LES FACTEURS ENVIRONNEMENTAUX EN METROLOGIE

IDENTIFICATION, EFFETS PHYSIQUES ET MOYENS DE MAITRISE

Maîtriser les grandeurs d'influence pour garantir la justesse et la traçabilité des mesures industrielles et légales

Rédacteur : Atelier de la Mesure
Public cible : Techniciens de laboratoire, Responsables Métrologie, Ingénieurs Qualité
Référence normative : ISO/IEC 17025, VIM (JCGM 200), GUM (JCGM 100)

1

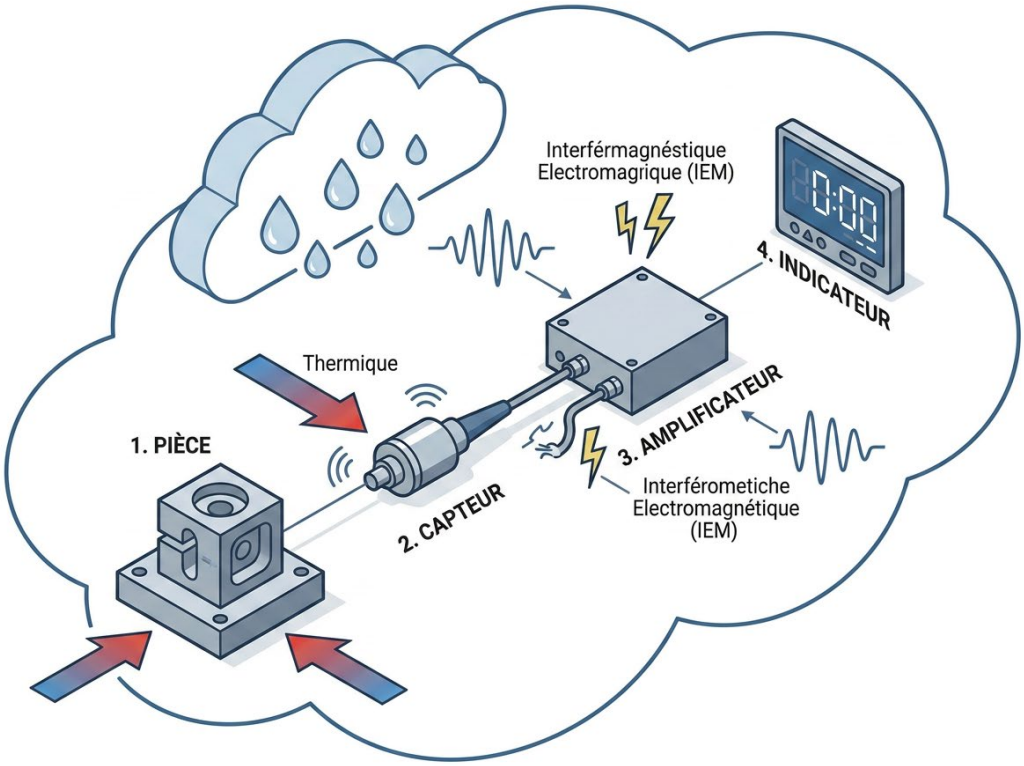
INTRODUCTION ET OBJECTIFS MÉTROLOGIQUES

En métrologie, le résultat d'une mesure n'est jamais parfait. Il est entaché d'une incertitude de mesure qu'il convient de minimiser et de quantifier pour garantir la conformité d'un produit ou la validité d'un étalonnage (ISO 17025)

Le Vocabulaire International de la Métrologie (**VIM**, JCGM 200) définit deux concepts clés :

- **Le mesurande :** La grandeur physique que l'on se propose de mesurer.
- **La grandeur d'influence :** Une grandeur qui, lors d'une mesure directe, n'a pas d'effet sur le mesurande lui-même, mais a un effet sur la relation entre l'indication de l'instrument et le résultat de la mesure.

