

---

# Norme internationale



# 7441

---

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION • МЕЖДУНАРОДНАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ ПО СТАНДАРТИЗАЦИИ • ORGANISATION INTERNATIONALE DE NORMALISATION

---

## Corrosion des métaux et alliages — Détermination de la corrosion bimétallique par des essais de corrosion en milieu extérieur

*Corrosion of metals and alloys — Determination of bimetallic corrosion in outdoor exposure corrosion tests*

Première édition — 1984-12-15

**ITeH STANDARD PREVIEW**  
**(standards.iteh.ai)**

[ISO 7441:1984](https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/0fbaf73c-ac33-4bd6-b499-b3b9dca3df80/iso-7441-1984)

<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/0fbaf73c-ac33-4bd6-b499-b3b9dca3df80/iso-7441-1984>

---

CDU 620.193.2 : 621.357.7

Réf. n° : ISO 7441-1984 (F)

**Descripteurs :** corrosion, métal, alliage, essai, détermination, résistance à la corrosion, essai de corrosion bimétallique, corrosion atmosphérique.

## 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 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.

Les projets de Normes internationales adoptés par les comités techniques sont soumis aux comités membres pour approbation, avant leur acceptation comme Normes internationales par le Conseil de l'ISO. Les Normes internationales sont approuvées conformément aux procédures de l'ISO qui requièrent l'approbation de 75 % au moins des comités membres votants.

La Norme internationale ISO 7441 a été élaborée par le comité technique ISO/TC 156, *Corrosion des métaux et alliages*.

[ISO 7441:1984](#)

<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/0fbaf73c-ac33-4bd6-b499-b3b9dca3df80/iso-7441-1984>

# Corrosion des métaux et alliages — Détermination de la corrosion bimétallique par des essais de corrosion en milieu extérieur

## 1 Objet et domaine d'application

La présente Norme internationale spécifie des méthodes de détermination de la corrosion bimétallique des métaux et alliages nus ainsi que des métaux et alliages des revêtements métalliques et non métalliques, non organiques, par des essais de corrosion en milieu extérieur.

NOTE — Dans le texte de la présente Norme internationale, le terme « métal » est employé aussi bien pour les métaux que pour les alliages, et le terme « métal revêtu » pour les métaux et alliages avec revêtements métalliques et non métalliques, non organiques.

Les méthodes visent à déterminer l'ampleur et le type des manifestations de la corrosion engendrés en atmosphères naturelles par le contact de métaux (métaux revêtus) différents et à évaluer l'efficacité des traitements de protection contre la corrosion bimétallique.

## 2 Références

ISO 1456, *Revêtements métalliques — Dépôts électrolytiques de nickel plus chrome.*

ISO 2081, *Revêtements métalliques — Dépôts électrolytiques de zinc sur fer ou acier.*<sup>1)</sup>

ISO 2082, *Revêtements métalliques — Dépôts électrolytiques de cadmium sur fer ou acier.*<sup>2)</sup>

ISO 4540, *Revêtements métalliques — Dépôts électrolytiques cathodiques par rapport au métal de base — Cotation des éprouvettes ayant reçu un dépôt électrolytique, soumises aux essais de corrosion.*

ISO 4542, *Revêtements métalliques et autres revêtements non organiques — Directives générales pour les essais de corrosion statique en milieu extérieur.*

ISO 6892, *Matériaux métalliques — Essai de traction.*

## 3 Principes généraux

**3.1** L'essai consiste en l'exposition simultanée des éprouvettes à essayer et des éprouvettes de référence dans des stations d'essai en atmosphères naturelles et l'évaluation ultérieure par comparaison de leur résistance à la corrosion.

L'éprouvette à essayer est un assemblage comportant une plaque de métal (métal revêtu) faisant office d'anode et deux plaques d'un autre métal (métal revêtu) tenant lieu de cathode créant une cellule électrochimique en présence d'un électrolyte. (Voir figures 1 et 2.)

Les éprouvettes de référence sont des plaques anodiques exposées en même temps que les éprouvettes à essayer.

