



Méthodes de contrôle des montres électroniques

Witschi Electronic AG, 2025

Table des matières

Table des matières	2
Principes de base	3
Types de mouvements électroniques	3
Composants d'une montre quartz	3
Montres quartz analogiques	12
Circuit intégré (CI)	17
Montre à quartz numérique.....	22
Retouche	24
Mesures et essais	28
Batterie tension.....	28
Courant Enregistrement	29
Tension de fonctionnement minimale	30
Tension EOL	30
Écart de marche	31
Écart de marche Quartz.....	32
Durée d'impulsion	33
Asservissement	33
Forme de l'impulsion du moteur	34
Mode accéléré	37
Générateur d'impulsions.....	37
Contrôle des montres quartz fermées	39
Contrôle des montres quartz ouvertes	41
Déroulement du contrôle.....	41
Dépannage	42
Aperçu des appareils de mesure Witschi pour montres quartz	45

Principes de base

Types de mouvements électroniques

Les mouvements électroniques assurent la mesure du temps de manière partielle ou intégrale par des procédés électroniques. Ils ont été développés dans le but principal de réduire l'écart de marche par rapport aux mouvements mécaniques traditionnels, en tirant parti de la stabilité de fréquence offerte par les oscillateurs électroniques, notamment ceux à quartz.

Types de montres

Les premiers développements en horlogerie électronique ont reposé sur un **balancier mécanique** muni d'aimants permanents, couplé de manière électromagnétique à un circuit électronique agissant comme un oscillateur à roue libre. Ce couplage permettait au balancier de maintenir ses oscillations avec un minimum de perturbations, tout en conservant son rôle central dans la régulation du temps.

Par la suite, ce balancier a été remplacé par un **diapason à excitation magnétique**, utilisé dans les montres à diapason. L'oscillation du diapason était transmise mécaniquement au rouage de transmission via un système de cliquets.

L'étape suivante de cette évolution fut l'introduction du **résonateur à quartz** oscillant, qui a rapidement supplanté les systèmes à diapason. Le quartz adopte lui aussi une forme de diapason, mais est logé dans un boîtier hermétiquement scellé, assurant sa protection contre les influences extérieures. Son excitation est entièrement électrique, sans aucune liaison mécanique.

Grâce à sa grande stabilité de fréquence, le quartz oscillant est devenu la référence dans l'horlogerie électronique contemporaine, à tel point que la quasi-totalité des montres électroniques repose aujourd'hui sur cette technologie.

Dans certains cas, les mouvements à quartz sont complétés par des systèmes de synchronisation externe visant à réduire encore davantage l'écart de marche sur des périodes prolongées (de plusieurs jours à plusieurs années). Ces systèmes permettent la correction automatique de la marche grâce à des signaux horaires reçus via le signal radio DCF77, les signaux GPS, le réseau de téléphonie mobile ou encore Internet. La synchronisation directe avec une horloge atomique n'a à ce jour été mise en œuvre que dans des prototypes de montres-bracelets.

Composants d'une montre quartz

Une **montre à quartz analogique** se compose des éléments suivants:

- une pile bouton, qui assure l'alimentation électrique du mouvement
- un **circuit intégré (CI)**, jouant le rôle de diviseur de fréquence, de logique de commande et de pilote du moteur pas-à-pas
- un **résonateur à quartz**, utilisé comme référence temporelle (générateur d'horloge)
- un **moteur pas-à-pas**, destiné à entraîner le rouage
- un **rouage de transmission**, qui convertit les impulsions moteur en mouvements continus pour les aiguilles des secondes, des minutes et des heures.

Une **montre à quartz numérique** est construite selon une architecture similaire, et comprend:

- une **pile bouton** pour l'alimentation en énergie,
- un **circuit intégré**, assurant la division de fréquence et la commande de l'affichage,
- un **résonateur à quartz**, servant de source d'horloge,
- un **affichage à cristaux liquides (LCD)** ou une **diode électroluminescente (LED)** pour afficher l'heure.

Cette section présente en détail les composants communs à ces deux catégories de montres : à savoir la pile et le quartz horloger.

Batterie

La pile fournit l'énergie nécessaire au fonctionnement de la montre à quartz. Selon les besoins en électricité des mouvements, elle peut permettre une autonomie de plusieurs années.

Une précaution particulière doit être observée lors de la manipulation des piles. Celles-ci ne doivent être saisies qu'à l'aide de pinces isolées ou de gants, afin d'éviter tout risque de décharge électrostatique, de courant de fuite ou de contamination des contacts, pouvant nuire au bon fonctionnement du mouvement. La plupart des montres utilisent des piles boutons à l'oxyde d'argent et au zinc d'une tension nominale de 1,55 V. Les piles à l'oxyde d'argent et au zinc sont utilisées pour les montres à quartz.

Cependant, les montres électroniques modernes intègrent souvent des fonctions supplémentaires qui augmentent leurs besoins énergétiques. Dans ce cas, on utilise des piles à l'oxyde d'argent à fort ou double débit (high-drain ou multi-drain), ou des piles au lithium offrant une capacité plus élevée, une tension nominale plus élevée (3 V), un taux d'autodécharge plus faible et une plage de température plus étendue.

Trois types fréquemment utilisés dans les montres :

Type	Tension nominale	Électrolyte	Application
Oxyde d'argent (low drain)	1.55 V	Hydroxyde de sodium (NaOH)	Montres sans rétro-éclairage ni alarme
Oxyde d'argent (high drain)	1.55 V	Hydroxyde de potassium (KOH)	Montres avec rétroéclairage ou alarme
lithium-dioxyde de manganèse	3.0 V		Montres à plus forte consommation d'énergie

La norme NIHS 13-02 définit les critères de désignation, d'étiquetage et de contrôle des piles pour montres. Elle est basée sur les normes internationales IEC 60086-1 et IEC 60086-2, qui spécifient les exigences générales et les caractéristiques de performance des piles primaires.

Exemples de préfixes de piles :

- SR – Oxyde d'argent
- CR – Dioxyde de manganèse au lithium
- BR – Polyfluorure de carbone / lithium
- LR – Manganèse alcalin

Exemple de désignation de batterie : SR516SW

- S = Oxyde d'argent
- R = Forme ronde (pile bouton)
- 5 = Code du diamètre (5,8 mm)
- 16 = Code de la hauteur (1,6 mm)
- SW = Faible consommation (low drain)

Une batterie se compose de deux électrodes, la **cathode (+)** et l'**anode (-)**, séparées par un **électrolyte**. D'autres composants tels que le séparateur, le joint, le boîtier et le couvercle ne participent pas à la réaction chimique, mais assurent la sécurité et la stabilité.

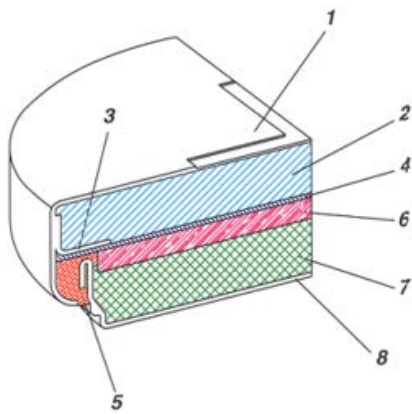
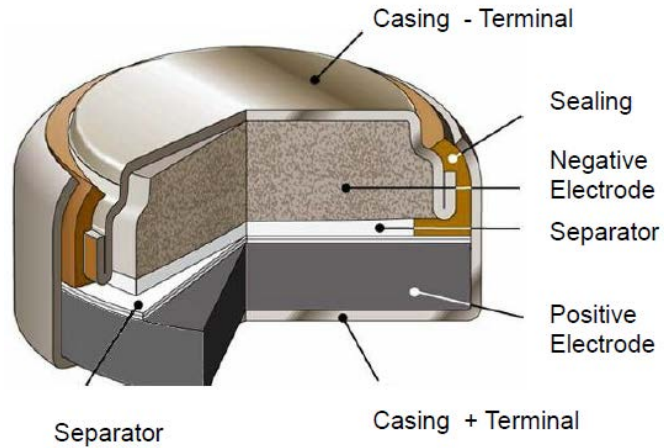


Illustration 1 : Structure d'une pile de montre



Numéro de pièce	Composant	Fonction
1	Boîtier	Pôle positif (+) . Protège les composants internes et assure la stabilité. Le revêtement extérieur en nickel protège de la corrosion et garantit un bon contact électrique.
2	Cathode (+)	Électrode positive (Ag_2O) sur laquelle a lieu la réduction.
3	Bague de pression	Assure la stabilité mécanique et la compensation de pression (selon le type de batterie).
4	Séparateur	Sépare l'anode et la cathode, empêche les courts-circuits, permet l'échange d'ions.
5	Joint d'étanchéité	Empêche l'électrolyte de s'échapper et protège contre les influences environnementales.
6	Électrolytes	Permet le transport des ions entre la cathode et l'anode.
7	Anode (-)	Électrode négative (Zn) sur laquelle se produit l'oxydation.
8	Couvercle	Ferme la batterie et sert de surface de contact, pôle négatif (-) .

Le séparateur réduit l'autodécharge, mais augmente la résistance interne de la batterie. La tension peut donc être plus faible en charge. La tension mesurée ne permet toutefois pas de se prononcer directement sur la capacité restante.

La **tension nominale** d'une batterie est déterminée par l'ensemble de sa structure - notamment par les matériaux actifs (zinc et oxyde d'argent), le séparateur, l'électrolyte et le boîtier.

En revanche, la **capacité** est principalement déterminée par la quantité de matériaux actifs, c'est-à-dire la quantité de zinc et d'oxyde d'argent que le fabricant a placée dans la pile. Elle s'exprime en milliampères-heures (mAh) et est généralement mesurée jusqu'à une tension finale de 1,2 V. La capacité d'une batterie est déterminée par le nombre d'heures qu'elle contient.

Une pile de plus grande capacité assure une plus longue durée de vie à la montre.

La **durée de vie** théorique **peut être calculée** en divisant la capacité de la pile (en mAh) par la consommation moyenne de courant du mouvement (en mA).

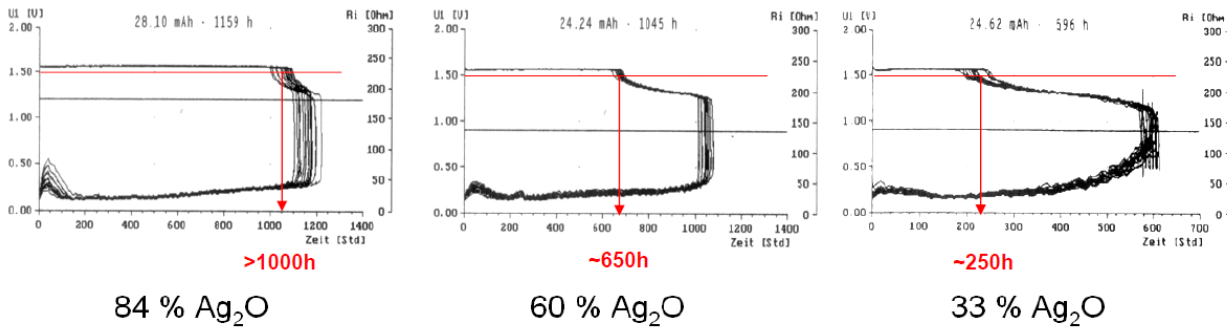


Figure 2 : Courbes de décharge en fonction de la proportion d'argent. Partie restante de la cathode composée de dioxyde de manganèse.

Low-Drain et High-Drain

Dans les montres dotées de fonctions qui nécessitent un courant élevé à court terme - comme le rétroéclairage ou un signal acoustique de réveil - on utilise **des piles High-Drain**. Ces piles se caractérisent par une résistance interne plus faible, ce qui leur permet de fournir le courant nécessaire sans chute de tension importante.

L'inconvénient des piles à haut rendement est toutefois leur durée de stockage plus courte et une autodécharge plus importante, ce qui peut réduire leur durée de vie totale.

Difference between High Drain and Low Drain Batteries

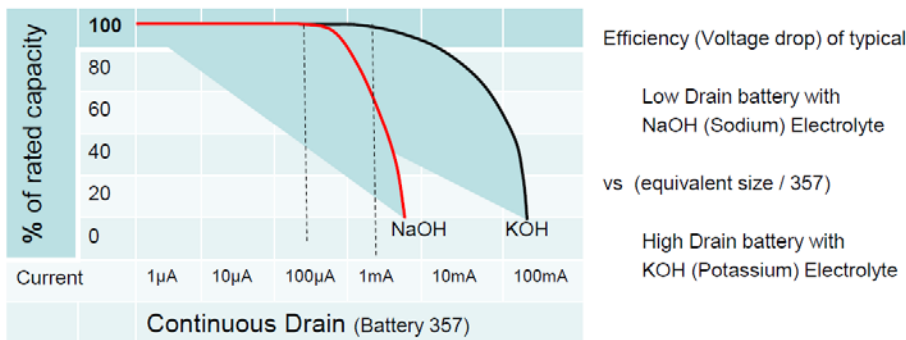


Figure 3 : Capacité en fonction du courant de décharge pour les batteries à faible et haut drain.

Stockage

Les batteries doivent être conservées dans leur emballage d'origine, dans un endroit sec et à des températures comprises entre 10°C et 25°C. La température ne doit jamais dépasser 30°C, car des températures plus élevées accélèrent l'autodécharge et réduisent la durée de vie.

Si les batteries sont humides, la résistance entre les pôles diminue, ce qui peut entraîner une autodécharge plus importante. De plus, l'humidité peut provoquer de la corrosion (formation de rouille).

Les batteries ont une durée de stockage limitée, car leur capacité diminue avec le temps en raison de l'autodécharge. Selon la recommandation ISO 2014, le code de production comprend généralement le mois et l'année de fabrication afin de pouvoir suivre la durée de vie restante.

Exemple de code fabricant pour les piles de Maxell, Seiko, Sony et Renata.

Code à 2 chiffres :

- 1er chiffre = année
- 2e position = mois (1-9 = janv.-sept., O = oct., Y = nov., Z = déc.)
- Exemple : "3Z" = décembre 2023

Code à 4 chiffres :

- 2 derniers chiffres = lot de production
- 2 premiers chiffres = selon le fabricant, année/mois
- Exemple : "2312" → lot de production 12, année éventuellement 2023

Le fabricant indique une **durée de stockage maximale pour les batteries** :

- Piles à faible consommation : jusqu'à 3 ans
- Piles à haut débit : jusqu'à 2 ans

Après cette période, l'**autodécharge** peut réduire la capacité, ce qui affecte les performances dans la montre.

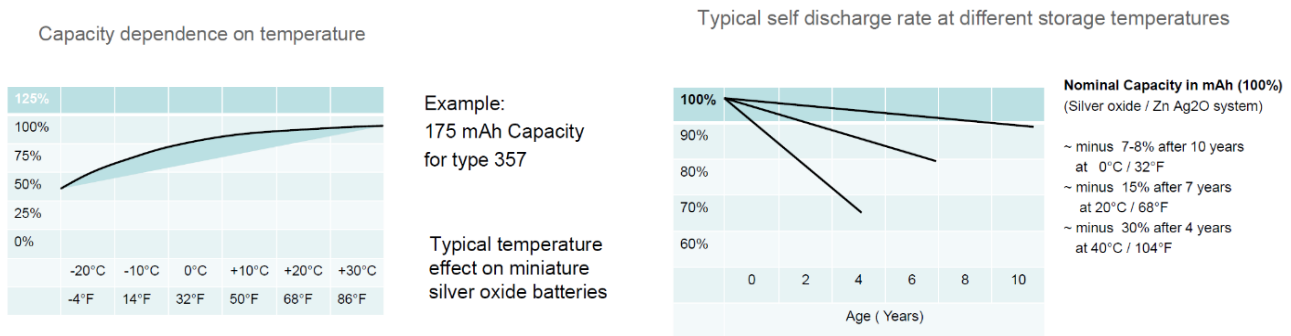


Figure 4: A gauche : Capacité en fonction de la température.

A droite : capacité restante lors du stockage.

Après l'alimentation en énergie par la pile, le quartz de la montre constitue l'élément central pour la commande temporelle de la montre.

Quartz de montre

Le **résonateur à quartz** constitue l'organe **régulateur** de la montre à quartz. La **précision de marche** du mouvement dépend directement de la **stabilité de sa fréquence d'oscillation**.

