

# MANOMETRE

Extrait article [Wikipédia \(manometre\)](#) remis en forme

Un **manomètre** est un instrument servant à mesurer une [pression](#). On a développé depuis les débuts de l'époque moderne de nombreux appareils pour mesurer les pressions et le degré de [vide](#) : ces instruments de mesure sont appelés tantôt **capteurs de pression**, tantôt **sondes** (pour le degré de vide). Le manomètre est un [instrument de mesure](#) de pression, destiné en principe à mesurer des pressions voisines de la [pression atmosphérique](#). Le terme « manomètre » renvoie plutôt dans son acception courante à des instruments de mesure à colonne de liquide.

Une sonde manométrique sert à mesurer la pression dans le vide ; on y distingue plusieurs catégories selon la pression, pouvant aller du vide industriel ou grossier à l'[ultravide](#). Les domaines d'application des différents appareils de mesure des pressions se recouvrent en partie ; ainsi, en combinant plusieurs instruments, il est possible de mesurer les pressions sur un spectre continu variant de 10 à  $10^{-11}$  mbar. Une nouvelle jauge de mesure (manomètre) sera bientôt commercialisée, celle-ci pourra mesurer un vide jusqu'à  $10^{-13}$  mbar.[\[Quand ?\]](#)

---

## Le problème de la pression de référence

---

Les mesures de pression comme la pression des [pneus](#) se font, dans la vie courante, par rapport à la pression de l'air ambiant. Les mesures industrielles ou scientifiques, en revanche, se font par rapport à un vide relatif ou une pression de référence pertinente. Pour distinguer ces zéros de pression servant de référence, on parle ainsi de :

- **pression absolue** lorsque la pression est exprimée par rapport au vide ;
- **pression relative** lorsque la pression est exprimée par rapport à la pression de l'air ambiant ; une pression exprimée ainsi est donc égale à la pression absolue diminuée de la [pression atmosphérique](#). On évite généralement de noter le signe des pressions négatives ;
- la **pression différentielle** est l'écart de pression entre deux points.

---

## Manomètres de référence

---

On a inventé depuis le [xvi<sup>e</sup> siècle](#) de multiples appareils pour mesurer les pressions, chacun avec ses avantages et ses inconvénients. Portée, sensibilité, temps de réaction et prix varient de plusieurs ordres de grandeur d'un instrument à l'autre. Le plus vieux manomètre à colonne de liquide (la cuve de mercure) a été inventé par [Evangelista Torricelli](#) en 1643. Le tube en U est dû à [Christian Huygens](#) en 1661. Ces manomètres, parce qu'ils mesurent directement la pression d'enceinte par un équilibre mécanique, demeurent malgré leur temps de réaction important et leur portée plus réduite indispensables à l'[étalonnage](#) de tous les autres capteurs de pression.

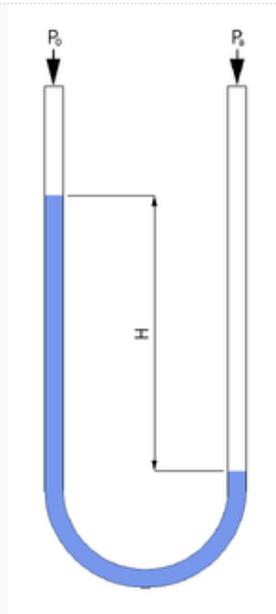
## Manomètres hydrostatiques

Les manomètres hydrostatiques (comme l'appareil à colonne de mercure) comparent la pression à la poussée hydrostatique par unité de surface exercée à la base d'une colonne de fluide. Les mesures hydrostatiques sont indépendantes du type de gaz dont on mesure la pression, et on peut concevoir les manomètres à colonne de telle façon que leur courbe caractéristique d'étalonnage soit pratiquement linéaire. Ils sont en revanche à réponse lente.