Les éprouvettes de contrôle sont des plaques anodiques conservées dans des conditions qui empêchent la corrosion durant la période d'essai.

L'ampleur et le type des manifestations de la corrosion sont évalués sur la base

- des changements de l'aspect superficiel;
- de la profondeur et de la superficie des manifestations de la corrosion;
- des changements des propriétés mécaniques;
- de la perte de masse;
- des autres caractéristiques résultant de la corrosion bimétallique.

L'efficacité des traitements de protection contre la corrosion peut être évaluée en appliquant des revêtements sur les plaques anodiques ou cathodiques, ou sur l'assemblage, à l'exception des revêtements électrolytiques qui ne doivent pas être déposés sur les assemblages.

Les éprouvettes revêtues et les éprouvettes sans revêtement devront être soumises aux essais en même temps.

**3.2** Les conditions d'essai (région macroclimatique, type d'atmosphère et conditions d'emplacement et d'exposition des éprouvettes dans les stations d'essai en atmosphères naturelles) doivent être choisies en fonction des conditions de service supposées des pièces prises isolément et dans des assemblages dans lesquels les métaux contactants (ou métaux revêtus) seront utilisés.

**3.3** Les stations d'essai en atmosphères naturelles doivent être équipées de manière appropriée et l'équipement doit être conforme aux spécifications des Normes internationales appropriées. (Voir par exemple ISO 4542.)

1) Actuellement au stade de projet. (Révision de l'ISO 2081-1973.)

2) Actuellement au stade de projet. (Révision de l'ISO 2082-1973.)

## 4 Éprouvettes

**4.1** Les éprouvettes à essayer doivent être telles que représentées aux figures 1 ou 2.

L'épaisseur des plaques anodiques ne peut pas dépasser 6 mm et leur longueur doit être appropriée pour les essais de traction selon l'ISO 6892.

L'épaisseur des plaques cathodiques doit être fixée entre 1 et 6 mm. Dans le cas de métaux précieux, les plaques cathodiques peuvent être constituées d'une feuille très mince recouvrant une plaque de matière inerte (par exemple matière plastique) en prenant soin que le contact entre les deux plaques soit assuré par pression. L'épaisseur ne doit être inférieure, en aucun cas, à 1 mm.

Si l'on ne connaît pas la polarité des métaux en contact lors de l'essai, les deux métaux (ou métaux revêtus) doivent être essayés parallèlement comme anode d'une part, et comme cathode d'autre part.

Les jeux et interstices, entre plaques anodiques et cathodiques, doivent être réduits au maximum et ne pas dépasser 0,02 mm. Lors de l'assemblage des éprouvettes, la valeur maximale du couple de serrage des boulons doit être supérieure à 5,0 N·m.

**4.2** La surface des éprouvettes doit être exempte de défauts visibles, tels que des irrégularités de laminage, calamine, exfoliation, fissures, pores, cloques, rayures, indentations.

Si aucun défaut n'apparaît sur la surface, les éprouvettes doivent être essayées à l'état de livraison ou après traitement, comme recommandé pour les pièces concernées.

Si l'élimination des défauts s'effectue par des moyens mécaniques, la rugosité de surface ( $R_a$ ) des éprouvettes à essayer, des éprouvettes de référence et des éprouvettes de contrôle (y compris des rives cisailées) devra être comprise entre 0,75 et 2,5  $\mu\text{m}$ .

**4.3** La finition de surface (métal revêtu) des plaques métalliques (y compris des rives cisailées) doit correspondre aux exigences des Normes internationales correspondantes, par exemple ISO 1456, ISO 2081, ISO 2082.

Dans les cas où un métal est essayé en contact avec un métal revêtu, l'endommagement du revêtement ou son absence n'est admis que sur les rives cisailées des plaques anodiques.

**4.4** L'évaluation de la résistance à la corrosion bimétallique en fonction de tous les critères retenus, sauf la perte de masse, doit être faite sur des éprouvettes telles que représentées à la figure 1.

L'évaluation de la résistance à la corrosion bimétallique en fonction de tous les critères retenus, sauf la modification des propriétés mécaniques, doit être faite sur des éprouvettes telles que représentées à la figure 2.

