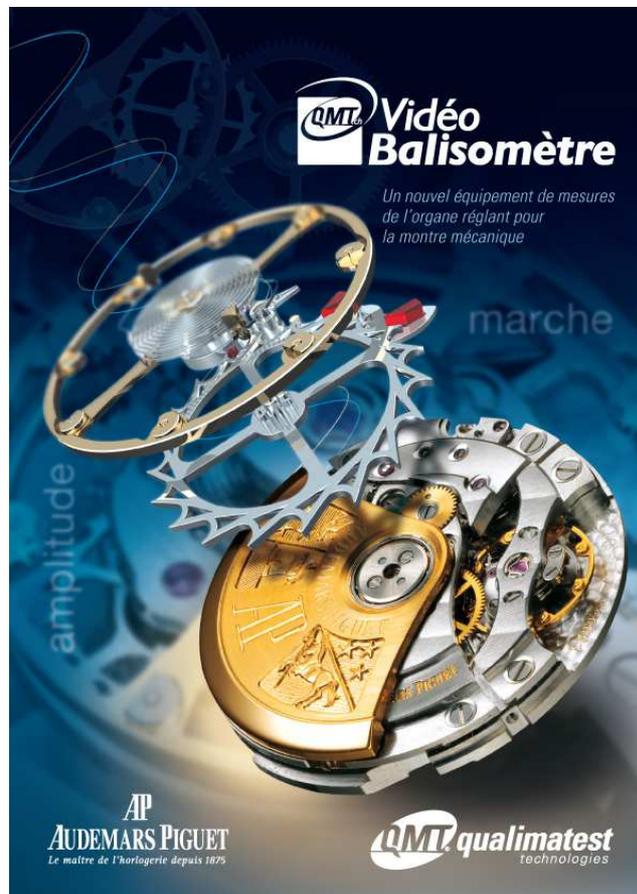


QMT.ch Vidéo Balisomètre

Le VidéoBalisomètre a été développé pour permettre une analyse très poussée de l'organe réglant et ainsi devenir un référentiel pour la mesure des amplitudes, des marches et des vitesses du balancier. Le VidéoBalisomètre est particulièrement performant et unique dans les mesures d'amortissements libres qui peuvent être réalisées de manière complètement automatiques et ceci dans toutes les positions horlogères. Il répond ainsi aux besoins les plus pointus en matière de recherche horlogère dans ces domaines.

Le VidéoBalisomètre offre ainsi plusieurs innovations majeures :

- Mesure optique à chaque alternance, en mode libre ou entretenu, de l'amplitude du balancier avec une précision inférieure à 1° et ceci pendant une durée illimitée.
- Mesure de plusieurs alternances, en mode libre ou entretenu, de la position angulaire (élongation) du balancier toutes les 1/4000ème de seconde
- Mesure des marches acoustiques et optiques sur une base de temps rubidium
- Analyse comparative des mesures de marche effectuées par la caméra et le système acoustique



Définitions

Oscillation

Passage d'une position extrême à l'autre et retour en position initiale.

Période

Durée d'une oscillation.

Alternance

Demi-oscillation.

Élongation [°]

Angle entre la position de repos et une position quelconque du balancier.

Ligne d'échappement

Droite passant par les axes de pivotement de l'ancre et du balancier.

Amplitude [°]

Élongation maximale du balancier.

Marche [s/j]

Différence, ramenée au nombre de secondes par jour, entre la période théorique (fixée par la construction du mouvement) et la période mesurée.

Repère [ms]

Décalage temporel de la cheville de plateau (balancier au repos) par rapport à la ligne d'échappement.

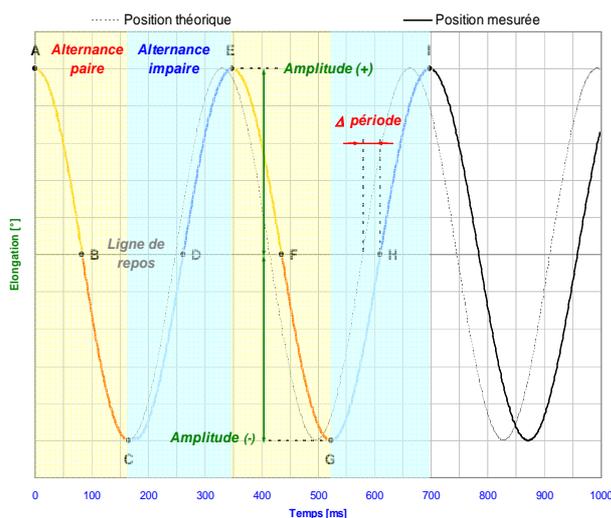
Position de repos

Position d'équilibre de l'ensemble balancier-spiral.