### Manomètres à valve

Dans ces manomètres, la pression du fluide comprime un ressort ou fait équilibre à un contrepois *via* une [valve](#) de section déterminée : c'est ainsi que sont fabriqués les manomètres manuels (de précision très variable) des stations de gonflage. Les balances d'étalonnage des manomètres sont des manomètres à contrepois : le contrepois n'est autre qu'une [masse-étalon](#).

### Manomètres à colonne de liquide



La différence de niveau dans un manomètre à colonne de liquide est proportionnelle à la différence de pression :

Les manomètres à colonne de liquide consistent en une colonne verticale de liquide piégée dans un tube dont les extrémités sont soumises à deux pressions différentes. Selon la différence de pression appliquée, la colonne va monter ou descendre jusqu'à ce que son poids soit équilibré. Une version simple est le **tube en U** rempli à moitié de liquide, et dont une extrémité est raccordée à l'enceinte à tester tandis que l'autre extrémité est soumise à une pression de référence (à savoir la [pression atmosphérique](#) ou le vide). La différence de niveau du liquide marque la pression appliquée par l'enceinte par rapport à la pression de référence. En effet, la pression exercée par une colonne de liquide de hauteur  $h$  et de densité  $\rho$  est donnée par la [formule du nivellement barométrique](#)  $P = \rho gh$ . C'est pourquoi l'écart entre la pression appliquée  $P_a$  et la pression de référence  $P_0$  dans un manomètre à tube en U s'obtient avec la relation  $P_a - P_0 = \rho gh$ . En d'autres termes, la pression à chaque extrémité de la colonne liquide (en bleu à droite sur la figure) doit être équilibrée (puisque le liquide est au repos) et par conséquent  $P_a = P_0 + \rho gh$ . Si le fluide dont on veut mesurer la pression est suffisamment dense, il faut introduire des corrections hydrostatiques sur la hauteur lue en fonction du point où le manomètre mesure la pression, à moins que l'on ne mesure la pression différentielle d'un fluide (par exemple au niveau d'un [ajutage](#) ou d'un [canal de Venturi](#)) : dans ce dernier cas, il faudra retrancher de la densité  $\rho$  du liquide manométrique la densité du fluide dont on mesure la pression interne<sup>3</sup>.

Bien que tout [fluide pesant quasi incompressible](#) puisse faire l'affaire, on continue de préférer le [mercure](#) pour sa densité élevée ( $13,534 \text{ g/cm}^3$ ) et sa faible [pression de vapeur](#). Pour détecter de faibles différences de pression dans un domaine très supérieur à la pression de vapeur, on emploie ordinairement l'[eau](#) (et c'est pourquoi l'expression « [mètre d'eau](#) » est encore d'usage courant). Les manomètres à colonne de liquide sont indifférents au type de gaz à tester, et ils présentent une courbe de réponse linéaire sur une plage de pression très étendue. En revanche ils sont lents et donc peu réactifs aux variations brutales du mesurande. Pour les faibles pressions, le liquide barométrique tend à s'évaporer et à contaminer l'enceinte à tester dès qu'on arrive au voisinage de la [pression de vapeur](#). Lorsque l'on mesure la pression dans un liquide, on peut empêcher son mélange avec le liquide de la colonne à l'aide d'un siphon rempli de gaz ou d'un troisième liquide moins dense que les deux autres ; toutefois, cette précaution n'est pas toujours utile, comme lorsque l'on utilise une colonne de mercure pour mesurer la pression différentielle entre deux réservoirs d'eau. Les manomètres hydrostatiques à colonne peuvent permettre de mesurer des pressions allant de quelques [torrs](#) (quelques centaines de Pa) à plusieurs atmosphères (environ  $1\,000\,000 \text{ Pa}$ ).



Une sonde de MacLeod, remplie de mercure

Le **manomètre à bulbe** est un [capillaire](#) de liquide gradué muni à sa base d'un réservoir (le « bulbe »). On peut incliner l'appareil pour gagner en sensibilité.