**4.5** Les matériaux, dimensions, sens du prélèvement, méthode de traitement de surface et autres paramètres des plaques anodiques doivent être les mêmes pour les éprouvettes à essayer, les éprouvettes de référence et les éprouvettes de contrôle.

**4.6** Les éprouvettes doivent être identifiées par marquage. Le marquage doit indiquer les caractéristiques des métaux (ou métaux revêtus) anodique et cathodique essayés, leur désignation convenue, selon l'inventaire des éprouvettes (voir annexe A) et le numéro de série attribué aux plaques métalliques. Le marquage peut être fait au poinçon, avec une peinture indélébile ou par encochage ou perçage de la face de dessus (visible) de chaque plaque métallique d'éprouvette.

La désignation du métal (métal revêtu) doit être apposée dans le coin supérieur gauche et le numéro de série dans le coin supérieur droit des plaques anodiques et cathodiques.

Les zones présentant des marquages apposés par des moyens mécaniques doivent être revêtues d'un vernis protecteur résistant à l'eau. Les marquages doivent rester lisibles et indélébiles durant la période d'essai.

**4.7** Des rondelles et manchons doivent être utilisés pour assurer l'isolation électrique des boulons de fixation des plaques et pour éviter le serrage de ces plaques métalliques durant la période d'essai. Comme matériaux pour les rondelles, il est recommandé d'utiliser des céramiques ou autres matériaux isolants insensibles au fluage ou aux déformations pendant des intervalles de temps étendus. Les manchons doivent de préférence être en polyéthylène ou polypropylène.

Les boulons et rondelles métalliques doivent être en acier inoxydable du type 18-8 ou à teneur plus élevée en chrome.

**4.8** Le nombre d'éprouvettes à essayer, d'éprouvettes de référence et d'éprouvettes de contrôle ne doit pas être inférieur à trois par prélèvement.

Si le programme ne prévoit pas d'essais mécaniques, le nombre d'éprouvettes de contrôle peut être réduit à trois par lot.

## 5 Préparation des éprouvettes à essayer

**5.1** On vérifie par des moyens visuels et des mesures appropriées que les éprouvettes à essayer, les éprouvettes de référence et les éprouvettes de contrôle remplissent les conditions du chapitre 4.

**5.2** Immédiatement avant l'essai, les surfaces des éprouvettes doivent être dégraissées avec un solvant organique, par exemple éthanol ou white spirit.

Après dégraissage, les éprouvettes ne doivent être tenues que par les chants et avec des gants de coton (ou de caoutchouc).

**5.3** Après dégraissage, les éprouvettes à essayer et les éprouvettes de référence dont le comportement à la corrosion doit être évalué par perte de masse, doivent être conservées dans des dessiccateurs contenant un produit absorbant l'humidité (par exemple gel de silice) pendant au moins 24 h. Elles doivent être ensuite pesées à 0,000 1 g près.

**5.4** Les éprouvettes de contrôle doivent être conservées durant la période d'essai dans des conditions qui empêchent la corrosion, c'est-à-dire dans des dessiccateurs ou dans des sacs en polyéthylène contenant un produit absorbant l'humidité (gel de silice) où l'humidité relative est inférieure à 50 %.

Pour les matériaux susceptibles de vieillissement naturel, des éprouvettes de contrôle ne doivent être stockées que pour apprécier l'évolution des caractéristiques mécaniques.

**5.5** Lors de la préparation des éprouvettes, on peut prévoir le dépôt d'une fine couche de revêtement organique (colle, vernis ou laque), du type acétate de cellulose dissous dans l'acétone, pour éviter la corrosion caverneuse. Ce revêtement doit être appliqué sur la surface dégraissée de la plaque anodique et les plaques cathodiques sans dépassement sur les plaques cathodiques. L'épaisseur du revêtement sec ne doit pas dépasser 10 µm. Ce revêtement ne doit pas recouvrir la zone adjacente aux trous de passage des boulons d'assemblage, pour permettre le contact entre les plaques métalliques assemblées.

