# Méthodes de contrôle des montres mécaniques

Witschi Electronic AG, 2025

**Witschi Electronic AG**
Bahnhofstrasse 26 | 3294 Büren an der Aare | Switzerland
41 (0)32 352 05 00 | welcome@witschi.com | witschi.com

# Table des matières

**Table des matières** ..... **2**

**Principes de base** ..... **4**

Structure d'une montre mécanique ..... 4
Oscillateur et échappement ..... 5
Fréquence ..... 5
Alternance ..... 5

**Grandeurs de mesure** ..... **6**

Ecart de marche ..... 7
Erreur de repère (Repère) ..... 8
Amplitude ..... 8

**Mesure acoustique** ..... **9**

Le bruit de battement de l'échappement à ancre suisse ..... 10
Ecart de marche ..... 11
Erreur de repère (Repère) ..... 11
Amplitude ..... 12
Paramètres de mesure ..... 13

**Mesure optique avec laser** ..... **14**

Signal optique ..... 15
Ecart de marche (optique) ..... 15
Amplitude (optique) ..... 15
Paramètres de mesure ..... 16

**Mesure optique avec caméra** ..... **17**

Position de l'aiguille ..... 17
Effet stroboscopique ..... 17
Caméra à haute vitesse ..... 17

**Représentation des résultats** ..... **18**

Diagramme (DIA) ..... 18
Trace (TRC) ..... 19
Vario (VAR) ..... 20
Séquence (SEQ) ..... 21
Scope (SCO) ..... 23
Transformation de Fourier rapide (FFT) ..... 24
Isochronisme (ISO) ..... 25

**Valeurs caractéristiques calculées** ..... **26**

Valeur moyenne (X) ..... 26
Différence maximale entre les couches d'essai (D) ..... 27
Différence verticale/horizontale (DVH) ..... 27

Différence entre les couches d'essai 6H et CH (Di) ....27
Isochronisme....28
Isochronisme maximum sur les positions d'essai mesurées (Im) ....28
Isochronisme entre 0h et 24h (Ie)....28
Différence des valeurs moyennes entre 0h et 24h (DX)....29
Différence entre complication activée et désactivée (DXC) ....29
Différence de marche maximale sur toutes les positions d'essai (Pmax)....29
Facteur de qualité (N) ....29
Facteur de qualité (Q) ....30
Erreur de centre de gravité (DVm, Φ)....31

**Conseils de mesure Witschi....33**

Tolérances standard ....34
Valeurs typiques de la réserve de marche ....34
Facteurs pertinents pour la mesure qui influencent la période d'oscillation du balancier ....34

**Détection des erreurs....36**

Détection des erreurs avec un diagramme ....36
Détection des erreurs avec Scope....38

# Principes de base

## Structure d'une montre mécanique

### Organe réglant

L'organe réglant d'une montre mécanique, composé d'**un balancier et d'un spiral**, garantit une grande précision de marche grâce à ses oscillations précises.

Fréquences typiques :
2.5 - 5 Hz = 18'000 - 36'000 A/h
(A/h pour alternances par heure).

### Échappement

L'**échappement**, composé d'une roue d'échappement et d'une ancre, transmet l'énergie du rouage à l'organe réglant et libère le mouvement des roues à des intervalles de temps précis.

### Rouage et minuterie

Transmet l'énergie du ressort à l'échappement et traduit le mouvement de rotation du rouage aux aiguilles, assurant ainsi l'affichage correct de l'heure sur le cadran.

### Ressort moteur barillet

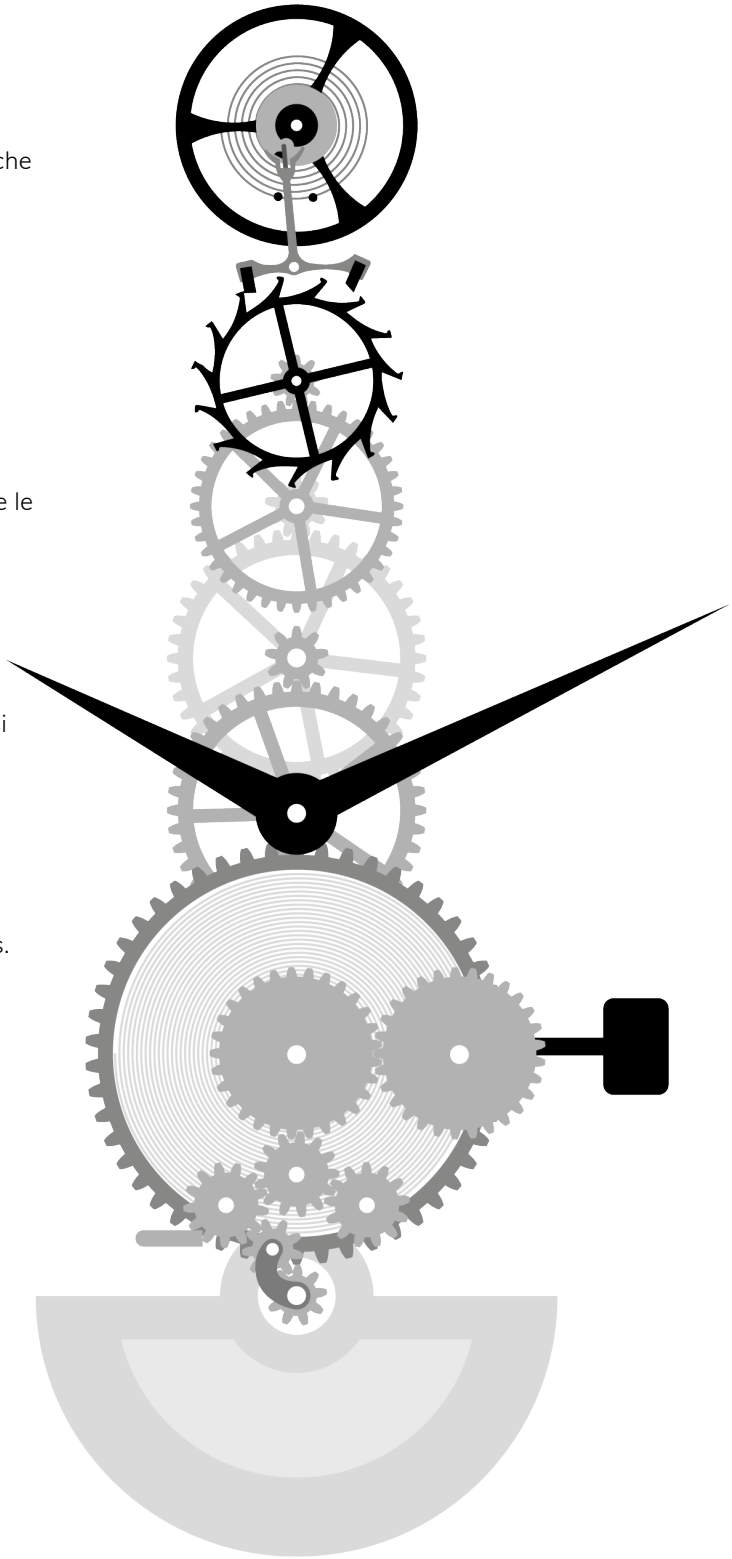
Fournit l'énergie motrice pour l'ensemble du mouvement. La réserve de marche est généralement d'environ 48 à 70 heures. Les montres dotées d'une réserve de marche particulièrement longue peuvent atteindre une durée de fonctionnement allant jusqu'à 8 jours sans devoir être remontées.

### Tige de remontoir avec couronne

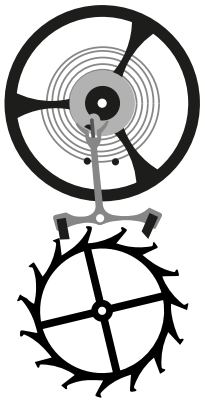
Le ressort moteur est armé en tournant manuellement la couronne, une fonction qui peut également être utilisée sur la plupart des montres automatiques.

### Remontage automatique

Remontage automatique avec masse oscillante et réducteur. Remonte automatiquement le ressort moteur grâce aux mouvements du bras (uniquement pour les montres automatiques).



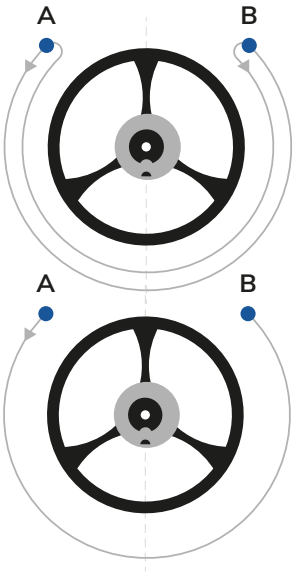
## Oscillateur et échappement



Dans les montres-bracelets mécaniques, c'est généralement un pendule rotatif (balancier) qui sert d'horloge pour la mesure du temps. L'échappement libère le mouvement des roues à des intervalles de temps précis tout en fournissant au balancier l'énergie nécessaire à son fonctionnement.
Il existe une grande variété d'échappements. Le type d'échappement le plus courant pour les montres-bracelets mécaniques modernes est l'**échappement à ancre suisse**. La description suivante du fonctionnement et des bruits générés s'applique à cet échappement.

## Fréquence

Le nombre d'oscillations du balancier par seconde est appelé **fréquence** et se mesure en **hertz (Hz)**. Ainsi, la fréquence est l'inverse de la durée de la période ou de la durée d'une oscillation. Souvent**, l'alternance** est indiquée pour les mouvements et les montres. Il s'agit du nombre d'alternances par heure (A/h).




L'**oscillation** du balancier décrit le mouvement d'un point d'un point d'inflexion à un autre et retour à la position initiale. (**A - B - A**).

Une demi-oscillation du balancier est appelée **une alternance** (**A - B**).

## Alternance

La conversion de l'alternance $S$ (en demi-oscillations par heure) en fréquence $f$ (en hertz) se fait avec la formule suivante

(1) $$f = \frac{S}{2 \cdot 3600}$$

Les alternances usuelles pour les montres-bracelets sont les suivantes :

| Alternance (A/h) | Fréquence (Hz) |
|---|---|
| 18'000 | 2 |
| 19'800 | 2.75 |
| 21'600 | 3 |
| 25'200 | 3.5 |
| 28'800 | 4 |
| 36'000 | 5 |
| 72'000 | 10 |

# Grandeurs de mesure

Les chronocomparateurs mesurent directement l'**écart de marche**, le **repère** et l'**amplitude du balancier**. Ces trois grandeurs de mesure sont définies dans ce chapitre. Les méthodes de mesure correspondantes seront traitées dans des chapitres ultérieurs, car elles dépendent du fait que la mesure est acoustique ou optique.

D'autres informations sur le mouvement peuvent être déduites des grandeurs directement mesurées. Par exemple, une variation périodique de l'amplitude peut indiquer **des variations de la transmission de force** par la forme des dents dans le rouage. Les appareils de mesure de Witschi offrent à cet effet une multitude de fonctions de représentation et d'évaluation permettant d'analyser précisément de tels effets.

**Illustration : ChronoMaster Auto.** Appareil de table compact pour la mesure précise et conviviale des montres mécaniques.

## Écart de marche

La **marche** ou l'**écart de marche** indique de combien l'heure affichée par une montre diffère de l'heure réelle au cours d'une journée.
Pour le déterminer, on compare la durée T mesurée sur la montre à une durée de référence $T_0$ (par exemple 86 400 s pour 24 heures). L'écart de marche relatif[1] se calcule selon la formule suivante :

$$G = \frac{T - T_0}{T_0} \qquad (2)$$

Pour exprimer l'écart de marche dans la pratique, la valeur sans dimension G est multipliée par 86 400, ce qui donne une indication en secondes par jour (s/d).

Pour une durée de référence de 24 heures exactement, on obtient la **marche quotidienne moyenne**. Des durées de référence plus courtes permettent d'analyser des variations de courte durée dans le comportement de marche, par exemple sur des heures ou des minutes.

Une valeur positive signifie que la montre est en avance, une valeur négative qu'elle est en retard. L'écart de marche est un paramètre central pour évaluer la précision de marche d'une montre. De faibles écarts systématiques peuvent être corrigés par réglage ou équilibrage.

### Exemple d'évaluation de la précision et de la fiabilité

Un client recherche une montre-bracelet de haute qualité avec une précision de marche élevée.
Pour évaluer la qualité de différents modèles, il observe pendant cinq jours consécutifs, à midi, l'affichage de quatre horloges de vitrine. La différence avec l'heure réelle est documentée.

| | **Montre 1** | **Montre 2** | **montre 3** | **Montre 4** |
|---|---|---|---|---|
| Jour 1 | 12:00:00 (0 s) | 12:01:10 | 12:03:30 | 12:05:00 |
| Jour 2 | 12:00:00 (0 s/d) | 12:01:15 (+5 s/d) | 12:03:25 (-5 s/d) | 12:05:50 (+50 s/d) |
| Jour 3 | 12:00:00 (0 s/d) | 12:00:50 (-25 s/d) | 12:03:30 (+5 s/d) | 12:06:40 (+50 s/d) |
| Jour 4 | 12:00:00 (0 s/d) | 12:01:20 (+30 s/d) | 12:03:35 (+5 s/d) | 12:07:30 (+50 s/d) |
| Jour 5 | 12:00:00 (0 s/d) | 12:01:05 (-15 s/d) | 12:03:30 (-5 s/d) | 12:08:20 (+50 s/d) |

Analyse des montres :

- Montre 1 : indique constamment 12:00:00 - probablement arrêtée. Pas de conclusion possible sur la qualité de la marche.
- Montre 2 : Marche moyenne acceptable, mais la marche quotidienne varie considérablement (de -25 s/d à +30 s/d).
  → Faible précision, donc peu fiable et difficile à ajuster.
- Montre 3 : présente un écart d'affichage global significatif (plus de 3 minutes), mais la marche quotidienne est relativement constante (±5 s/d).
  → Bonne précision moyenne, mais précision moyenne, pas idéale pour le réglage.
- Montre 4 : indique un processus net mais constant de +50 s/d sur tous les jours.
  → Très grande précision, facile à compenser ou à ajuster.