Lorsque le quartz est soumis à une **tension électrique**, il entre en oscillation selon le principe de l'**effet piézoélectrique inverse**. Sa géométrie est généralement celle d'un **diapason**, optimisée pour assurer une oscillation stable. Le cristal est **hermétiquement scellé** dans un **boîtier métallique**, afin de le protéger des influences extérieures (humidité, poussières, variations de pression).

La **fréquence nominale** d'oscillation est typiquement de **32 768 Hz**, soit une valeur bien supérieure à celle des oscillateurs mécaniques. Grâce à son **facteur de qualité (Q) élevé**, cette fréquence reste remarquablement stable, ce qui permet d'atteindre une **précision de marche** nettement supérieure à celle des mouvements mécaniques traditionnels.

La **stabilité de fréquence d'un quartz d'horloge** est principalement influencée par :

- Température
- Humidité de l'air
- Vieillessement
- Charge
- Tension d'alimentation

Les influences qui peuvent entraîner un défaut :

- Accélération
- Chocs mécaniques et vibrations

En revanche, l'influence des champs électriques et magnétiques sur la fréquence du quartz est négligeable.

Précision de marche

La précision de la fréquence d'oscillation du quartz détermine la précision de marche de la montre. Elle est généralement exprimée en ppm (parties par million).

La marche de la montre s'exprime soit en **secondes par jour**, soit en **secondes par mois**.

ppm	s/d	s/M
0.1157	0.0100	0.300
0.3858	0.0333	1.000
1.0000	0.0864	2.592
1.1574	0.1000	3.000
11.574	1.0000	30.000

Tableau 1 : Conversion des unités de mesure des écarts de fréquence et de marche.

Les valeurs typiques des écarts de marche dus à différentes influences sur un quartz de montre sont indiquées dans le tableau suivant.

Raison	ppm	s/d
Écart de fréquence par production	±20	±1.73
Diffusion Condensateur à l'intérieur du CI	±10	±0.86
Circuit imprimé (condensateur de fuite)	±1	±0.08
Total pour l'ajustement [1]	±31	±2.67

Raison	ppm	s/d
Dépendance à la température	0.038 / °C2	0.0033 / °C2
Vieillessement la première année	±3	±0.26
Coups (5 à 10 kg / 0,3ms)	±5	±0.43
Vibration (20g / 20 - 20kHz / 20 min)	±3	±0.26

[1] cette valeur est mesurée en production et corrigée lors du réglage.

Tableau 2 : écart de marche typique pour le quartz horloger.

Charge capacitive

La fréquence du quartz de l'horloge peut être influencée par une charge capacitive. Une courbe typique de la fréquence d'oscillation en fonction de la charge capacitive est donnée sur Figure 5. Pour les montres avec réglage de l'inhibition, le choix d'une charge capacitive plus faible permet de régler volontairement une fréquence légèrement supérieure à 32'768 Hz.

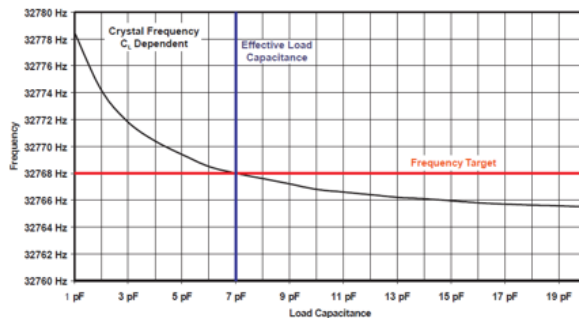
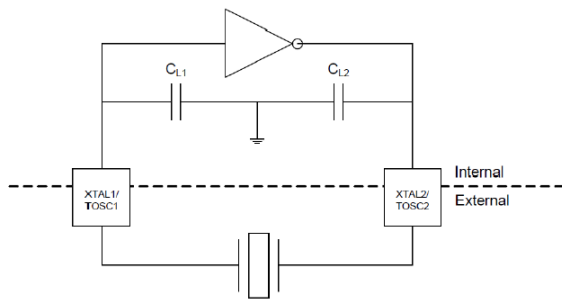


Figure 5 : A gauche : Schéma fonctionnel de l'oscillateur. A droite : fréquence en fonction de la charge capacitive.

Vieillessement

Le **vieillessement** du résonateur à quartz résulte de modifications progressives de sa structure cristalline, provoquant une dérive de la fréquence de résonance au fil du temps. Ce phénomène suit généralement une loi logarithmique, ce qui signifie que l'impact est plus marqué au cours des premiers mois de fonctionnement. Les quartz récemment mis en service subissent ainsi une variation plus importante que ceux déjà stabilisés.

La valeur maximale de dérive liée au vieillissement est généralement fournie par le fabricant du quartz. Elle se situe typiquement autour de ±10 ppm sur une période de 10 ans, bien que les valeurs réellement observées soient souvent inférieures dans des conditions d'exploitation normales. Il convient toutefois de noter que la dérive exacte ne peut pas être prédite individuellement pour un quartz donné.

Le vieillissement peut entraîner aussi bien une augmentation qu'une diminution de la fréquence, mais les études statistiques montrent que dans plus de 90 % des cas, on observe une diminution progressive de la fréquence d'oscillation.

Influence de la température

La **stabilité en fréquence d'un résonateur à quartz** est fortement influencée par la température, cette dépendance étant directement liée à la coupe cristalline du quartz. En horlogerie, on utilise généralement des quartz taillés selon une coupe AT, spécifiquement choisie pour que la variation de fréquence en fonction de la température suive une courbe parabolique.

Cette parabole présente un point d'inflexion, ou point d'inversion thermique, situé typiquement autour de 25 °C. À cette température, la sensibilité thermique est minimale, ce qui permet de garantir une grande stabilité de marche dans la plage de température ambiante usuelle.

La relation entre la fréquence et la température peut être exprimée mathématiquement par une fonction comme suit :

$$\frac{F_{xT} - F_0}{F_0} = \frac{\Delta F_{xT}}{F_0} = \beta(T - T_{inv})^2$$

où

T_{inv} Température au point d'inversion ($25^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$)

F_{xT} Fréquence à la température T

F_0 Fréquence à la température au point d'inversion T_{inv} (typ. 32'768 Hz at 25°C)

β Coefficient de variation en fonction de la fréquence (typ. $-(0,035 \pm 0,005)$ ppm/ $^{\circ}\text{C}^2$)

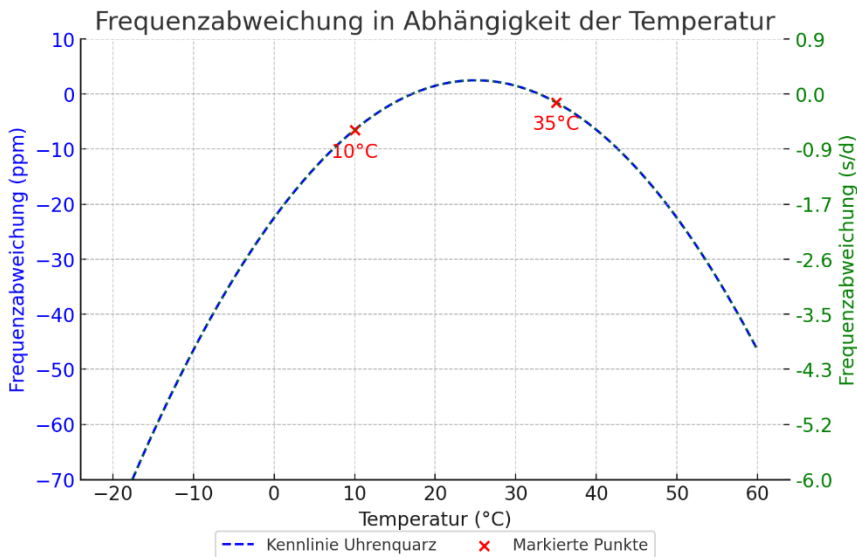


Figure 6: Variation de fréquence en fonction de la température pour un quartz d'horloge

Exemple d'écart de fréquence à $T = 10^{\circ}\text{C}$

$$\frac{\Delta F}{F_0} = \beta(T - T_{inv})^2 = 0.038(10 - 25)^2 = 8.55 \text{ ppm} \rightarrow 0.74 \text{ s/d}$$

Exemple d'écart de fréquence à $T = 35^{\circ}\text{C}$, ce qui correspond à une température possible à l'intérieur d'une montre au poignet.

$$\frac{\Delta F}{F_0} = \beta(T - T_{inv})^2 = 0.038(35 - 25)^2 = 3.8 \text{ ppm} \rightarrow 0.33 \text{ s/d}$$

Comme la température de la montre au poignet est généralement un peu plus élevée que la température ambiante, on cherche souvent à obtenir un léger processus de +0,1 s/d à +0,2 s/d lors du réglage.

Thermocompensation

Comme nous l'avons déjà mentionné, la fréquence d'oscillation d'un quartz de montre dépend de la température. **Les quartz thermocompensés** contiennent un circuit de mesure de la température qui compense les écarts de fréquence et améliore ainsi nettement la précision de marche.

Pour la **thermocompensation**, la fréquence d'oscillation du quartz de la montre est mesurée pendant la production en fonction des changements de température et approximée à l'aide d'une fonction polynomiale. En fonctionnement, un circuit mesure la température actuelle à l'intérieur du quartz thermocompensé et calcule une correction à partir de cette température. L'adaptation de la fréquence

est réalisée par exemple par des diodes capacitives dont la capacité varie avec une tension de commande. Cela permet d'adapter la charge capacitive du quartz et donc de stabiliser sa fréquence.

La figure 7 montre l'écart de fréquence **avant la compensation (en bleu)** et **après la compensation (en rouge)**, ce qui montre l'efficacité de la thermocompensation.

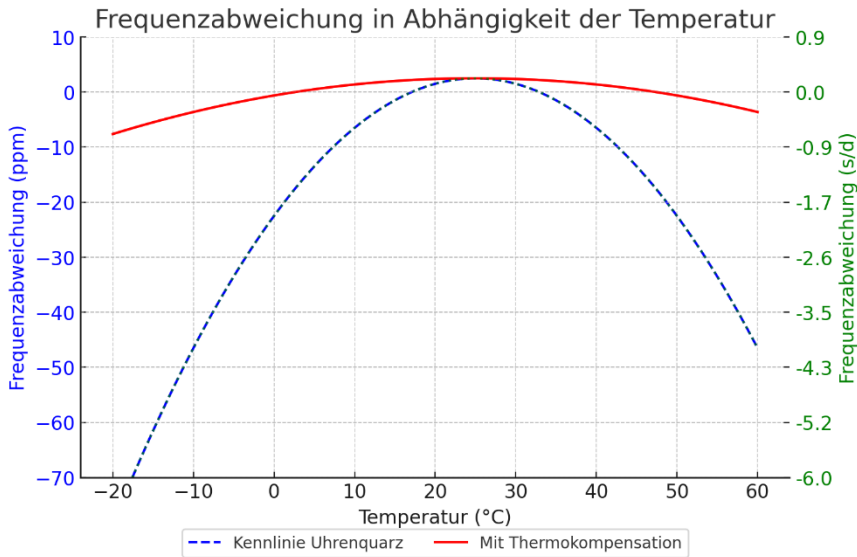


Figure 7: Variation de fréquence en fonction de la température pour le quartz thermocompensé.

Pour la mesure de la marche d'une montre à quartz thermocompensée, il est recommandé d'utiliser une durée de mesure correspondant au moins à une ou plusieurs périodes de thermocompensation.

Ces périodes sont indiquées dans la fiche technique de la montre et sont typiquement de 4, 8 ou 16 minutes. Une période de mesure trop courte peut donner des résultats imprécis, car le cycle complet de thermocompensation n'est pas enregistré.

Grâce à la thermocompensation, il est déjà possible d'obtenir des précisions de marche très élevées. Toutefois, pour les garde-temps particulièrement précis, des exigences supplémentaires s'appliquent - comme celles qui doivent être remplies par les chronomètres à quartz.

Chronomètre à quartz

Le **Contrôle Officiel Suisse des Chronomètres (COSC)** a développé à cet effet sa propre norme de contrôle pour les chronomètres à quartz, qui comprend huit critères d'exclusion (voir tableau ci-dessous).

Critères de test COSC pour les chronomètres à quartz

Symbole	Critère	Valeur limite (s/d)
Avg R	Marche quotidienne moyenne à 23°C	±0.07
M _{T8}	Marche à 8°C	± 0.20
M _{T38}	Marche à 38°C	±0.20
SM	Stabilité de la démarche	0.05
D	Marche dynamique	±0.05
TE	Effet temporaire des chocs mécaniques	±0.05
R	Reprise de la marche	±0.05
RE	Effet résiduel des chocs mécaniques	±0.05

Montres quartz analogiques

Comme mentionné précédemment, une montre à quartz analogique se compose des éléments suivants : une pile assurant l'alimentation, un circuit intégré (CI) faisant office de diviseur de fréquence et de pilote moteur, un résonateur à quartz, un moteur pas-à-pas destiné à l'entraînement mécanique, ainsi qu'un rouage chargé de transmettre le mouvement aux aiguilles des secondes, des minutes et des heures.

Ce chapitre détaille les composants fonctionnels caractéristiques des montres à quartz analogiques :

- **Le circuit intégré** avec pilote moteur : il assure à la fois la division de fréquence du signal issu du quartz et la génération des impulsions destinées à l'entraînement du moteur. Il contrôle ainsi la cadence de marche de la montre.
- **Le moteur pas-à-pas** : ce moteur électromagnétique miniature convertit les impulsions électriques envoyées par le CI en mouvement de rotation angulaire, généralement par incréments de 180° ou 360°.
- **Le rouage de transmission** : il transforme et réduit la fréquence du mouvement produit par le moteur, transmettant ce dernier aux différentes aiguilles selon une cinématique précise (secondes, minutes, heures).