La résistance de contact entre les plaques anodiques et cathodiques doit demeurer constante pendant la période d'essai.

## 6 Mode opératoire

**6.1** Les éprouvettes à essayer et les éprouvettes de référence doivent être exposées à 45° directement en atmosphère naturelle soit dans un hangar, soit sous abri. Il est permis de choisir des angles de 30° ou 90°. La face supérieure des éprouvettes doit être exposée en direction du sud dans l'hémisphère nord et du nord dans l'hémisphère sud. L'axe longitudinal de la plaque cathodique des éprouvettes à essayer doit être perpendiculaire à la base du pupitre.

Les éprouvettes de référence doivent être exposées de la même manière que les plaques anodiques des éprouvettes à essayer.

**6.2** Les éprouvettes à essayer et les éprouvettes de référence doivent être fixées sur des pupitres d'exposition, etc., à l'aide de dispositifs en matériaux isolants appropriés, par exemple en porcelaine.

Les boulons servant à fixer les éprouvettes à essayer les unes aux autres peuvent également servir à les fixer sur le pupitre.

**6.3** Normalement la durée de l'essai ne doit pas être inférieure à deux ans. Si le cas est techniquement justifié, cette durée peut être raccourcie. Durant l'essai, il faut effectuer au moins trois prélèvements d'éprouvettes à essayer.

La périodicité des prélèvements et des examens d'éprouvettes doit être définie dans le programme d'essais.

**6.4** Les éprouvettes prélevées doivent être examinées, démontées et débarrassées des produits de corrosion. L'évaluation des résultats d'essai doit s'effectuer selon des critères retenus.

## 7 Appréciation des résultats d'essai

### 7.1 Généralités

La résistance à la corrosion bimétallique doit être évaluée selon un ou plusieurs des critères choisis en examinant le métal (ou métal revêtu) de la plaque anodique de l'éprouvette dans la zone de la corrosion bimétallique. La zone de la corrosion bimétallique est l'aire totale des parties de plaque anodique adjacentes à la zone de contact direct avec les plaques cathodiques et de largeur de 10 mm.

L'appréciation de la résistance à la corrosion bimétallique en fonction de la modification de l'aspect superficiel et de l'ampleur et le type des manifestations de la corrosion doivent être effectués séparément pour les faces supérieure et inférieure des éprouvettes.

Comme résultat d'essai doit être retenue la valeur moyenne de l'indice (ou des indices) d'augmentation de la corrosion déterminée sur trois éprouvettes ou plus.

### 7.2 Appréciation basée sur la modification de l'aspect superficiel

**7.2.1** Les éprouvettes choisies pour examen pendant ou après l'essai doivent être examinées visuellement à la lumière du jour ou sous lumière artificielle diffuse. L'emploi d'appareils optiques est permis si le programme d'essai le spécifie.

**7.2.2** L'appréciation qualitative doit tenir compte des modifications d'aspect superficiel suivantes :

- ternissement de la surface;
- couleur des produits de corrosion;
- répartition des manifestations de la corrosion sur la surface (corrosion uniforme, non uniforme, localisée, etc.);
- zones affectées par la corrosion (points, taches, etc.).

**7.2.3** Pour des appréciations quantitatives des surfaces corrodées dans la zone de la corrosion bimétallique ou dans le cas de corrosion par piqûres, le nombre de points de corrosion par unité de surface doit être déterminé après enlèvement du produit de corrosion.

Le nombre de manifestations de corrosion doit être calculé à l'aide d'une grille quadrillée de carrés de 5 mm de côté, placée sur les plaques anodiques dans la zone de la corrosion bimétallique, attenantes aux bords verticaux des plaques cathodiques.

Le nombre de points de corrosion ou la superficie de la surface corrodée des éprouvettes de référence doivent être déterminés sur la même surface et au même emplacement que pour les éprouvettes à essayer.