Si l'environnement de mesure n'est pas maîtrisé, les grandeurs d'influence génèrent des **erreurs systématiques** (que l'on doit corriger) et des **erreurs aléatoires** (qui viennent gonfler l'incertitude de type A ou de type B selon les préconisations du **GUM**)



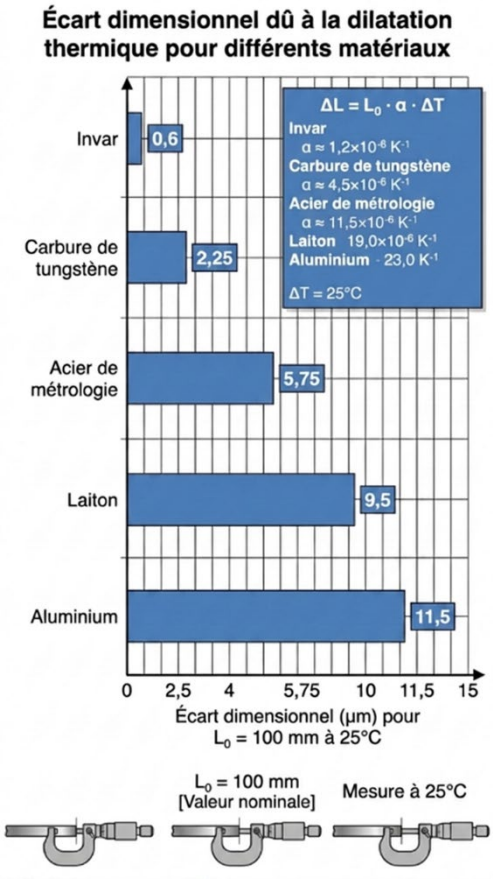
L'objectif de ce guide est de fournir une analyse quantitative des principaux facteurs physiques perturbateurs et de présenter les procédures requises pour s'en affranchir ou en corriger les effets.

Atelier de la Mesure (C) Copyright (Juin 2026) Tous droits réservés

2

LA TEMPÉRATURE : ENNEMI NUMÉRO UN DE LA PRÉCISION

La température *T* est sans conteste la grandeur d'influence la plus critique et la plus fréquemment rencontrée dans tous les domaines de la métrologie (dimensionnelle, électrique, masse, force).



Dilatation thermique linéaire

Tout corps solide subit une variation dimensionnelle lorsque sa température s'écarte de la température de référence internationale fixée à 20°C (ISO 1). Cette déformation est régie par la loi physique de la dilatation thermique :

$$\Delta L = L_0 \,.\, \alpha \,.\, (\, T - 20 \,)$$

Où :

- ΔL est la variation de longueur (en *m* ou *µm*)
- L_0 est la longueur nominale à 20°C (en m ou mm).
- α est le coefficient de dilatation thermique linéique du matériau (en $°C^{-1}$ ou K^{-1}).
- *T* est la température effective de la pièce (en °C)

Note : L'incertitude sur la température u(T) se propage sur la longueur mesurée u(ΔL)

$$u^2(\Delta L) \approx \left(\frac{\partial \Delta L}{\partial T}\right)^2 u^2(T) = (L_0 \cdot \alpha)^2 \cdot u^2(T)$$

Atelier de la Mesure (C) Copyright (Juin 2026) Tous droits réservés

Dérive des composants électroniques et capteurs

Les capteurs électriques (jauges de contrainte, capteurs capacitifs, thermocouples, circuits intégrés de numérisation) exploitent des propriétés électriques intrinsèques dépendantes de la température (par exemple, la loi de variation de la résistance des métaux comme le Platine *Pt100*).

- **Dérive de zéro (Offset)**
  Décalage systématique de la valeur affichée en l'absence de signal d'entrée.

- **Dérive de gain (Sensibilité)**
  Modification de la pente de la courbe d'étalonnage du capteur

Variation des propriétés physiques des fluides

En métrologie des volumes et débits (pesage d'eau, débitmètres), la masse volumique de l'eau (ρ_{eau}) et de l'air (ρ_{air}) varie drastiquement avec la température :

- L'eau à 20°C présente une masse volumique de 998,203 kg/m^3.

- À 25°C elle descend à 997,043 kg/m^3. Une absence de correction de température engendre une erreur systématique de 0,11% sur l'étalonnage d'un volume par gravimétrie

Moyens de maîtrise et stabilisation

- **L'acclimatation thermique (temps de séjour)**
  Les pièces et les instruments doivent séjourner ensemble dans l'enceinte de mesure afin d'atteindre l'équilibre thermique. (1 heure pour les pièces pesant moins de 100 g, 4 heures pour les pièces pesant moins de 1 kg)

- **La régulation d'ambiance de laboratoire**
  - Métrologie courante : 20°C ±1°C.
  - Haute précision (cales étalons Classe 0) : 20°C ±0,2°C avec un gradient temporel maximum de 0,1°C/h.