Le client choisira très probablement la montre 4.

La montre 4 répond le mieux à ses exigences : elle présente une marche régulière de grande précision sur les cinq jours, même si l'opération quotidienne est nette. Comme il est important pour lui que la précision de marche soit la plus élevée possible, il demande au commerçant de faire régler la montre avant l'achat afin de compenser l'écart constant. Il obtient ainsi une montre qui fonctionne avec précision et dont la base de temps est fiable.

[1] Witschi utilise systématiquement cette convention. Dans la littérature, on trouve parfois aussi la convention différente avec G = (T - T0) / T.

## Erreur de repère (Repère)

Si la **position de repos du balancier** ne correspond pas à la position centrale de l'ancre entre les goupilles de limitation, l'impulsion ne se produit pas exactement lorsque le balancier passe par sa position d'équilibre.
Cela provoque une différence entre les intervalles de temps des deux bruits de battement (TIC et TAC).
Cette asymétrie est appelée **erreur de repère**.

L'erreur de repère peut s'exprimer comme suit :

(3) $$\mathrm{Rep} = \left|\frac{t_{TIC} - t_{TAC}}{2}\right|$$

Le résultat de la mesure est généralement multiplié par 1000 et exprimé en **millisecondes (ms)**.
Dans la pratique, l'objectif est de minimiser cette différence afin que les deux côtés de l'échappement fonctionnent de manière symétrique, ce qui contribue à la précision du marche à court terme.

En principe, le repère peut également être converti en une erreur angulaire avec une unité de ° (appelée erreur de repère géométrique), en tenant compte de l'alternance et de l'amplitude.

Dans le cas des horloges à pendule, le repère peut être si important que les différences de temps entre les bruits de battement deviennent audibles. Ce phénomène est appelé "cliquetis".

Traditionnellement, le repère est indiqué **sans signe** et sans attribution spécifique à la palette d'entrée ou de sortie.
Toutefois, certains appareils Witschi récents affichent une information si le signe du repère change pendant l'équilibrage.

## Amplitude

L'amplitude décrit l'**amplitude d'oscillation de l'oscillateur** et est indiquée en tant que déviation maximale par rapport à la position de repos du balancier.

Elle correspond à l'angle entre la position d'équilibre (position de repos du balancier) et le point d'inflexion de l'oscillation.
Pour les mouvements les plus répandus aujourd'hui, l'amplitude se situe typiquement entre 270° et 310° en cas de remontage complet.

# Mesure acoustique

La mesure acoustique est une méthode très répandue pour déterminer l'écart de marche, le repère et l'amplitude. Elle peut également être effectuée sur des montres fermées. L'utilisation n'est pas compliquée : Il suffit de placer la montre sur un **"microphone"** spécial. Seul l'angle de levée correspondant doit être connu pour une mesure précise de l'amplitude.

La méthode de mesure acoustique est expliquée à l'aide des **bruits de battement de l'échappement à ancre suisse**. D'autres constructions d'échappement peuvent toutefois produire des bruits de battement différents et nécessitent des méthodes d'évaluation adaptées en conséquence.

**Illustration : Chronoscope M20**
Mesure simultanée de 20 montres mécaniques avec lecteur de code intégré pour une identification automatique.

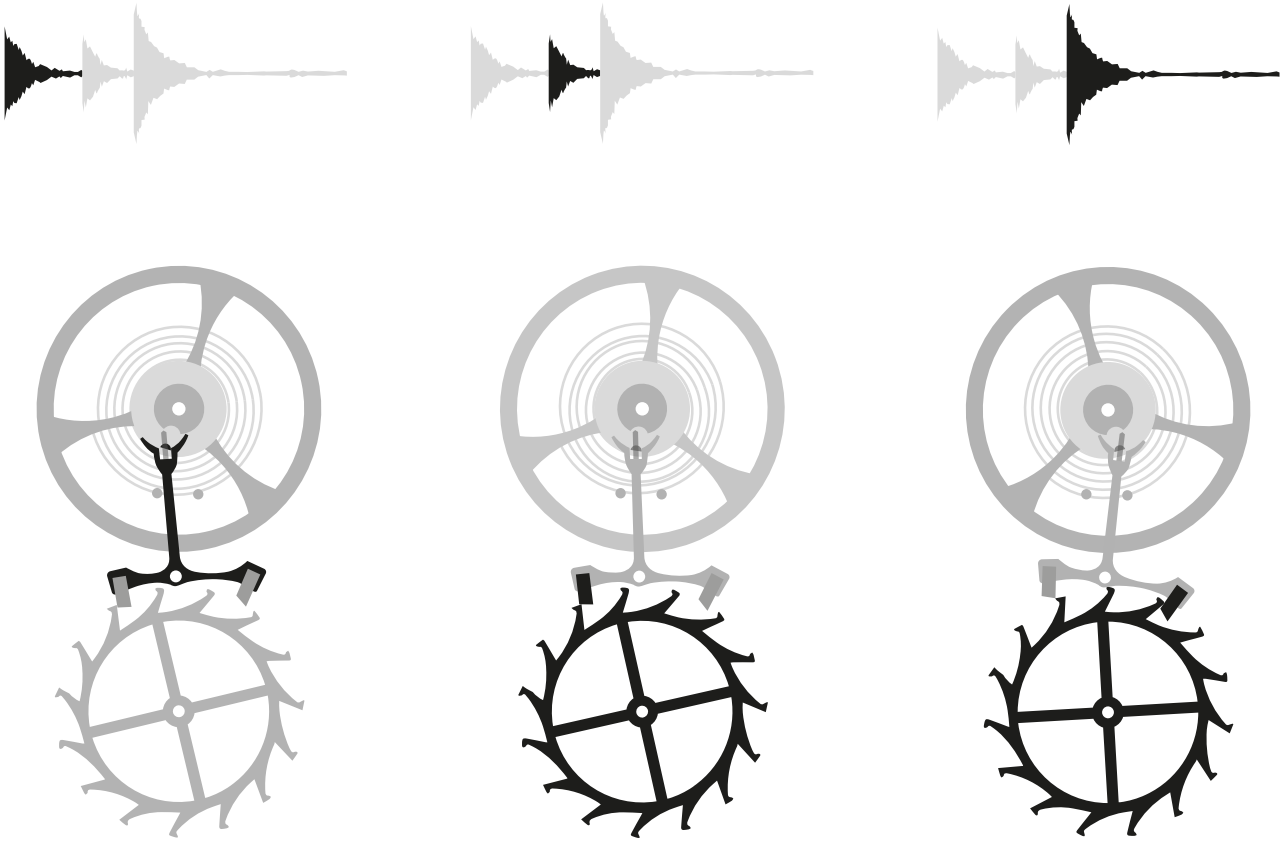
## Les bruits de battement de l'échappement à ancre suisse

Les bruits de battement de l'échappement à ancre suisse se composent principalement de **trois impulsions différentes**. Des impulsions supplémentaires sont souvent reconnaissables et peuvent être attribuées à certains événements. Pour expliquer le procédé de mesure acoustique, il suffit toutefois de se limiter à ces trois impulsions principales.

Le **premier** bruit se produit lorsque la pierre d'impulsion du balancier entre en contact avec la fourchette de l'ancre. Ce bruit, très précis dans le temps, est utilisé pour l'enregistrement des diagrammes, ainsi que pour le calcul de l'écart de marche et du repère. Il correspond au **dégagement**. »

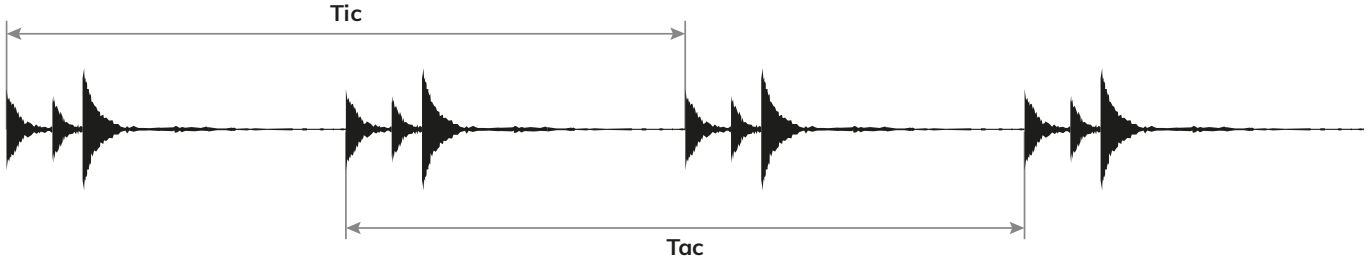
Un **deuxième** bruit se produit lorsqu'une dent de la roue d'échappement rencontre la surface d'impulsion d'une palette et que la fourche de l'ancre touche la pierred'impulsion. Ce bruit très irrégulier (**impulsion**) n'est pas utilisé pour l'évaluation. Ce bruit correspond à la transmission de l'impulsion du rouage au balancier.

Le **troisième** bruit, le plus fort, se produit lorsqu'une dent de la roue d'échappement tombe sur la surface de repos de la palette et que la tige d'ancrage heurte une goupille de limitation. Ce bruit est évalué pour le calcul de l'amplitude. Ce bruit correspond à la **chute**.



## Écart de marche

Pour évaluer correctement le bruit de battement d'un mouvement mécanique, il est nécessaire d'utiliser un appareil de mesure acoustique de haute précision,. L'élément décisif est la détection fiable du début du premier bruit (dégagement). Si ce bruit est très faible sur une montre ou si la montre produit des bruits parasites importants, l'amplification doit être adaptée en conséquence.

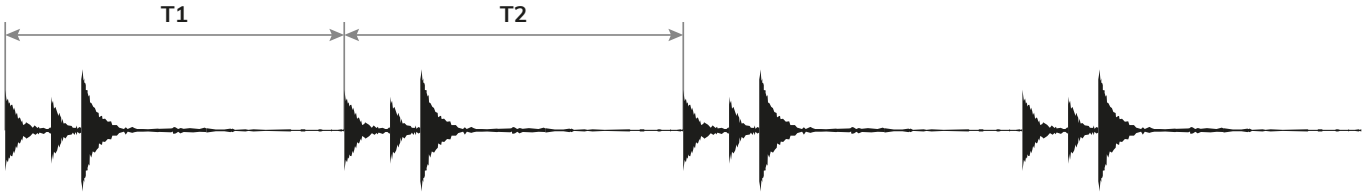



Pour calculer l'écart de marche, on détermine les différences entre la durée de période mesurée et la valeur de consigne selon la formule (4) et on les convertit en secondes par 24 heures (s/d). Cela se fait séparément pour la marche TIC et la marche TAC afin d'éviter l'influence du repère sur le calcul. Les valeurs de marche sur une période sont moyennées sur le temps d'intégration réglé et ensuite éditées.

(4)2 $$\text{Gang} = \left|\frac{\text{Gang}_{\text{TIC}}+\text{Gang}_{\text{TAC}}}{2}\right|$$

## Erreur de repère (Repère)

Comme décrit précédemment, l'erreur de repère résulte d'une oscillation asymétrique lorsque la position de repos du balancier ne correspond pas à la position centrale de l'ancre. De ce fait, les durées des deux alternances diffèrent. Les montres haut de gamme disposent d'un dispositif spécial (porte-piton) pour régler la chute. La différence de temps est mesurée par microphone et est généralement exprimée en millisecondes (ms).

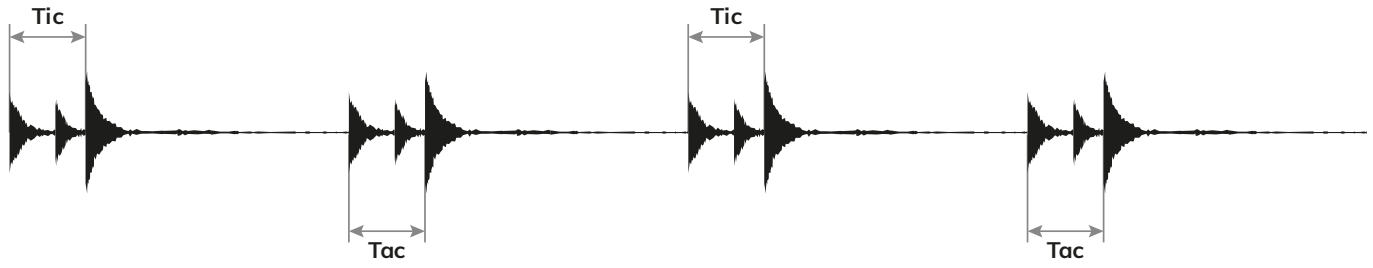



Le diagramme illustre un repère typique. En l'absence d'erreur de repère (c'est-à-dire un écart de 0,0 ms), les deux intervalles $t_1$ et $t_2$, qui représentent les temps séparant les dégagements successifs dans chaque sens d'oscillation, devraient être parfaitement identiques. Toute différence entre ces deux valeurs indique une erreur de repère.

(3) $$\text{Repère} = \left|\frac{t_1-t_2}{2}\right|$$

## Amplitude

L'amplitude (amplitude d'oscillation) décrit l'angle entre la position d'équilibre (position de repos du balancier) et le point d'inflexion. Dans les mouvements modernes, elle se situe typiquement entre 270° et 310° en cas de remontage complet. Avec le vieillissement des huiles, l'amplitude diminue progressivement. Pour calculer l'amplitude, on mesure la durée entre la **première impulsion** (**dégagement**) et la **troisième impulsion** (**chute**) dans les bruits de battement.