**7.2.4** La résistance à la corrosion bimétallique est déterminée par l'indice d'augmentation de la corrosion, qui est le rapport du nombre de manifestations de corrosion par unité de surface dans la zone de la corrosion bimétallique des éprouvettes à essayer au nombre de manifestations de corrosion sur les éprouvettes de référence, ou le rapport de la superficie de la

surface corrodée dans la zone de la corrosion bimétallique à la superficie de la surface corrodée de l'éprouvette de référence. Les résultats d'essai doivent être notés dans un formulaire comme illustré par l'annexe B.

### 7.3 Appréciation par mesurage de la profondeur des manifestations de la corrosion

**7.3.1** La profondeur de corrosion dans la zone de la corrosion bimétallique doit être déterminée sur chaque éprouvette à essayer et de référence à l'aide de profilomètres, d'indicateurs, de jauges de profondeur ou par examen métallographique de microsections. Les microsections doivent être au moins au nombre de 2.

**7.3.2** Les mesurages doivent être faits après l'enlèvement des produits de corrosion.

**7.3.3** Les profondeurs maximales moyennes de corrosion doivent être déterminées à partir des cinq mesures les plus profondes.

**7.3.4** La résistance à la corrosion bimétallique s'exprime sous la forme de l'indice d'augmentation de la corrosion qui est le rapport de la valeur maximale moyenne de la profondeur de corrosion dans la zone de la corrosion bimétallique sur la plaque anodique de l'éprouvette à essayer à la valeur maximale moyenne de profondeur de corrosion sur les éprouvettes de référence.

Les résultats d'essai doivent être notés sur un formulaire comme illustré par l'annexe C.

### 7.4 Appréciation basée sur le type des manifestations de corrosion

Le type des manifestations de la corrosion doit être déterminé par examen métallographique de microsections des plaques anodiques des éprouvettes à essayer et de référence.

Les types spécifiques des manifestations de corrosion (intergranulaire, piqûres, exfoliation, etc.) doivent être notés en précisant pour les échantillons revêtus, s'il s'agit d'une manifestation de la corrosion du métal de base, filiforme ou autre. Les types des manifestations de corrosion doivent être notés sur un formulaire comme illustré par l'annexe C.

### 7.5 Appréciation basée sur les modifications des propriétés mécaniques

**7.5.1** L'appréciation de la résistance à la corrosion bimétallique peut être effectuée en fonction de la modification des propriétés mécaniques, par détermination de la charge ultime à l'instant de la rupture, de la limite apparente d'élasticité et de l'allongement des éprouvettes à essayer, de référence et de contrôle.

**7.5.2** La détermination des propriétés mécaniques s'effectue sur des éprouvettes de traction plates (voir figure 1) suivant les indications des Normes internationales appropriées, par exemple ISO 6892.

**7.5.3** La modification relative de la charge ultime à l'instant de la rupture d'une éprouvette à essayer, exprimée en pourcentage, est donnée par la formule

$$\frac{R_{m,c} - R_{m,t}}{R_{m,c}} \times 100$$

où

$R_{m,c}$  est la charge ultime à l'instant de la rupture, en mégapascals, d'une éprouvette de contrôle;

$R_{m,t}$  est la charge ultime à l'instant de la rupture, en mégapascals, de la plaque anodique de l'éprouvette à essayer.

**7.5.4** La modification relative de la charge ultime à l'instant de la rupture d'une éprouvette de référence, exprimée en pourcentage, est donnée par la formule

$$\frac{R_{m,c} - R_{m,r}}{R_{m,c}} \times 100$$

où

$R_{m,c}$  est la charge ultime à l'instant de la rupture, en mégapascals, d'une éprouvette de contrôle;

$R_{m,r}$  est la charge ultime à l'instant de la rupture, en mégapascals, de l'éprouvette de référence.

NOTE — Les modifications de la limite apparente d'élasticité ( $R_p$ ) et de l'allongement (A) se déterminent de manière analogue.

**7.5.5** La résistance à la corrosion bimétallique s'exprime sous la forme de l'indice d'augmentation de la corrosion qui est la différence des modifications relatives des propriétés mécaniques des éprouvettes à essayer et de référence. Les résultats d'essai doivent être notés sur un formulaire comme illustré par l'annexe D.