- **La compensation mathématique**
  Enregistrement de la température à l'aide de sondes de précision raccordées (Pt100 étalonnée avec U ≤ 0,02°C) et calcul en temps réel du terme correctif ΔL

Atelier de la Mesure (C) Copyright (Juin 2026) Tous droits réservés

3

L'HYGROMÉTRIE (HUMIDITÉ RELATIVE)

L'humidité relative (*HR*) correspond au rapport entre la pression partielle de la vapeur d'eau contenue dans l'air et la pression de vapeur saturante à la même température. Elle s'exprime en %.

Phénomènes de gonflement hygroscopique

Certains matériaux industriels absorbent l'humidité ambiante, ce qui altère leur structure cristalline ou polymérique.

- Les plastiques techniques, tels que le **Nylon (Polyamide 6.6)**, peuvent absorber jusqu'à 8% de leur masse en eau, provoquant des variations dimensionnelles de plusieurs dixièmes de millimètre qui faussent les contrôles sur pièces finies.

Modification de l'indice de réfraction de l'air

Pour les mesures de très haute précision basée sur l'interférométrie laser, l'air ambiant fait office de milieu de propagation. L'indice de réfraction de l'air (*n*) dépend de sa composition chimique, notamment de sa teneur en vapeur d'eau. Une variation d'humidité dévie la longueur d'onde du laser :

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{n}$$

Une variation non compensée de 10% d'humidité relative induit une erreur de mesure dimensionnelle de l'ordre de 0,1 µm/m

Atelier de la Mesure (C) Copyright (Juin 2026) Tous droits réservés

Corrosion et altération des surfaces de référence

Une humidité élevée (*HR > 60%*) favorise le dépôt d'un film d'eau microscopique acide (chargé en CO_2 atmosphérique) sur les aciers, provoquant :

- Une corrosion par piqûre sur les faces de mesure des cales étalons ou des micromètres.
- Des fuites électriques par conduction superficielle sur les isolants des ponts de mesure de haute impédance.

.

Développement de micro-piqûres de rouille sur la face supérieure polie optiquement d'une cale étalon de haute précision

Moyens de maîtrise

- **Régulation stricte :**
  Consigne fixée à *50% ±10% HR* (ou *50% ±5%* pour la haute précision).
- **Atmosphère inerte :**
  Stockage des étalons de référence métalliques dans une armoire dessiccatrice active ou dans de l'huile blanche de métrologie neutre.

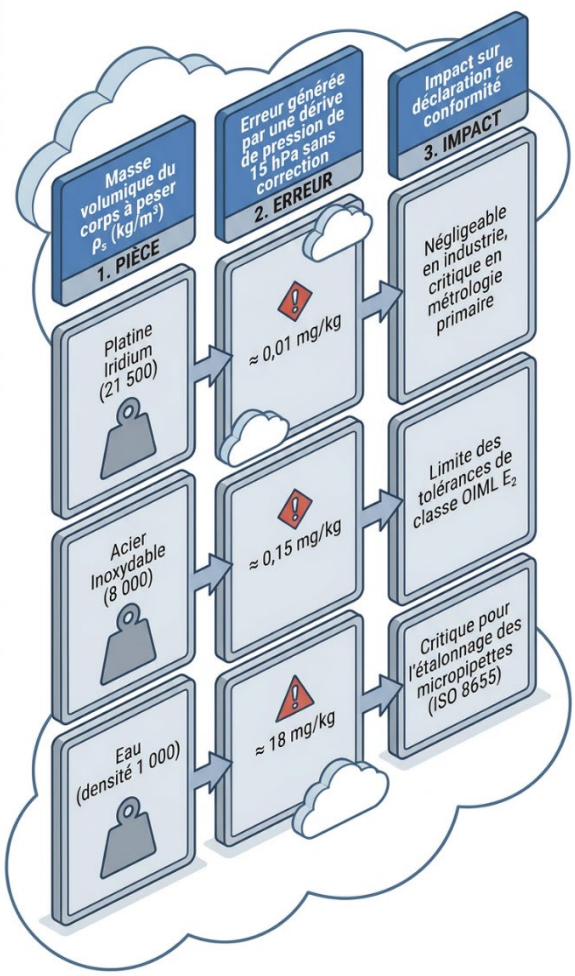
Atelier de la Mesure (C) Copyright (Juin 2026) Tous droits réservés

4

LA PRESSION ATMOSPHÉRIQUE

La pression atmosphérique (p) varie naturellement en fonction de l'altitude du laboratoire et des variations météorologiques cycloniques/anticycloniques (plage de fluctuation courante de *950 hPa* à *1040 hPa*)