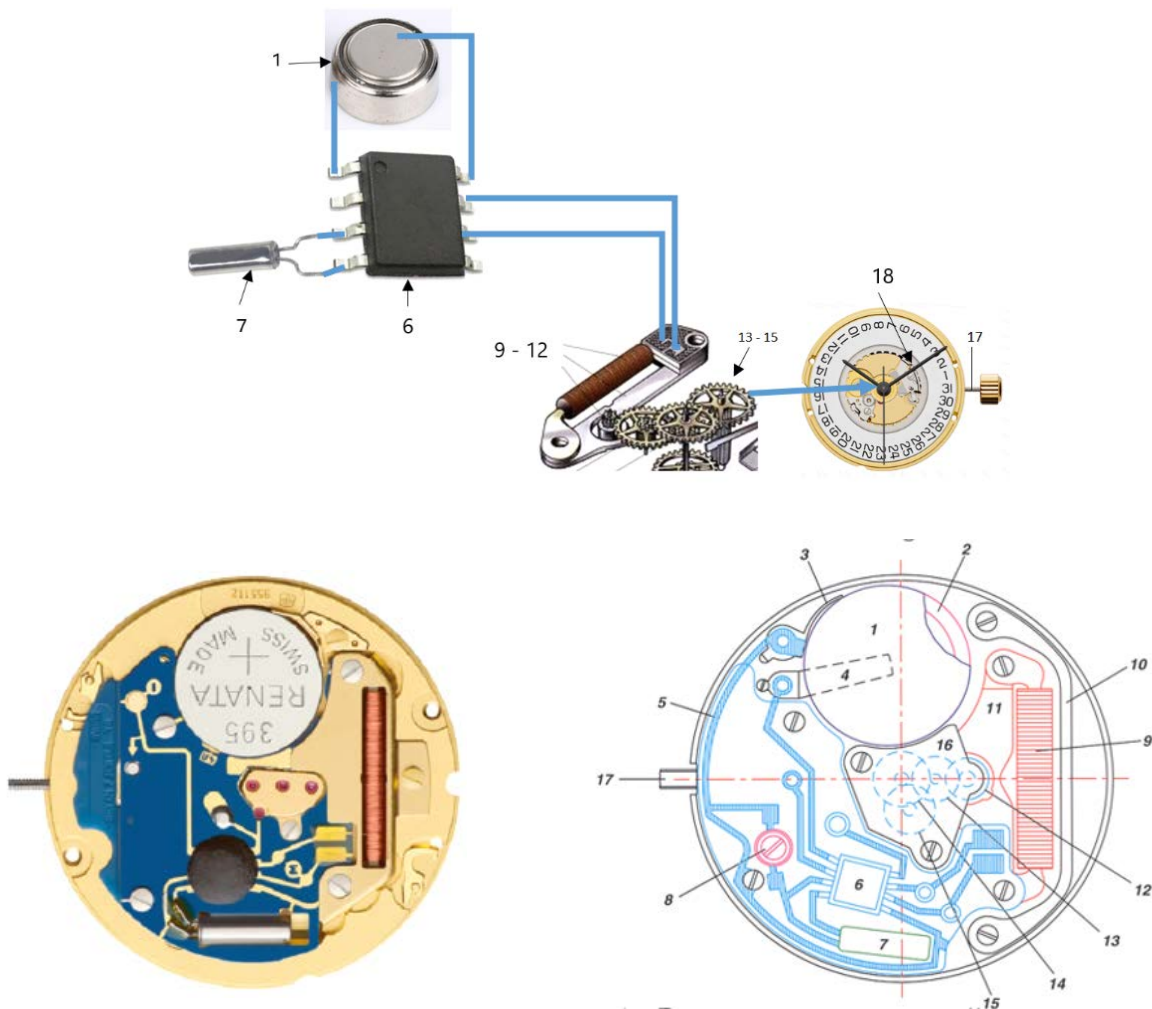


Figure 8 : Structure d'une montre à quartz analogique

Numéro de pièce	Composant	Fonction
1	Batterie	Stockage d'énergie
2	Isolateur	
3	Contact positif	
4	Contact négatif	
5	Circuit imprimé	
6	Circuit intégré	Compteur de fréquence, inhibition, commande de moteur
7	Quartz de montre	Le quartz de la montre a généralement une fréquence de 32'768 Hz. Avec le circuit intégré, il forme un oscillateur et constitue ainsi le composant de la montre à quartz qui donne la fréquence.
8	Condensateur variable	L'accord de la fréquence du quartz est en partie réalisé à l'aide d'un condensateur réglable (uniquement sur Illustration 8 , à droite).
9	Bobine	Le moteur pas à pas, composé d'une bobine, d'un stator et d'un rotor, transforme les impulsions électriques du moteur en un mouvement de rotation.
10	Protection de la bobine	
11	Stator	
12	Rotor	
13	Rouage	Déplace les aiguilles, le calendrier et d'autres fonctions mécaniques.
14		
15		
16	Pont de rouage	
17	Arbre de réglage	
18	Affichage analogique	Cadran et aiguilles

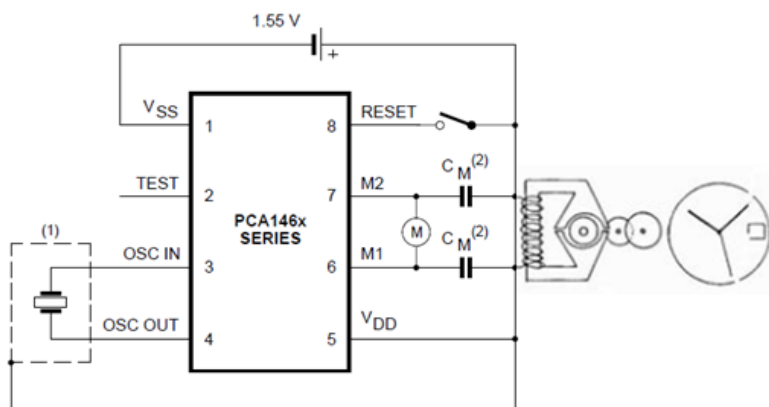


Figure 9: Schéma de câblage d'une montre à quartz analogique

Moteur Lavet

Le moteur Lavet est un moteur pas-à-pas monophasé, couramment utilisé dans les montres à quartz analogiques pour l'entraînement des aiguilles. Ce type de moteur présente l'avantage d'un fonctionnement simple, compact et peu énergivore, parfaitement adapté aux exigences de la microtechnique horlogère.

Il a été inventé par l'ingénieur français Marius Lavet et décrit pour la première fois en 1936. Structure

Le moteur Lavet est composé d'une bobine, d'un noyau de bobine, d'un stator et d'un rotor.

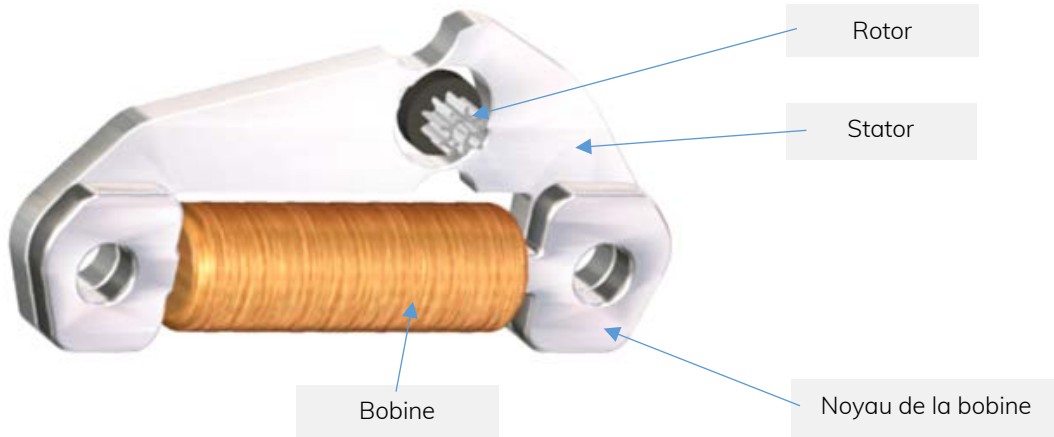


Illustration 10 : Moteur Lavet

Comme les autres moteurs monophasés, le moteur Lavet ne peut tourner que dans un sens, déterminé par la géométrie de son stator.

Commande

Les moteurs Lavet nécessitent des impulsions électriques courtes à polarité alternée. La durée des impulsions dépend de la conception du moteur.

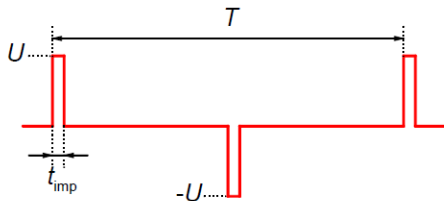


Illustration 11 : Tension de la commande d'un moteur Lavet

Le signal représenté avec les niveaux $0V$, $+U$ et $-U$ pourrait être généré par une tension d'alimentation positive et une tension d'alimentation négative. Cependant, dans un mouvement, seule une tension d'alimentation unique de 1,55 V ou 3 V est disponible.

Un signal équivalent peut néanmoins être généré en commutant la sortie de tension alternativement sur les deux bornes de la bobine du moteur. Cette fonction est réalisée dans le circuit intégré de la montre par un pont en H, qui permet d'inverser la polarité avec une seule tension d'alimentation, ce qui permet un **courant** bidirectionnel à travers la bobine sans rail de tension négatif.

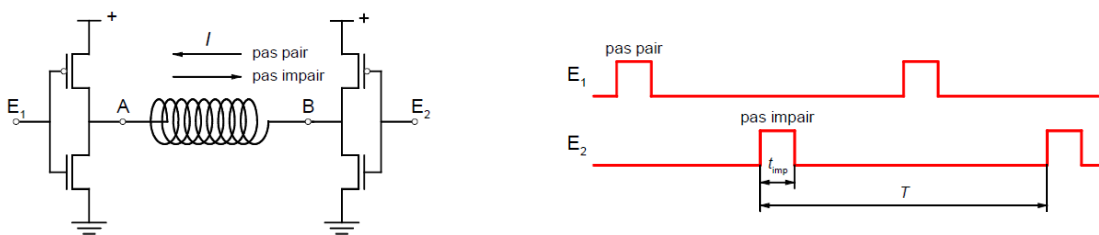


Figure 12 : A gauche : Pont en H et bobine de commande.

A droite : signal de sortie bipolaire.

Bobine

La bobine est fabriquée à partir d'un fil de cuivre long et fin, isolé par une couche de polyuréthane. Le fil est enroulé sur un noyau en fer doux (FeNi). Lorsque la bobine est alimentée, elle génère un champ magnétique qui fait avancer le rotor d'un pas (une demi-rotation). En outre, le mouvement du rotor induit également une tension dans la bobine, qui peut être utilisée par le circuit intégré de l'horloge pour détecter si le pas a été effectué correctement.

Paramètres		Valeur typique	Unité	Notes
Diamètre du fil	d	23	µm	
Longueur du fil	l	30.8	m	
Poids du cuivre		130	mg	
Nombre d'enroulements	N	6700		
Résistance à 20°C	R ₀	1280	Ω	La résistance varie avec la température $R_T = R_0[1 + \alpha(T - T_0)]$ R _T : résistance à la température T R ₀ : résistance à la température T ₀
Coefficient thermique	α	0.0038	K ⁻¹	
Inductance		1.4	H	

Noyau de la bobine

Le **noyau de la bobine** concentre et dirige le champ magnétique de la bobine vers le stator. Le noyau de la bobine est fabriqué en fer doux, car ce matériau peut répondre aux exigences.

Le matériau du noyau de la bobine doit avoir une faible résistance magnétique (R_m) et donc une perméabilité magnétique élevée (μ).

Pour que la bobine entière soit petite, le diamètre du noyau de la bobine est limité. Il en résulte une densité de flux magnétique très élevée. Le matériau doit la permettre sans que le noyau ne soit saturé magnétiquement.

Le champ magnétique de la bobine change de direction à chaque impulsion. Il en résulte une courbe d'hystérésis. La rémanence entraîne des pertes thermiques.

Stator

Le **stator** est également fabriqué en fer doux (FeNi). Il conduit efficacement le champ magnétique de la bobine vers le rotor. En outre, le stator détermine la position de repos du rotor et donc le sens de rotation.

La section du stator est nettement plus grande que celle de la bobine, ce qui réduit la densité de flux magnétique. Le risque de saturation magnétique est ainsi considérablement réduit.

Dans les conceptions actuelles, les stators sont généralement réalisés en une seule pièce, ce qui permet à la fois de réduire les coûts de fabrication et de simplifier le processus d'assemblage du moteur pas-à-pas, tout en garantissant une bonne reproductibilité industrielle.

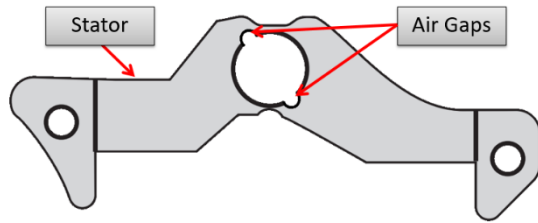


Illustration 13: Stator du moteur Lavet

Les points d'arrêt du rotor jouent un rôle essentiel dans le fonctionnement du moteur Lavet, et varient selon que la bobine d'excitation est alimentée ou non.

En l'absence de courant, le positionnement du rotor est principalement déterminé par la configuration des entrefers dans le circuit magnétique. Le rotor tend à s'orienter de manière à réduire l'angle entre ses pôles et la branche principale du stator, adoptant ainsi une position de repos stable correspondant à un minimum d'énergie magnétique. Cette propriété permet au rotor de rester naturellement aligné en l'absence d'impulsion, ce qui contribue à la précision et à la fiabilité du positionnement angulaire entre deux impulsions.

Rotor

Le **rotor** du moteur Lavet est constitué d'un aimant permanent fixé sur un pignon en acier (pinion), monté sur une broche (arbor) et un pivot assurant son guidage et sa rotation. Cette construction compacte permet une transmission directe du mouvement vers le rouage d'entraînement des aiguilles.

En l'absence d'excitation (entre deux impulsions électriques), le rotor s'aligne spontanément en fonction de la configuration des entrefers du stator, adoptant une position stable qui verrouille le rouage en maintenant les aiguilles en position.

Lors de l'activation du moteur, une impulsion électrique est envoyée dans la bobine, générant un champ magnétique transitoire. Ce champ modifie l'équilibre magnétique du système, provoquant une rotation du rotor d'un demi-tour. Ce mouvement est ensuite transmis mécaniquement au rouage de la montre par l'intermédiaire du pignon, entraînant ainsi l'avancement des aiguilles.

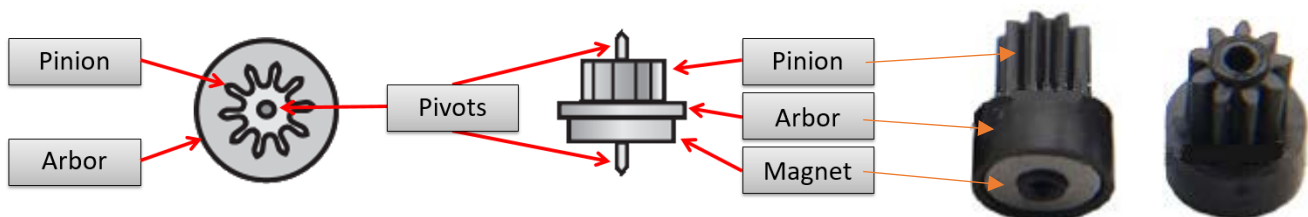


Illustration 14: Rotor du moteur Lavet

Le rotor est fabriqué dans un matériau magnétiquement dur, généralement du samarium-cobalt (SmCos). Contrairement au stator et à la bobine, le rotor doit rester magnétisé en permanence.

Pour cela, deux caractéristiques sont particulièrement importantes :

- une rémanence élevée B_r , donc l'aimantation restante après la suppression du champ magnétique,
- ainsi qu'une force coercitive élevée H_c , c'est-à-dire la résistance à la démagnétisation.

Ces propriétés permettent au rotor de rester magnétisé de manière fiable, même sous l'influence d'éléments extérieurs.

Circuit intégré (CI)

Fonctions du CI

Le circuit intégré de la montre contrôle un grand nombre de fonctions de la montre à quartz.

- Stimuler l'oscillation du quartz.
- Diviser la fréquence de l'oscillateur à quartz jusqu'à un signal de 1 Hz.
- Compensation d'un écart de la fréquence d'oscillation de l'oscillateur à quartz par rapport à la fréquence nominale par inhibition.
- Générer les impulsions du moteur.
- Vérification si les étapes ont été exécutées correctement et, le cas échéant, génération d'impulsions de correction.
- Vérification de la tension de la pile (EOL).
- Mode de fonctionnement sans impulsions du moteur pour un réglage précis du temps et comme mode d'économie d'énergie pendant le stockage.
- Mode de fonctionnement avec des impulsions moteur accélérées pour les tests.
- Eventuellement d'autres fonctions comme le chronographe, l'alarme, etc.

L'illustration suivante montre un circuit typique pour une montre à quartz analogique.