*Aux très faibles pressions : la sonde de McLeod*

Dans la [sonde de MacLeod](#), un échantillon de gaz est isolé dans une cellule et se trouve comprimé dans un manomètre à mercure modifié jusqu'à ce que sa pression soit de quelques [mmHg](#). Le gaz doit rester physiquement stable au cours du processus de compression (il ne faut pas qu'il se condense). Cette technique lente est peu adaptée à l'enregistrement en continu, mais sa précision est excellente.

**Portée utile** : de  $10^{-4} \text{ Torr}^4$  (environ  $0,01 \text{ Pa}$ ) à  $10^{-6} \text{ Torr}$  ( $0,1 \text{ mPa}$ ),

La pression de  $0,1 \text{ mPa}$  est actuellement la plus faible pression détectable en laboratoire. Il existe bien d'autres sondes pouvant descendre à des pressions inférieures, mais elles ne donnent qu'une mesure indirecte (cf. § suivant), fondée sur la baro-dépendance d'autres propriétés physiques des gaz. Ces mesures indirectes doivent à leur tour être étalonnées en unités SI par raccordement à un manomètre direct, et pour cela on recourt le plus souvent à une sonde de McLeod<sup>5</sup>.

## Manomètres anéroïdes



Un manomètre à membrane

Les manomètres anéroïdes utilisent l'élasticité d'une pièce métallique : sa déformation ([déflexion](#) d'un diaphragme, variation de courbure d'un tube enroulé, etc.) mesure de manière fidèle la différence de pression appliquée. L'adjectif « anéroïde », qui signifie « sans <le truchement d'un> fluide », voulait distinguer à l'origine ces manomètres « secs » des manomètres à colonne de liquide. Toutefois, ces manomètres anéroïdes peuvent parfaitement mesurer la pression interne d'un liquide, et ce ne sont pas les seuls capteurs de pression exempts de fluide interne. Pour cette raison, on les qualifie aujourd'hui souvent de manomètres mécaniques. Les manomètres anéroïdes, contrairement aux capteurs à effet thermo-ioniques et aux chambres d'ionisation, sont indifférents à la nature du gaz dont on recherche la pression et, contrairement aux manomètres à colonne de liquide, ne risquent pas de contaminer le mesurand. La cellule élastique peut prendre la forme d'un [tube de Bourdon](#), d'un diaphragme, d'une capsule manométrique comme la [capsule de Vidie](#), ou d'un manomètre à soufflet. Elle se déforme en réponse à la pression du fluide testé. La déformation de cette cellule est soit lue sur un cadran à aiguille par un mécanisme, soit convertie grâce à des [jauges de déformation](#).

## Appareil de Bourdon

### Principe

L'appareil de Bourdon est fondé sur le principe qu'un tube cylindrique pincé tend à se rectifier et à reprendre une section circulaire lorsqu'il est soumis à une pression interne. Quoique ce changement soit à peine perceptible à l'œil, et ne développe donc que des [contraintes](#) élastiques même dans les métaux très ductiles, il est possible d'amplifier les [déformations](#) du tube en le [cintrant](#) « en C » ou même en [hélice](#), de telle façon que sous l'effet de la pression de gaz, il tend à s'ouvrir (pour un appareil en C) ou à élargir ses spires de manière réversible, élastique. [Eugène Bourdon](#) breveta cet appareil en 1849, et très vite la sensibilité, la linéarité et la précision de l'instrument firent son succès : Edward Ashcroft racheta les droits d'exclusivité de Bourdon pour les [États-Unis](#) en 1852 et devint le premier fabricant de manomètre du continent nord-américain. En 1849, Bernard Schaeffer breveta à [Magdebourg](#) un manomètre à diaphragme (cf. infra), qui complétait heureusement la portée de l'appareil de Bourdon : dans la seconde moitié du [xix<sup>e</sup> siècle](#), ces deux manomètres révolutionnèrent la métrologie des pressions dans le monde de l'industrie<sup>6</sup>. Mais dès 1875, le brevet de Bourdon expirait, et c'est désormais la compagnie allemande [Schaeffer and Budenberg Co.](#) qui fabriqua, pendant quelques décennies, l'essentiel des manomètres à tube de Bourdon.