Tableau d'influence de la poussée d'Archimède



La correction de la poussée de l'air en pesage de haute précision

Lors de la pesée d'un objet de masse volumique ρ_p à l'aide d'un étalon de référence de masse volumique ρ_r, l'air ambiant (de masse volumique ρ_a) exerce une poussée d'Archimède différentielle sur les deux corps. La formule de correction de masse conventionnelle s'exprime ainsi :

$$m_c = m_i.\left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_r}\right).\left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_p}\right)^{-1}$$

Où :

- m_c est la masse corrigée.
- m_i est la pesée brute (indication).
- ρ_a est la masse volumique de l'air, calculée via la formule de l'équation de l'air du CIPM en fonction de la température, de l'humidité et de la pression atmosphérique.

Une variation de pression de 10 hPa modifie ρ_a d'environ 1%. Sans correction, cela induit une erreur de pesage sur les corps de faible densité (comme les liquides étalons ou les masses de faible valeur en aluminium).

Atelier de la Mesure (C) Copyright (Juin 2026) Tous droits réservés

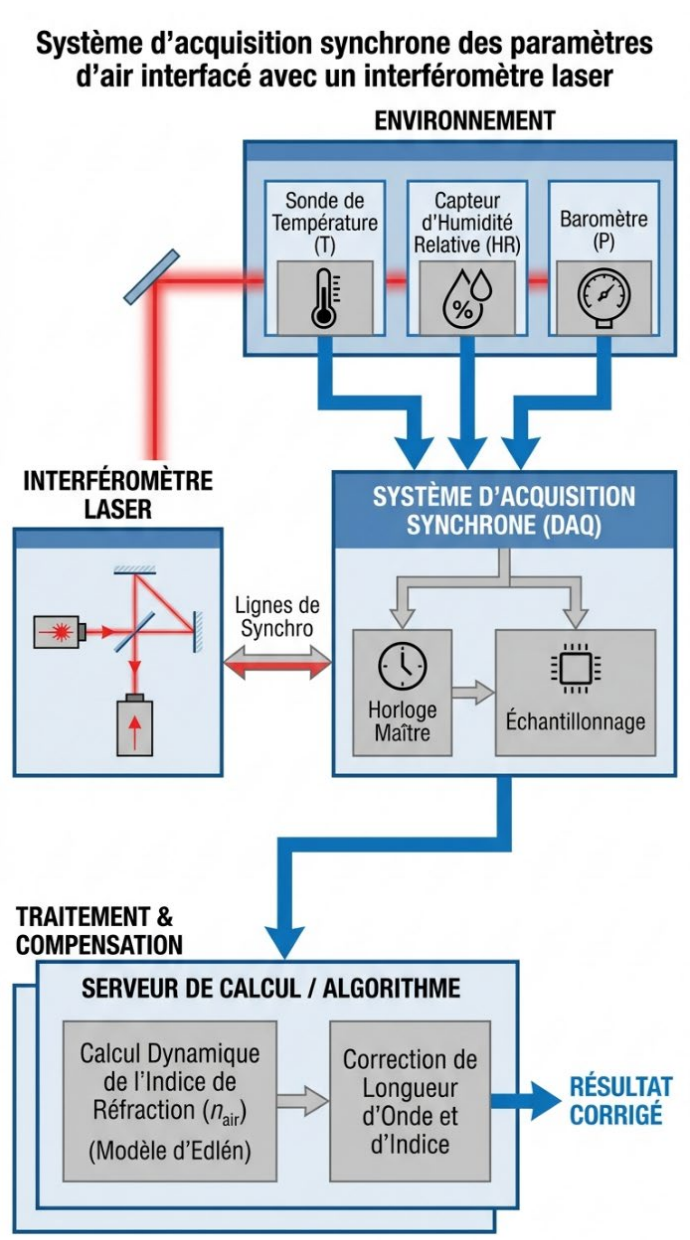
Incidence sur l'indice de réfraction et l'interférométrie

La pression atmosphérique influe de manière majeure sur la densité de l'air. C'est le facteur le plus sensible pour la dérive de l'indice de réfraction de l'air. Une fluctuation non compensée de seulement 3 hPa de la pression génère une erreur systématique de 1 µm/m sur une mesure de distance par interféromètre laser.

