

---

# Le niveau à bulle : l'outil gnomonique de prédilection

---

John Gueulette

---

## Avant-propos

La précision de l'heure fournie par un cadran solaire dépend de deux éléments bien distincts :

- **la précision des données** de latitude et de déclinaison gnomonique du lieu et de la surface sur laquelle le cadran est destiné à être posé, données qui servent à calculer les lignes horaires et à en déterminer le tracé ;
- **la précision de la mise en station du cadran**, tant en ce qui concerne le respect de ses données de calcul que de l'orientation de son gnomon.

Cette assertion ne vaut toutefois que partiellement pour les cadrans horizontaux, équatoriaux et polaires (dont le « calcul » et le positionnement sont relativement simples), mais prend toute son importance pour les cadrans verticaux, en particulier pour les cadrans déclinants. On sait en effet que la « **déclinaison gnomonique** » est un paramètre éminemment difficile à déterminer avec précision<sup>1</sup> et que le positionnement du gnomon est souvent problématique et incertain<sup>2</sup>, si bien que ces deux éléments constituent l'essentiel des sources d'erreurs communément observées.

Tous les paramètres de calcul et de positionnement d'un cadran se basent sur les coordonnées locales (alt-azimutales), qui se réfèrent au plan horizontal (et aux plans verticaux associés). Les outils de vérification de l'horizontalité d'un plan sont multiples et variés, allant du simple **niveau à bulle** (en anglais « **spirit level** ») à différents types de **niveaux laser**, en passant par le **niveau à eau** (basé sur le principe des vases communicants)

et le **niveau à pinnules** (niveau à bulle surmonté d'une lunette de visée). Chacun de ces appareils a un domaine d'application spécifique : schématiquement, les niveaux à bulle et à eau sont utilisés pour le nivellement de petites et moyennes dimensions (comme par exemple, dans le domaine de la construction, pour l'élévation de murs, le placement de cloisons, de portes, etc.), tandis que les autres outils sont utilisés pour des nivellements plus importants, intéressant principalement les domaines de la topographie/topométrie (implantation de bâtiments, de lignes de chemin de fer, etc.) et de la géodésie (triangulations, méridiennes).

Le niveau à bulle a la particularité de **s'appuyer directement** sur la surface à niveler, permettant de la sorte de niveler avec grande précision des objets **de très petites tailles**. Ceci au contraire des autres instruments, qui fournissent des lignes horizontales virtuelles (lignes optiques) ou lignes horizontales lumineuses (lignes laser) auxquelles la surface à niveler doit être rendue parallèle, opération qui ne peut être exécutée avec précision que sur de grandes distances.

De ce fait, considérant d'une part que les cadrans solaires sont des objets de dimensions restreintes, et, d'autre part, que toutes erreurs sur les références d'horizontalité et/ou de verticalité lors de leur conception et/ou de leur mise en station peuvent entraîner des différences horaires non négligeables, le **niveau à bulle s'impose comme l'outil gnomonique de prédilection**. Après un bref rappel de leur principe de fonctionnement, les paragraphes suivants seront consacrés à l'étude de leur sensibilité et aux moyens de les régler.

## Principe

Le niveau à bulle, aussi appelé niveau à « bulle d'air » – « inventé » par **Melchisédech Thévenot** (France, 1620-1692) –, est fondé sur le principe d'Archimède selon lequel « *tout*

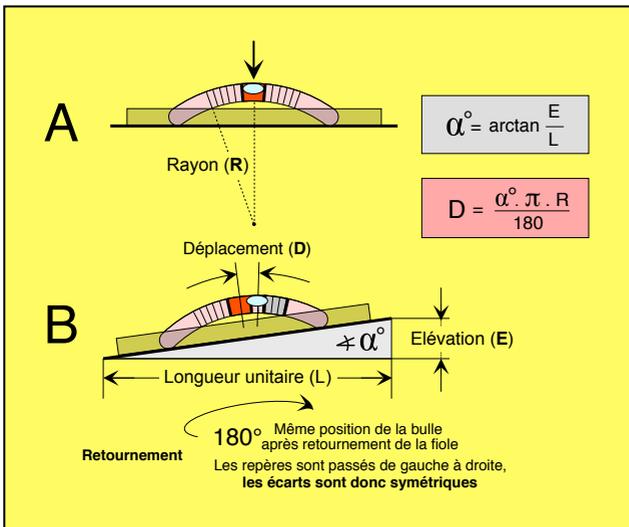
---

1 La littérature propose de nombreuses méthodes de mesure de la déclinaison gnomonique, à choisir en fonction de la configuration des lieux et des ressources du gnomoniste.