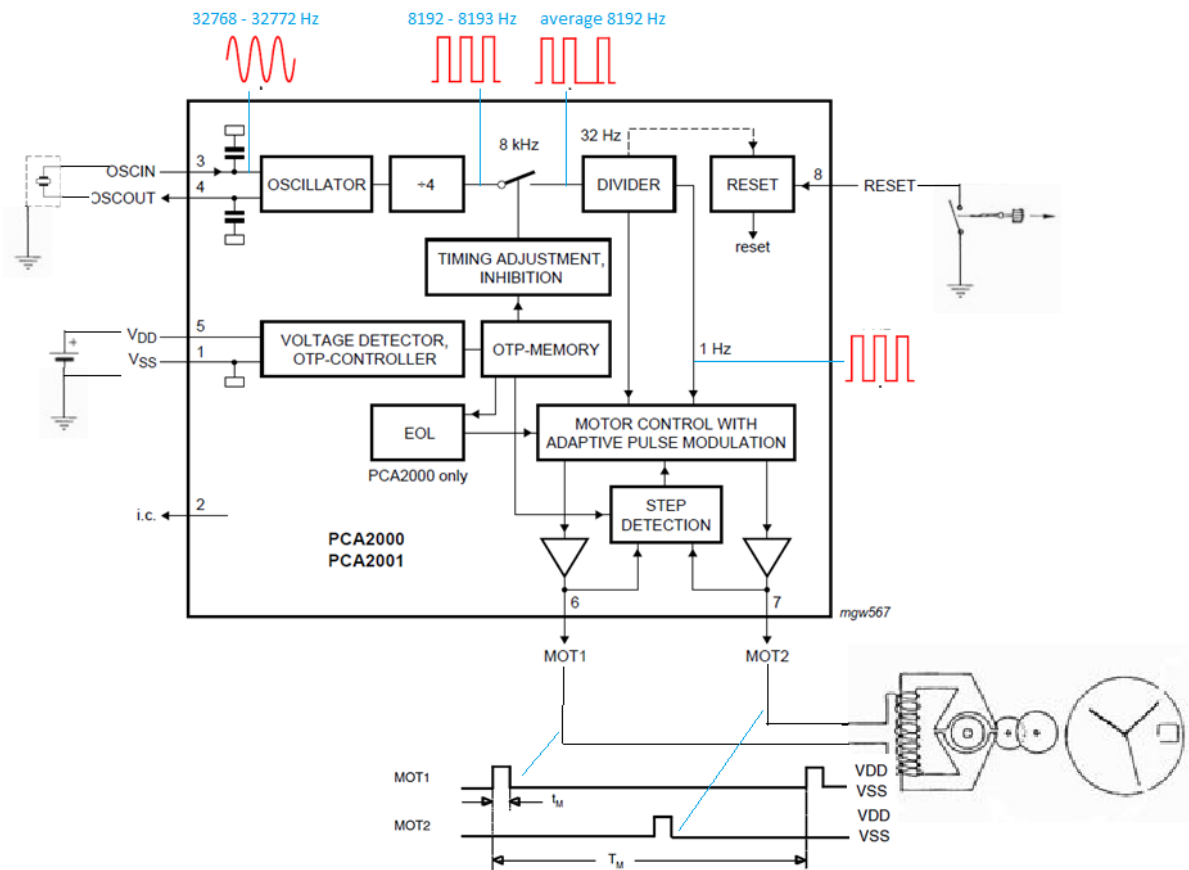


Illustration 15: Schéma de câblage du circuit intégré de l'horloge

Sur ce CI, les condensateurs de charge pour le quartz de l'horloge sont déjà intégrés et se trouvent sur les broches 3 et 4.

La fréquence du quartz de l'horloge est d'abord divisée par 4. La fréquence ainsi réduite peut soit être divisée davantage, soit être supprimée pendant un court moment - cette fonction est appelée **inhibition** et est traitée en détail dans la section "Inhibition".

Après un autre diviseur de fréquence, un signal de 1 Hz est envoyé au contrôleur du moteur. Dans la

mesure où aucun signal de réinitialisation n'est présent sur la broche 8, le contrôleur de moteur génère les impulsions sur les broches 6 et 7 et vérifie si l'étape a été correctement exécutée par le moteur de lave.

Indicateur de changement de pile (EOL)

La tension d'alimentation sur la broche 5 est surveillée en permanence. Si la tension tombe en dessous d'une certaine valeur, le contrôleur de moteur passe en **mode End-of-Life (EOL)**. Dans cet état, il génère 4 pas toutes les 4 secondes, ce qui fait que la trotteuse se déplace par sauts de 4 secondes.

Cela sert d'avertissement visuel pour le porteur de la montre lorsqu'un changement de pile est nécessaire.

Système de gestion du moteur (Asservissement)

Le couple nécessaire pour déplacer le rouage et les aiguilles varie, par exemple lors du changement de date, qui nécessite plus de force.

Les CI horlogers modernes disposent d'un **système de gestion du moteur (asservissement)** qui adapte les impulsions du moteur au couple nécessaire afin de minimiser la consommation de courant. Pour ce faire, le CI détecte si le rotor a effectué le pas.

Si les étapes sont effectuées correctement, le niveau d'énergie est abaissé après un certain temps (par exemple 4 minutes) afin de réduire la consommation d'énergie.

Si une étape échoue, une séquence de correction a lieu, qui compense l'étape manquée et augmente à nouveau le niveau d'énergie.

L'alimentation en courant est généralement régulée par un **rapport d'impulsions de hachage (asservissement)**, la durée totale de l'impulsion restant constante. Au cours de cette durée, le courant est modulé par une mise en marche et un arrêt rapide.

Le rapport entre l'état activé et l'état désactivé détermine l'**alimentation électrique**. Les valeurs habituelles se situent **entre 37,5 % et 100 %**, par **incréments de 6,25 %**.

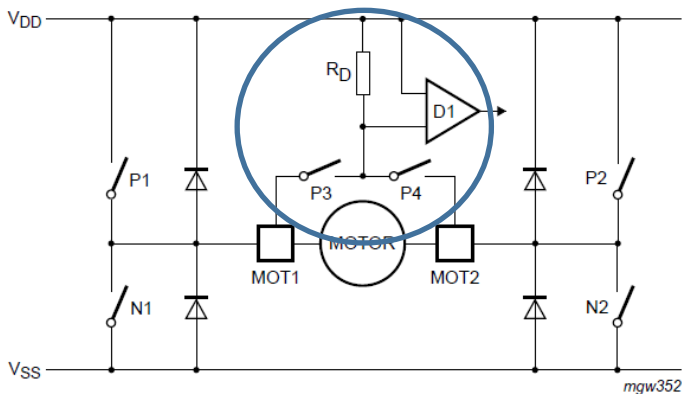


Figure 16: Circuit de reconnaissance des pas dans un circuit intégré d'horloge

Détection des pas

La **détection de pas** se fait après une impulsion du moteur et vérifie si le rotor a effectué correctement la demi-rotation ou s'il est retombé dans la position précédente.

L'impulsion du moteur est si courte que le rotor commence à tourner, mais ne termine pas sa rotation pendant la durée de l'impulsion. Ensuite, soit il continue à tourner (mouvement correct), soit il revient à sa position initiale (aucun pas exécuté).

Le rotor induit alors un courant dans la bobine qui génère, via une résistance, une tension mesurée par le circuit intégré de l'horloge (voir figure 16). Le test se déroule en quatre phases (voir figure 17). Après un court temps d'attente en phase 2, une tension induite de même polarité que l'impulsion du moteur est attendue en phase 3. Une tension inversée doit ensuite apparaître dans la phase 4. Si ces signaux ne sont pas détectés dans un délai de 31,25 ms, l'étape est considérée comme non exécutée.

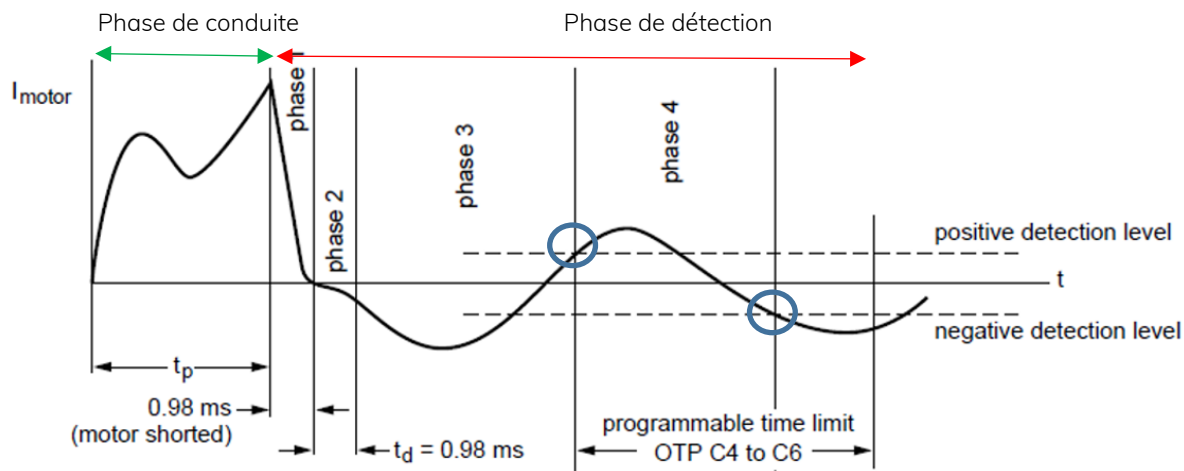


Figure 17: Courbe de courant pendant et juste après l'impulsion du moteur.

Séquence de correction

Si un pas moteur manqué est détecté, une séquence de correction est générée et le niveau d'énergie est augmenté. Pendant la séquence de correction, une impulsion courte d'une durée de 0,98 ms et de polarité inversée est d'abord générée, suivie d'une impulsion moteur au niveau d'énergie le plus élevé.

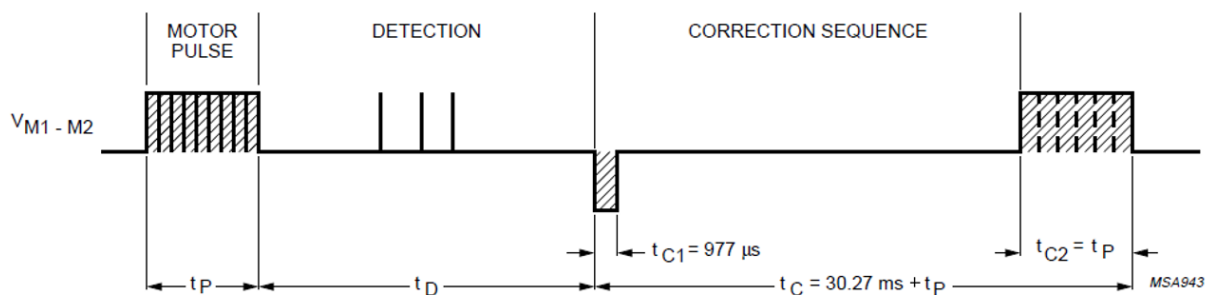


Illustration 18: Détection de l'impulsion du moteur et séquence de correction

Adaptation du niveau d'énergie

L'adaptation du niveau d'énergie commence à la valeur minimale programmée (par ex. Stage 1 = 56.25 %). Si un pas du moteur n'a pas été effectué correctement, le niveau d'énergie augmente d'un palier, ce qui correspond à une augmentation du rapport d'impulsion de hachage de 6.25 %.

Si le niveau le plus élevé est atteint (par exemple Stage 8 = 100 %), la reconnaissance des pas est désactivée.

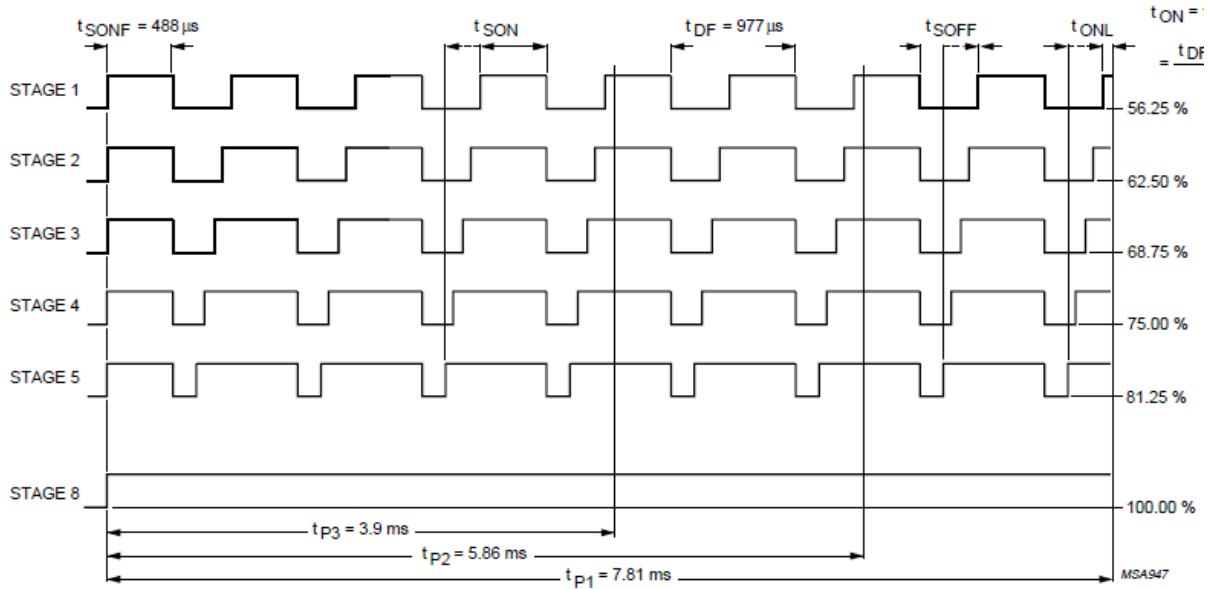


Figure 19: Représentation schématique du niveau d'énergie

Le niveau d'énergie reste constant pendant 4 ou 8 minutes, à condition que tous les pas du moteur soient effectués correctement. Ensuite, il est réduit d'un niveau et reste à ce niveau tant qu'aucune étape manquée n'est détectée.

Toutefois, si une étape manquée se produit, une séquence de correction est effectuée et le niveau d'énergie est augmenté d'un niveau.

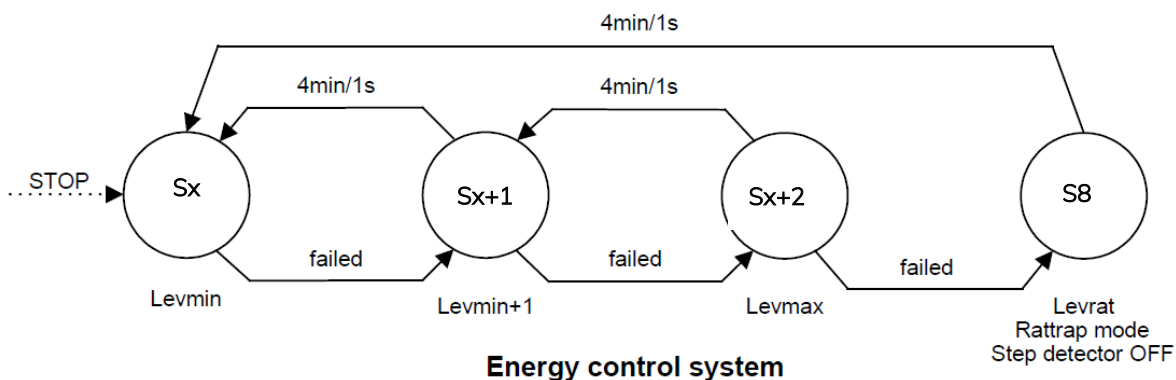


Figure 20: Organigramme de la gestion des niveaux d'énergie

Rouage

Le rouage d'une montre à quartz assure la transmission du mouvement généré par le moteur pas-à-pas de type Lavet vers les organes d'affichage, c'est-à-dire les aiguilles.

Il est composé d'un ensemble de roues dentées et de pignons, dont les rapports de transmission sont précisément calculés afin de convertir la fréquence de rotation du moteur en vitesses angulaires adaptées aux aiguilles des secondes, des minutes et des heures. Ce rouage constitue ainsi la chaîne cinématique qui transforme les impulsions discrètes du moteur en un affichage analogique continu et lisible..