Par approximation, la **durée comprise entre le dégagement et la chute** correspond au temps pendant lequel la pierre d'impulsion (ellipse) reste en contact avec la fourchette de l'ancre. Cette phase est appelée **temps de levée du balancier**. Un léger écart est dû à la courte période entre le moment où la fourchette se désengage de l'ellipse et celui où elle vient en butée contre la **limite de course**, ce que l'on désigne comme la **course libre**. Pendant ce temps de levée, le balancier effectue une rotation autour de l'**angle de levée λ**, défini par la construction de l'échappement et utilisé comme référence pour la mesure de l'amplitude. Dans la majorité des mouvements modernes, cet angle est d'environ **51°**.Le temps de levée dépend de la vitesse angulaire du balancier au passage par la position d'équilibre. Cette vitesse est directement liée à l'amplitude. Plus l'amplitude du balancier est élevée, plus sa vitesse au passage du point neutre est grande, et plus le temps nécessaire pour franchir l'angle de levée est court.Pour le calcul de l'amplitude, on suppose que la déviation angulaire du balancier suit une courbe sinusoïdale. Cette hypothèse est valable pour un balancier équipé d'un spiral, à condition que l'influence de l'échappement, qui peut freiner ou accélérer légèrement le mouvement, reste négligeable. La figure de droite représente la déviation instantanée du balancier en fonction du temps. La courbe pleine correspond à une faible amplitude, tandis que la courbe en pointillés représente une grande amplitude.

L'angle de levée, noté λ, est illustré en considérant que le passage par la position d'équilibre du balancier se situe exactement à mi-chemin entre le dégagement et la chute. Il est alors évident que les temps de levée diffèrent selon l'amplitude. Le temps de levée $t_1$ pour une grande amplitude est plus court que le temps de levée $t_2$ pour une faible amplitude.

Dans ces conditions, on peut établir que l'amplitude A se calcule à partir du temps de levée t, de l'angle de levée λ et de la fréquence d'oscillation f selon la formule suivante

$$A = \frac{\lambda}{2\sin(\pi f t)} \approx \frac{\lambda}{2\pi f t} \qquad (6)$$

est calculée.

## Paramètres de mesure

Différents paramètres de mesure sont disponibles pour la configuration de la mesure acoustique. Les paramètres fréquemment utilisés peuvent être enregistrés pour un rappel rapide. Une telle configuration enregistrée est appelée "programme". Selon l'appareil, il est possible d'enregistrer entre 20 et 99 programmes ~~et de les rappeler en cas de besoin~~.

| | | |
|---|---|---|
| **Mode Alternance** | Aut | Détermination automatique à partir d'une liste d'alternances courantes. |
| | Man | Sélection manuelle d'une alternance quelconque entre 3'600 et 43'200 A/h (72'000 A/h sur certains appareils). |
| | Frq | Mode de détermination automatique d'une alternance inconnue.<br>L'alternance est déterminée de manière que la marche soit proche de 0 s/d. |
| **Alternance** | nn | Valeur numérique de l'alternance lorsque le mode manuel de l'alternance est sélectionné. |
| **Mode de test** | Stnd | Montre avec échappement à ancre suisse. |
| | Spe1 | Montre avec échappement Co-Axial. |
| | Spe2 | Montre avec échappement AP. |
| | Spe4 horloge. | Mode avec filtre d'amplitude spécifique. |
| | Taux | Mesure de la marche uniquement. Pour les montres à pendule ou les montres avec bruits de battement inhabituels. |
| **Angle de levée** | xx° : angle d'inclinaison | Saisie de l'angle de levée, de 10° à 90°. |
| **Temps de mesure** | xx s | Durée totale de la mesure en s |
| **Temps d'intégration** | Aut | Durée entre l'actualisation des résultats intermédiaires<br>Sélection automatique du temps d'intégration sur la base du temps de mesure |
| | xx s | Sélection manuelle du temps d'intégration en s |
| | yy A | Sélection manuelle du temps d'intégration en alternances. |
| **Stable . VV/HH** | Aut s | Sélection automatique du temps de stabilisation par alternance. |
| | Man | Sélection manuelle du temps de stabilisation, entre 1 et 99 s. |
| **Stable VH/HV :** | Aut s | Sélection automatique du temps de stabilisation par alternance. |
| | Man | Man Sélection manuelle du temps de stabilisation, entre 1 et 99 s. |
| **Résolution** | s/d | Résolution de l'affichage numérique de la marche, 1 s/d, 0.1 s/d, 0.01 s/d |
| **Positions de contrôle** | | Positions de contrôle abordées pour les séquences. |
| **Amplification** | | Amplification du signal. La valeur par défaut est 2.<br>1 pour les montres avec des signaux très forts.<br>3 ou 4 pour les montres avec des signaux faibles. |

# Mesure optique avec laser

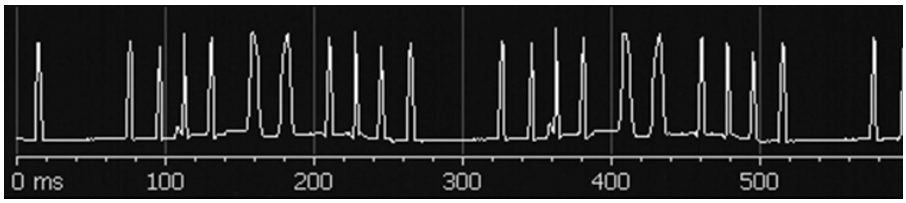
Une autre méthode de mesure repose sur une détection optique utilisant un faisceau laser. Celui-ci est dirigé vers un composant mobile du mouvement, et un capteur enregistre les variations de luminosité causées par les déplacements de ce composant. En général, un élément effectuant un mouvement périodique est exposé au faisceau. Lorsqu'il est visible, le balancier est particulièrement bien adapté à cette méthode, car ses passages à travers le faisceau permettent une mesure directe de l'amplitude. Il est toutefois également possible d'effectuer des mesures de marche à partir du déplacement d'autres éléments du mouvement, comme les oscillations de l'ancre ou même le passage d'une aiguille devant le point de détection.

**Illustration : WisioScope S**
Mesure acoustique combinée des bruits de battement et mesure optique du balancier.

## Signal optique

Le signal optique du WisioScope S saisit le changement de luminosité provoqué par le mouvement d'un composant éclairé par le laser. La qualité du signal dépend donc fortement du composant qui est irradié. Dans ce qui suit, on suppose que le balancier est utilisé comme référence et que le laser est dirigé de manière ciblée vers un endroit où seuls les passages des rayons sont détectés. Cela signifie qu'aucune partie du signal provenant des masselottes, du spiral, de l'ancre ou d'autres pièces mobiles n'est détectée.

Idéalement, le signal se présente comme sur la figure ci-dessous, chaque passage de rayon étant clairement visible par une déviation du signal.




## **Écart de marche** (optique)

Si des événements sont identifiés dans le signal, l'écart de marche peut être déterminé en utilisant la même méthode que pour la mesure acoustique. La durée mesurée entre des événements périodiques est alors comparée à une durée de référence et convertie en écart de marche.

Une méthode alternative est basée sur l'autocorrélation du signal. Dans ce cas, on détermine le décalage temporel $\tau|tau$ pour lequel l'autocorrélation est maximale. La comparaison de $\tau|tau$ avec la valeur de consigne permet de calculer l'écart de marche.

## **Amplitude** (optique)

La mesure de l'amplitude suppose que la structure du signal soit connue et qu'une attribution claire soit possible. Ce n'est qu'ainsi que l'amplitude peut être calculée de manière fiable au moyen d'une mesure optique.

## Paramètres de mesure

| | | |
|---|---|---|
| **Mode Alternance** | Aut | Détermination automatique à partir d'une liste d'alternances courantes. |
| | Man | Sélection manuelle d'une alternance quelconque entre 3'600 et 720'000 A/h. |
| **Alternance** | nn | Valeur numérique de l'alternance lorsque le mode manuel de l'alternance est sélectionné. |
| **Mode test** | Arrêt | Pas de mesure optique |
| | Balancier | Balancier/oscillant avec rayons |
| | Structure de test | Balancier/oscillant avec structure de test |
| | Aiguilles | Mesure d'un intervalle d'une seconde |
| | Asymétrique | Balancier avec rayons répartis de manière asymétrique |
| **Position du laser** | x,y | Déviation du laser |

# Mesure optique avec caméra

## Position des aiguilles

Une méthode directe pour déterminer l'écart de marche consiste à noter l'heure affichée à des moments fixes, par exemple chaque jour à 12:00. Cela permet de lire directement l'écart de marche moyen quotidien.
Cette procédure peut être partiellement ou totalement automatisée. Dans une version semi-autonome, une caméra associée à une horloge de référence de haute précision enregistre les images. Dans une version entièrement autonome, un **traitement d'image** analyse de manière autonome la position des aiguilles et détermine l'écart de marche.

Dans cette version simple, la résolution du procédé de mesure est limitée par la durée d'une alternance, à condition que la trotteuse se déplace par saccades (sauts) correspondant aux alternances.
Pour une montre typique à 4 Hz (28'800 A/h), on obtient une résolution de 3 s/d pour une durée de mesure d'une heure et une résolution de 0,125 s/d pour une durée de mesure d'un jour.

Pour améliorer la résolution, il est possible de prendre plusieurs images en succession rapide à des moments donnés, au lieu d'une seule image. Ainsi, le moment du mouvement de l'aiguille est connu avec plus de précision.

## Effet stroboscopique

Si un objet effectuant un mouvement périodiquement répétitif est exposé à un stroboscope, le mouvement apparaît ralenti. La fréquence visible est la différence entre la fréquence du stroboscope et celle de l'objet. Si l'objet semble immobile, les fréquences coïncident (ou la fréquence de l'objet est un multiple de la fréquence du stroboscope). Grâce à cet effet, il est possible de comparer deux fréquences de manière très précise.

Au lieu d'un stroboscope, il est également possible d'utiliser une caméra avec un temps d'exposition suffisamment court. La fréquence de prise de vue dans le **WisioScope S** de Witschi est calculée sur la base de l'alternance indiquée de manière à ce que le mouvement du balancier soit représenté de manière très ralentie.

## Caméra à haute vitesse

Une caméra à haute vitesse permet de capturer des séquences à un taux d'acquisition très élevé, rendant possible l'analyse fine de phénomènes dynamiques rapides dans le mouvement d'une montre. Elle permet notamment de visualiser avec précision les phases de l'échappement, en particulier le déroulement du cycle entre le dégagement et la chute. Cette technique est utile pour étudier le comportement du balancier, de l'ancre et de la roue d'échappement à des moments critiques du fonctionnement.

Cependant, pour des mesures de longue durée, comme la détermination de la marche moyenne journalière, l'usage de la vidéo devient moins adapté. Le volume important de données générées par l'enregistrement en continu implique un traitement informatique complexe et coûteux, ce qui limite l'efficacité de cette méthode dans le cadre d'une analyse de stabilité de marche sur 24 heures.

# Représentation des résultats

Dans les appareils Witschi, les valeurs mesurées sont traitées graphiquement et présentées clairement à l'utilisateur. Ce chapitre explique quelques possibilités de représentation et met en évidence leur utilité spécifique pour les analyses des résultats.

## Diagramme (DIA)

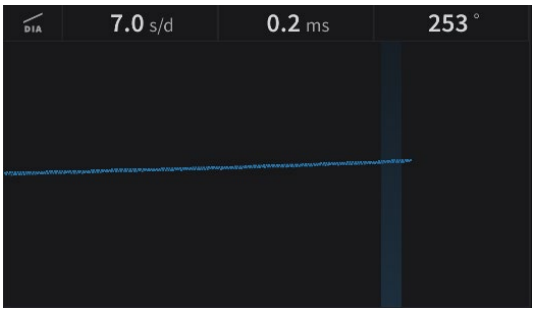
Le diagramme représente un enregistrement continu des bruits de battement d'une montre mécanique. Ce type de visualisation est particulièrement adapté aux opérations de réglage, car toute modification du comportement du mouvement y apparaît immédiatement.

Chaque alternance du balancier correspond à un point sur le diagramme. Le temps entre deux dégagements consécutifs, c'est-à-dire la durée d'une demi-période d'oscillation, est mesuré et comparé à une valeur de référence correspondant à une marche parfaitement régulière. Si la durée mesurée est conforme à cette valeur de consigne, le point suivant est placé à la même hauteur que le précédent, dans l'axe horizontal. Si le battement est légèrement en avance, le point est placé plus haut. S'il est en retard, il apparaît plus bas. L'alignement successif des points forme une ligne continue.

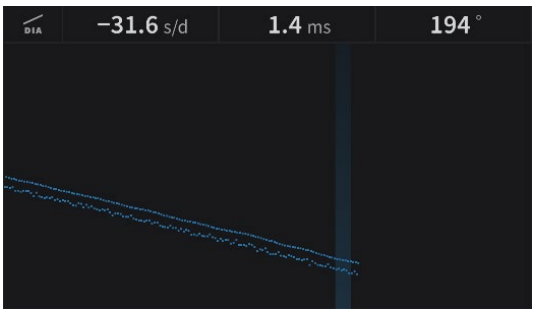
La pente de cette ligne indique la dérive de marche. Une ligne ascendante traduit une avance du mouvement, tandis qu'une ligne descendante reflète un retard. Lorsqu'on observe deux lignes parallèles, comme dans l'exemple 2, cela révèle une erreur de repère, c'est-à-dire une dissymétrie entre les deux demi-périodes d'oscillation du balancier.

Des points isolés apparaissant au-dessus de la ligne principale peuvent signaler des irrégularités dans la détection du dégagement. Cela peut être causé par une dent défectueuse de la roue d'échappement, par un bruit parasite interne tel qu'un contact du spiral dans la raquette, ou encore par une perturbation acoustique externe. Si de tels points se multiplient au-dessus de la ligne, il est conseillé de réduire le gain d'amplification du signal.