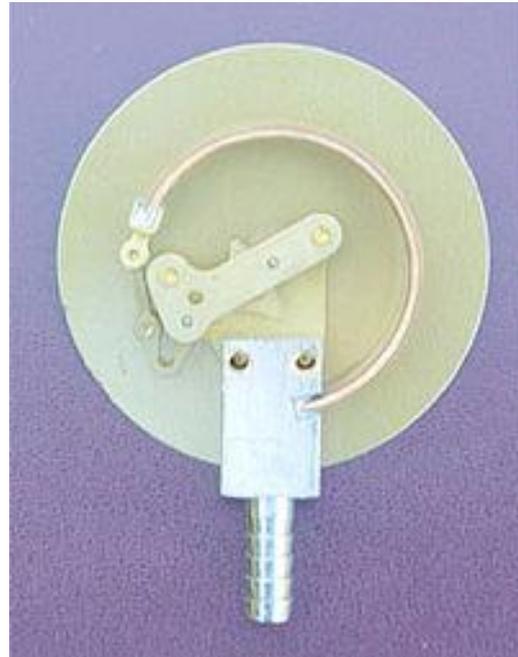
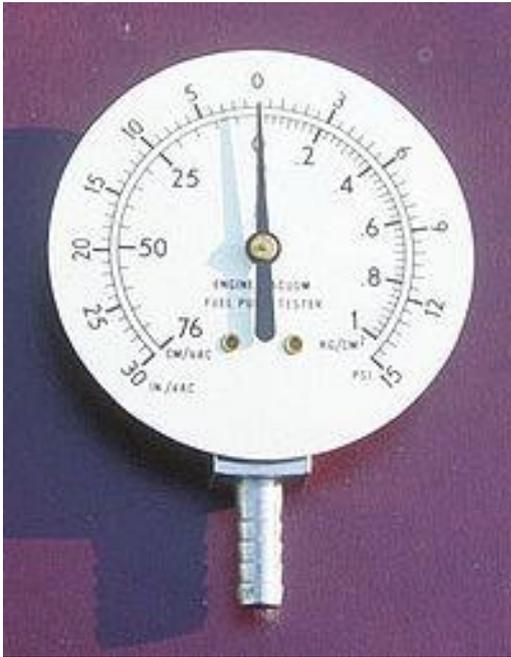
En pratique, on raccorde un tube pincé et obturé à ses extrémités à l'extrémité d'un flexible de prise en dérivation sur l'enceinte dont on veut mesurer la pression. Lorsque la pression croît, la courbure du tube diminue et son extrémité décrit un arc : elle repousse par l'intermédiaire d'une bielle un segment de roue dentée (généralement interchangeable *via* un sélecteur de calibre, qui fait embrayage). Un pignon denté de petit diamètre est en prise avec l'aiguille, ce qui permet de multiplier l'amplitude de lecture par un facteur constant. L'étalonnage se fait simplement soit en tournant légèrement le cadran, soit en déplaçant la position zéro de l'aiguille, soit en jouant sur la longueur de transfert. On peut mesurer une pression différentielle avec deux tubes de Bourdon couplés par des joints.