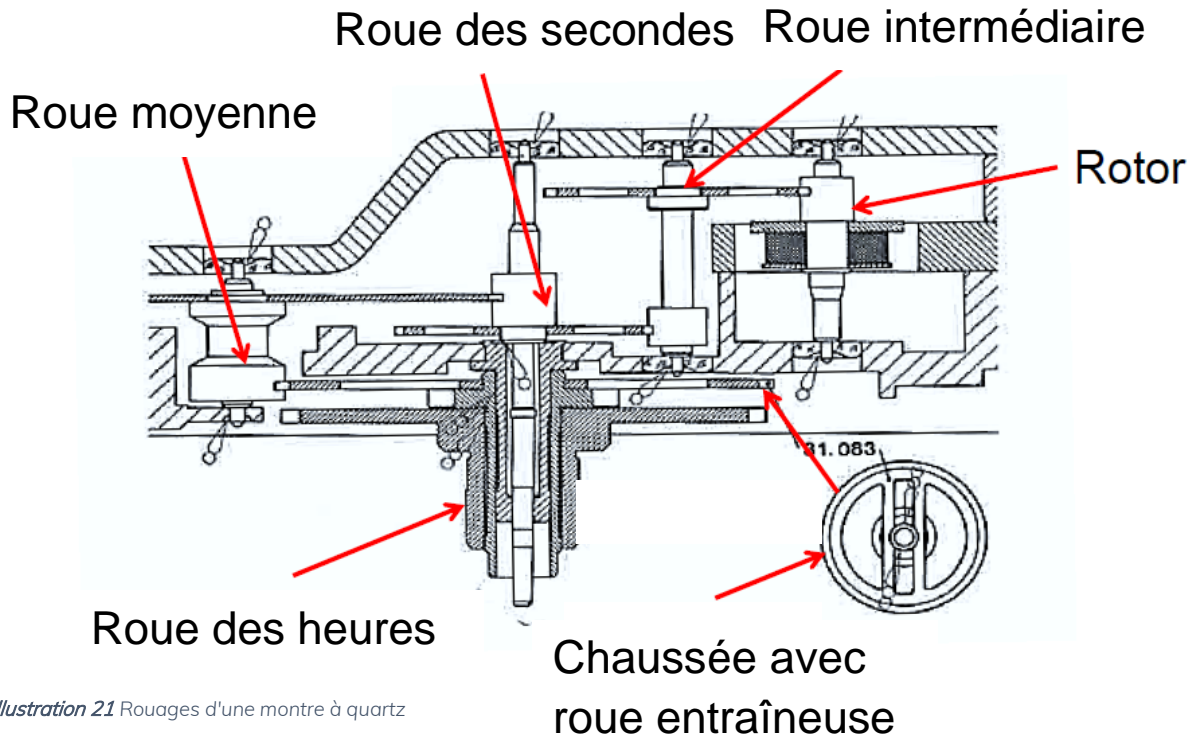


Illustration 21 Rouages d'une montre à quartz

Structure des rouages d'une montre à quartz :

- **Rotor du moteur Lavet** : effectue une rotation de 180° par impulsion, soit un demi-tour par seconde, correspondant à 30 rotations complètes par minute. Il constitue l'élément moteur de la chaîne cinématique.
- **Roue des secondes** : couplée directement ou indirectement (via une roue intermédiaire) au rotor, elle effectue une rotation complète toutes les 60 secondes, assurant ainsi l'entraînement de l'aiguille des secondes.
- **Roue des minutes** : reçoit le mouvement de la roue des secondes et le transforme en une rotation de $1/60$ de tour par minute, soit une rotation complète en une heure, pour entraîner l'aiguille des minutes.
- **Roue des heures** : introduit une réduction supplémentaire du rapport de transmission, permettant une rotation complète toutes les 12 heures, correspondant au déplacement de l'aiguille des heures.
- **Roues supplémentaires** : dans les montres à fonctions calendaires (date, jour de la semaine, etc.), des roues additionnelles sont intégrées au rouage principal pour assurer la commutation des affichages à intervalles réguliers, généralement via des systèmes de sautoir et de came.

Le rouage d'une montre à quartz est conçu de manière à réduire les frottements au minimum, afin de limiter la consommation d'énergie et de garantir un déplacement fluide et précis des aiguilles.

Dans les **mouvements dépourvus d'aiguille des secondes** (absence de trotteuse), le moteur Lavet fonctionne généralement à une fréquence d'excitation plus faible, dans le but d'optimiser l'autonomie. Dans ce cas, le moteur n'effectue qu'un pas par minute, ce qui provoque un saut visible de l'aiguille des minutes à chaque impulsion. Afin d'adoucir ce mouvement, certains mouvements adoptent une stratégie intermédiaire, avec un pas toutes les 20 secondes, ce qui répartit la rotation de l'aiguille en trois incréments par minute, améliorant ainsi le confort visuel.

Dans ce type d'architecture, le rapport de réduction entre le rotor du moteur Lavet et la roue des minutes est typiquement de 1:90, assurant la conversion correcte du rythme des impulsions en rotation horaire.

Montre à quartz numérique

Une montre digitale à quartz se compose des éléments principaux suivants :

- **Batterie** - sert de source d'énergie
- **Circuit intégré (CI)** - fait office de compteur et de pilote pour l'affichage
- **Quartz d'horlogerie** - il sert de référence temporelle, oscillant à une fréquence de 32 768 Hz. Cette fréquence standard permet une division binaire précise jusqu'à une impulsion par seconde, utilisée comme base de temps.
- **Affichage** - généralement un **écran à cristaux liquides (LCD)**, car il est peu gourmand en énergie et peut fonctionner avec de très faibles courants.

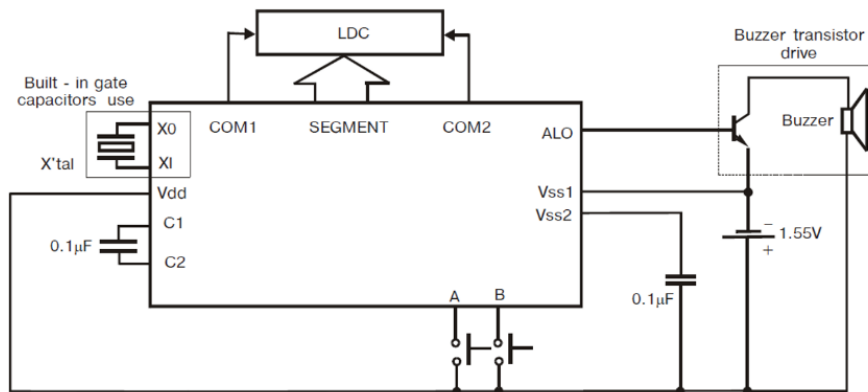


Figure 22 : Schéma de câblage d'une montre à quartz numérique



Figure 23 : A gauche : Représentation électronique des aiguilles. Au milieu : Affichage de l'heure avec des chiffres. A droite : combinaison de représentation par aiguilles et chiffres.

Les montres quartz numériques proposent généralement des fonctions supplémentaires :

- **Affichage de la date** (jour, mois, année, jour de la semaine)
- **Chronomètre** (de la milliseconde à l'heure)
- **Réveil** (plusieurs heures d'alarme possibles)
- **Rétroéclairage** (panneau EL ou LED)
- **Compte à rebours**
- **Deuxième fuseau horaire (Dual Time)**
- **Réception radio** pour la correction automatique de l'heure (pour les horloges radio-pilotées)
- **Fonctionnement à l'énergie solaire** pour prolonger la durée de vie des piles
- **Fonctions intelligentes** (connexion Bluetooth au smartphone, suivi de l'activité et de la santé, contrôle de la musique, etc.)

Circuit intégré (CI)

Un schéma de câblage du circuit intégré de l'horloge DS-A1369A-001 est donné dans Figure 24. La fréquence du quartz est ajustée à l'aide d'un condensateur ajustable.

2) Piezo or Speaker Drive Type:

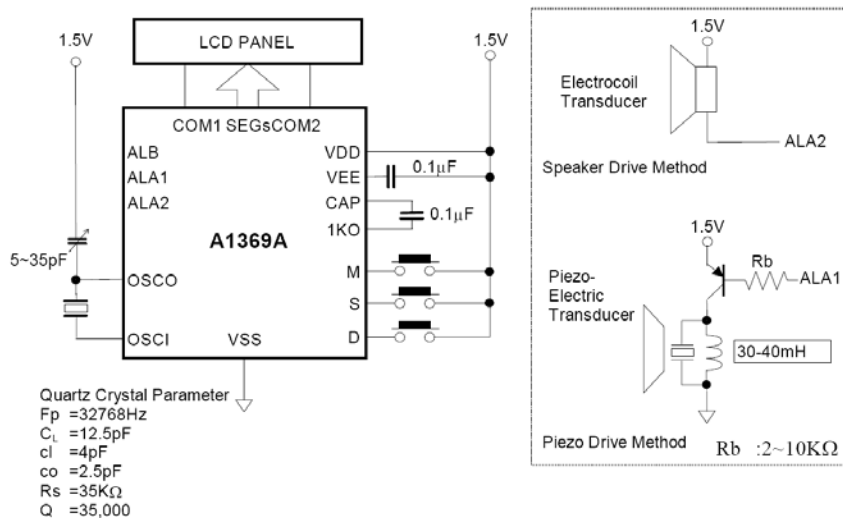


Figure 24 : Schéma d'une montre à quartz numérique.

Écran à cristaux liquides (LCD)

Les **écrans à cristaux liquides** (LCD) utilisés dans les montres numériques sont constitués de segments indépendants dont la transparence peut être contrôlée individuellement. Chaque segment peut ainsi laisser passer ou bloquer la lumière, permettant l'affichage sélectif de chiffres, symboles ou informations temporelles. En l'absence de rétroéclairage, la lisibilité repose sur la réflexion de la lumière ambiante par une couche réfléchissante située à l'arrière de l'écran.

Chaque segment est composé de deux filtres polarisants croisés, disposés à 90° , entre lesquels se trouve une couche de cristaux liquides. Le comportement optique de cette couche varie en fonction de la tension électrique appliquée.

Dans la configuration la plus simple, dite Twisted Nematic (TN), les molécules de cristaux liquides sont naturellement organisées en structure hélicoïdale en l'absence de tension. Cette hélice fait pivoter la polarisation de la lumière issue du premier filtre de 90° , permettant ainsi à la lumière de traverser également le second filtre. Dans cet état, le segment apparaît clair.

Lorsqu'une tension est appliquée, les molécules de cristaux liquides s'alignent selon le champ électrique, supprimant la torsion. La lumière conserve alors son axe de polarisation initial et est bloquée par le second filtre : le segment apparaît foncé.

Pour éviter les effets d'électrolyse susceptibles de détériorer la couche active, les écrans LCD sont alimentés par une tension alternative. Celle-ci est généralement synchronisée avec la fréquence du quartz de la montre. Ainsi, la mesure de la fréquence d'excitation de l'écran LCD permet, dans de nombreux cas, de déterminer la fréquence réelle du quartz, et donc d'en évaluer l'écart de marche.

Retouche

Après l'assemblage du mouvement, une étape de réglage est effectuée afin d'assurer une précision de marche optimale. Cette opération s'effectue en deux temps : dans un premier temps, la fréquence d'oscillation du quartz est mesurée et comparée à une référence temporelle étalon ; dans un second temps, une correction est appliquée pour compenser l'éventuel écart constaté.

Il existe principalement deux méthodes de correction :

Correction par ajustement capacitif (adaptation directe de la fréquence)

Dans cette approche, on agit directement sur la fréquence propre du résonateur à quartz en modifiant la charge capacitive à ses bornes. Cela peut être réalisé :

- soit par l'ajout d'un **condensateur trimmer** variable, permettant un réglage fin,
- soit par le choix de condensateurs fixes sélectionnés pour atteindre la valeur de fréquence souhaitée.

Compensation électronique par **inhibition**

Dans cette méthode, la fréquence du quartz reste inchangée, mais le circuit intégré (CI) applique une correction numérique. Celle-ci consiste à omettre périodiquement un certain nombre de cycles d'oscillation — un procédé appelé inhibition. Cela permet d'ajuster la fréquence effective utilisée pour la division de temps, sans altérer le résonateur.

D'autres méthodes existent également, comme la programmation d'une valeur initiale dans le compteur du CI, influençant le point de départ du comptage. Toutefois, ces techniques sont moins répandues dans les applications horlogères courantes et ne seront pas traitées ici en détail.

Condensateur variable

Un condensateur variable peut être placé en série ou en parallèle sur l'un des électrodes du quartz oscillant. En ajustant sa valeur de capacité, il est possible de modifier la charge capacitive vue par le quartz, ce qui entraîne une variation fine de sa fréquence d'oscillation.

Cette méthode de réglage permet généralement une correction de marche dans une plage d'environ $\pm 2,5$ secondes par jour.

Toutefois, à long terme, la valeur de ce condensateur variable n'est pas stable, ce qui peut entraîner un écart de marche dû au vieillissement de la montre. Un réglage peut être effectué à tout moment par un centre de service ou un horloger qualifié afin de rétablir la précision.

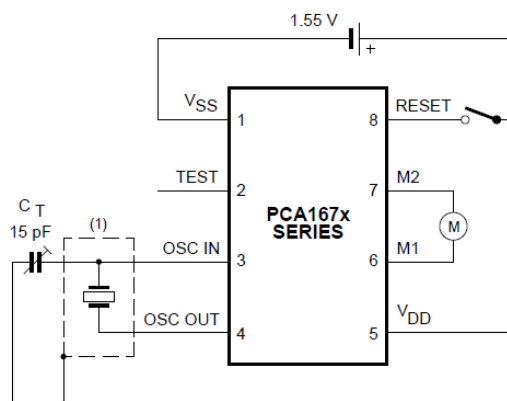


Figure 25: A gauche : Image d'un condensateur variable sur un mouvement. A droite : schéma fonctionnel d'une montre à quartz analogique avec condensateur variable.

Condensateurs fixes

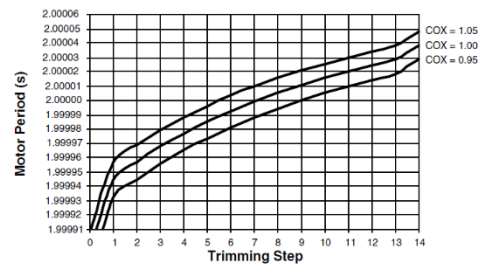
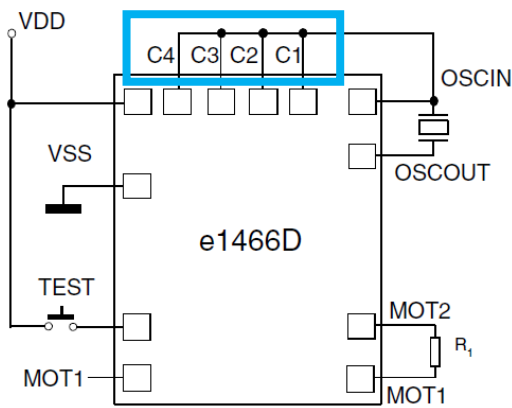
En alternative au condensateur variable, il est possible d'utiliser un condensateur fixe pour ajuster la fréquence d'oscillation du quartz. Bien que cette approche rende tout réglage ultérieur plus complexe lors d'éventuelles opérations de maintenance, elle présente l'avantage d'une meilleure stabilité à long terme, notamment en termes de dérive capacitive et de robustesse mécanique.

Dans le contexte de la production industrielle en série, un réglage individuel pour chaque mouvement serait trop coûteux. C'est pourquoi on utilise fréquemment un réseau de condensateurs fixes, typiquement constitué de quatre condensateurs à valeurs échelonnées. En usine, la connexion entre le quartz et les condensateurs peut être activée ou désactivée :

- soit par suppression de piste au laser,
- soit par création de ponts de soudure.

Cette configuration permet de sélectionner 16 niveaux de fréquence (2^4 combinaisons possibles), offrant ainsi une plage de réglage discrète mais suffisante pour compenser les variations de fréquence liées aux tolérances de fabrication du quartz. Elle permet également d'automatiser le processus de réglage, ce qui représente un gain significatif en termes de productivité.

Par ailleurs, l'emploi de condensateurs céramiques thermiquement compensés, permet de corriger partiellement les dérives de fréquence dues à la température. Ce type de composant améliore la stabilité de marche de la montre sur une plage de température étendue, contribuant ainsi à une précision accrue en conditions réelles d'utilisation.



COX means frequency deviation due to production process variations.
 Trimming inputs C1 ... C4 are binary weighted, i.e.,
 C1 ... C4 = 0 corresponds to trimming step 0
 C1 ... C4 = 1 corresponds to trimming step 15
 LSB = C1



Figure 26: Image du circuit imprimé avec le CI de l'horloge et l'équilibrage par la mise en circuit de condensateurs fixes intégrés par des ponts de soudure.

Inhibition

Plutôt que d'agir directement sur la fréquence d'oscillation du quartz, il est également possible de conserver cette fréquence inchangée et de procéder à une compensation électronique dans le circuit intégré (CI) de l'horloge.

La méthode la plus répandue consiste à utiliser un quartz dont la fréquence est légèrement supérieure à 32 768 Hz, typiquement entre 32 768 Hz et 32 771 Hz. Pour corriger l'avance de marche induite par cette fréquence majorée, le CI supprime périodiquement un nombre programmable d'oscillations avant leur transmission au diviseur de fréquence. Cette technique est appelée inhibition.

La figure 27 illustre les blocs fonctionnels de l'entrée de fréquence, incluant un commutateur d'inhibition positionné en général à une fréquence intermédiaire d'environ 8 kHz.