2 Il existe également différentes méthodes de positionnement du gnomon, comme celle proposée dans *Le Ciel* de janvier 2019 (p. 14) et dans le livre de gnomonique de l'auteur, en page 44.

corps plongé dans un liquide subit une poussée vers le haut », **menant donc l'objet (la bulle) à se mouvoir vers le haut et à occuper la position la plus haute du liquide (Fig. 1 A)**. La partie supérieure de la « fiole » contenant celui-ci étant de forme concave vers le bas, la bulle occupera dès lors **invariablement le sommet de la concavité**, et ce **de manière absolue**, indépendamment de l'orientation de la fiole dans le plan vertical. Il s'ensuit que si la bulle reste immobile – **par rapport à des repères gravés sur la fiole** – après que le niveau a été tourné sur lui-même de  $180^\circ$ , cela signifie que le signe (positif ou négatif) de la pente de la « **ligne de pente** » sur laquelle

il s'appuie demeure inchangé. La valeur de la pente est donc forcément nulle, et, par conséquent, la ligne de pente est horizontale et le **niveau « juste »**. Corrélativement, cela signifie que si ce même niveau – **juste** – est retourné sur une ligne de pente **non horizontale** (la valeur de la pente reste égale mais change de signe), la bulle occupera une position **symétrique par rapport aux repères (Fig. 1 B)**, ce qui, d'un point de vue pratique, implique **qu'en regardant le niveau toujours du même côté**, la bulle n'aura pas bougé (voir aussi la Fig. 4). Cette observation sera utile à prendre en compte lors des opérations de vérification d'exactitude (voir plus loin).



**Figure 1 : Principe de fonctionnement des niveaux à bulle (voir texte).** Les rectangles oblongs en bistre représentent le bâti de l'instrument dont la fiole est solidaire. Le carré rouge au centre de celle-ci correspond au repère d'horizontalité ; le même carré est grisé (en B) après le retournement. Le rayon de courbure  $R$  de la concavité est fortement réduit ; l'inclinaison du plan non horizontal (en B) est fortement exagérée. L'angle  $\alpha$  est exprimé en degrés ; la longueur unitaire  $L$  et l'élévation  $E$  doivent être exprimées dans les mêmes unités.

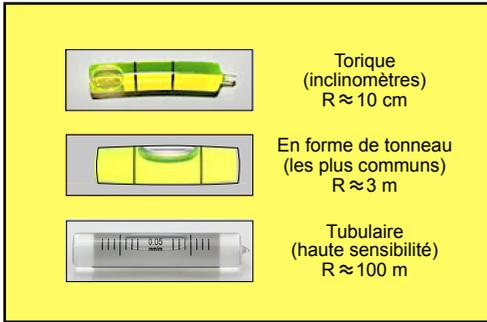
## Sensibilité

La sensibilité d'un niveau à bulle se définit par la pente qu'il faut donner à l'outil pour que la bulle se meuve de **2 mm** (valeur conventionnelle égale à l'intervalle habituel entre les graduations – s'il y en a !). Comme on a pu le voir dans la **Figure 1**, la valeur de cet angle est égale à l'arc tangente (arctan) de l'élévation ( $E$ ) de l'une des extrémités du niveau par unité de distance. Il existe dès lors plusieurs manières d'exprimer la sensibilité :

- soit en donnant simplement **la valeur de l'angle de la pente** correspondante (peu fré-

quent), par ex. 5 à 10 secondes d'arc ( $5'' - 10''$ ) pour les niveaux de haute précision, ou 3 – 4 minutes d'arc ( $3' - 4'$ ) pour les niveaux de charpentier ;

- soit en donnant la pente sous forme de « **pourcentage** » (très peu usité), c.-à-d. le rapport entre l'élévation et la distance unitaire (valeur de la tangente), par ex. 0,005 % (haute précision), ou 0,1 % (charpentier) ;
- soit encore en donnant les rapports précédents **sous forme de fraction** (le plus fréquent), par ex. 0,05 mm/m (haute précision) ou, 1 mm/m (charpentier).