Les tubes de Bourdon mesurent une pression relative par rapport à la pression atmosphérique ambiante, et non la pression absolue ; Les dépressions se détectent à un mouvement rétrograde de l'aiguille. Certains baromètres anéroïdes emploient des tubes de Bourdon obturés à leurs extrémités (mais la plupart intègrent plutôt des capsules, cf. *infra*). Lorsque la pression oscille rapidement, comme à proximité d'un moteur à piston, on prévoit souvent de ménager une valve de surpression dans le flexible de prise pour éviter une usure prématurée des mécanismes et pour lisser le signal de pression ; lorsque tout le manomètre est mis en vibration, on peut remplir tout l'appareil (y compris le cadran et l'aiguille) d'un fluide amortisseur : on parle alors de manomètre à bain de silicone ou de [glycérine](#). Il est déconseillé de tapoter sur le cadran du manomètre pour le dégripper car cela fausse généralement la mesure. Le tube de Bourdon n'est pas en contact avec le corps du manomètre et sa déformation n'affecte donc pas le cadran. Les manomètres modernes de ce type offrent une précision de  $\pm 2$  % de la portée, mais un appareil haut-de-gamme peut descendre jusqu'à 0,1 % de toute l'étendue de mesure<sup>7</sup>.

Les schémas ci-contre montrent le cadran et le mécanisme d'un manomètre utilisable également comme sonde. Cette combinaison particulière de sonde et de manomètre de Bourdon est employée pour le diagnostic des moteurs :

[cadran](#) et aiguille.

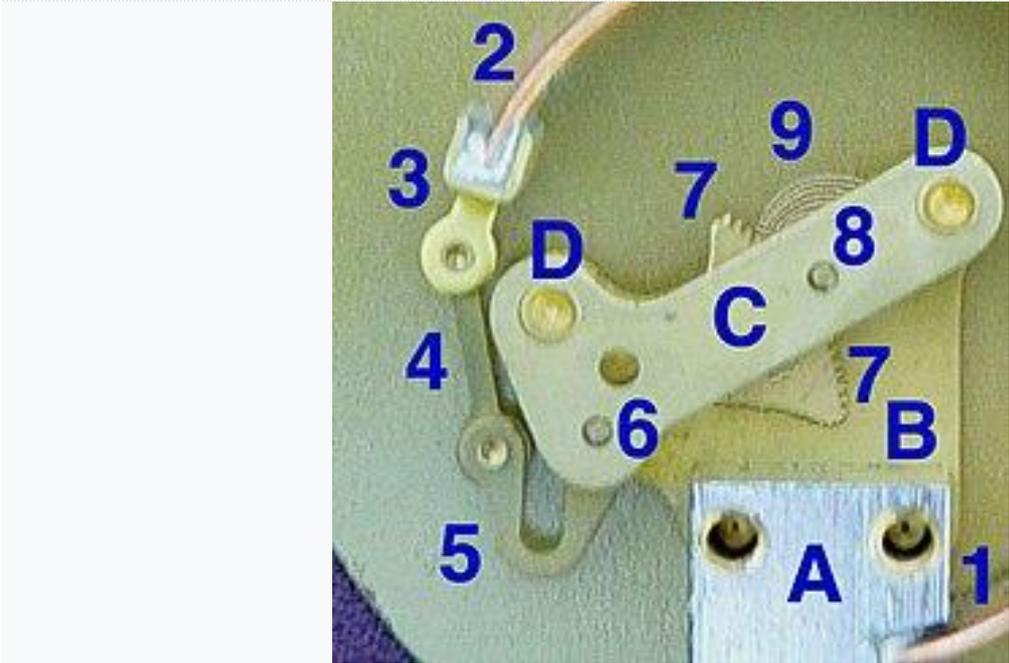
Le tube de Bourdon et son mécanisme de conversion vers l'aiguille indicatrice.



Sur cet appareil :

- la moitié gauche du cadran, utilisée pour mesurer la [dépression du collecteur](#), est graduée en [centimètres de mercure](#) (échelle intérieure) et [pouces de mercure](#) (échelle périphérique) ;
- la moitié droite du cadran, utilisée pour mesurer la pression de la [pompe à injection](#), est graduée par [fractions](#) de 1 [kgf/cm<sup>2</sup>](#) (échelle intérieure) et en [psi](#) (échelle périphérique).