Mode entretenu / libre

Organe réglant avec / sans échappement.

Les oscillations d'un balancier 3Hz sont schématisées dans la figure 1 avec les différentes caractéristiques à mesurer.



Technologies de l'équipement

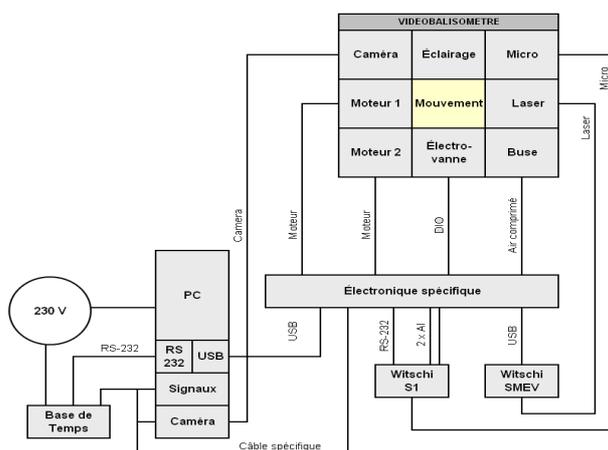
Afin de répondre aux spécifications, le VidéoBalisomètre® intègre plusieurs systèmes de mesure :

- **Vision**
Mesure dynamique, par une caméra, de la position angulaire du balancier.
- **Acoustique directe**
Signal analogique transféré depuis l'appareil de mesure acoustique et synchronisé aux images de la caméra.
- **Acoustique RS232**
Valeurs transférées depuis l'appareil de mesure acoustique au VidéoBalisomètre® (sans synchronisation directe).

Récapitulatif des mesures possibles en fonction de la technologie et du mode (E = entretenu ; L = libre) :

	Vision	Acoustique	
	VidéoBalisomètre	Witschi S1	
		Directe	RS232
Marche [s/j]	E / L	E	E
Amplitude [°]	E / L	---	E
Repère [ms]	---	E	E
Vitesse [°/ms]	E / L	---	---

Schéma bloc de l'équipement avec ses différents composants :



Concept de la mesures par vision

Les mesures par vision sont basées sur l'idée de mesurer dynamiquement l'élongation du balancier en fonction du temps.

Trois aspects sont importants pour garantir les spécifications demandées :

- **Centre de rotation**

Le centre de rotation du balancier doit être mesuré avec une précision inférieure à 30 microns.

- **Géométrique**

Des repères connus doivent être visibles sur le balancier. Ils permettent de détecter sur chaque image la position angulaire du balancier, et de définir ainsi la courbe d'élongation.

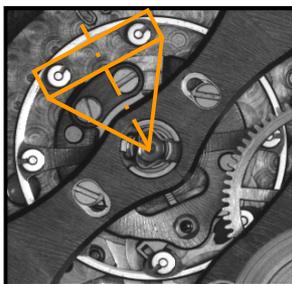
- **Temporel**

Pour une mesure adéquate de la marche à la vitesse maximale du balancier, la fréquence d'échantillonnage se doit d'être suffisamment élevée et précise.

L'atteinte des objectifs ci-dessus implique deux modes de mesure successifs : le premier doit permettre une visualisation de l'ensemble du balancier (\varnothing 12 mm maximum) avec une vitesse d'acquisition d'images limitée. Le deuxième doit permettre une acquisition d'un champ de vision plus petit mais à une cadence élevée (cf. tableau 2).

Mode	Dimensions	Vitesse
Complet	1'300 x 1'000 pixels 14.3 x 11 mm	500 images/s
Partiel	1'300 x 128 pixels 14.3 x 1.4 mm	4'000 images/s

Il est important de noter que, pour que le système puisse acquérir et tracer une courbe d'élongation, le champ de vision partiel doit permettre un suivi permanent des repères. Par exemple dans l'images ci-dessous, la zone de traitement permet la visualisation de deux masselottes.