**Figure 2 : Types de fioles.** Les fioles toriques sont plutôt spécifiques des « inclinomètres » – appareils de mesure de pente destinés à couvrir une large plage d’inclinaisons. Le rayon de courbure de leur fiole étant réduit (10 cm), ces appareils sont de précision moyenne, de l’ordre du demi-degré. Les fioles en forme de tonneau – dont la courbure reste pareille sur toute la circonférence du tube – équipent la majorité des niveaux à bulle. Cette configuration permet à la bulle de conserver sa position supérieure quel que soit le degré de pivotement du tube autour de son axe longitudinal. Il n’empêche cependant que le bombement peut

ne pas être parfaitement isotrope, raison pour laquelle les fioles des niveaux de haute précision (fioles « tubulaires ») comportent en plus une petite fiole perpendiculaire destinée à prévenir toute inclinaison latérale de l’instrument. Les fioles ont des longueurs comprises entre 3 et 5 cm pour les niveaux de charpentiers (diamètre 6 – 9 mm), et entre 6 et 12 cm pour les niveaux de haute précision (diamètre 10 – 15 mm). Voir plus d’informations dans le paragraphe suivant.

Comme on a pu le voir dans les exemples précédents, la sensibilité est d’autant plus grande que les chiffres qui l’expriment sont faibles. Elle dépend précisément du **rayon de courbure** de la fiole dans laquelle se meut la bulle : plus sa courbure est faible, plus le déplacement de la bulle pour un angle donné est **important** – et plus la **sensibilité du niveau est grande**. La courbure des fioles des niveaux de haute précision équivaut à celle d’un cercle de l’ordre de **100 mètres** de rayon, tandis que celle des « niveaux de charpentier » équivaut à celle d’un cercle d’environ **3 m**. Ce qui indique d’emblée que si la courbure de la fiole des niveaux « courants » peut dans certains cas être visible, celle des niveaux de précision n’est absolument pas décelable : leurs fioles se présentent comme de simples tubes de verre parfaitement rectilignes, mais qui ont fait l’objet d’un rodage intérieur particulièrement fin. Afin de se fixer les idées, sachons que le bombement intérieur au centre d’une telle fiole de par ex. 6 cm de longueur est inférieur au  $1/100$  de millimètre, totalement invisible donc.

Ajoutons que la sensibilité dépend également de la fluidité du liquide contenu dans la fiole, ordinairement de l’**éthanol** pour une sensibilité moyenne ou de l’**éther** pour les niveaux de haute précision, ou encore un liquide de composition particulière, tenue secrète par les constructeurs.

## Réglage

### Préambule

Un niveau à bulle n’est **juste** que lorsque la bulle revient exactement à la même place après que l’instrument a été retourné sur lui-même de  $180^\circ$  (toujours en regardant le niveau du même côté, voir § *Principe* et Fig. 4).

Tous les niveaux à bulle n’offrent pas la possibilité d’être réglés. Seuls certains niveaux de haute précision possèdent une vis de réglage agissant sur le positionnement de la fiole par rapport à la « semelle » de l’instrument dont elle est solidaire. Une manière de pallier l’inconvénient d’être réglé « par construction » (comme la presque totalité des niveaux communs) est de coller aux extrémités de la semelle deux talons de quelques millimètres d’épaisseur. Le ponçage de l’un ou l’autre talon de cette « fausse semelle » permettra d’opérer les (très) faibles ajustements nécessaires (voir plus loin).