Inversement, des points isolés situés en dessous de la ligne principale indiquent des dégagements non détectés. Si ce phénomène se produit fréquemment, une amplification du signal plus élevée est recommandée afin d'assurer une détection fiable de tous les bruits d'échappement.




**Exemple 1 :** Diagramme régulier.
Processus léger, constant dans le temps. Presque pas de repères.




**Exemple 2 :** Diagramme irrégulier.
Progression ultérieure, fluctuante dans le temps. Erreur de repère élevée.

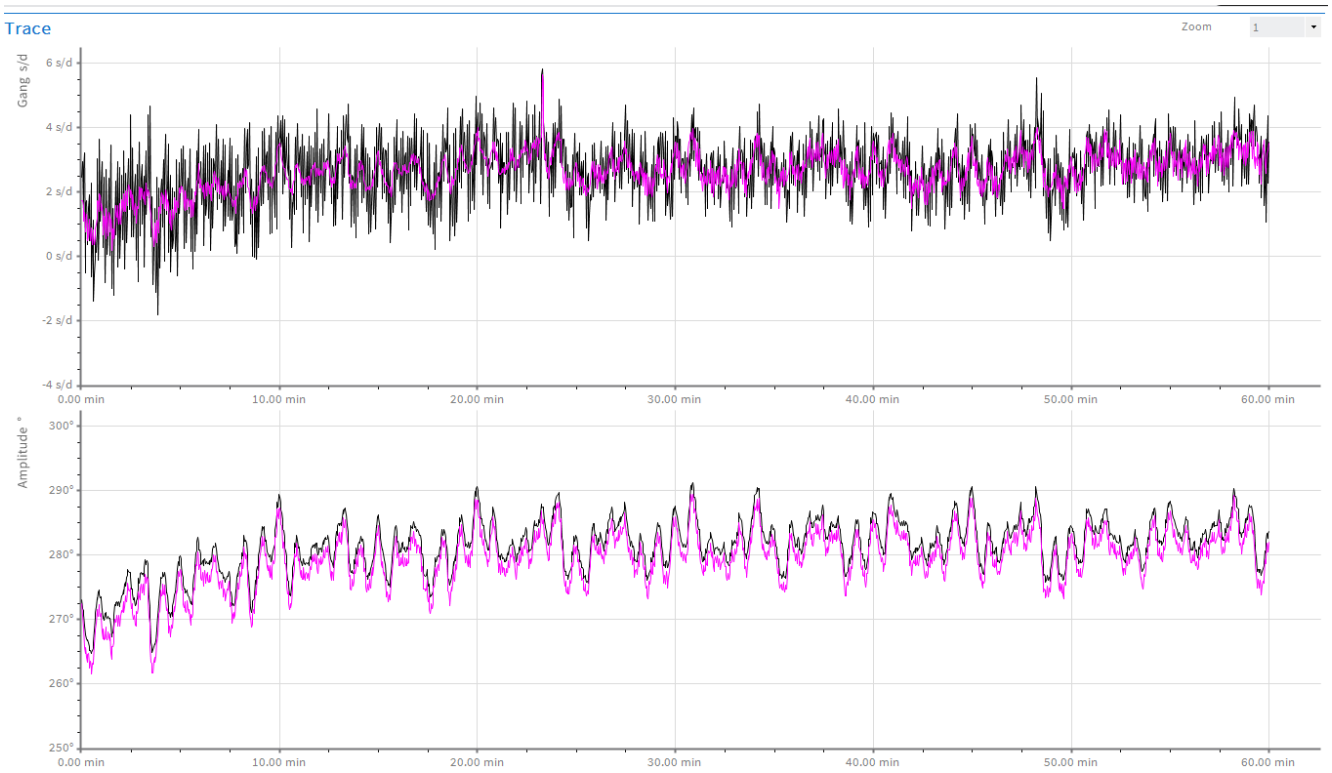
D'autres exemples sont donnés dans la section "Détection des erreurs avec un diagramme".

## Trace (TRC)

Trace montre l'évolution temporelle des **variations de marche et d'amplitude** sur une longue période et permet de vérifier la stabilité. Des durées de mesure allant jusqu'à 300 heures sont possibles.

Le temps d'intégration se situe entre 2 et 60 secondes et est généralement défini automatiquement sur la base du temps de mesure. Il définit l'intervalle de temps entre deux résultats de mesure.

Pour les applications en laboratoire, il est possible de choisir un temps d'intégration de 4A, où une valeur de mesure est enregistrée toutes les 4 alternances. Sur la plupart des appareils de mesure, la durée de mesure dans ce mode est limitée à 8 minutes.



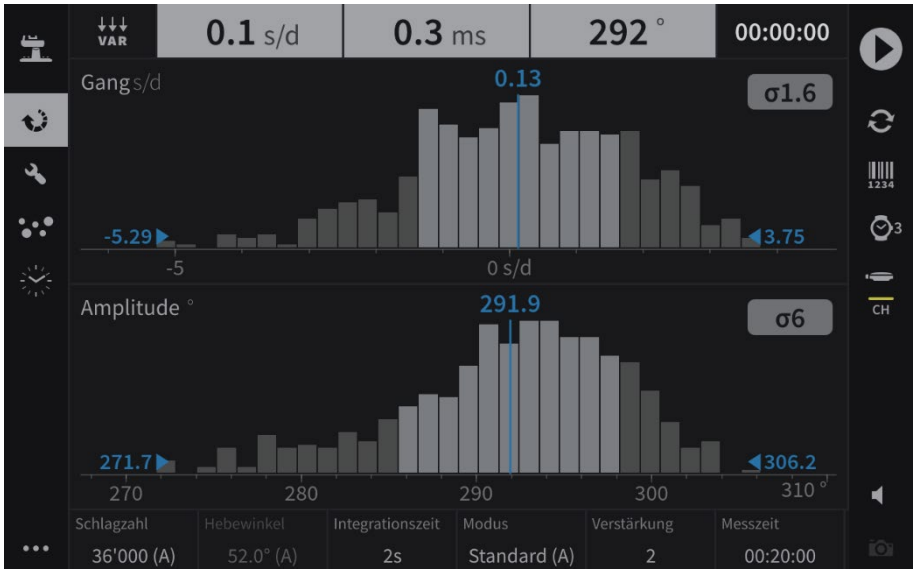

Dans l'exemple illustré, l'amplitude augmente au cours des 10 premières minutes, tandis que l'on observe simultanément une légère augmentation de l'écart de marche. Par la suite, des variations périodiques apparaissent, dues aux variations de force sur la roue d'échappement.

## Mode vario (VAR)

Le mode Vario visualise les résultats de mesure sur une période allant jusqu'à 300 heures à l'aide d'un histogramme de la fonction de distribution.

Cette représentation ne permet pas une interprétation temporelle directe, mais offre un aperçu clair de la répartition des valeurs mesurées.
En un coup d'œil, on peut voir la **valeur la plus fréquente**, la **moyenne**, le **minimum** et le **maximum**.

L'histogramme facilite l'identification des variations de marche sur de longues périodes. De plus, l'**écart-type** (σ) est représenté afin d'évaluer la stabilité des résultats de mesure.



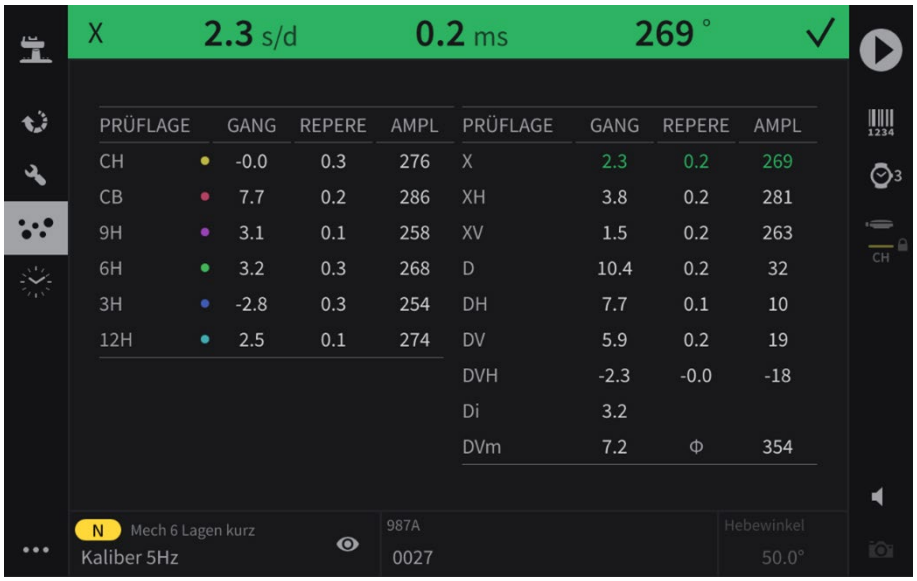

Le mode Vario est particulièrement adapté à la détection d'écarts systématiques causés par des variations de force, des effets de friction ou des états de lubrification, sans qu'il soit nécessaire d'analyser des points de mesure individuels.

## Séquence (SEQ)

Les montres mécaniques sont testées dans plusieurs positions afin d'évaluer la précision de marche et la stabilité du mouvement dans des conditions représentatives du port au poignet. Ces positions de tests reproduisent les différentes orientations que la montre peut adopter en usage quotidien, et permettent de détecter d'éventuelles variations de marche liées à la gravité, à la friction ou à des déséquilibres du balancier.

### Raisons de la mesure dans plusieurs positions de test en mode séquence

- **Influence de la gravité**
  Le balancier et le système d'échappement réagissent différemment à l'effet de la gravité selon l'orientation de la montre. Lorsqu'elle est posée à plat, cadran vers le haut ou vers le bas, ou placée verticalement, par exemple avec la couronne à trois heures, les charges mécaniques sur les pivots et les forces internes varient. Cela peut affecter la régularité de la marche.
- **Déséquilibre du balancier**
  Même les balanciers soigneusement usinés peuvent présenter un léger déséquilibre. Ce défaut se manifeste de manière différente selon la position de la montre, influençant la stabilité de l'oscillation et donc la précision.
- **Frottement dans les rubis**
  Le frottement exercé sur les pivots du balancier varie selon la position du mouvement. En position verticale, les efforts sur les surfaces de contact dans les pierres de pivot diffèrent de ceux rencontrés en position horizontale, ce qui modifie l'amplitude et la régularité de la marche.
- **Évaluation pratique de la marche**
  Une montre portée au poignet change en permanence d'orientation. La mesure en plusieurs positions permet de simuler ces conditions de port et d'évaluer la précision moyenne du mouvement dans un contexte réaliste.
- **Contrôle de la qualité et réglage**
  Les montres de haute qualité sont systématiquement testées et réglées dans plusieurs positions d'essai afin de minimiser les écarts de marche entre ces différentes orientations. Cette procédure garantit une performance chronométrique stable et conforme aux standards de précision.




### Les positions de contrôle typiques sont :

Cadran haut (CH), Cadran bas (CB)
Couronne bas (9H), Couronne gauche (6H), Couronne haut (3H), Couronne droite (12H).

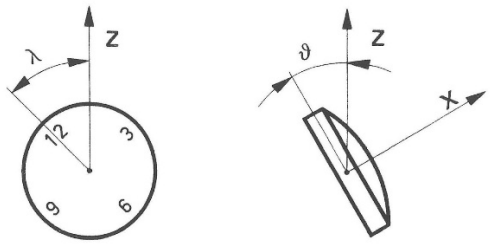
Le réglage dans les trois positions de contrôle principales **CH, 9H et 6H** garantit une stabilité de la marche aussi proche que possible de la pratique, car ces positions représentent les positions de port les plus fréquentes d'une

montre et sont déterminantes pour la **précision de marche** effective **au quotidien**.

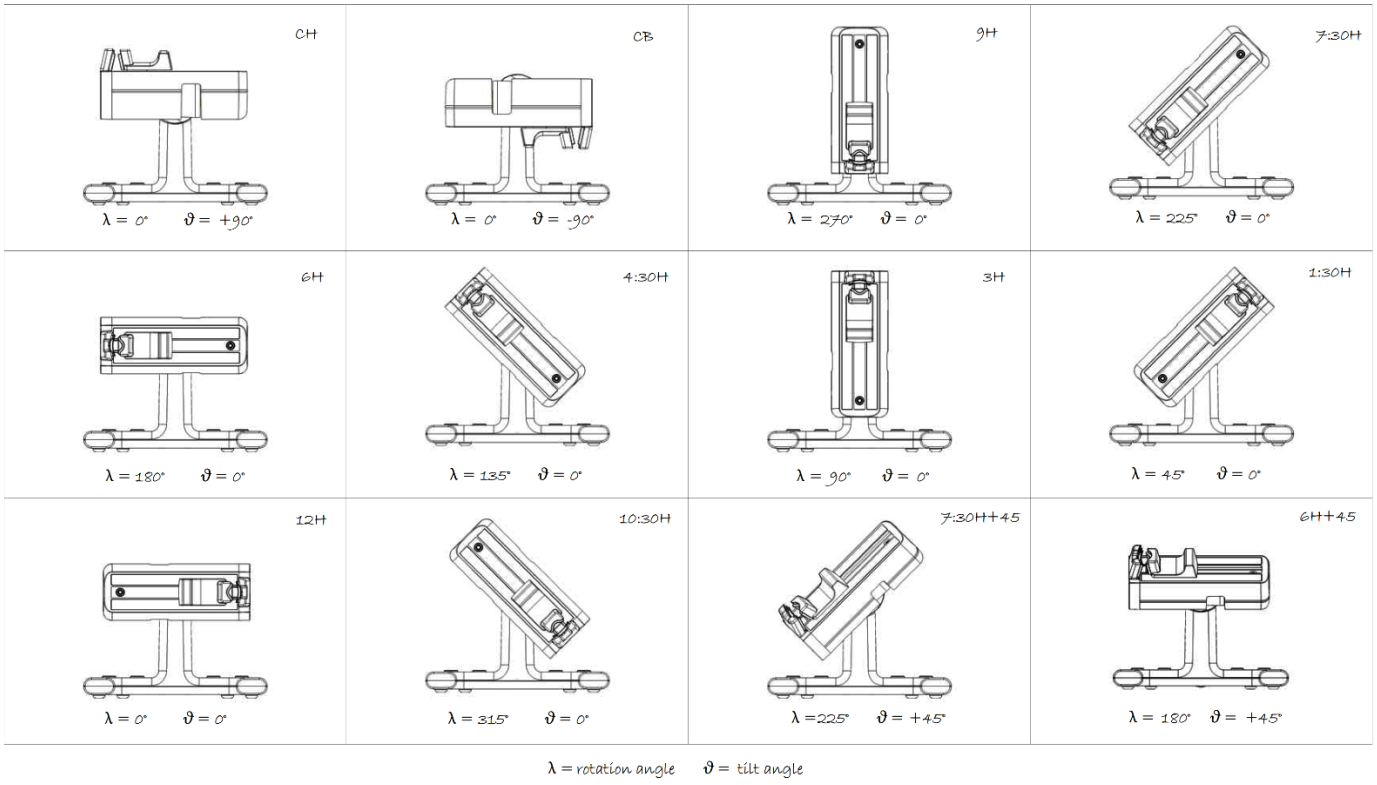
Pour les microphones à **changement automatique de positions d'essai** (par ex. ChronoMaster Auto), les mesures sont effectuées de manière autonome et les résultats de toutes les positions d'essai sont regroupés.