### 7.6 Appréciation basée sur la perte de masse

**7.6.1** Pour les appréciations basées sur la perte de masse, les éprouvettes à essayer et de référence doivent être examinées, et la poussière, les salissures et les produits de corrosion doivent être enlevés.

Les plaques anodiques présentant des manifestations de corrosion sous les plaques cathodiques, à une distance de plus de 3 mm de la rive de contact, ne sont pas prises en compte.

Il est nécessaire d'éliminer la colle ou le vernis utilisés pour empêcher la corrosion cavernueuse des éprouvettes, avant d'éliminer les produits de corrosion.

**7.6.2** Après élimination des produits de corrosion, les plaques métalliques (métal revêtu) doivent être séchées, dégraissées, stockées pendant 24 h dans un dessiccateur, et ensuite pesées.



**7.6.3** Le taux de corrosion des éprouvettes à essayer, exprimé en grammes par mètre carré par année, est donné par la formule

$$\frac{\Delta m_1}{(S_1 - 2S_2) \times t}$$

où

$\Delta m_1$  est la perte de masse, en grammes, de la plaque anodique de l'éprouvette à essayer;

$S_1$  est la superficie totale, en mètres carrés, de la plaque anodique;

$S_2$  est la superficie, en mètres carrés, masquée par la plaque cathodique sur un seul côté;

$t$  est la durée de l'essai, en années.

**7.6.4** Le taux de corrosion des éprouvettes de référence, exprimé en grammes par mètre carré par année, est donné par la formule

$$\frac{\Delta m_2}{S_3 \times t}$$

où

$\Delta m_2$  est la perte de masse, en grammes, de l'éprouvette de référence;

$S_3$  est la superficie totale, en mètres carrés, de l'éprouvette de référence;

$t$  est la durée de l'essai, en années.

**7.6.5** La résistance à la corrosion bimétallique s'exprime sous la forme de l'indice de l'augmentation de la corrosion qui est la différence entre les taux de corrosion des éprouvettes à essayer et des éprouvettes de référence.

Les résultats d'essai doivent être notés sur un formulaire comme illustré par l'annexe E.

## 8 Procès-verbal d'essai

Le procès-verbal d'essai doit contenir les indications suivantes:

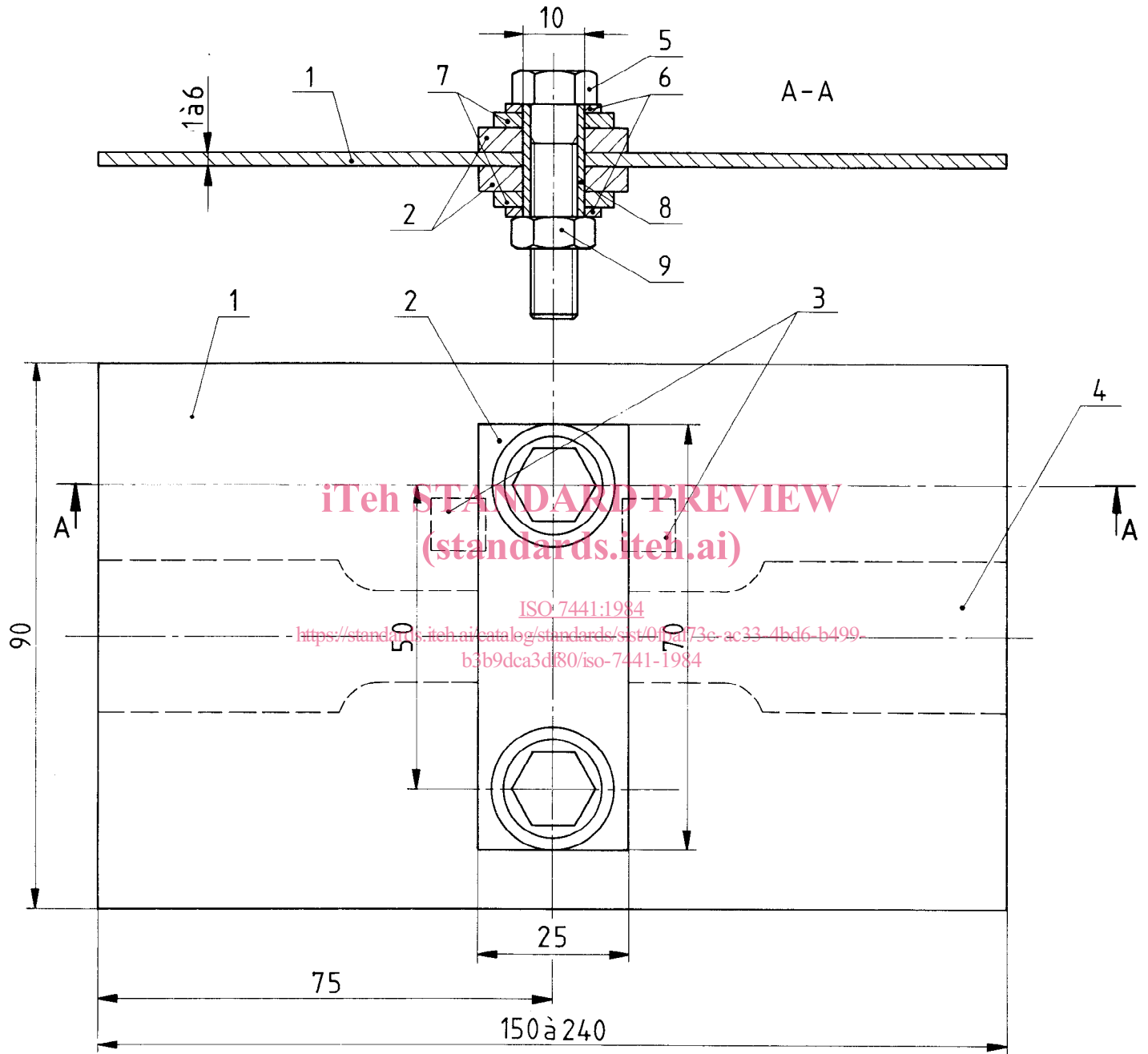
- a) objet de l'essai;
- b) désignation et description des métaux (métaux revêtus) essayés [composition chimique, mode de traitement (thermique, chimique et mécanique), type de revêtement, épaisseur] (voir annexe A);
- c) nombre d'éprouvettes;
- d) identification de la station d'essai en atmosphère naturelle, son emplacement et les caractéristiques de l'atmosphère;
- e) méthode de fixation des éprouvettes durant l'essai;
- f) durée de l'essai et périodicité de prélèvement des éprouvettes;
- g) résultats avec critères d'essai, y compris les données descriptives et données numériques présentées selon les annexes B, C, D et E, avec, si possible, des photographies des éprouvettes;
- h) autres données requises suivant l'objet de l'essai.

iTeh STANDARD PREVIEW  
(standards.iteh.ai)

ISO 7441:1984

[https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/01ba173c-ac35-48d6-b499-](https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/01ba173c-ac35-48d6-b499-b3b9dca3df80/iso-7441-1984)

[b3b9dca3df80/iso-7441-1984](https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/01ba173c-ac35-48d6-b499-b3b9dca3df80/iso-7441-1984)