**Notons que le réglage d’un niveau ne nécessite aucunement de disposer d’un plan horizontal de référence.** Au contraire, on se basera sur un plan **quasi horizontal**, plan dont les différentes directions présentent alternativement des pentes positives et négatives, et qui passent nécessairement par l’horizontale parfaite (**Figure 3**). Le pivotement du niveau sur une telle surface permettra de spécifier des

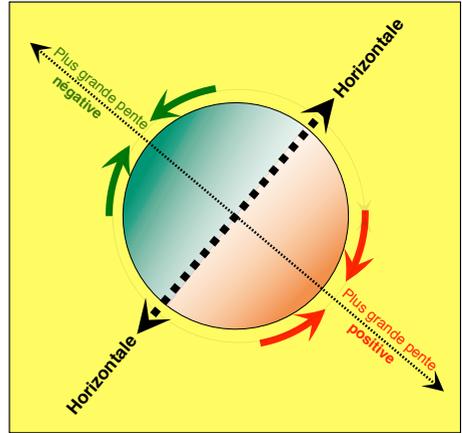
différences de pente minimales, telles que celles qui seront requises dans les différentes étapes de réglage ci-après (en particulier dans les étapes 3 et 4).

**Remarque importante :** la « plus grande pente » du plan doit être légèrement supérieure au défaut éventuel de parallélisme entre l'axe longitudinal de la fiole, ou – dans le cas d'une fiole torique – la « corde » et la semelle de l'instrument. Ceci pour permettre à la bulle de se mouvoir librement sans rester coincée dans l'une ou l'autre extrémité de la fiole : en principe, la bulle devrait pouvoir se positionner entre les graduations extrêmes de la fiole quelle que soit l'orientation de cette dernière. Cette condition peut ordinairement être remplie après que le plan a été grossièrement nivelé avec un niveau commun (de charpentier)

Notons par ailleurs que si le plan ne doit pas être horizontal, il doit être parfaitement plat. Un verre à vitre épais, ou, mieux, la plaque de verre couvrant une table conviennent parfaitement : ils sont lisses et peuvent être facilement débarrassés de leurs poussières. Pour finir, ajoutons que les « retournements de 180° » doivent être aussi exacts que possible. Pour ce faire, on adossera le niveau à une règle, assez lourde pour rester en place malgré les légers chocs engendrés par la manœuvre.

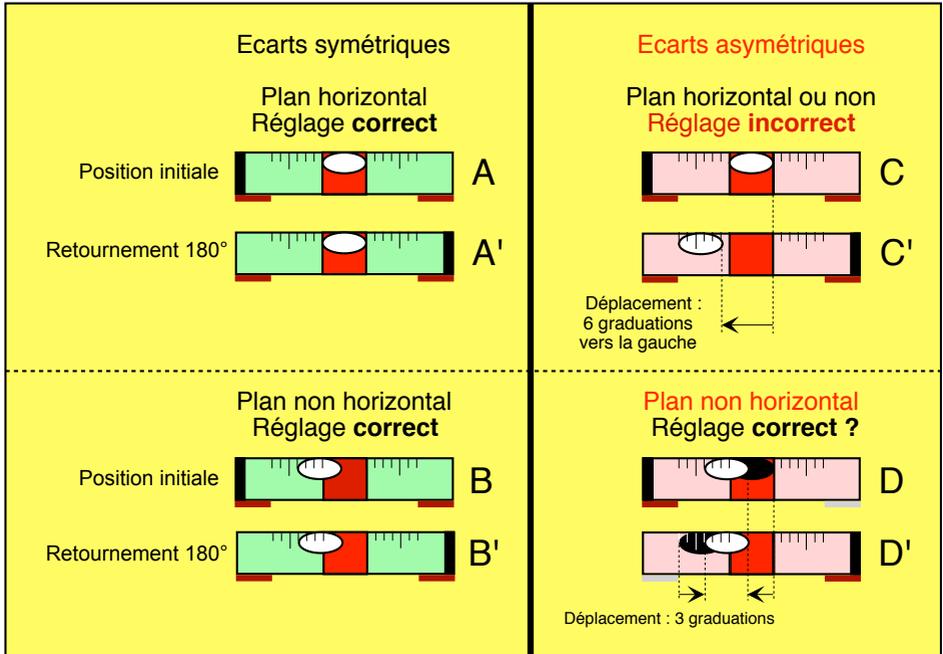
#### Procédure (Figure 4) :