Pour les microphones à **changement de position de contrôle manuel** (par ex. ChronoMaster), un mode séquentiel est parfois également disponible. L'appareil demande à l'utilisateur de changer de position d'essai et reconnaît automatiquement lorsque la nouvelle position d'essai est atteinte, après quoi la mesure suivante démarre de manière autonome.

Les appareils ChronoMaster combinés à **Wicotrace 360°** permettent de tester les montres mécaniques dans des positions d'essai librement définissables.
L'**angle de rotation** (**Rotation Angle** λ, Lambda) et l'**angle d'inclinaison** (**Tilt Angle** ϑ, Theta) sont alors définis pour chaque position de mesure afin de permettre une analyse complète des valeurs de marche dans différentes positions.
La combinaison flexible de ces deux angles permet de définir toutes les positions de contrôle imaginables - des positions classiques comme le cadran en haut (CH) ou la couronne en bas (9H) aux positions spéciales adaptées individuellement.

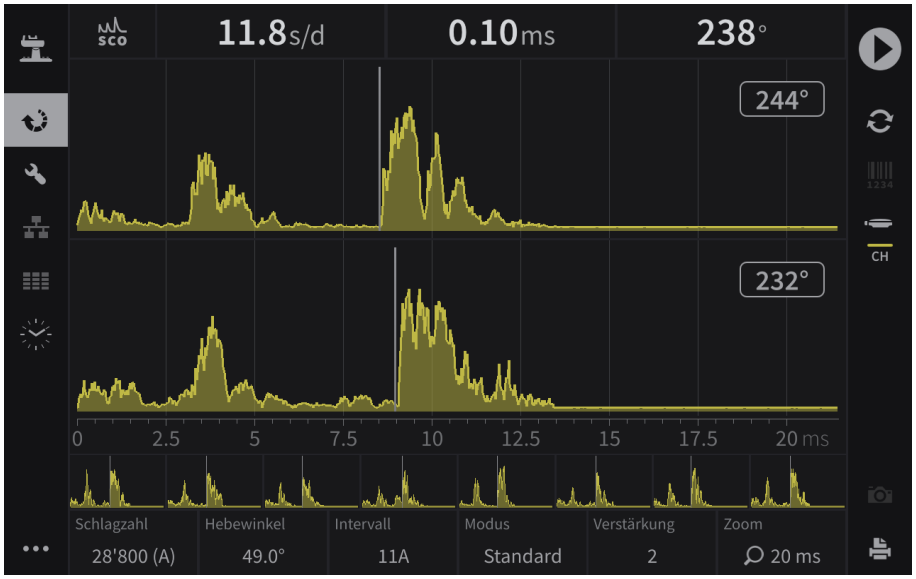



L'illustration ci-dessous présente 12 positions de contrôle typiques utilisées dans l'industrie horlogère pour le contrôle qualité.



## Scope (SCO)

La représentation graphique des bruits de battement (Scope) affiche respectivement deux impulsions, une pour l'alternance TIC et une pour l'alternance TAC. L'affichage se fait au choix dans une plage de temps de 20, 200 ou 400 ms, 20 ms étant la valeur par défaut.




Le Scope permet une analyse détaillée des bruits de battement en capturant les signaux acoustiques à des intervalles définis. Dans cet exemple, la mise à jour de l'image a lieu toutes les 11 alternances (11A), ce qui permet de détecter et d'analyser avec précision les modèles périodiques et les écarts.

De plus, le scope sert à vérifier le paramétrage de l'appareil afin de s'assurer que l'intensité et la qualité du signal sont suffisantes pour une mesure précise et fiable.

Pour chaque alternance, les amplitudes correspondantes sont représentées en plus des bruits de battement. L'amplitude est calculée en mesurant l'intervalle de temps entre la première et la troisième impulsion dans le bruit de battement. Ces impulsions sont marquées par des lignes verticales et servent de référence pour la détermination précise de l'amplitude de l'oscillation.

De plus, les 8 derniers bruits de battement sont représentés en petit format dans une bande située en dessous des bruits de battement actuels.
Une fois la mesure arrêtée, il est possible de cliquer directement sur une petite image pour afficher le bruit de battement correspondant en grand format.

D'autres exemples d'analyse d'erreurs avec le Scope sont présentés dans la section "Détection d'erreurs avec le Scope".

## Transformation de Fourier rapide (FFT )

L'analyse par FFT, (Fast Fourier Transform), permet de calculer le spectre fréquentiel à partir des données de marche et d'amplitude, puis de le représenter graphiquement. Cette méthode rend visibles des variations périodiques souvent imperceptibles dans un affichage temporel classique.

Ces irrégularités régulières sont généralement liées à des influences mécaniques internes, notamment au comportement des engrenages dans le rouage. Lors de chaque engrènement, de légères fluctuations du couple transmis apparaissent, typiquement de l'ordre de 5 à 10 %. L'accumulation de ces effets sur plusieurs étages d'engrenage peut provoquer des variations d'amplitude atteignant jusqu'à 30 degrés. De tels phénomènes sont intrinsèquement liés à la conception du mouvement et sont considérés comme normaux.

L'analyse FFT permet de révéler ces composantes périodiques en décomposant les données en fréquences élémentaires, de manière comparable à un musicien qui sépare les notes d'un accord complexe. Un exemple issu du logiciel Wicotrace 3 montre jusqu'à 15 périodes distinctes détectées lors d'un enregistrement continu de l'amplitude sur plusieurs heures.

Cette représentation est particulièrement utile pour :

- Détecter des variations régulières de la marche ou de l'amplitude,
- de détecter des irrégularités dans la denture ou le flux de force,
- d'évaluer la qualité du rouage - par exemple en cas de défaut de forme des dents ou de frottement.

La représentation FFT est donc un outil efficace pour les horlogers afin d'analyser de manière ciblée les variations de marche et de rendre visibles les causes mécaniques.

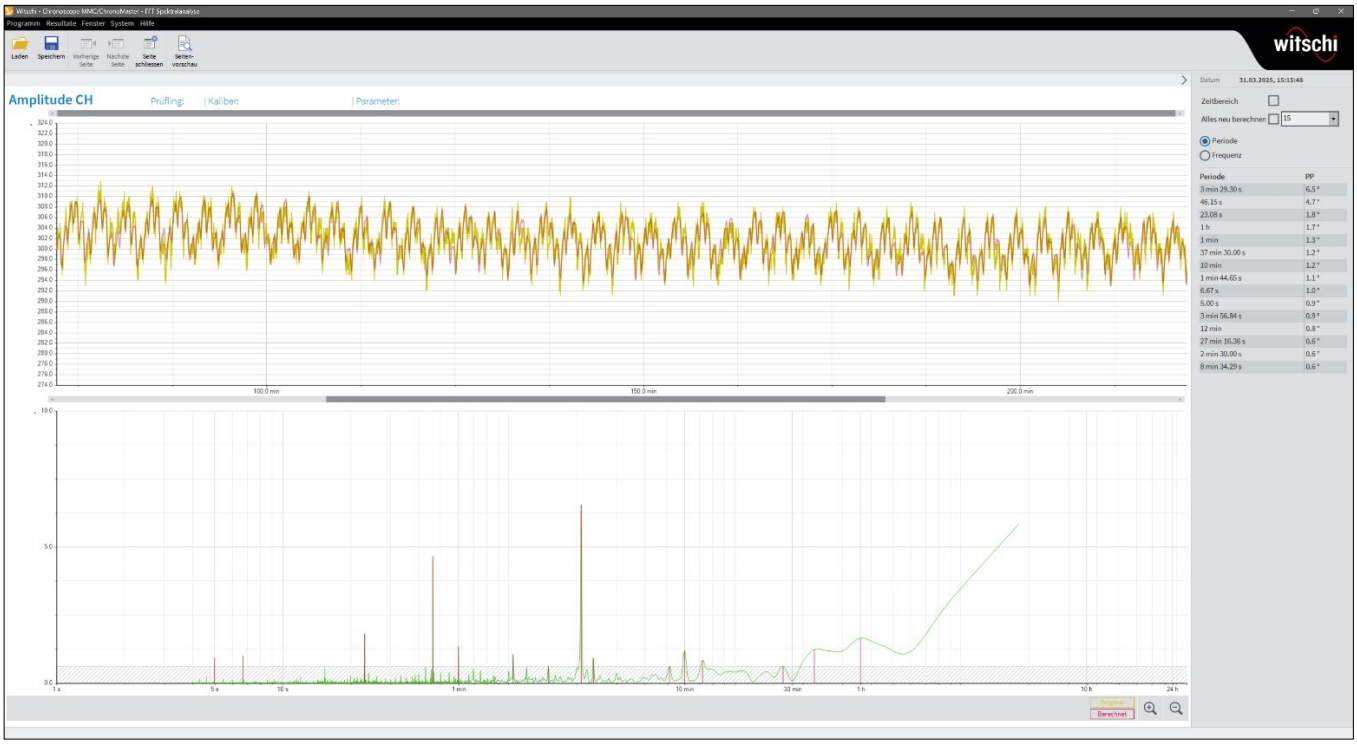



**Illustration** : Représentation FFT avec 15 périodes trouvées d'une mesure de l'amplitude sur plusieurs heures dans Wicotrace 3.

## Isochronisme (ISO)

L'isochronisme d'un système oscillant balancier-spiral désigne la propriété selon laquelle la durée de la période d'oscillation reste constante, quelle que soit l'amplitude du balancier. Dans un système parfaitement isochrone, le balancier effectue chaque alternance avec une durée identique, que l'amplitude soit faible ou élevée. En pratique, cependant, l'isochronisme est affecté par plusieurs facteurs, tels que les variations d'élasticité du spiral, le jeu du spiral dans la raquette, les frottements aux pivots, ou encore les effets de résistance de l'air.

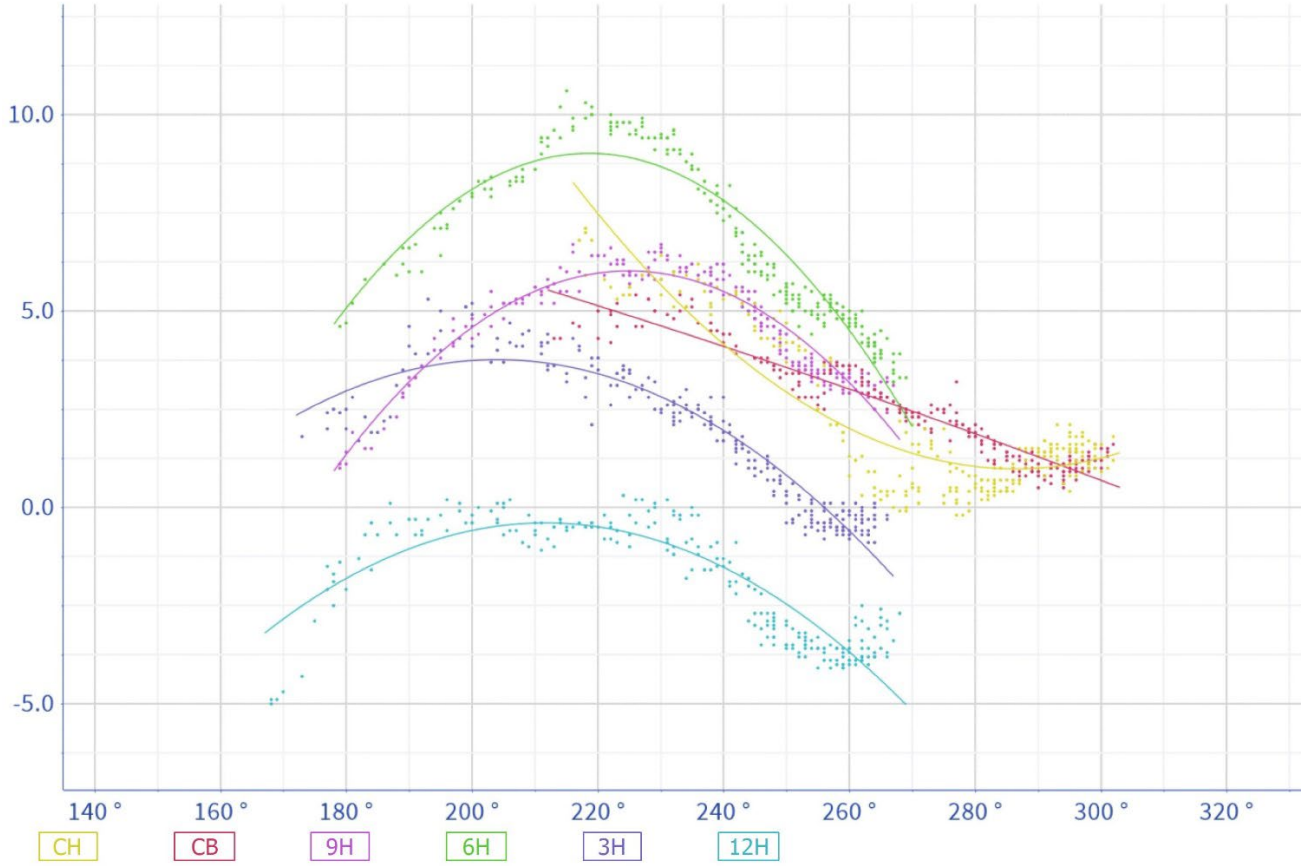



**Illustration** : Diagramme d'isochronisme dans Wicotrace 3

Un **diagramme d'isochronisme** représente l'écart de marche en fonction de l'amplitude et sert à analyser la stabilité de la marche sur différentes amplitudes d'oscillation.