Les fiches techniques des circuits intégrés spécifient si la fréquence d'entrée est préalablement divisée avant l'inhibition, ainsi que le facteur de division éventuellement appliqué. La périodicité de la correction dépend elle aussi du circuit utilisé, avec des valeurs typiques de 60 ou 120 secondes, bien que d'autres intervalles soient possibles selon les architectures.

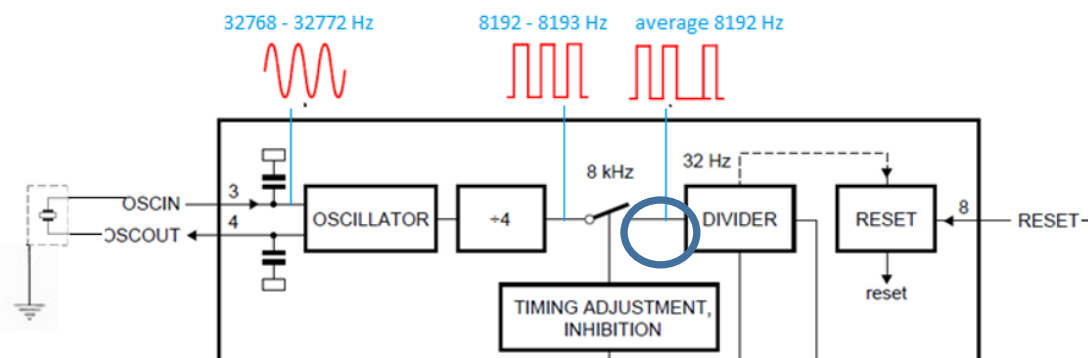


Figure 27: Blocs fonctionnels dans le circuit intégré de l'horloge à l'entrée de la fréquence d'oscillation

Le CI horloger PCA2000 est pris comme exemple pour le calcul de la compensation. Des condensateurs de 5,2 pF sont connectés au quartz de l'horloge, ce qui est inférieur à la capacité de charge (CL) spécifiée de 8,2 pF.

Grâce à cette capacité de charge plus faible, le quartz oscille environ 60 ppm plus rapidement, ce qui correspond à un écart de marche d'environ 5,18 secondes par jour (par rapport à la fréquence nominale de 32 768 Hz).

Avant l'équilibrage, l'écart de fréquence réel est mesuré individuellement. La fréquence trop élevée est ensuite compensée par une suppression périodique de certaines oscillations (inhibition) dans le CI.

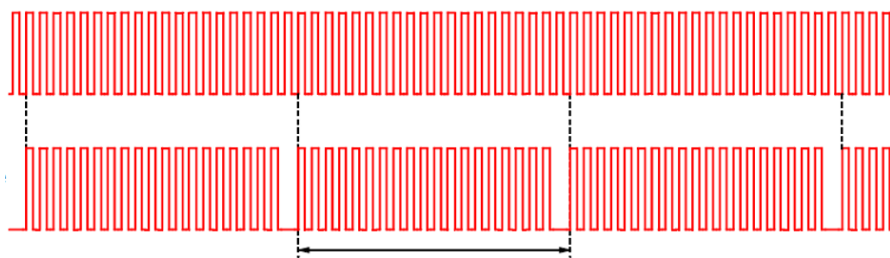


Figure 28: Représentation de la fréquence de 8 kHz avant et après inhibition

Si l'inhibition est effectuée une fois par minute, chaque oscillation éliminée entraîne un ralentissement de

$$\varepsilon_1 = \frac{1}{F_p \cdot T_p}$$

avec F_p comme fréquence avant l'inhibition et T_p comme durée entre deux inhibitions.
 A titre d'exemple, $F_p = 8192$ Hz et $T_p = 60$ s donnent un ralentissement de

$$\varepsilon_1 = \frac{1}{F_p \cdot T_p} = \frac{1}{8192 \cdot 60} = 2.03 \cdot 10^{-6} = 2.03 \text{ ppm} \rightarrow 0.176 \text{ s/d}$$

Une suppression de N oscillations donc de

$$\varepsilon_N = N \cdot \varepsilon_1 = \frac{N}{F_p \cdot T_p}$$

Ces informations sont également documentées dans la fiche technique du PCA2000, comme le montre la figure 29.

Table 4. Time calibration

Calibration period	Correction per step (n = 1)		Correction per step (n = 127)	
	ppm	seconds per day	ppm	seconds per day
1 minute	2.03	0.176	258	22.3
2 minutes	1.017	0.088	129	11.15

Table 5. Words and bits

Word	Bit							
	1	2	3	4	5	6	7	8
A	number of 8 192 Hz pulses to be removed							calibration period

Bit	Value	Description
Inhibition time		
1 to 7	-	adjust the number of the 8 192 Hz pulses to be removed; bit 1 is the MSB and bit 7 is the LSB
Calibration period		
8	0	1 minute
	1	2 minutes

Figure 29: Description du registre pour le réglage de l'inhibition dans la fiche technique PCA2000.

A l'aide de cet exemple, nous allons maintenant calculer la valeur de correction qui sera écrite dans le registre A. On suppose que l'écart de fréquence mesuré du quartz est de $R_s = 5,18$ s/d et que l'écart souhaité à température ambiante est de $R_t = 0,2$ s/d.
 Comme mentionné dans la section consacrée au quartz de montre, une marche légèrement positive est souvent recherchée afin de compenser l'influence de la température au poignet.

Avec une inhibition toutes les minutes, le nombre d'oscillations à supprimer est calculé avec

$$N = \frac{R_s - R_t}{\varepsilon_1} = \frac{5.18 \text{ s/d} - 0.20 \text{ s/d}}{0.176 \text{ s/d}} = 28.295.$$

L'entier suivant est 28, écrit dans le registre. La marche après le réglage est donc

$$R_r = R_s - (n \cdot \varepsilon_1) = 5.18 - (28 \cdot 0.176) = 0.252 \text{ s/d}.$$

La correction peut être effectuée soit avec les **appareils de programmation du fabricant** du mouvement, soit à l'aide d'un **Witschi Analyzer Q2** ou d'un **QuartzMaster® QC**.

Mesures et essais

Le chapitre suivant décrit en détail les méthodes d'essai les plus courantes.

Batterie tension

Dans le cas des piles bouton utilisées en horlogerie, la tension reste relativement constante pendant la majeure partie de leur durée de vie, pour ne chuter de manière significative que peu de temps avant leur décharge complète. Ainsi, une simple mesure de la tension à vide, ou même sous charge, ne permet que de déterminer si la pile est encore fonctionnelle ou déjà épuisée, mais ne fournit aucune indication fiable sur la capacité résiduelle.

Pour une évaluation plus réaliste, la pile peut être testée sous charge, en la connectant à une résistance définie. Ce test permet de vérifier si la pile est encore capable de fournir le courant nécessaire au fonctionnement du mouvement sans que la tension ne chute en dessous des seuils admissibles.

Lors de chaque contrôle, il est également recommandé de vérifier l'étanchéité de la pile. La présence de résidus cristallins (sels) au niveau du joint d'étanchéité peut indiquer une fuite d'électrolyte. Dans un tel cas, la pile doit être immédiatement remplacée, même si sa tension semble suffisante, afin d'éviter toute corrosion ou détérioration du mouvement.

Pour effectuer la mesure :

- la borne positive est appliquée sur la surface de contact supérieure de la pile,
- la borne négative (généralement reliée à l'étrier noir de l'appareil) est placée sur la surface inférieure,

selon les appareils de test, il est possible de sélectionner différentes valeurs de charge, afin de simuler le courant de fonctionnement réel et d'évaluer l'état de la pile de manière plus représentative.

Désignation	Dernier	Signification
Pas de charge (B0)	2 MΩ	Simule la charge du CI du mouvement (presque sans consommation d'énergie)
Drain bas (BL)	2 kΩ	Simule la charge du moteur pas à pas
High Drain (BH)	100 Ω	Simule une forte consommation d'énergie, comme pour l'éclairage ou la fonction de réveil

Lors du test "Low Drain", une charge de 2 kΩ est activée chaque seconde pendant 10 ms et la tension est mesurée - soit en permanence, soit pendant 5 secondes.

Lors du test "High Drain", une charge de 100 Ω est connectée une fois pendant 500 ms (pour l'Analyzer Q1 : 1000 ms) afin de vérifier la tension sous une charge élevée.



Figure 30: Mesure de la tension de la batterie sans charge, à faible charge et à charge élevée.

Comme la procédure ne permet pas de se prononcer sur la capacité restante, il est recommandé de remplacer la batterie à titre préventif lors de chaque entretien.

Pour déterminer si une batterie est complètement déchargée, certaines valeurs limites de tension s'appliquent.

Type de batterie	Dernier	Batterie déchargée	Batterie bonne
Oxyde d'argent	Pas de charge	< 1.4 V	1.45 à 1.6 V
	Drain bas	< 1.4 V	1.45 à 1.6 V
	High Drain	< 1.2 V	>1.25 V
Alcaline (grandes horloges)	Drain élevé	< 1.2 V	1,4 à 1,6 V
Lithium [1]	Pas de charge	< 2.8 V	2.9 à 3.2 V
	Drain faible	< 2.8 V	2.9 à 3.2 V

[1] Pour les batteries au lithium, il existe une multitude de technologies avec des tensions et des valeurs limites différentes.

Courant Enregistrement

La consommation électrique d'une montre à quartz est un critère de qualité important, car elle influence directement la durée de vie de la pile.

- Courant du **circuit intégré (CI)** : dans les montres à quartz analogiques, un courant faible est consommé en permanence par le CI.
- **Courant total (CT)** : lors des impulsions du moteur, une consommation nettement plus élevée s'ajoute brièvement. Le courant total correspond à la somme du courant du CI et du courant du moteur.

Les appareils de mesure Witschi détectent cette consommation par une mesure intégrative, ce qui permet d'afficher le courant total moyen sur la durée de la mesure.

Les appareils modernes permettent de distinguer automatiquement le courant du CI et le courant total pendant le fonctionnement, et d'afficher les deux valeurs simultanément.

Sur de nombreuses montres, il est possible d'activer un mode d'économie d'énergie en tirant sur la tige de réglage. Dans ce mode, le moteur ne fonctionne plus, mais le CI reste actif, ce qui permet de contrôler le courant du CI uniquement.

Pour l'évaluation, les tolérances spécifiées par le fabricant font foi.

Valeurs typiques de courant total (CT) pour les montres à quartz analogiques :

- avec affichage des secondes : env. **0,7 – 1,2 µA**
- avec période d'impulsion plus longue (sans trotteuse) : env. **0,5 – 0,7 µA**

Ces valeurs servent de référence pour une consommation normale. Une augmentation notable peut indiquer des défauts mécaniques ou électroniques, tels que :

- un rouage qui offre trop de résistance,
- des aiguilles qui se touchent,
- une bobine dont l'isolation est défectueuse, provoquant des pertes de puissance.

Dans ces cas, une recherche ciblée des causes est recommandée, afin de réduire la consommation et d'éviter une décharge prématurée de la pile.



Figure 31 : Consommation de courant d'une montre quartz. Courant total (CT) et courant du circuit intégré (CI)

Tension de fonctionnement minimale

La tension minimale de fonctionnement (TM) constitue un paramètre clé permettant d'évaluer la réserve de force résiduelle d'un mouvement à quartz, ainsi que sa capacité à fonctionner en condition de tension dégradée, typique d'une pile fortement déchargée ou fraîchement installée mais instable.

Pour déterminer cette valeur, la tension d'alimentation du mouvement est réduite progressivement à l'aide d'un appareil de test tout en observant le comportement des aiguilles, généralement à l'aide d'un miroir de contrôle permettant de détecter toute interruption de rotation. Dès que le mouvement s'arrête, la tension est augmentée lentement jusqu'à ce que le moteur pas-à-pas redémarre. La tension à laquelle la montre redémarre est alors considérée comme la tension minimale de fonctionnement.

En pratique, il est souvent suffisant de vérifier si le mouvement fonctionne correctement à une tension de service réduite, sans descendre jusqu'au point de coupure. Pour les montres alimentées par des piles bouton à l'oxyde d'argent, la valeur typique de TM se situe aux alentours de 1,2 volt, bien que cette valeur puisse varier selon l'architecture du circuit intégré et la charge mécanique du rouage.

Tension EOL

En abaissant progressivement la tension d'alimentation, il est possible de tester la présence et le bon fonctionnement de la **fonction EOL (End of Life)**, présente sur de nombreux mouvements à quartz modernes.

Lorsque la tension de la pile descend en dessous d'un seuil défini — généralement autour de 1,25 V — le circuit intégré déclenche une séquence spécifique d'entraînement moteur : le moteur pas-à-pas **effectue quatre pas toutes les quatre secondes**, ce qui provoque un avancement de l'aiguille des secondes par sauts de 4 secondes. Ce comportement constitue une indication visuelle explicite pour l'utilisateur qu'un remplacement de la pile est imminent.

Il convient de noter que la fonction EOL ne réagit pas immédiatement à une variation soudaine de la tension, car le CI ne contrôle la tension qu'à des intervalles périodiques, souvent une fois par minute dans les configurations standard.

Certains circuits intégrés horlogers récents sont toutefois dotés d'un mode de test accéléré, activable en phase de contrôle, dans lequel la fréquence de vérification de la tension est significativement augmentée. Ce mode permet une validation rapide de la fonction EOL, en rendant le mouvement réactif en temps réel à toute baisse sous le seuil critique, par exemple via une augmentation instantanée de la fréquence des pas moteur lorsque la tension chute sous le niveau EOL.

Écart de marche

L'écart de marche exprime la différence temporelle entre la progression réelle d'une montre et une référence temporelle de haute précision. Il permet de déterminer si la montre est en avance ou en retard par rapport au temps étalon.

Pour ce faire, les intervalles entre impulsions moteur (ou autres signaux temporels caractéristiques) sont comparés à une durée de référence stable, fournie dans les appareils de mesure Witschi par des oscillateurs à quartz thermorégulés :

- OCXO (Oven Controlled Crystal Oscillator),
- ou TCXO (Temperature Compensated Crystal Oscillator).

Les instruments affichent généralement deux types d'écarts de marche :

- Écart de marche moteur (RM) :
Intégré sur toute la durée de la mesure, il prend en compte les pas réellement effectués par le moteur pas-à-pas. C'est ce paramètre qui reflète la marche effective de la montre, telle qu'observée par l'utilisateur.
- Écart de marche quartz (RQ) :
Ce paramètre mesure l'écart théorique de fréquence du quartz, en ignorant les cycles d'inhibition imposés par le circuit intégré. Il reflète donc la fréquence brute du résonateur, sans tenir compte des ajustements numériques.

Pour une mesure significative, la durée de mesure doit respecter certaines conditions :

- sur les montres à quartz analogiques, elle doit être un multiple entier de la période de pas du moteur (souvent 1 seconde),
- pour les mouvements équipés de correction par inhibition, la durée de mesure doit être un multiple de la période d'inhibition, afin d'obtenir une moyenne représentative et éviter les artefacts dus à la fenêtre de mesure.

Montres avec réglage de l'inhibition

Dans les mouvements à quartz avec correction par inhibition, la fréquence du résonateur n'est pas ajustée mécaniquement, mais est volontairement légèrement supérieure à la fréquence nominale attendue par le circuit intégré — généralement avec une avance initiale de +0,5 à +10 secondes par jour.

Pour compenser cette avance, le circuit effectue une suppression périodique de cycles d'oscillation dans le diviseur de fréquence. Ce procédé est appelé inhibition.

Les périodes d'inhibition varient selon les mouvements :

- 60 s ou 10 s dans les cas standard,
- Jusqu'à 120 s ou davantage (par exemple 480 s, 960 s) pour les mouvements dits "de haute précision".

Pendant chaque période sans inhibition, la montre avance légèrement en raison de la fréquence excédentaire du quartz. Lors de la fenêtre d'inhibition, un nombre défini d'impulsions est omis, provoquant un retard abrupt. Sur la période complète, l'avance et le retard se compensent pour assurer une marche corrigée.

Il est donc crucial, lors des mesures de marche, d'adapter la durée de mesure à la période d'inhibition. Une durée trop courte (par exemple 60 s) peut conduire à des variations cycliques dans les résultats, selon le moment où la fenêtre de mesure est lancée. Ainsi, si l'on observe des alternances régulières entre écart positif et négatif sur des mesures successives de 60 secondes, cela indique très probablement un mouvement à inhibition active. Dans ce cas, il est recommandé d'augmenter la durée de mesure de façon à englober un ou plusieurs cycles d'inhibition complets, afin d'obtenir un résultat fiable et représentatif de la marche réelle.