- 1) on dépose le niveau sur un plan quasi horizontal et on le fait pivoter sur lui-même jusqu'à ce que la bulle se place entre les repères (carré rouge) – position **A** ou **C** ;
- 2) on fait à nouveau pivoter le niveau sur lui-même – de 180° (retournement) : si la bulle reprend exactement la même position le niveau est **juste**, et la surface est horizontale (**A'**). Dans le cas contraire, le niveau est **faux** et doit être réglé. On note alors le sens et la distance sur laquelle la bulle s'est déplacée (par ex. **C'**, **6 divisions à gauche des repères**).
- 3) **Réglage proprement dit** : on abaisse l'une des extrémités de la « fausse semelle » (on ponce l'un de ses talons) de sorte que la bulle se positionne à **mi-chemin** de sa posi-



**Figure 3. Plan quasi horizontal :** les pentes positives (rouges) et négatives (vertes) sont croissantes dans le sens des flèches, pour atteindre leur maximum à l'endroit de la « ligne de plus grande pente » (direction de l'écoulement des eaux sur ce plan). La perpendiculaire à cette dernière est – forcément – exactement horizontale.

- 4) contrôlons la chose : *il est peu probable que le niveau soit juste dès après ce premier réglage* et que la bulle retrouve exactement la même position qu'en **D**. Dès lors, on recommencera les étapes **1** à **3** par des réglages de plus en plus fins – autant de fois que nécessaire pour aboutir à la situation **A/A'** (plan horizontal). **Le niveau étant désormais « juste »**, le fait de le placer sur un plan *non horizontal* engendrera des configurations de la bulle analogues à **B/B'** quelle que soit son orientation dans ce plan.

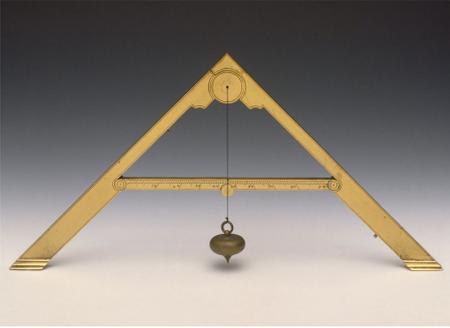


**Figure 4.** Positions de la bulle par rapport aux repères (carrés rouges) selon que le niveau est « juste » (à gauche), et/ou qu’il est placé sur un plan horizontal ou non. Après retournement, le « nez » de la fiole (ligne verticale grasse en noir) passe du côté gauche au côté droit. Les traits horizontaux brun foncé (les « talons ») forment la « fausse semelle » de l’instrument ; son talon de droite en **D** (talon grisé) a été poncé de manière que la fiole se soulève du côté gauche et que la bulle se meuve de droite à gauche – et qu’elle se meuve de gauche à droite après le « retournement ». Les bulles noires montrent les mêmes positions qu’en C / C’, c.-à-d. les positions qu’elles occupaient avant le réglage.

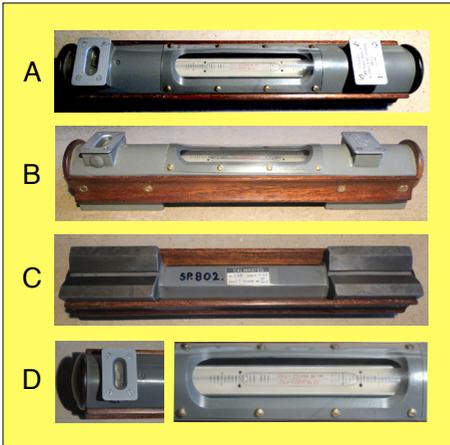
**Annexe**

Le principe du niveau à bulle est fondé sur la même « loi de la pesanteur » (corrélative de la « loi de la gravitation universelle » de Newton) que ses ancêtres, à savoir « la dioptré », « l’archipendule », « le chorobate », « la groma », et leurs dérivés. Toutefois, ces instruments – schématiquement faits d’un triangle isocèle au sommet duquel est suspendu un fil à plomb (Figure 5) –, définissent l’horizontale à partir de la perpendiculaire au fil. On comprendra aisément qu’ils ne purent atteindre une très grande précision si l’on considère que leur hauteur devrait atteindre une centaine de mètres pour fournir