Un comportement isochrone idéal présente un écart de marche constant, indépendamment de l'amplitude.

Cette représentation permet une évaluation précise du comportement isochrone et aide à identifier les potentiels d'optimisation dans la régulation et la construction du mouvement.

# Valeurs caractéristiques calculées

Outre différentes possibilités de représentation graphique, de nombreuses **valeurs caractéristiques** sont disponibles et peuvent être calculées à partir des données de mesure. Ils permettent une évaluation compacte, objective et comparable des caractéristiques temporelles et des caractéristiques liées à la position d'un mouvement. Grâce à la standardisation de ces caractéristiques, les résultats des essais peuvent être analysés et comparés efficacement entre eux.

Pour illustrer les calculs de caractéristiques, nous nous référons ci-après à un exemple numérique uniforme. On suppose qu'un mouvement mécanique a été mesuré dans six positions d'essai définies, à la fois au remontage complet (0h) et après 24 heures de fonctionnement (24h). Les résultats de mesure comprennent l'écart de marche (en s/d), le repère (en ms) ainsi que l'amplitude (en degrés) :

| | **Résultats 0h** | | | **Résultats 24h** | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Position de contrôle | Marche (s/d) | Repère de chute (ms) | Amplitude (°) | Marche (s/d) | Repère de chute (ms) | Amplitude (°) |
| CH (HH) | 9.1 | 0.0 | 298 | 8.6 | 0.0 | 298 |
| CB (HB) | 10.0 | 0.0 | 294 | 11.7 | 0.0 | 286 |
| 9H (VB) | 8.3 | 0.1 | 287 | 11.2 | 0.1 | 264 |
| 6H (VG) | 3.2 | 0.1 | 283 | 2.6 | 0.1 | 268 |
| 3H (VH) | 7.2 | 0.1 | 287 | 6.7 | 0.1 | 275 |
| 12H (VD) | 11.2 | 0.1 | 278 | 11.1 | 0.1 | 279 |

Cette base de données servira par la suite de référence pour la définition et le calcul de toutes les valeurs caractéristiques.

### Valeur moyenne (X )

La valeur caractéristique X désigne la valeur moyenne arithmétique des valeurs de marche$G_i$ dans toutes les positions testées.
(horizontalement et verticalement) :

(7)
$$X = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} G_i$$

| | **Résultats 0h** | | | **Résultats 24h** | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Valeur caractéristique | Marche (s/d) | Rejets de déchets (ms) | Amplitude (°) | Marche (s/d) | Repère de chute (ms) | Amplitude (°) |
| XH | 9.6 | 0.0 | 296 | 10.2 | 0.0 | 292 |
| XV | 7.5 | 0.1 | 284 | 7.9 | 0.1 | 272 |
| X | 8.2 | 0.1 | 288 | 8.7 | 0.1 | 278 |

XH : valeur moyenne de toutes les couches d'essai horizontales.

XV : valeur moyenne de toutes les couches d'essai verticales.

## Différence maximale entre positions de test (D )

La valeur caractéristique D représente la plus grande différence entre les valeurs relevées dans les différentes positions d'essai mesurées séparément. Elle fournit une indication sur la sensibilité du mouvement à la position, autrement dit sur la variation de la marche en fonction de l'orientation de la montre. Une faible valeur de D traduit une bonne stabilité de marche quelles que soient les positions, critère essentiel pour la régularité chronométrique.

| | Résultats 0h | | | Résultats 24h | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Valeur caractéristique | Marche (s/d) | Repère de chute (ms) | Amplitude (°) | Marche (s/d) | Repère de chute (ms) | Amplitude (°) |
| D | 8.0 | 0.1 | 20 | 9.1 | 0.1 | 34 |

DV : Différence maximale entre toutes les positions d'essai verticales mesurées.
DH : différence maximale entre toutes les positions d'essai horizontales mesurées.

## Différence verticale/horizontale (DVH )

La valeur caractéristique DVH (différence verticale/horizontale) décrit l'écart de marche entre les positions de contrôle verticales et horizontales d'un mouvement.

| | Résultats 0h | | | Résultats 24h | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Valeur caractéristique | Marche (s/d) | Repère de chute (ms) | Amplitude (°) | Marche (s/d) | Repère de chute (ms) | Amplitude (°) |
| XV | 7.5 | 0.1 | 284 | 7.9 | 0.1 | 272 |
| XH | 9.6 | 0.0 | 296 | 10.1 | 0.0 | 292 |
| DVH | -2.1 | 0.1 | -12 | -2.2 | 0.1 | -20 |

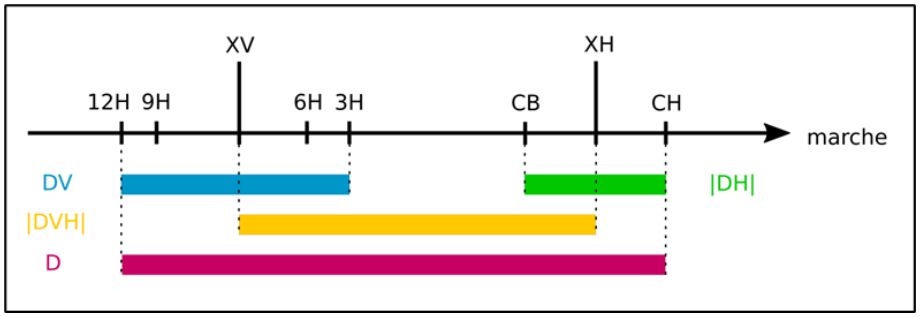



**Figure :** Visualisation des valeurs caractéristiques possibles XH, HV, DH, DV, DVH et D

## Différence entre les positions d'essai 6H et CH (Di )

La différence de marche Di entre les positions d'essai 6H (verticale, couronne gauche) et CH (horizontale, cadran en haut) correspond à une valeur caractéristique comparable au critère D de la norme COSC ISO 3159, mais dans le cadre d'une mesure de courte durée.

| | Résultats 0h | | | Résultats 24h | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Valeur caractéristique | Marche (s/d) | Repère de chute (ms) | Amplitude (°) | Marche (s/d) | Repère de chute (ms) | Amplitude (°) |
| Di | -5.9 | | | -6.0 | | |

## Isochronisme

L'isochronisme désigne la différence d'écart de marche entre 0 heure (remontage complet) et 24 heures (ou après un temps de marche défini Nh) dans la même position de contrôle.
Cette valeur individuelle doit être distinguée de la représentation graphique de l'isochronisme, dans laquelle l'écart de marche est reporté en fonction de l'amplitude (voir par ex. le diagramme, page 25).

| | Résultats 0h | | | Résultats 24h | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Position de contrôle | Marche (s/d) | Repère de chute (ms) | Amplitude (°) | Marche (s/d) | Rejets de déchets (ms) | Amplitude (°) | Isochronisme (s/d) |
| CH (HH) | 9.1 | 0.0 | 298 | 8.6 | 0.0 | 298 | 0.5 |
| CB (HB) | 10.0 | 0.0 | 294 | 11.7 | 0.0 | 286 | -1.7 |
| 9H (VB) | 8.3 | 0.1 | 287 | 11.2 | 0.1 | 264 | -2.9 |
| 6H (VG) | 3.2 | 0.1 | 283 | 2.6 | 0.1 | 268 | 0.6 |
| 3H (VH) | 7.2 | 0.1 | 287 | 6.7 | 0.1 | 275 | 0.5 |
| 12H (VD) | 11.2 | 0.1 | 278 | 11.1 | 0.1 | 279 | 0.1 |
| X | 8.2 | 0.1 | 288 | 8.7 | 0.1 | 278 | |

## Maximum d'isochronisme sur les positions d'essai mesurées (Im)

L'indice d'isochronisme **Im** (ou $I_{max}$ ) désigne la plus grande valeur d'isochronisme résultant de la différence des écarts de marche entre 0h et 24h dans certaines positions d'essai.

| | Résultats 0h | | | Résultats 24h | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Valeur caractéristique | Marche (s/d) | Repère de chute (ms) | Amplitude (°) | Marche (s/d) | Repère de chute (ms) | Amplitude (°) | Isochronisme (s/d) |
| **Im** | | | | | | | -2.9 |

Im prend en compte les positions d'essai selon la norme NIHS 93-10 (sans 12H), tandis que Im* prend en compte toutes les positions d'essai mesurées.

## Isochronisme entre 0h et 24h (Ie)

La valeur caractéristique d'isochronisme **Ie** décrit la stabilité de la précision de marche d'un mouvement en fonction de l'état de remontage. Elle est déterminée en faisant la différence entre les marches moyennes dans les six positions lors du remontage complet (0h) et après 24 heures de fonctionnement (24h). Le calcul est effectué comme suit :

(8) $$Ie = Abs(X0h - X24h)$$

Cette valeur différentielle absolue (en s/d) indique dans quelle mesure la précision de marche varie dans le temps et constitue une mesure de l'isochronisme du mouvement.

| | Résultats 0h | | | Résultats 24h | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Valeur caractéristique | Marche (s/d) | Repère de chute (ms) | Amplitude (°) | Marche (s/d) | Repère de chute (ms) | Amplitude (°) | Isochronisme (s/d) |
| **Ie** | | | | | | | 0.5 |

### Différence des valeurs moyennes entre 0h et 24h (DX)

La valeur caractéristique **DX** désigne la différence des valeurs moyennes entre 0h (remontage complet) et 24h de temps de marche et est calculée respectivement pour la marche, le repère et l'amplitude.

| | **Résultats 0h** | | | **Résultats 24h** | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Valeur caractéristique | Marche (s/d) | Repère de chute (ms) | Amplitude (°) | Marche (s/d) | Repère de chute (ms) | Amplitude (°) |
| X | 8.2 | 0.1 | 288 | 8.7 | 0.1 | 278 |
| **DX** | | | | -0.5 | 0.0 | 10 |

La valeur caractéristique **DX** renseigne sur la manière dont la marche moyenne (repère et amplitude) du mouvement s'est modifiée au cours des 24 heures. Contrairement à l'**isochronisme le**, qui travaille avec un **montant absolu**, **DX** conserve le sens de la variation.

### Différence entre complication activée et désactivée (DXC)

La valeur caractéristique **DXC** désigne la différence des valeurs moyennes de la marche, du repère et de l'amplitude entre les mesures avec complication activée (p. ex. fonction chronographe activée) et les mesures sans complication.

### Différence de marche maximale sur toutes les positions d'essai (Pmax )

**Pmax** désigne la plus grande différence de marche entre toutes les positions d'essai mesurées au moment 0h.
(Cette valeur caractéristique correspond fonctionnellement à la valeur D à 0h).

| | **Résultats 0h** | | |
|---|---|---|---|
| Valeur caractéristique | Marche (s/d) | Repère de chute (ms) | Amplitude (°) |
| **Pmax** | 8.0 | | |

### Facteur de qualité (N )

(Correspond également à l'indice de fonction **Fm** selon la norme NIHS 93-10)

Le **facteur de qualité N** est une valeur caractéristique normalisée permettant d'évaluer la qualité chronométrique d'un mouvement.
Plus la valeur de N est faible, meilleure est la marche du mouvement en termes de précision et de stabilité de la position.

(9) $$N = 0.15\,|I_{\max}| + 0.1\,P_{\max} + C$$

C est le coefficient thermique. Calculé dans la position d'essai 6H à 38°C. S'il n'est pas connu, il convient d'utiliser pour C le coefficient thermique maximal garanti par le fabricant du spiral. Par exemple, pour la qualité 1, le coefficient thermique C = 0.6.

N = 0.15 |-2.9| + 0.1 * 8.0 + 0.6 = 1.8

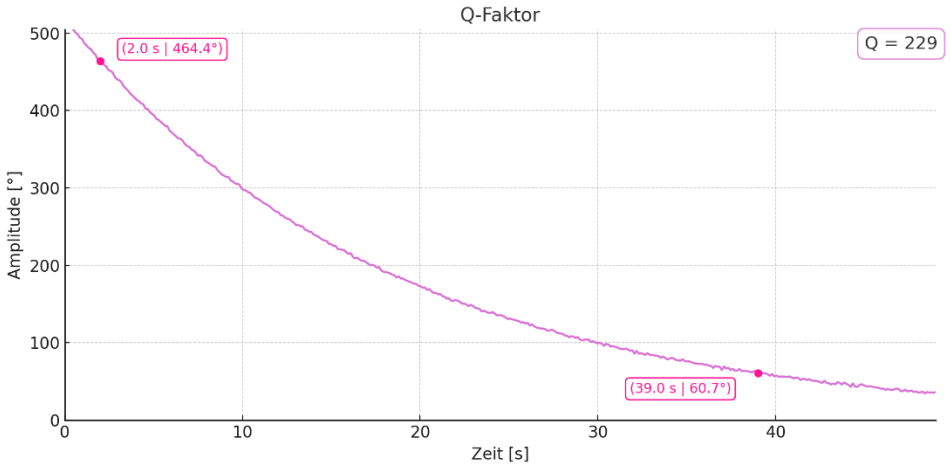
N prend en compte les couches d'essai selon la norme NIHS 93-10, tandis que N* prend en compte toutes les couches d'essai mesurées.