Influence de la température

L'écart de marche des montres quartz dépend de la température de la montre. Il est donc important que la montre soit à la température ambiante normale (~ 23°C) lors de la mesure. Les mesures comparatives doivent être effectuées à la même température.

La précision de mesure du QuartzMaster® n'est pas influencée par les variations de la température ambiante.

Valeurs typiques de l'écart de marche

Pour les montres avec réglage de l'inhibition, le réglage s'effectue généralement par pas de 0,18 s/d (pour certaines montres également 0,09 s/d ou 0,36 s/d). Le réglage est généralement effectué de manière que l'écart de marche soit le plus proche possible de 0 mais dans la zone positive.

L'écart dû au vieillissement du quartz et l'écart de température s'ajoutent à l'écart initial.

On peut donc s'attendre à un écart de marche compris **entre -0,1 s/d et +0,3 s/d** pour les montres quartz de qualité moyenne.

Les indications du fabricant sont contraignantes pour les écarts maximaux admissibles.

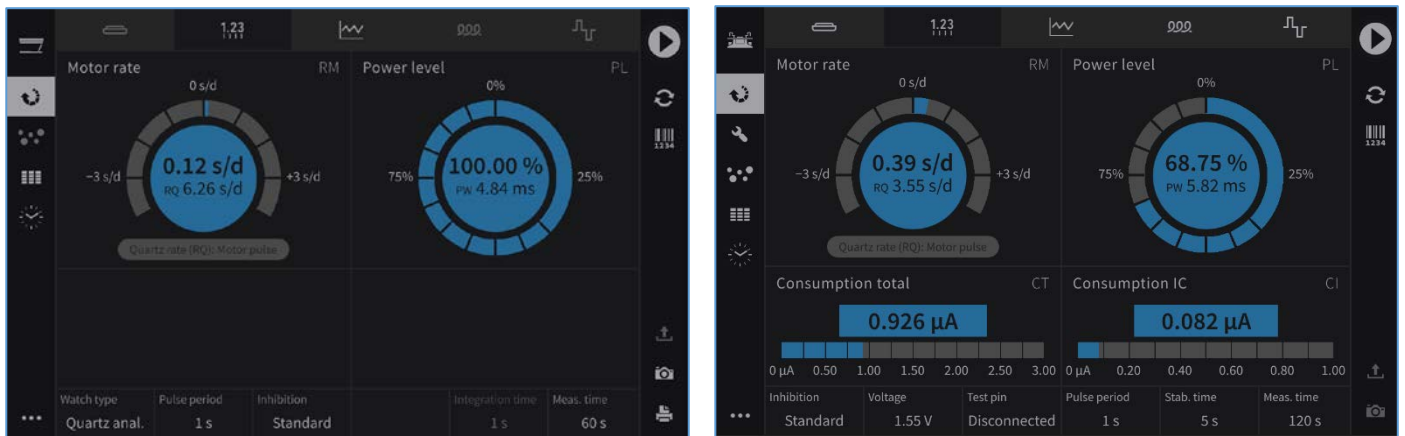


Figure 32: Mesure de l'écart de marche du moteur (RM), de l'écart de marche du quartz (RQ), de l'asservissement (PL) et de la durée d'impulsion (PW). À gauche : Avec QuartzSensor/Terminal via un capteur inductif/capacitif. À droite : Avec QuartzMaster® /Terminal via la mesure de courant.

Écart de marche Quartz

La mesure de la fréquence du résonateur à quartz s'effectue en détectant les variations périodiques de la consommation de courant à environ 32 768 Hz. Cette méthode permet de déterminer la fréquence même sur les mouvements sans impulsions moteur.

Pour les montres dont la marche est ajustée par compensation capacitive, la fréquence du quartz mesurée permet de déduire directement l'écart de marche. En revanche, dans les mouvements corrigés par inhibition, la fréquence mesurée du quartz ne reflète pas la marche effective, car la correction s'effectue par suppression périodique d'oscillations dans le diviseur de fréquence.

La fréquence du quartz peut être mesurée soit de manière capacitive, par détection du champ électrique du résonateur, soit de manière acoustique, en détectant les ondes ultrasonores générées par l'oscillation.

Dans les mouvements à correction par inhibition, la fréquence du quartz n'est pas directement ajustée et se situe généralement au-dessus de +1 s/jour. Dans ce cas, la fréquence est mesurée à l'aide d'une sonde adaptée. La détermination indirecte de la marche, basée sur l'analyse des impulsions moteur sans prise en compte de l'inhibition, est traitée dans le chapitre relatif à l'écart de marche.

Durée d'impulsion

Lors de la mesure des impulsions de courant du moteur pas à pas, il est possible d'analyser non seulement l'écart de marche, mais aussi les impulsions du moteur. Des informations sur la **durée de l'impulsion (PW)** et l'**asservissement (PL)** sont alors déterminées. La durée d'impulsion décrit la longueur de l'impulsion du moteur et est en général déjà définie en usine.

Asservissement

Deux types d'impulsions de commande moteur sont utilisés dans les mouvements à quartz analogiques :

- **Impulsion fixe** : la tension de la pile est appliquée de manière continue aux bornes de la bobine du moteur pas-à-pas pendant toute la durée de l'impulsion.
- **Impulsion asservie** : la tension appliquée à la bobine est rapidement commutée à une fréquence fixe (généralement 1 kHz) durant la période d'excitation. Cette modulation permet un pilotage optimisé du couple moteur.

Dans le cas d'une impulsion asservie, l'énergie transmise à la bobine du moteur pas-à-pas peut être ajustée par le rapport cyclique entre la durée d'activation (enclenchement) et la durée d'extinction (relâchement) du signal, autrement dit par le taux de hachage (duty cycle). Cette modulation permet d'adapter finement la consommation énergétique en fonction des besoins réels du mouvement.

Dans les mouvements à impulsion motorisée adaptative, le système électronique détermine automatiquement l'énergie minimale requise pour garantir une exécution fiable du pas moteur. Le taux de hachage (souvent désigné sous le nom de Power Level) — et dans certains cas la durée totale de l'impulsion — peuvent alors être ajustés par paliers successifs, en fonction des conditions de fonctionnement. Cette adaptation dynamique est directement mesurable via le courant total consommé.

Ces mouvements sont également équipés d'un contrôle de pas, qui permet de vérifier si le rotor a bien effectué sa rotation. En cas d'échec de pas, une deuxième impulsion, cette fois à énergie maximale (impulsion fixe), est envoyée pour compenser.

Pendant le fonctionnement normal, l'asservissement est réduit progressivement, par exemple toutes les 4 minutes, tant que le moteur accomplit correctement ses pas. Si un faux pas est détecté, le circuit augmente automatiquement le niveau de puissance afin de garantir la stabilité du fonctionnement moteur.

Une mesure ponctuelle du niveau d'asservissement donne ainsi des informations utiles sur l'état mécanique global du mouvement.

- L'augmentation de la consommation d'énergie peut être causée par :
- des secousses ou chocs,
- un changement de date (forte charge mécanique),
- une baisse de la tension d'alimentation,
- ou encore des résistances anormales dans le rouage (friction excessive, grippage, etc.).

Après une telle perturbation, il faut parfois attendre plusieurs minutes avant que le système d'asservissement ne revienne à son niveau initial, une fois le retour à la stabilité confirmé.



Illustration 33: Mesure de la durée d'impulsion (PW) et de l'asservissement (PL)

Forme de l'impulsion du moteur

La **forme d'impulsion** représente l'évolution temporelle du courant absorbé par la bobine du moteur pas-à-pas durant une impulsion. Elle constitue un indicateur précieux de l'état fonctionnel du mouvement.

Dans un mouvement fonctionnant normalement, le courant augmente progressivement au début de l'impulsion, atteint un pic, puis diminue légèrement avant de remonter en fin d'impulsion, traduisant le comportement dynamique attendu lors du déplacement du rotor.

En cas de blocage mécanique dû à un rouage dur, un grippage, ou des aiguilles bloquées le courant augmente de manière continue jusqu'à sa valeur maximale, puis reste constant jusqu'à la fin de l'impulsion. Cette courbe plate indique une résistance anormale au déplacement.

Une asymétrie marquée entre l'impulsion positive et l'impulsion négative, en fonctionnement normal, est souvent le signe d'un déséquilibre magnétique ou d'un défaut de la bobine du moteur pas-à-pas (par exemple, une rupture partielle d'enroulement ou un champ magnétique perturbé).

Chaque impulsion moteur est enregistrée individuellement et représentée sous forme d'oscillogramme, où les impulsions de polarité positive et négative apparaissent en alternance. Cette représentation permet une analyse fine de la forme des impulsions et facilite une recherche ciblée des anomalies dans la commande moteur ou la chaîne cinématique.



Figure 34: Gauche : mouvement bon avec des impulsions de hachage. A droite : mouvement problématique avec des impulsions de hachage.



Figure 35: Gauche : mouvement bon sans asservissement. A droite : mouvement problématique sans asservissement.

Mesure de la résistance

La mesure de la résistance électrique permet de détecter les interruptions ou courts-circuits dans la bobine du moteur pas-à-pas des mouvements à quartz analogiques, ainsi que les défauts d'isolation entre la bobine, le noyau magnétique ou le circuit imprimé. Elle est également utile pour le contrôle de continuité et d'isolement des pistes conductrices, connexions ou contacteurs.

Cette mesure s'effectue à l'aide d'une tension très faible, ce qui n'entraîne aucun risque pour le mouvement, et évite toute perturbation liée aux diodes de protection intégrées au circuit intégré.

Résistance de la bobine

Pour effectuer la mesure, il est impératif de retirer la pile du mouvement. Les deux bornes de connexion de la bobine sont mises en contact avec des pointes de test ou étriers mobiles — la polarité est sans importance.

Si les points de mesure ne sont pas clairement identifiables, il est recommandé de consulter la fiche technique du calibre concerné.

La **résistance** typique d'une bobine de moteur dans un mouvement à quartz analogique se situe généralement entre **1 kΩ et 3 kΩ**. Pour des valeurs précises, se référer aux spécifications techniques du fabricant.

- Une interruption (bobine coupée) se manifeste par une résistance très élevée, voire une lecture « circuit ouvert ».
- Un court-circuit partiel entre spires se traduit par une résistance significativement inférieure à la valeur nominale, indiquant une perte de performance du moteur.

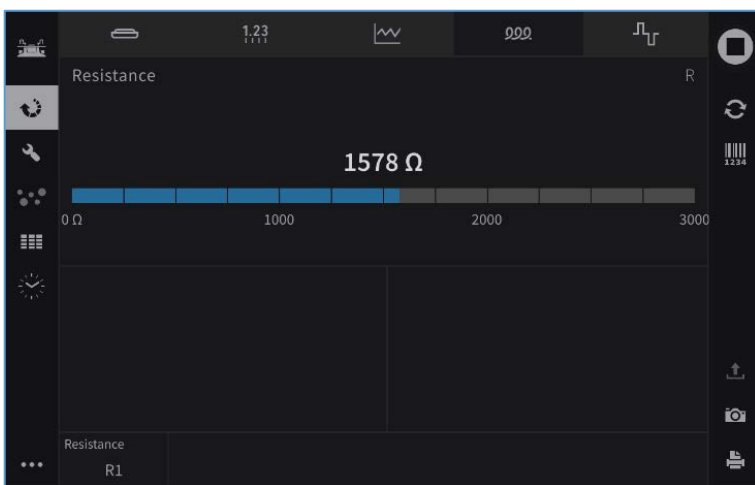


Illustration 36: Mesure de la résistance de la bobine avec QuartzMaster® et Terminal.

Isolation de la bobine

Pour contrôler l'isolation électrique entre la bobine du moteur pas-à-pas et la platine du mouvement, il convient de mettre en contact :

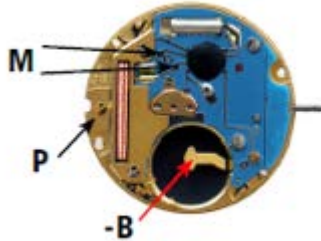
- l'un des points de connexion de la bobine,
- ainsi que la platine du calibre,

à l'aide des pointes de test ou des étriers de contact.

La valeur de résistance mesurée s'affiche sous forme numérique sur l'appareil de contrôle.

Un état d'isolation correct est attesté lorsque la mesure indique une résistance supérieure à 1 MΩ.

Une valeur inférieure peut signaler un défaut d'isolation, susceptible de provoquer des fuites de courant



ou un dérèglement du fonctionnement moteur.

Figure 37: Connexions M pour la mesure de la bobine.

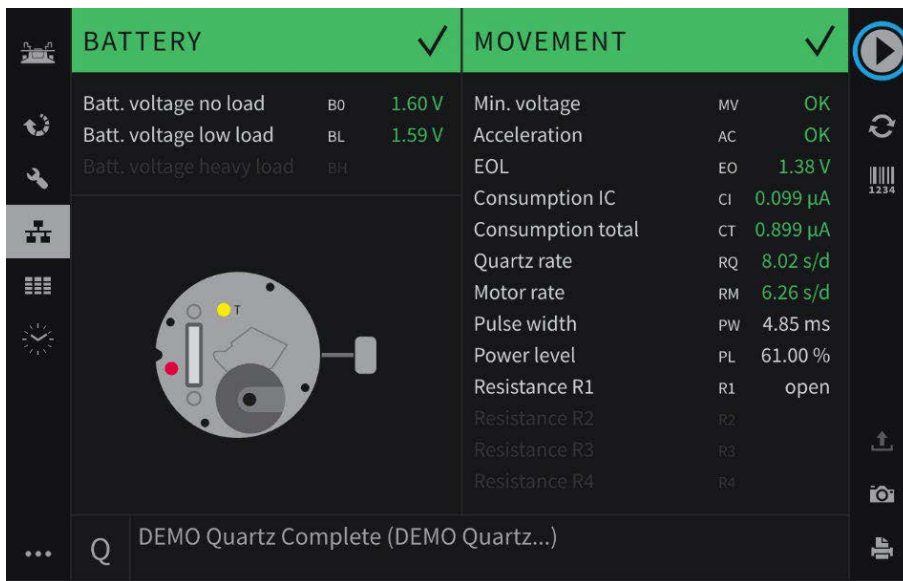


Figure 39: Exemple de protocole de mesure complet :

Tension min. (MV), accélération (AC), EOL (EO), courant absorbé IC (CI), courant absorbé total (CT), marche quartz (RQ), marche moteur (RM), durée d'impulsion (PW), asservissement (PL)

Le protocole de mesure, illustré à la figure 39, est généré automatiquement par le QuartzMaster, en interaction directe avec le Terminal de mesure Witschi. Les valeurs mesurées telles que la tension minimale de fonctionnement, le courant absorbé, les écarts de marche et les paramètres moteur sont affichées en temps réel sur l'écran de l'appareil.

En connexion avec Wicotrace 360°, ces données de mesure sont également enregistrées dans la base de données. Elles peuvent ensuite être organisées, analysées systématiquement et exportées pour des vérifications ou traçabilités ultérieures.

Ce fonctionnement automatisé supprime la nécessité de tenir un protocole manuel et garantit la disponibilité d'un jeu de données complet, structuré et traçable pour chaque calibre contrôlé.

Mode accéléré

De nombreux **calibres de montres à quartz** disposent d'un **point de test**, généralement identifié par l'inscription **R/T**, situé sur le **module électronique** du mouvement. Ce point de contact permet d'activer les **fonctions de réinitialisation** et de **mode accéléré** à des fins de contrôle.

Pour activer ces fonctions, et en complément de l'**alimentation standard par les étriers de contact**, le **point de test R/T** est connecté à l'aide de l'**étrier de test jaune** :

- **Tension positive au point de test** → **Reset** : les impulsions moteur sont **inhibées** ;
- **Tension négative au point de test** → **Mode accéléré** : les impulsions moteur sont **accélérées de manière continue**.

Pour les conditions d'utilisation précises, il est recommandé de **se référer à la fiche technique du calibre** concerné.

En **mode accéléré**, le mouvement exécute généralement **16 ou 32 pas moteur par seconde**, ce qui permet d'**observer visuellement le comportement des aiguilles** dans un **miroir d'inspection**, et de **détecter rapidement** d'éventuelles **anomalies mécaniques**, telles que :

- **aiguilles bloquées**,
- **point dur dans le rouage**
- ou **défaut de changement de date**.