Moyens de maîtrise

- Enregistrement et compensation

Comme il est impossible de réguler économiquement la pression d'un laboratoire entier, la méthode standard consiste à mesurer la pression atmosphérique locale en continu à l'aide d'un baromètre de précision étalonné (U ≤ 0,2 hPa) et à appliquer les corrections en temps réel par logiciel

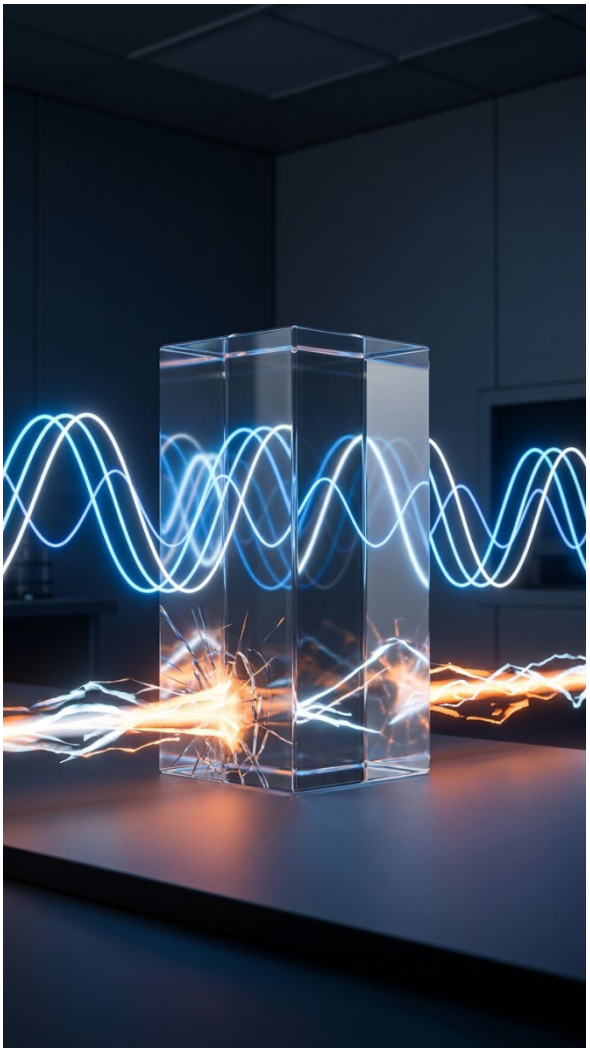


Atelier de la Mesure (C) Copyright (Juin 2026) Tous droits réservés

5

LES VIBRATIONS ET CHOCS MÉCANIQUES

Les perturbations vibratoires se transmettent par les structures solides (murs, dalles de sol) et par l'air (ondes acoustiques basse fréquence)



Altération de la répétabilité (bruit de mesure)

Sur les machines de mesure tridimensionnelle (MMT), les micro-profilomètres ou les microscopes électroniques, les vibrations du sol excitent les modes de résonance mécaniques de la structure (axes, colonnes, stylets).

Conséquence **:** Dispersion importante des points de palpage, instabilité du signal optique et impossibilité d'atteindre la résolution nanométrique.

Perturbation des systèmes de pesage analytique

Les balances analytiques (sensibilité à 0,1 µg ou 1 µg) intègrent les vibrations verticales comme des variations d'accélération de la pesanteur (*g*). Le signal de pesée ne parvient jamais à se stabiliser, augmentant drastiquement l'incertitude de répétabilité (type A)

