrée avec partie centrale calibrée (forme en os de chien)

ISO 12004-2:2008

Pour $\epsilon_2 > 0$, des flans avec découpes semi-circulaires avec différents rayons sont possibles.

cdffd8b03e835/iso-12004-2-2008

Pour l'acier (principalement nuances d'acier doux), des bandes rectangulaires de différentes largeurs sont suffisantes si les éprouvettes n'atteignent pas la rupture pour le rayon de matrice, sinon utiliser la géométrie d'éprouvette décrite ci-avant.

On peut obtenir, avec une forme extérieure de flan circulaire, une répartition des points expérimentaux de limite de formage, plus uniforme que celle obtenue avec des bandes rectangulaires.

4.1.3 Préparation de l'éprouvette dans la zone d'essai

Le fraisage, l'électroérosion ou d'autres méthodes qui ne causent pas de fissures, d'écaillage ou de modification de la microstructure peuvent être utilisés et permettent d'assurer que la rupture ne s'amorce jamais à partir des bords des éprouvettes.

4.1.4 Nombre de géométries différentes d'éprouvette

Au moins cinq géométries pour la description d'une CLF complète sont nécessaires. (Une répartition uniforme de la traction uniaxiale à l'expansion biaxiale est recherchée pour la CLF.)

Si la description d'une CLF complète n'est pas nécessaire, alors un nombre plus faible de géométries est admis mais cela doit être mentionné dans le rapport d'essai.

4.1.5 Nombre d'essais pour chaque géométrie

Autant d'éprouvettes qu'il est nécessaire pour obtenir au moins trois échantillons valables.

4.2 Application de la grille

4.2.1 Type de grille

La taille recommandée de la grille est approximativement une fois l'épaisseur du matériau (la taille de la grille est reliée à l'épaisseur du matériau du fait de la largeur de la striction), une taille maximale de grille de 2,5 fois l'épaisseur du matériau est admise et la plus grande dimension de grille autorisée pour un poinçon de 100 mm est 2,54 mm (0,1 in). En général, des grilles de dimensions 1 mm ou 2 mm sont utilisées. L'utilisation de grilles de petite taille est souvent limitée du fait de leur manque d'exactitude (si la grille non déformée n'est pas mesurée avant le début de l'essai).

Pour un motif stochastique, il convient que la taille de grille «virtuelle» corresponde à la taille recommandée de grille. Une taille plus petite de grille «virtuelle» peut être utilisée.

4.2.2 Application de la grille

Il convient que les grilles déterministes (par exemple carrés, cercles, points) présentent un bon contraste et soient appliquées sans aucun effet d'entaille et/ou modification de la microstructure. Des techniques courantes d'application sont les méthodes électrochimique ou photochimique, l'impression offset et le transfert de grille.

Les motifs stochastiques (speckle) peuvent être appliqués par pulvérisation de peinture sur les surfaces des éprouvettes. Il convient de vérifier l'adhérence de la peinture sur la surface après déformation. Il est possible de pulvériser une fine couche de base blanc mat pour réduire les réflexions à la surface de l'éprouvette. À la suite de cela, un nuage de points noirs répartis aléatoirement peut être pulvérisé (par exemple peinture noire en spray ou graphite).

iTeh STANDARD PREVIEW
(standards.iteh.ai)

4.2.3 Exactitude de la grille non déformée

Pour obtenir l'exactitude requise de 2 % pour le système, il convient que l'exactitude initiale de la grille soit meilleure que 1 % sur la base d'une fois l'écart-type (1 σ). Cela est seulement requis pour les systèmes où l'état sans déformation n'est pas considéré pour l'évaluation.

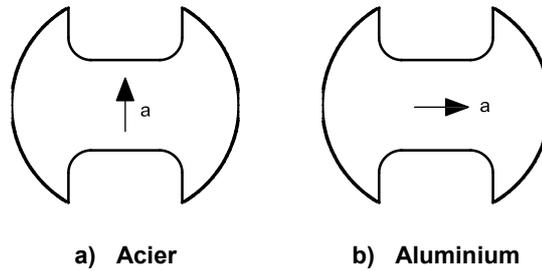
4.3 Équipement d'essai

4.3.1 Généralités

Les paramètres suivants sont valables pour les essais Nakajima et les essais Marciniak.

Vitesse du poinçon:	(1,5 ± 0,5) mm/s
Prévention de l'avalement du matériau:	On doit autant que possible prévenir l'avalement pour assurer des chemins de déformation pratiquement linéaires. Des mesures possibles sont: l'emploi de joncs de freinage, de forces suffisantes pour maintenir le flan, des outils dentelés ou moletés (pour autant que les deux dernières méthodes n'entraînent pas de risque de déformation localisée ou de rupture).
Force de maintien du flan, en kN:	On doit autant que possible prévenir l'avalement.
Température d'essai:	(23 ± 5) °C
Direction d'essai:	Pour une CLF donnée, la direction principale de toutes les éprouvettes doit être la déformation limite la plus faible e_1 ou e_2 et être la même par rapport à la direction de laminage (voir Figure 3).
Aluminium:	Longitudinale (partie centrale parallèle à la direction de laminage).
Acier:	Transversale (partie centrale perpendiculaire à la direction de laminage); des cas exceptionnels sont admis, mais doivent être mentionnés dans le rapport d'essai.

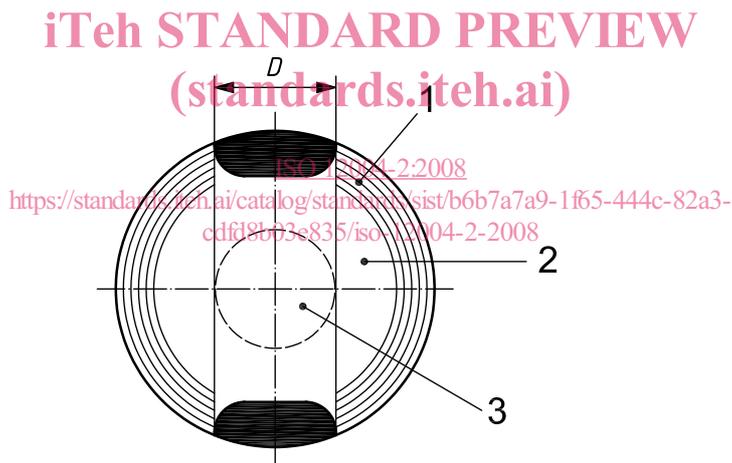
Dans le cas où la direction préférentielle de rupture n'est pas connue, il convient de la vérifier au moyen d'un essai de déformation biaxiale ou de toute autre méthode adaptée.



^a Direction de laminage (DL)

Figure 3 — Orientation de la partie centrale par rapport à la direction de laminage (DL)

- Rugosité de surface du poinçon: Il convient que la zone de contact à la surface du poinçon soit polie.
- Matériau et dureté de la matrice: Acier durci.
- Forme du presse-flan: Presse-flan circulaire complet, voir Figure 4.



Légende

- D* largeur découpée, égale au diamètre du poinçon
- 1 presse-flan dentelé avec découpe
- 2 flan
- 3 poinçon

NOTE Pour se rapprocher des chemins linéaires idéaux de déformation et pour atteindre une répartition plus uniforme des valeurs de déformation vraie, un presse-flan circulaire avec une découpe peut être utile (largeur recommandée de la découpe = diamètre du poinçon).

Figure 4 — Presse-flan avec découpe

- Critère d'arrêt d'essai: Apparition d'une fissure.
- Détection de fissure: Visuelle ou chute de la force.