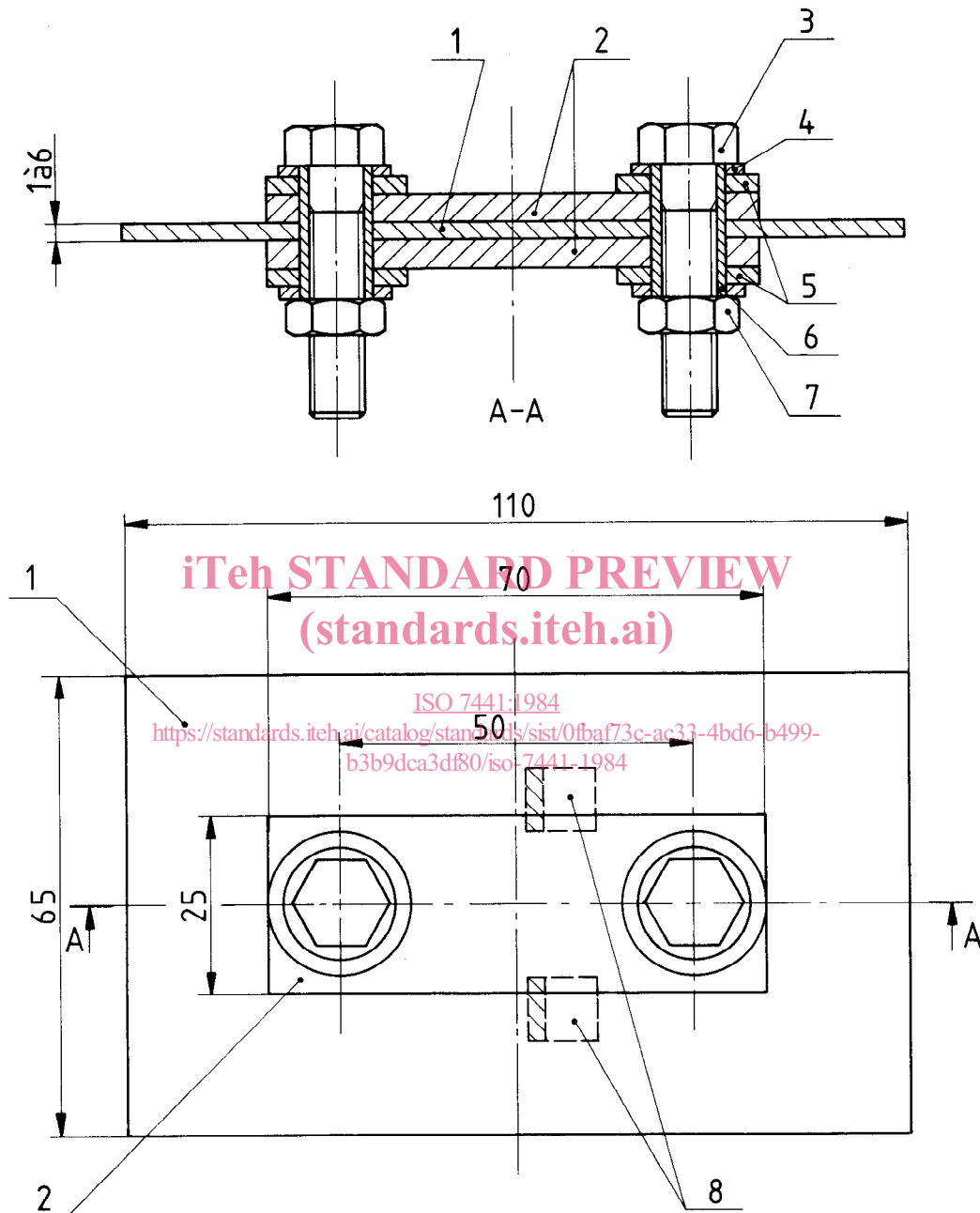


- |   |                        |   |   |
|---|------------------------|---|---|
| 1 | Plaque anodique        | 6 | Rondelle de 1 mm d'épaisseur et 16 mm de diamètre                   |
| 2 | Plaque cathodique      | 7 | Rondelle isolante de 1 à 3 mm d'épaisseur et 18 à 20 mm de diamètre |
| 3 | Microsections          | 8 | Manchon isolant   |
| 4 | Éprouvette de traction | 9 | Écrou   |
| 5 | Boulon 8 mm × 40 mm    |   |   |

Figure 1 — Exemple d'éprouvette à essayer pour les évaluations basées sur des critères autres que la perte de masse



Dimensions en millimètres



- 1 Plaque anodique
- 2 Plaque cathodique
- 3 Boulon 8 mm × 40 mm
- 4 Rondelle de 1 mm d'épaisseur et 16 mm de diamètre

- 5 Rondelle isolante de 1 à 3 mm d'épaisseur et 18 à 20 mm de diamètre
- 6 Manchon isolant
- 7 Écrou
- 8 Microsections

Figure 2 — Exemple d'éprouvette à essayer pour les évaluations basées sur des critères autres que la modification des propriétés mécaniques