Atelier de la Mesure (C) Copyright (Juin 2026) Tous droits réservés

Solutions d'isolation vibratoire

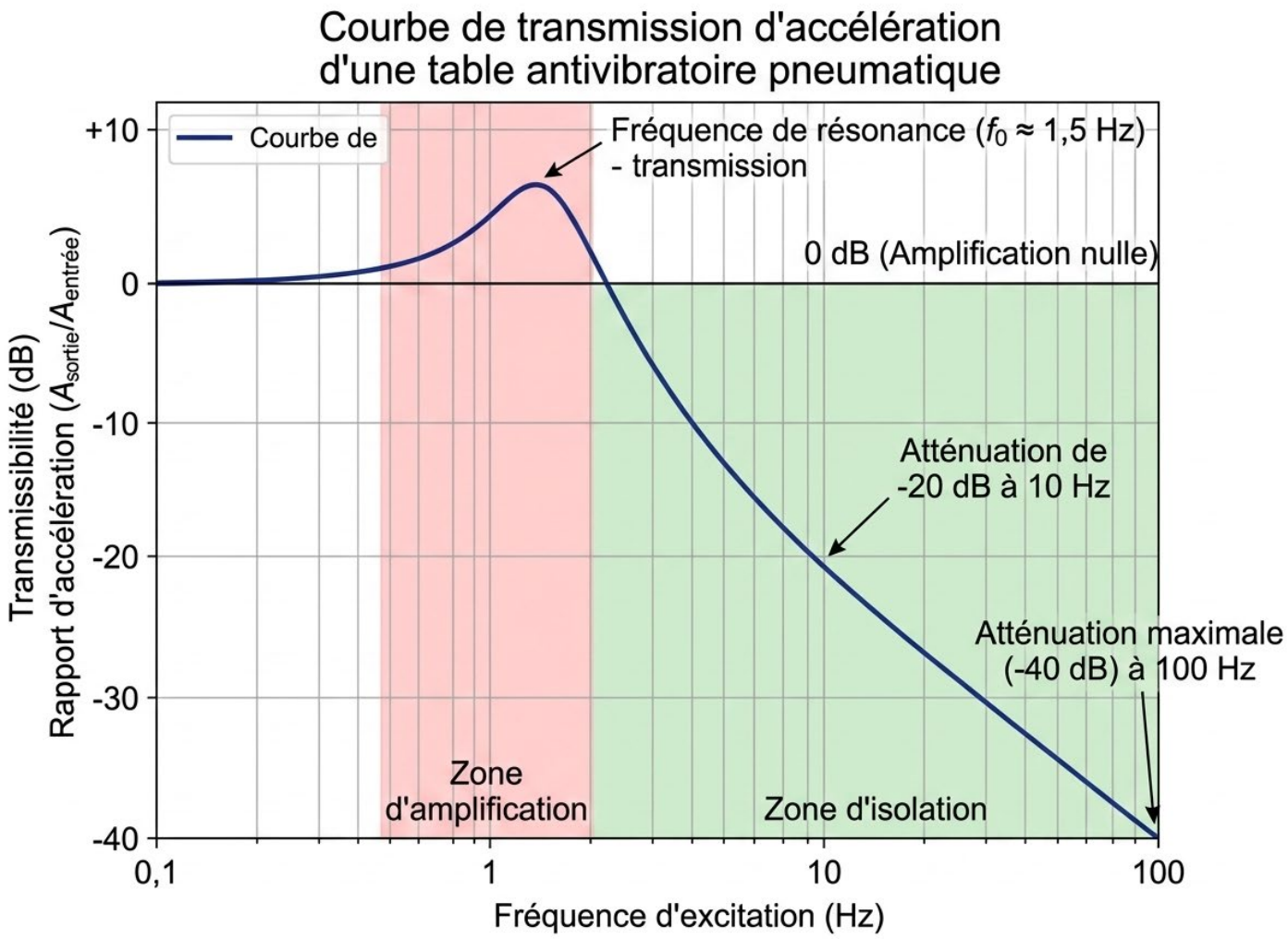
1 Dalle sismique :

Coulage d'un bloc de béton massif indépendant du reste des fondations du bâtiment, isolé en périphérie par des joints élastomères épais.

2 Tables antivibratoires :

Amortissement passif
Utilisation de masses d'inertie (marbres) reposant sur des supports élastomères ou des coussins d'air basse fréquence.

Amortissement actif
Systèmes piézoélectriques dynamiques mesurant les micro-accélérations du sol et appliquant une force opposée en temps réel