## Facteur de qualité (Q )

Le facteur de qualité (**facteur Q**) indique l'efficacité de l'oscillation d'un balancier à ressort spiral en décrivant le rapport entre l'énergie stockée et la perte d'énergie par oscillation. Un facteur Q élevé signifie que l'oscillation est maintenue plus longtemps, car moins d'énergie est perdue. Cela permet d'obtenir une amplitude plus stable et d'améliorer la précision de marche de la montre.
Les horlogers peuvent augmenter le facteur Q en minimisant les pertes par frottement ou en augmentant la fréquence d'oscillation.

**Le laboratoire WisioScope** permet de mesurer le facteur Q en enregistrant l'amplitude des oscillations en fonction du temps et en analysant le taux de décroissance.

Déroulement de la mesure du facteur Q :
- Retirer l'ancre, positionner le mouvement de manière stable.
- Dévier manuellement le balancier et le laisser osciller librement.
- Calcul du facteur Q à partir du taux de décroissance de l'amplitude.




Les facteurs de qualité typiques (facteurs Q) pour les balanciers libres dans les mouvements mécaniques se situent - en fonction du type de construction, des paliers, de la lubrification et de la pression atmosphérique - dans une plage de 150 ... 300.

Les facteurs de qualité typiques sont :

| Type d'oscillateur | Q |
|---|---|
| Montre mécanique de série | 150 ... 300 |
| Montre mécanique de très haute qualité | 300 ... 600 |
| Montre à diapason | 1'000 ... 2'000 |
| Horloge à pendule | 3'000 ... 15'000 |
| Oscillateur à quartz TCXO | $10^{(4)}$ ... $10^{5}$ |
| Oscillateur à quartz OCXO | $10^{4}$ |
| Oscillateur au rubidium | $10^{7}$ |
| Horloge atomique à faisceau de césium | $10^{8}$ |
| Maser d'hydrogène | $10^{9}$ |
| Horloge atomique à fontaine de césium | $10^{10}$ |

## Erreur de centre de gravité (DVm, Φ)

Si le centre de gravité du système oscillant (balancier et spiral) n'est pas sur l'axe de rotation, cela peut avoir une influence d'accélération ou de freinage sur la fréquence. L'influence dépend de la position d'essai et de l'amplitude.

Si l'écart de marche est mesuré dans quatre positions d'essai verticales, il est possible de le calculer pour déterminer l'erreur de centre de gravité et donc les mesures de correction nécessaires.

En supposant que seule l'erreur de centre de gravité est à l'origine des différences de mesures dans les positions d'essai, les formules suivantes peuvent être établies.

Première position de contrôle : $\varphi_1 = 0°$ $\mu_1 = \mu_0 + MgaG(\Theta_0)\cos(\phi_0 + \beta)$

Deuxième position d'essai : $\varphi_2 = 90°$ $\mu_2 = \mu_0 - MgaG(\Theta_0)\sin(\phi_0 + \beta)$

Troisième position d'essai : $\varphi_3 = 180°$ $\mu_3 = \mu_0 - MgaG(\Theta_0)\cos(\phi_0 + \beta)$

Quatrième couche d'essai : $\varphi_4 = 270°$ $\mu_4 = \mu_0 + MgaG(\Theta_0)\sin(\phi_0 + \beta)$

La quantité de matière à enlever est de

$$Mga = \frac{2}{|G(\Theta_0)|}\sqrt{(\mu_1 - \mu_3)^2 + (\mu_4 - \mu_2)^2}$$

Où

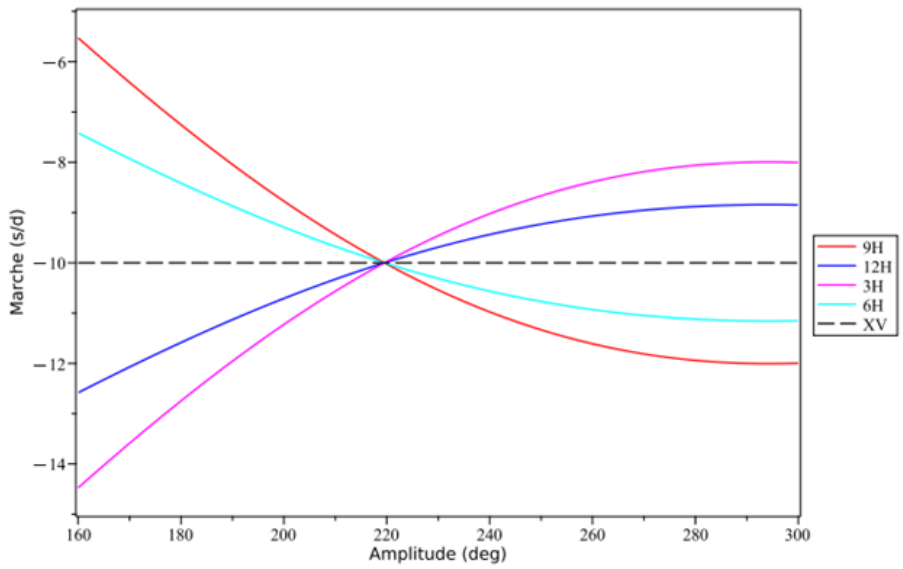
$$G(\Theta_0) = \frac{86\,400}{J_b\omega_0^2}\frac{J_1(\Theta_0)}{\Theta_0}$$

$J_b$ est le moment d'inertie du balancier,$J_1$ la fonction de Bessel,$\omega_0$ la fréquence circulaire et$\Theta_0$ l'amplitude du balancier.

La direction de l'erreur de centre de gravité par rapport à la première position de contrôle est :

$$\tan(\phi_0 + \beta) = \frac{\mu_4 - \mu_2}{\mu_1 - \mu_3}$$

L'influence d'une erreur de centre de gravité est la plus grande lorsque l'amplitude est faible. L'influence diminue avec l'augmentation de l'amplitude et disparaît à 220°. Pour des amplitudes encore plus élevées, l'influence s'inverse de manière atténuée.



Si le moment d'inertie du balancier n'est pas connu, le balourd du balancier peut être décrit par une différence de marche maximale qui en résulte, appelée DVm.

**DVm** est la différence de marche maximale théorique résultant de l'erreur de balourd du balancier pour une amplitude de 270° dans les positions verticales.

**Phi (Φ)** Indique l'angle de rotation de la tige de remontoir par rapport à la position 3H, où le balourd du balancier se trouve au point le plus bas de la verticale.

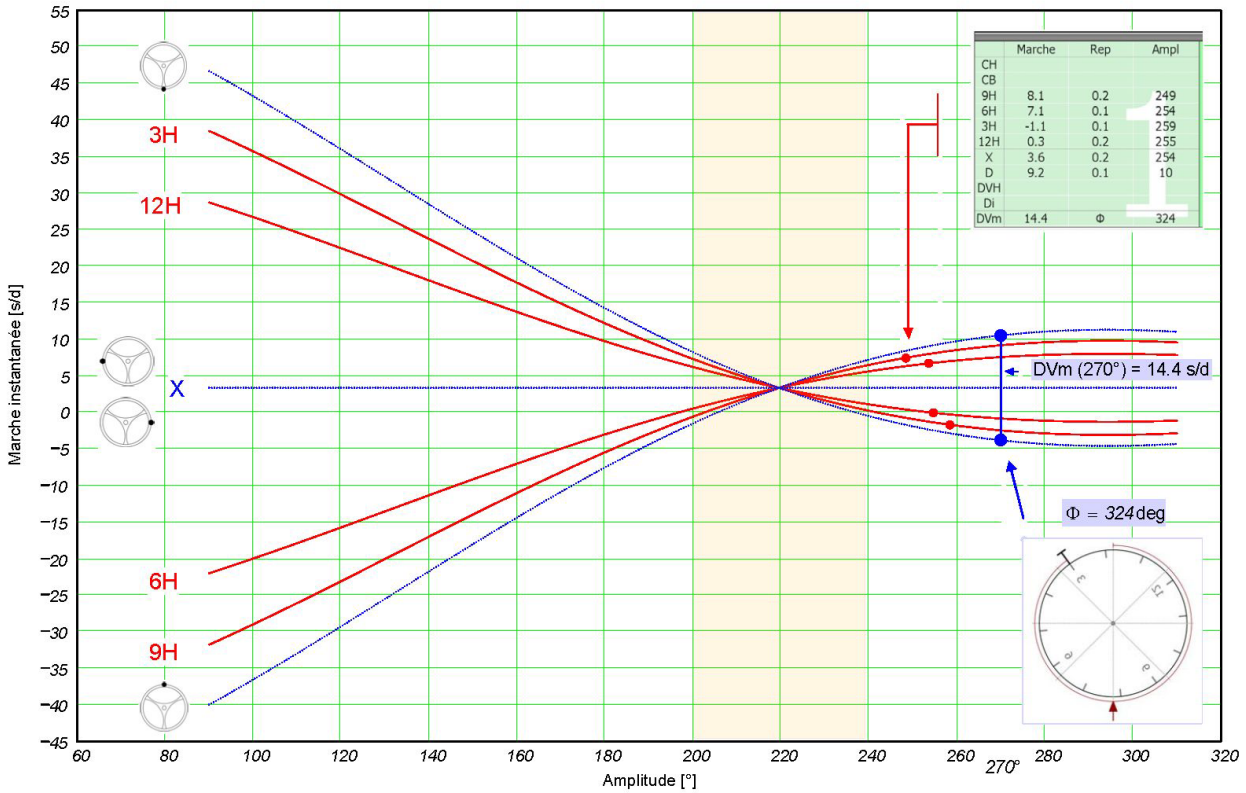



**Illustration :** Exemple de la manière dont les valeurs caractéristiques DVm et Phi (Φ) sont déterminées à partir des valeurs de marche et d'amplitude des quatre positions de test verticales.

En **mode séquentiel** (par ex. sur le terminal Witschi), les valeurs caractéristiques **DVm** et **Phi (Φ)** sont calculées automatiquement à partir des valeurs mesurées des positions de test verticales et affichées dans un tableau.

| PRÜFLAGE | GANG | REPERE | AMPL | PRÜFLAGE | GANG | REPERE | AMPL |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| CH | -0.0 | 0.3 | 276 | X | 2.3 | 0.2 | 269 |
| CB | 7.7 | 0.2 | 286 | XH | 3.8 | 0.2 | 281 |
| 9H | 3.1 | 0.1 | 258 | XV | 1.5 | 0.2 | 263 |
| 6H | 3.2 | 0.3 | 268 | D | 10.4 | 0.2 | 32 |
| 3H | -2.8 | 0.3 | 254 | DH | 7.7 | 0.1 | 10 |
| 12H | 2.5 | 0.1 | 274 | DV | 5.9 | 0.2 | 19 |
| | | | | DVH | -2.3 | -0.0 | -18 |
| | | | | Di | 3.2 | | |
| | | | | DVm | 7.2 | Φ | 354 |

# Conseils de mesure Witschi

Pour obtenir des résultats de mesure précis et répétables, il convient de respecter certaines consignes de mesure. Ce chapitre décrit la procédure, explique les facteurs d'influence sur la mesure et énumère les facteurs généraux influençant la période d'oscillation du balancier.

| **Déroulement du contrôle pour la mesure de la marche et le contrôle de qualité** | **Explications** |
|---|---|
| Contrôler l'état des mouvements. | Vérifier la propreté, évaluer l'état de lubrification des huiles, inspecter les pièces mécaniques.<br>Si nécessaire : nettoyer le mouvement (révision). |
| Remonter le mouvement | 0 à 15 tours de la couronne pour assurer une tension suffisante du ressort. |
| Laisser la montre se roder. | Laisser tourner la montre pendant environ 20 minutes avant de procéder à la mesure, afin que les valeurs de marche se stabilisent.<br>Un diagramme régulier est ainsi enregistré. |
| Éviter la position des aiguilles avant minuit | Pendant le changement de date, la mesure peut être influencée et faussée pendant un certain temps. |
| Mettre la couronne en position zéro (enfoncée). | En position tirée, le mouvement pourrait être arrêté. |
| Démagnétisation (si nécessaire) | Si possible, démagnétiser la montre à l'aide d'un appareil approprié tel que le Teslascope Witschi.<br>Les composants magnétisés peuvent exercer une influence négative sur la précision de marche. |
| Régler les paramètres de mesure | Par position d'essai : 20 secondes de stabilisation, définir un temps de mesure d'au moins 40 secondes pour des résultats plus stables. |
| Mesure de la marche en position horizontale (CB) | Effectuer la première mesure en position cadran en bas (CB). |
| Réglage du mouvement | Ajuster les repères pour assurer une oscillation symétrique du balancier.<br>Régler finement la marche afin d'obtenir la précision de marche souhaitée. |
| Effectuer la séquence de mesure dans plusieurs positions | Positions horizontales : cadran en haut (CH) et en bas (CB), puis dans les positions verticales : 9H, 6H, 3H et 12h.<br>En optimisant l'ordre (d'abord horizontal, puis vertical), le temps de stabilisation entre les couches peut être réduit. |
| Si nécessaire, réajuster le mouvement. | Si nécessaire, sur la base des résultats de la mesure de la séquence, réajuster le mouvement afin d'assurer une précision de marche optimale. |
| Vérifier le changement de date et les aiguilles. | Test de fonctionnement et réglage des aiguilles |
| Simulation de port et test du remontage automatique | Tester le remontage automatique avec un simulateur de portage (p. ex. Cyclomat), remonter manuellement les montres à remontage manuel. |
| Contrôle après 24 heures | Contrôler la précision de marche, l'affichage de l'heure et de la date et effectuer un test de fonctionnement final. |

| | |
|---|---|
| (En option) Contrôler la réserve de marche. | Noter l'heure de départ, laisser tourner la montre jusqu'à l'arrêt et mesurer le temps écoulé. |