Générateur d'impulsions

Le générateur d'impulsions permet de tester le moteur pas à pas et la partie mécanique d'une montre à quartz analogique indépendamment de l'électronique.

Vérifier le moteur pas à pas

Le **mode de fonctionnement accéléré** permet de **détecter rapidement** les **défauts mécaniques** du mouvement, tels que des **aiguilles qui frottent**, des **points durs dans le rouage**, ou des **dysfonctionnements du mécanisme de changement de quantième**.

Procédure de test :

Avant de débiter le **test du moteur pas-à-pas**, il convient de **retirer la pile** du mouvement. Les **étriers de contact** doivent ensuite être placés sur les **points de connexion moteur (M)** prévus à cet effet.

- **Sélectionnez la durée d'impulsion** et le **taux de hachage** conformément aux **spécifications techniques du calibre** à tester.
Pour un **test en mode accéléré**, choisissez une **fréquence d'impulsion de 16 Hz**.
Si aucune donnée constructeur n'est disponible, les **valeurs standard prédéfinies** fournissent généralement un résultat satisfaisant.
- **Réglez la tension de test** à une valeur inférieure d'environ **0,2 V** à la tension nominale de la pile (par exemple **1,35 V** pour une pile à **oxyde d'argent**).
Cela permet de **simuler plus fidèlement** les pertes de tension internes au **circuit intégré** pendant l'impulsion moteur.
- **Fixez le mouvement** dans le **support prévu à cet effet**, puis placez l'ensemble sur le **socle en verre de l'appareil de test**.
- **Appliquez les étriers de contact mobiles** sur les **bornes de la bobine**. La **polarité est indifférente**.
En cas de doute sur les points de contact, se référer à la **fiche technique du calibre**.
- **Observez le déplacement de la trotteuse** à l'aide du **miroir d'inspection**.

- Pour tester la **tension de démarrage**, réduisez progressivement la tension jusqu'à ce que la trotteuse s'arrête, puis **augmentez-la lentement** jusqu'à reprise du mouvement.

Il est également possible de **réduire progressivement la durée d'impulsion ainsi que le taux de hachage**, afin de déterminer les **limites inférieures de fonctionnement** du circuit de commande moteur.



Figure 38: Mode générateur d'impulsions lors de la génération d'impulsions moteur.

Vérifier Buzzer

Pour tester un émetteur de signaux piézo (buzzers), il est possible de générer un signal permanent. Le piézo devrait alors émettre un signal audible.



Figure 39: Mode générateur d'impulsions lors de la génération d'un signal piézoélectrique.

Certaines des mesures décrites peuvent être effectuées sans ouvrir la montre - les appareils correspondants le permettent.

Contrôle des montres quartz fermées



*Figure 42 : Capteur à quartz avec terminal
Appareil de mesure compact et ergonomique pour montres à quartz et mouvements avec pile insérée.*

Une montre à quartz ne doit être ouverte qu'en cas de stricte nécessité, toute ouverture comportant des risques de contamination par des poussières ou corps étrangers. Certains modèles permettent même le remplacement de la pile sans ouverture du boîtier, tandis que d'autres ne sont pas conçus pour être ouverts sans dommage irréversible.

Même lorsque la montre est fermée, il est possible d'effectuer divers contrôles fonctionnels permettant une évaluation fiable de l'état du mouvement.

Mesure de la fréquence du quartz

La fréquence d'oscillation du résonateur à quartz peut être mesurée sans ouverture, à l'aide :

- d'un capteur capacitif
- ou d'un capteur acoustique

Dans ce cas, l'oscillation à 32 768 Hz est directement comparée à une fréquence de référence à haute stabilité, pour en évaluer l'écart.

Fréquence de l'affichage (montres LCD)

Sur les montres à affichage à cristaux liquides (LCD), le capteur capacitif permet également de mesurer la fréquence de commutation de l'affichage, qui est généralement synchronisée à la fréquence du quartz. Cela constitue une méthode de vérification indirecte de la stabilité de l'oscillateur.

Mesure des impulsions moteur (montres analogiques)

Pour les montres à affichage analogique, les impulsions moteur peuvent être détectées à l'aide d'un capteur inductif. Cette mesure permet d'analyser :

- la marche effective avec ou sans inhibition
- la durée de l'impulsion moteur
- le niveau d'asservissement utilisé à l'instant de la mesure

L'ensemble de ces paramètres offre une évaluation ciblée du comportement dynamique du mouvement, sans qu'il soit nécessaire de démonter la montre.

Mouvement induit des aiguilles

Un niveau d'asservissement élevé observé lors des mesures peut indiquer une résistance mécanique accrue dans le rouage, souvent causée par une résinification des lubrifiants ou un encrassement. Ce phénomène se traduit par une charge plus importante pour le moteur pas-à-pas lors du déplacement des aiguilles.

Il est possible de provoquer un mouvement accéléré des aiguilles, même avec la montre fermée, en appliquant un **champ magnétique rotatif généré de manière externe**. Cette stimulation peut permettre de désolidariser partiellement les résidus figés, facilitant ainsi le réentraînement du rouage et contribuant à restaurer une cinématique fluide.

Remarque : l'appareil **Witschi Cyclonic**, autrefois utilisé à cet effet, n'est plus proposé dans la gamme actuelle des équipements de mesure et de maintenance.

Toutefois, si l'ouverture de la montre est possible et nécessaire, un examen plus détaillé peut être effectué.

Contrôle des montres quartz ouvertes



*Figure 43 : QuartzMaster® avec Terminal
Appareil de mesure compact et ergonomique pour montres quartz ouvertes / mouvements quartz.*

Lorsque les montres quartz sont ouvertes, le QuartzMaster permet d'effectuer toutes les mesures décrites au chapitre "Mesures et contrôles".

Il est recommandé de mesurer la consommation de courant à chaque changement de pile. Cela permet de détecter d'éventuels problèmes dans le mouvement, qui pourraient avoir entraîné une réduction de l'autonomie de la pile.

Déroulement du contrôle

[1] Examen visuel

- Vérifier l'absence de saleté ou de dépôts dans la zone située entre la couronne et le boîtier.
- S'assurer que les aiguilles se déplacent librement et ne frottent pas.
- Vérifier le fonctionnement du calendrier (par ex. commutation de la date).
- Contrôler l'absence de salissures ou de particules étrangères dans les rouages.

[2] Test de la résistance de la bobine et de l'isolation de la bobine

- Retirer la batterie. Vérifier la résistance de la bobine et l'isolation de la bobine.
- Si les valeurs sont hors tolérance : changer de mouvements. Sinon, continuer avec [3].

[3] Consommation de courant et mesure de la vitesse

- Placer le mouvement au-dessus du miroir et raccorder les étriers de contact Supply+ (rouge) et Supply- (noir).
- Mesurer la consommation de courant et l'écart de marche.
- Si une valeur se situe en dehors de la tolérance, le mouvement doit être remplacé. Si les valeurs sont discrètes : continuer avec l'étape [4].

[4] Vérifier la tension minimale

- Placer le mouvement au-dessus du miroir et raccorder les étriers de contact Supply+, Supply- et RT/T (jaune).
- Baisser progressivement la tension jusqu'à ce qu'il n'y ait plus de pas de moteur
- Hors tolérance : remplacer le mouvement.
Dans les limites de la tolérance : insérer la pile et fermer la montre.

Dépannage

Procédure en cas de dysfonctionnement d'une montre à quartz analogique

- Vérifier si la couronne/l'arbre de commande est tiré (pas d'impulsions du moteur)
- Contrôler l'écartement des aiguilles et la distance par rapport au verre/cadran
- Ouvrir la montre et vérifier la remise à zéro
- Vérifier que le mouvement n'est pas encrassé, poussiéreux ou usés, en particulier les rouages et le rotor.
- Mesurer la tension de la pile
- Vérifier la consommation de courant ; si elle est trop élevée, mesurer la résistance de la bobine→
- Vérifier le fonctionnement des rouages, du moteur et du rotor
- Vérifier d'autres fonctions et composants

Défaut	Cause	Mesure
Le mouvement s'arrête	Batterie déchargée	<p>⇒ Changer la pile</p> <p>En présence d'une décharge anormalement rapide de la pile, procéder aux vérifications suivantes :</p> <p>(a) Vérifier la consommation de courant du mouvement ainsi que la résistance de la bobine du moteur pas-à-pas, afin de détecter toute anomalie électrique (surchauffe, court-circuit entre spires, surconsommation due à un défaut mécanique ou électronique).</p> <p>(b) Contrôler que la languette de contact de la borne négative de la pile ne touche pas accidentellement le circuit imprimé, ce qui pourrait entraîner un court-circuit partiel et une consommation parasite permanente.</p>
	Ressort d'écartement La roue des heures est bloquée	Dans certaines constructions de mouvements, la roue des heures est maintenue en position sous le cadran par un ressort d'écartement. Si le ressort d'écartement est endommagé lors de l'assemblage ou s'il est utilisé deux fois par inadvertance, le jeu nécessaire de la roue des heures est réduit. Cela peut entraîner un blocage et donc l'arrêt du mouvement.
	Roue dentée endommagée	Avant de monter le cadran et les aiguilles, il faut s'assurer que la roue des heures est correctement alignée avec le pivot de la roue des minutes. Lors de la mise en place des aiguilles des heures et des minutes, une pression excessive peut endommager la roue des heures. Il est donc nécessaire de contrôler soigneusement la force appliquée lors du montage des aiguilles.
	Graissage excessif du tube du boîtier	Il est de pratique courante d'appliquer de la graisse sur le tube du boîtier (tube) afin d'empêcher l'eau de pénétrer dans la montre. Toutefois, l'excès de graisse peut pénétrer à l'intérieur de la montre lors du montage de l'axe de réglage et entraîner des dysfonctionnements. C'est pourquoi il faut veiller à un dosage précis et parcimonieux lors de l'application de la graisse.
	Problèmes avec l'arbre de commande	La présence de colle sur le carré ou une tige de réglage coupée trop court surviennent généralement lors de la découpe de la tige de réglage et de la fixation de la couronne. Dans la pratique, l'inspection révèle souvent le symptôme suivant : "Les aiguilles bougent déjà alors que l'axe de réglage se trouve encore en position normale (insérée)". Lors du durcissement de la colle, il faut veiller à ce que l'axe de réglage reste correctement aligné afin d'éviter la présence de colle dans les zones importantes pour le fonctionnement. Lors du raccourcissement de l'arbre

		de réglage, il faut veiller à ce que la longueur soit suffisante et que le carré soit intact.
	Poussière et abrasion	Les particules de poussière, les fibres textiles ou l'abrasion peuvent se coincer entre les roues et les pignons et entraîner l'arrêt de la montre.
	Espacement des aiguilles	Vérifiez soigneusement l'écartement des aiguilles et ajustez-le si les aiguilles se touchent. Veillez en particulier à ce que le contrepoids de l'aiguille des secondes n'effleure pas ou ne touche pas l'aiguille des minutes.
L'horloge indique le retard	Espacement insuffisant des aiguilles / Bande de la trotteuse sur le verre	<p>Les montres qui retardent sont souvent dues à un espacement insuffisant entre les aiguilles. Il est important de contrôler non seulement l'écart entre le cadran et l'aiguille des heures, ainsi qu'entre les aiguilles des heures et des minutes, mais également la distance entre l'aiguille des secondes (trotteuse) et la glace, ainsi que l'écart entre le contrepoids de la trotteuse et l'aiguille des minutes.</p> <p>Dans certains cas, la montre fonctionne correctement hors du boîtier, mais s'arrête après emboîtage. Cela indique souvent un contact de la trotteuse avec la glace.</p> <p>Conseil : une petite goutte d'huile déposée sur la pointe de la trotteuse peut aider à détecter un éventuel contact avec la glace lors du montage.</p>
Date ne commutent pas	Adhésif au dos du cadran / Date Doigt de commande endommagé	<p>Des résidus de colle au dos du cadran peuvent frotter contre le disque de la date ou du jour et provoquer ainsi un arrêt.</p> <p>Le disque de la date possède une denture intérieure dans laquelle s'engrène le doigt de commande de la roue de quantième et qui fait avancer le disque d'une division toutes les 24 heures.</p> <p>Des dommages au doigt de commande ou au disque de quantième surviennent souvent lorsque l'aiguille est tournée vers l'arrière lors de la mise à l'heure alors que le doigt de commande est en prise avec la denture intérieure.</p>
Mauvais changement de date	Réglage AM/PM incorrect	<p>Pour les mouvements équipés d'une indication du jour et de la date, l'arbre de mise à l'heure doit être tourné jusqu'à ce que le changement du jour et de la date s'effectue. Ce n'est qu'à ce moment-là que les aiguilles peuvent être posées, afin de garantir que le changement de quantième se produise ultérieurement au bon moment.</p> <p>Le porteur doit également être informé sur la manière correcte de régler le jour et la date, afin que le passage s'effectue bien à minuit, et non à midi.</p>
Espace entre le fond du boîtier et le boîtier	Supports d'outils en plastique mal positionnés	<p>Un fond de boîtier mal emboîté peut engendrer un jeu entre le fond et la carrure, compromettant ainsi l'étanchéité de la montre.</p> <p>Avant d'emboîter le fond, il est essentiel de positionner correctement l'encoche du porte-mouvement en plastique par rapport à la tige de remontoir. Si cet alignement n'est pas respecté, le porte-mouvement repose sur la tige, ce qui crée un espace résiduel entre le fond de boîte et la carrure.</p>
Poussière entre le cadran et le verre visible	Nettoyage inapproprié	Pour éviter la poussière et les fibres textiles, il est recommandé d'installer un capot de protection ou, idéalement, un flux laminaire au-dessus du poste de travail de montage où s'effectue l'emboîtage. Cela permet d'éviter que la poussière ne se dépose sur l'établi ou sur la boîte de montre. Pour le nettoyage des cadrans et des verres, il convient d'utiliser

exclusivement des goupilles à vide, car elles éliminent la poussière de manière fiable. En revanche, les chevilles pneumatiques ne font que déplacer la poussière d'un endroit à l'autre et ne sont donc pas adaptées.

Entrée d'humidité	Fuite de la montre : Verre / couronne / fond de boîtier	Dans de tels cas, tous les joints doivent être remplacés. Le joint de la couronne peut se tordre ou être endommagé lors du remontage. Il convient donc de lubrifier le tube du boîtier (tube) avec de la graisse silicone afin de faciliter le vissage et le dévissage de la couronne. Lors de l'ouverture du fond du boîtier, il convient d'utiliser un outil approprié afin de ne pas endommager le joint. Le joint de fond doit être traité avec de la graisse silicone et remplacé à chaque ouverture.
-------------------	--	---

Aperçu des appareils de mesure Witschi pour montres quartz

Fonction	Q-Test 6000	New Tech Handy	Analyzer Q1	Analyzer Q2	Analyzer Twin	CS1 (G2) avec micro. à quartz	Quartz Master	Quartz Sensor
Mesure de la marche Quartz								
par capteur capacitif	✓	✓	✓	✓	✓	✓	-	✓
par capteur acoustique	✓	✓	✓	-	✓	-	-	-
par absorption de courant	✓	✓	✓	✓	✓	-	✓	-
Mesure de la marche								
par capteur inductif	✓	✓	✓	-	✓	✓	-	✓
par capteur capacitif (LCD)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	-	✓
par consommation de courant	✓	✓	✓	✓	✓	-	✓	-
Mesure de la consommation de courant	✓	✓	✓	✓	✓	-	✓	-
Testeur de piles	✓	✓	✓	✓	✓	-	✓	-
Mesure de la résistance	✓	✓	✓	✓	✓	-	✓	-
Générateur d'impulsions	✓	-	✓	✓	✓	-	✓	-
Analyse des pulsations du moteur	-	-	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Réglage des mouvements d'inhibition pour des CI sélectionnés	✓	-	-	✓	-	-	-	-
Procédures de contrôle automatisées	-	-	-	✓	-	-	✓	✓
Mesure des montres à diapason	✓	-	-	-	-	✓	-	✓
Mesure des montres mécaniques	-	-	✓	-	✓	✓	-	-

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.

Version du document

D40f | 18.11.2025