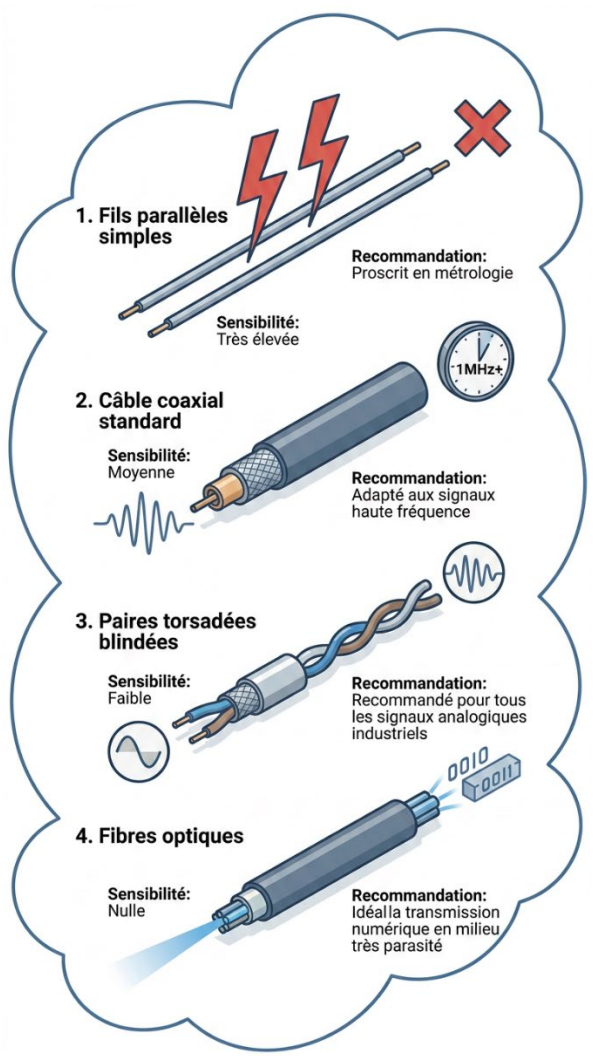


Atelier de la Mesure (C) Copyright (Juin 2026) Tous droits réservés

6

LES PERTURBATIONS ÉLECTROMAGNÉTIQUES (EMI)

Les sources de pollution électromagnétique (lignes haute tension, commutateurs, moteurs asynchrones, téléphones) polluent le secteur électrique ou émettent des ondes radiofréquences.



Induction de parasites sur signaux analogiques de faible amplitude

Certains capteurs métrologiques délivrent des signaux électriques de très faible niveau.

Par exemple :

- Un couple thermoélectrique de type K génère seulement 41 µV/°C.
- Un signal de jauge de contrainte (pesage) délivre quelques millivolts

Si un câble de signal non blindé chemine à proximité d'un câble d'alimentation d'un moteur, il se produit un couplage capacitif ou inductif. Le "bruit de fond" électrique vient fausser l'acquisition en superposant une composante alternative de 50 Hz (et ses harmoniques) au signal utile, générant des dérives de lecture instables.

Techniques de câblage et blindage

- **Blindage systématique :** Les lignes de transmission doivent être dotées d'une tresse de blindage reliée à la terre.
- **Torsadage :** L'utilisation de paires torsadées permet d'annuler par symétrie les flux inductifs parasites.

Règle de mise à la masse : Les blindages ne doivent être connectés à la terre qu'en **un seul point** afin d'éviter les boucles de terre (différences de potentiel induisant des courants de circulation

Atelier de la Mesure (C) Copyright (Juin 2026) Tous droits réservés

7

LA LUMINOSITÉ ET LE RAYONNEMENT THERMIQUE

Gradients thermiques asymétriques par rayonnement

Le soleil émet un rayonnement infrarouge direct à forte puissance thermique (jusqu'à 1000 W/m^2). Si ce rayonnement frappe un côté d'un marbre de métrologie ou d'une colonne de mesure, il génère un gradient thermique asymétrique.

Déformation : La dilatation locale de la face exposée provoque un fléchissement de la structure géométrique de l'instrument (génération de défauts de planéité ou de perpendicularité).

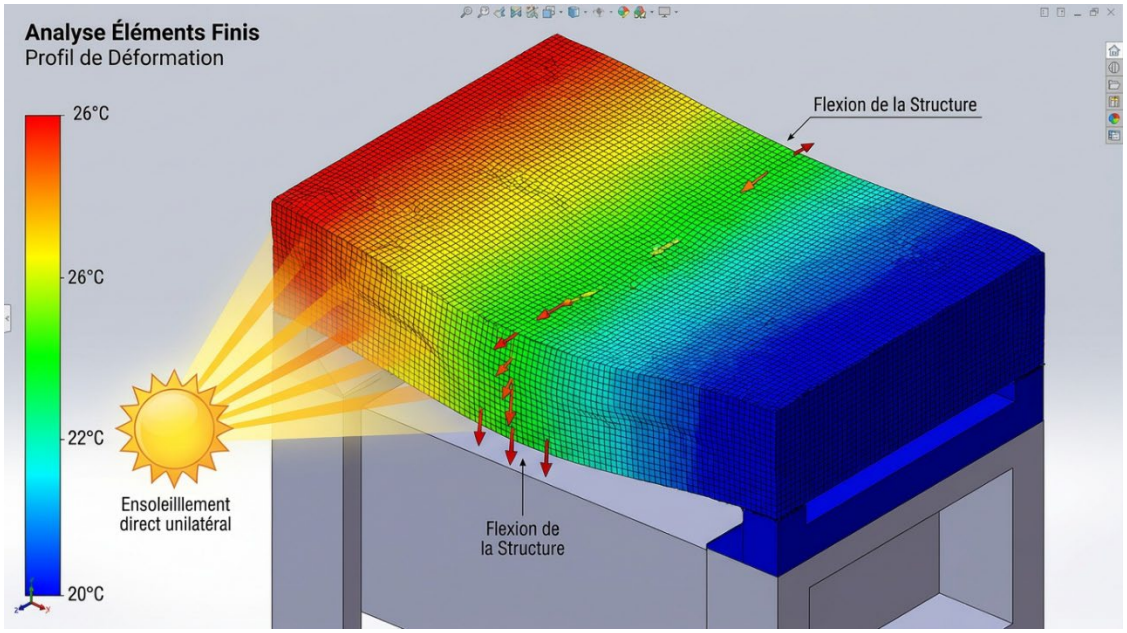
Perturbation des capteurs optiques et caméras de mesure