## Mécanisme du manomètre de Bourdon



Appareil de Bourdon : détails du mécanisme

### Pièces fixes :

- A : Enceinte réceptrice. Elle assure la jonction entre le flexible de prise et l'admission dans le tube de Bourdon (1) et participe à la rigidité de la plaque du châssis (B) avec deux vis de fixation.
- B : Plaque du châssis. Elle reçoit le cadran gradué. Deux alésages sont prévus pour l'aiguille et les pivots du mécanisme de réduction/amplification.
- C : Plaque secondaire du châssis : reçoit l'autre extrémité des pivots des roues dentées et du balancier.
- D : Entretoise permettant de rigidifier les deux plaques du châssis et l'espace intermédiaire, logement du mécanisme.

### Pièces mobiles :

1. Extrémité fixe du tube de Bourdon. C'est par cette extrémité que le fluide en pression est admis dans la cellule.
2. Extrémité mobile du tube de Bourdon. Cette extrémité est scellée hermétiquement.
3. Pivot et son appui.
4. Bielle de transmission au crochet (5) avec un axe pour permettre la rotation commune.
5. Balancier entraînant le secteur denté (7).
6. Pivot du secteur denté.
7. Secteur denté.
8. Pivot de l'aiguille indicatrice du cadran. Il engrène sur le secteur denté (7) et traverse la plaque du châssis pour entraîner l'aiguille de lecture. Compte tenu du très faible bras de levier entre l'axe du balancier et du taux de réduction du pignon d'engrenages, les moindres déformations du tube de Bourdon sont fort amplifiées et se traduisent par un mouvement bien détectable de l'aiguille.
9. [Ressort spiral](#) pour le rappel du pignon denté : il élimine les rebonds et évite l'[hysteresis](#).



### Capsules manométriques



Empilement en série de **capsules manométriques** dans un [barographe](#) anéroïde.

Un autre type de manomètre anéroïde repose sur la mesure de la [déflexion](#) d'une [membrane](#) flexible séparant deux enceintes à des pressions différentes. À une différence de pression donnée correspond une déflexion précise, de sorte qu'un étalonnage permet de mesurer les différences de pression. La déformation d'un diaphragme, ou paroi mince, dépend de la différence de pression entre ses deux faces. La membrane peut être exposée à une pression de référence ou avec l'atmosphère (on mesure alors une pression indiquée), à une enceinte pressurisée (on mesure une pression différentielle) ; enfin elle peut être scellée sur une capsule où l'on a fait le vide, pour mesurer la pression absolue. La déflexion de la membrane se mesure par toutes sortes de comparateurs : mécaniques, optiques, capacitifs. Pour mesurer la pression absolue, on utilise des capsules faites de deux diaphragmes soudés à leur périphérie. Les diaphragmes sont métalliques ou céramiques.

**Portée utile<sup>8</sup>** : à partir de  $10^{-2}$  Torr (environ 1 Pa).

Forme : plat, tôle ondulée, tube pincé, capsule.

### *Manomètres à soufflet*

---

Dans les manomètres destinés à mesurer les pressions absolues, les faibles pressions ou les faibles différences de pression, le pignon de réduction et l'aiguille peuvent être mus par une série de capsules manométriques empilées dans une enceinte étanche déformable, dite « à soufflet », appelé un **anéroïde** : ce modèle à soufflet est en effet souvent employé dans les manomètres anéroïdes (manomètres à cadran à aiguille), dans les [altimètres](#), les [barographes](#) d'enregistrement de l'altitude, et les instruments de télémétrie embarqués dans les [ballons-sondes](#). Dans ces instruments, le gaz prisonnier du soufflet donne une pression de référence et la pression extérieure agit sur l'empilement des capsules manométriques. Plusieurs instruments embarqués dans les avions : le [tachymètre](#) et l'accéléromètre ascensionnel ([variomètre](#)), fonctionnent par connexion à une chambre anéroïde et à une enceinte pressurisée externe.