## Tolérances standard

Le tableau suivant présente les plages de mesure typiques de mouvements fonctionnant bien et entièrement remontés. Les valeurs indiquées peuvent varier selon les fabricants.

| Montres Catégorie | Marche en s/d | Amplitude H | Amplitude V | Repère |
|---|---|---|---|---|
| Montre homme | -5 ... +15 | 260° ... 320° | 240° ... 280° | < 0.5 ms |
| Montre dame (petit diamètre) | -5 ... +25 | " | " | " |
| Chronomètre COSC (diamètre supérieur à 20 mm) | -4 ... +6 | " | " | " |
| Chronomètre COSC (diamètre inférieur à 20 mm) | -5 ... +8 | " | " | " |
| Chronomètre METAS | 0 ... +5 | " | " | " |

## Valeurs typiques de la réserve de marche

| Catégorie de montres | Réserve de marche |
|---|---|
| Montres standard (barillet simple) | 38 ... 48 heures |
| Mouvements de manufacture haut de gamme | 60 ... 75 heures |
| Montres avec réserve de marche accrue (barillets optimisés, double barillet) | 5 ... 8 jours |

## Facteurs pertinents pour la mesure qui influencent la période d'oscillation du balancier

| Facteurs | |
|---|---|
| Frottement | Frottement des roulements, résistance de l'air, état de l'huile |
| Échappement | Efficacité de l'impulsion, erreur d'échappement |
| Chocs | Coups, chocs, vibrations |
| Déséquilibre du balancier | Répartition des masses, asymétries |
| Déséquilibre de l'ancre | Répartition des masses, tolérances de fabrication |
| Déséquilibre du ressort spiral | Asymétries, défauts de fabrication |
| Jeu du spiral entre les goupilles de raquette | Limitation irrégulière |
| Modifications de l'élasticité du ressort spiral | En raison de la fatigue des matériaux et des variations de température |
| Variations de température | Influence de l'élasticité du ressort et de la viscosité de l'huile |
| Forces centrifuges | En cas de mouvements importants du support |
| Inertie du ressort spiral | Influences dynamiques à haute fréquence |
| Variations de la pression atmosphérique | Variation de la résistance de l'air |

| | |
|---|---|
| Champs magnétiques | Magnétisation des composants, en particulier du ressort spiral |
| Champs électrostatiques | Interactions avec des matériaux non conducteurs |

(Cette liste n'est pas exhaustive)

# Détection des défauts

La représentation graphique des bruits de battement permet une analyse détaillée de l'état de l'échappement. Le dégagement, ainsi que son instant précis, peuvent être visualisés dans le mode Diagramme. Le déroulement complet d'un seul bruit de battement est affiché dans le mode Scope, permettant une observation fine du profil acoustique.

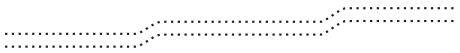
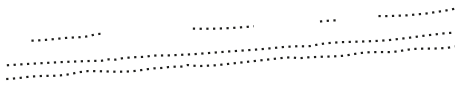
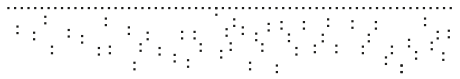
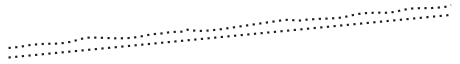
Les paragraphes suivants décrivent l'interprétation de ces représentations et exposent certaines causes possibles pouvant expliquer leur forme. Cette liste n'est toutefois pas exhaustive, car de nombreux autres facteurs mécaniques ou acoustiques peuvent produire des représentations similaires, voire identiques.

.

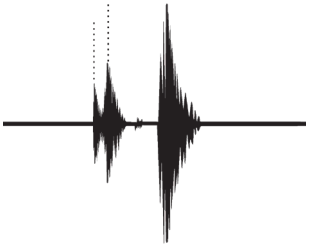
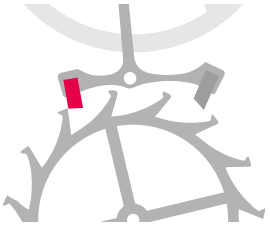
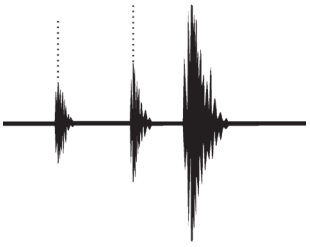
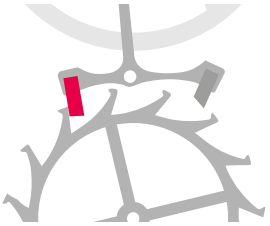
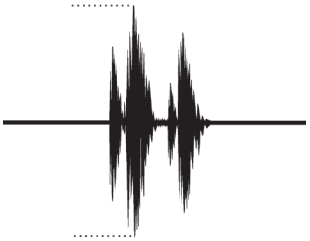
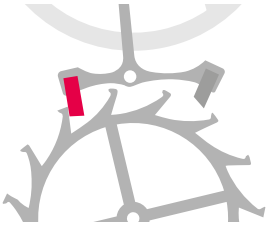
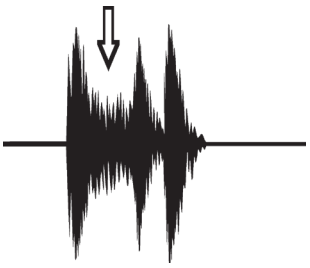
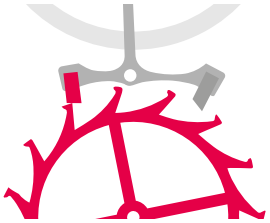
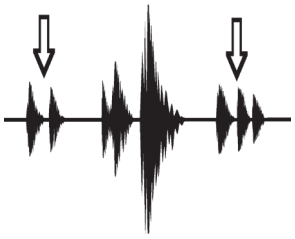
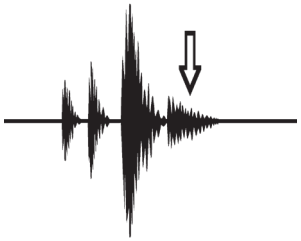
### Détection des erreurs avec le diagramme

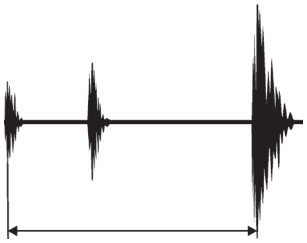
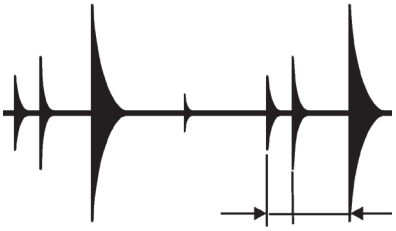
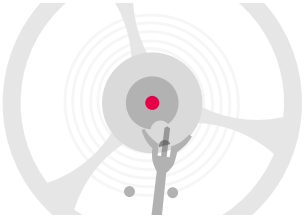
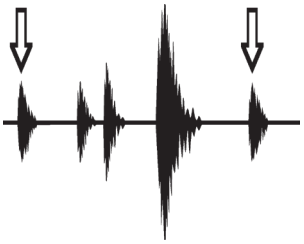
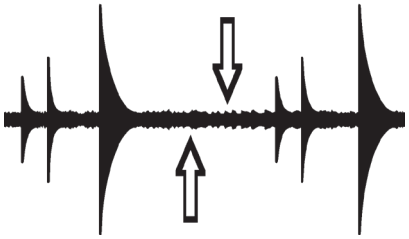
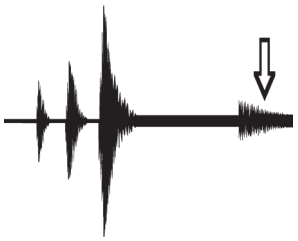
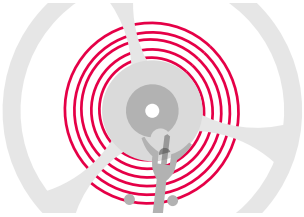
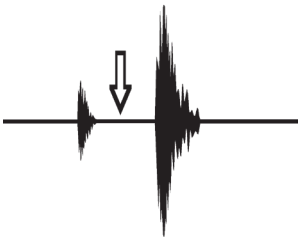
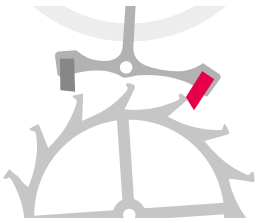
Réglage de l'amplification du signal : le réglage par défaut est 2.
Si aucun diagramme propre n'apparaît, il faut augmenter ou diminuer l'amplification du signal sur l'appareil de mesure.

| Erreur | Description Mesure à prendre | Image |
|---|---|---|
| Mouvements en bon état. | Aucune action n'est nécessaire. | |
| Repère (erreur de chute) trop important (env. 3 ms). | Vérifier d'abord l'amplification sur l'appareil de mesure. Si aucune influence n'est perceptible, réajuster la montre. Il faut d'abord corriger le repère, puis régler la marche. | |
| Réglage nécessaire | Le mouvement affiché à gauche présente une forte avance de marche.<br>Le mouvement affiché à droite présente un net retard.<br>Il est nécessaire de procéder à un ajustement afin d'amener la marche à la valeur cible souhaitée.<br>p. ex.+ 0 à 10 s/d. | +90 s/d<br>-90 s/d |
| Mouvement avec grandes erreurs de position entre différentes positions verticales | Centrage du spiral<br>ou équilibrage du balancier<br>ou remplacement de l'organe réglant. | +30 s/d<br>-40 s/d |
| Mouvement présentant des erreurs de position entre les positions de contrôle verticales et horizontales | Régler le jeu du ressort spiral dans la raquette.<br>Pour les goupilles DVH-, réduire le jeu.<br>Pour les goupilles DVH+, augmenter le jeu. | +10 s/d<br>-10 s/d |
| Mouvements avec de grandes, mais variations de marche régulières. | Défaut dans le rouage. Révision et éventuellement remplacement de parties du rouage. | |
| Mouvement avec des marches très irrégulières.<br>et des perturbations. | L'amplitude est alors généralement insuffisante.<br>Le mouvement doit être révisé. | |

| | | |
|---|---|---|
| Balancier "rebat" par moments. | Amplitude trop élevée du balancier (> 330°). Le double "tic-tac" est audible dans le haut-parleur. Le ressort, l'ancre et/ou la roue d'échappement doivent être remplacés. |  |
| Balancier "rebat" en permanence | Amplitude trop élevée du balancier (>330°). Le double "tic-tac" est audible dans le haut-parleur. Le ressort, l'ancre et/ou la roue d'échappement doivent être remplacés. |  |
| La roue d'échappement n'est pas ronde. | Remplacer la roue d'échappement. (Remarque : 15 à 21 dents correspondent à un tour de la roue d'échappement). | |
| La palette d'entrée s'accroche mal ou est "sèche" (encrassée). | Nettoyer l'échappement ou remplacer la roue d'échappement. |  |
| Le ressort spiral frotte | La plupart du temps, le spiral frotte. Dans ce cas, au niveau des goupilles de raquette ou du coq du spiral (bruits parasites dans le haut-parleur). Centrer le spiral, redresser la marche. |  |
| Mise en route lente après un changement de position | Les pivots du balancier et les rouages sont peut-être mal ou pas du tout huilés. Dans ce cas, il faut nettoyer, huiler correctement les points de lubrification, et si nécessaire, effectuer une révision complète du mouvement. | |

## Détection des erreurs avec Scope

| Erreur | Description Mesure à prendre | Image |
|---|---|---|
| Repos de l'échappement trop faible |  |  |
| Repos de l'échappement trop fort |  |  |
| Dégagement trop fort |  |  |
| Frottement supplémentaire |  |  |
| Le dard de sécurité touche l'ellipse |  | |
| Pas de jeu entre les cornes et la cheville du levier |  | |

| | | |
|---|---|---|
| Amplitude faible |  | |
| Jeu de la tige de balancier trop important |  |  |
| La corne de la fourchette rebondit sur l'ellipse. |  | |
| Pivot de balancier rugueux |  | |
| Le ressort spiral frotte |  |  |
| Une dent de la roue d'ancre tombe directement sur une palette |  |  |

# Mentions légales

**Éditeur**
Witschi Electronic AG
Bahnhofstrasse 26
CH-3294 Büren an der Aare
Suisse
https://www.witschi.com

**Contact**
Téléphone : +41 32 352 05 00
E-mail : info@witschi.com

**Responsable du contenu**
Witschi Electronic AG, Product Management & Formation

**Droits d'auteur et droits d'utilisation**
© Witschi Electronic AG, Büren an der Aare, Suisse.
La copie de ce document, en tout ou en partie, est **expressément autorisée** à condition que **Witschi Electronic AG** soit citée comme source.
Les contenus peuvent être utilisés à des fins de formation et non commerciales sans autorisation préalable.
Toute modification, traduction ou utilisation commerciale nécessite l'accord écrit préalable de Witschi Electronic AG.

**Clause de non-responsabilité**
Toutes les informations contenues dans ce document ont été compilées avec le plus grand soin.
Witschi Electronic AG décline toute responsabilité quant aux erreurs ou omissions ainsi qu'aux dommages résultant de l'utilisation de ce matériel.
Des modifications techniques et des ajustements de produits peuvent être apportés à tout moment.