Les systèmes de mesure sans contact (projecteurs de profil, micromètres laser, caméras de tri) sont calés sur des seuils de détection de contraste lumineux.

- Des reflets directs ou une lumière ambiante variable (passage de nuages devant les vitrages, néons vieillissants oscillants) modifient l'histogramme de l'image captée, décalant virtuellement la position détectée des bords des pièces de plusieurs pixels.

Précautions d'implantation

- Occulter totalement les fenêtres des laboratoires de mesure critique (stores opaques, filtres anti-infrarouges).
- Utiliser exclusivement des éclairages de type LED à courant continu régulé (sans papillotement à 50 Hz ou 100 Hz)



Atelier de la Mesure (C) Copyright (Juin 2026) Tous droits réservés

8

SYNTHÈSE : LISTE DE CONTRÔLE DU MÉTROLOGUE

L'opérateur doit systématiquement dérouler la liste d'audit environnementale ci-après avant d'effectuer des relevés de mesures critiques à enregistrer dans les rapports officiels

LISTE DE CONTRÔLE ENVIRONNEMENTALE DU MÉTROLOGUE

- **1. STABILISATION THERMIQUE**
  Les étalons et la pièce ont-ils respecté le temps de stabilisation minimum dans l'enceinte régulée (généralement ≥ 4 heures*) ?*

- **2. FLUX D'AIR ET TURBULENCES**
  Les hottes d'aspiration, climatisations directes ou courants d'air sur les plateaux des balances et capteurs sensibles sont-ils déviés ou confinés ?

- **3. VIBRATIONS**
  Le niveau vibratoire du sol est-il conforme (absence de machines tournantes à proximité immédiate, indicateur de la table antivibratoire au vert) ?

- **4. PERTURBATIONS ÉLECTROMAGNÉTIQUES**
  Les câbles de puissance des moteurs lourds sont-ils physiquement séparés des lignes de capteurs analogiques ? Aucun émetteur radio actif n'est présent à proximité ?

- **5. CONDITIONS D'AMBIANCE ENREGISTRÉES**
  La température, la pression atmosphérique et l'humidité ont-elles été relevées sur la centrale d'acquisition pour l'évaluation de l'incertitude ?

Atelier de la Mesure (C) Copyright (Juin 2026) Tous droits réservés

9

CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS OPÉRATIONNELLES

Ignorer ou sous-estimer l'effet des facteurs environnementaux est l'une des causes majeures d'erreurs d'interprétation lors des contrôles de conformité métrologiques (risques de faux accepte ou faux rejette). La maîtrise de ces conditions est un impératif technique pour maintenir l'accréditation des laboratoires de métrologie.

.

Recommandations clés pour l'Atelier de la Métrologie :

1. **Établir un registre environnemental :**
   Renseigner systématiquement la température *T* (et éventuellement *HR%* et *p*) sur chaque constat de vérification ou certificat d'étalonnage.

2. **Estimer rigoureusement les incertitudes :**
   Intégrer les incertitudes liées à la dérive thermique résiduelle et aux erreurs d'arrondi des corrections physiques dans le budget d'incertitude global conformément au GUM.

3. **Assurer l'entretien du laboratoire :**
   Faire étalonner périodiquement les enregistreurs thermo-hygro-barométriques du laboratoire afin de garantir leur traçabilité aux étalons nationaux.

Atelier de la Mesure (C) Copyright (Juin 2026) Tous droits réservés