une ligne horizontale ayant la même précision que celle donnée par le niveau à bulle ci-dessous (Figure 6). L’invention de Thévenot constitue donc une avancée majeure, qui se répandit en France d’abord (au XVIII<sup>e</sup> siècle), puis dans le monde entier. Le niveau à bulle remplace ou équipe désormais tous les instruments de nivellement, qui, pour ne citer qu’un exemple, contribuèrent de manière décisive à la précision des mesures de triangulation de Delambre (1749–1822) et Méchain (1744–1804), en quête de la longueur du « quart de méridien terrestre », à partir de laquelle serait définie celle du mètre.



**Figure 5.** Archipendule (17<sup>e</sup> siècle, Museo Galileo, Florence). Aussi exact que soit – par définition – la verticale définie par le fil à plomb, la précision avec laquelle on peut définir celle de sa perpendiculaire dépend de la hauteur de l'instrument. Faisant un calcul analogue à celui fait pour le niveau à bulle, il vient qu'une incertitude de 1 mm sur la correspondance entre le fil et la graduation centrale de l'instrument engendre une incertitude de  $\pm 6$  min d'arc sur l'horizontale, soit une précision comparable à celle des niveaux à bulle « communs » – mais ceci pour un instrument de 50 cm de hauteur; à condition que le plomb soit exactement centré, que l'instrument (en bois le plus souvent) ait été construit à la perfection, qu'il n'ait pas « joué »... et qu'il n'y ait pas de vent !



Ci-contre, un modèle de niveau à bulle de précision, fabriqué par la firme anglaise **Cook, Troughton & Simms** (Figure 6). Fondée à York en 1847 (et fermée en 1988), la firme prédomina dans la fabrication de télescopes, théodolites et autres appareils optiques, et fournit la plupart des observatoires mondiaux de l'époque en grands instruments. Le présent modèle est spécifiquement conçu pour la mise en station de machines-outils de haute précision et d'autres dispositifs du genre, chez lesquels les moindres balourds peuvent provoquer des distorsions rédhibitoires. Il va de soi que les mêmes exigences de précision s'appliquent à la mise en station des télescopes, lunettes méridiennes, etc., en particulier pour le nivellement de leur axe transversal.

**Figure 6.** En **A** : vue du dessus de l'instrument. À droite, la plaquette portant les références du constructeur (Cook, Troughton & Simms, Ltd, YORK ENGLAND EO.93522). Au centre, la fiole tubulaire principale, à gauche, la fiole secondaire perpendiculaire à la fiole principale (pour le contrôle de l'aplomb). L'instrument – particulièrement lourd (2,44 kg) – est principalement constitué d'acier. Sa longueur est 30 cm et sa largeur 5 cm. En **B** : Vue de côté. Les flancs sont bardés d'une languette en bois, empêchant la chaleur de la main de se transmettre au corps de l'instrument. Une distribution non uniforme de la température au sein de la fiole est en effet propre à induire à la bulle des déviations aléatoires. En **C** : vue du dessous. On distingue les deux « talons » de la « fausse semelle ». Ceux-ci sont usinés en forme de V afin de pouvoir s'appuyer sur une surface tubulaire. On distingue également (au centre) la mention du dernier étalonnage (« CALIBRATED, Date 6-07-1993, Service SP802 »). Le dispositif ne possédant aucune vis de réglage, cet étalonnage est vraisemblablement réalisé par micro ponçage de l'un des talons selon la procédure vue dans l'article. En **D**, à gauche : la fiole auxiliaire; à droite : la fiole principale (13 cm de longueur et 18 mm de diamètre), protégée par un écran en matière plastique. Elle porte 2 rangs de 17 graduations équidistantes d'environ 2 mm, symétriquement disposées de part et d'autre des repères d'horizontalité (petits points noirs). La bulle s'étale sur une distance particulièrement longue (7 cm), ce qui lui donne une certain « poids » contrecarrant les nano rugosités tubulaires s'opposant à sa mobilité. La sensibilité affichée (sur la fiole) est : 1 div. = 0, 0005" in 10" (en « pouces »), soit 0,05 mm par mètre.