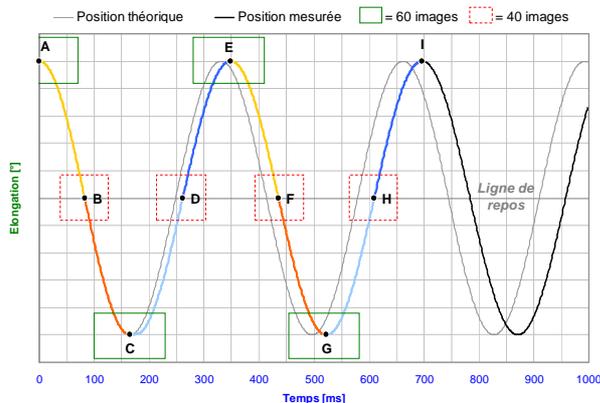


Le système de vision sélectionné permet une acquisition d'images avec une fréquence liée à la résolution verticale de l'image selon le tableau 2.

Les deux modes d'acquisition représentent un flux de 650 MO/s soit le contenu d'un CD acquis chaque seconde.

Pour mesurer les caractéristiques de marche et d'amplitude, il n'est pas nécessaire de traiter toutes les images de l'alternance. Huit fenêtres d'acquisition pour deux oscillations (cf. figure

4) sont définies et positionnées par anticipation de la position du balancier.



Placement des fenêtres de mesure (A, C, E et G pour la mesure d'amplitude ; B, D, F et H pour la mesure de marche)

Mesure de l'amplitude (élongation maximale)

La mesure de l'amplitude doit être réalisée dans toutes les conditions avec une précision de 1° , même si :

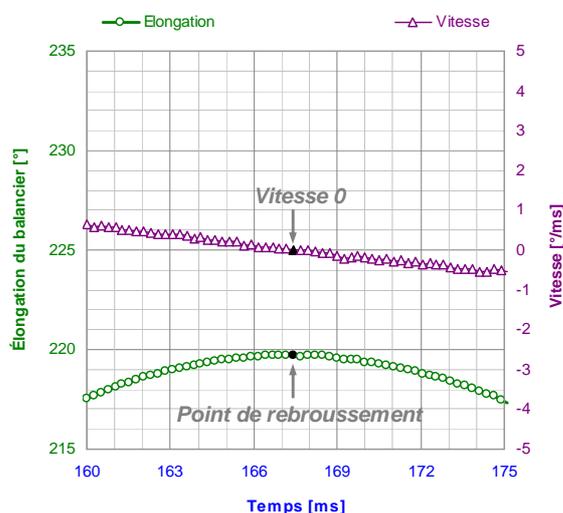
- L'amplitude change rapidement ($\pm 10^\circ/s$)
- La marche est imprécise ou change rapidement (plage de ± 1000 s/j, variation ± 100 s/j par seconde).

Le temps moyen pour parcourir 1° de part et d'autre du point de rebroussement d'un balancier de 3 Hz (cf. figure 4, points A, C...) pour une élongation maximale de 320° est approximativement de 8 ms (10 ms pour 220° , cf. figure 5).

En tenant compte de l'erreur liée à la variation de la marche admise, une fenêtre d'acquisition de 15 ms (60 images) donne une plage de mesure minimale de $\pm 1.5^\circ$.

Le mode de prise d'images partiel à 4'000 images par seconde est donc adapté à cette mesure.

Fenêtre de l'élongation pour la recherche du point de l'élongation maximale (amplitude)



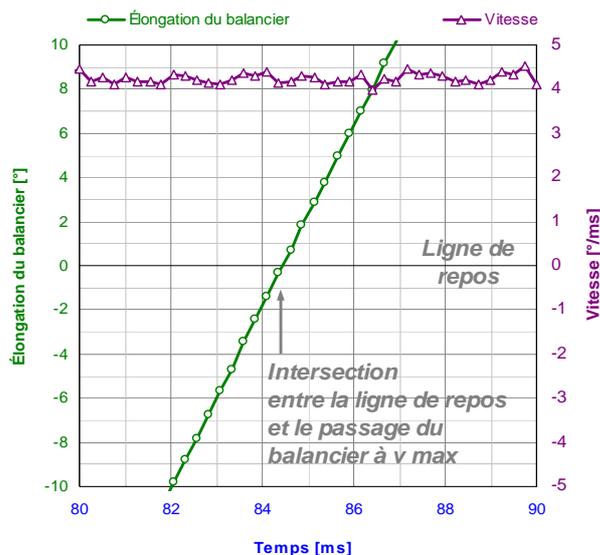
Mesure de la marche

La marche doit être mesurée avec une précision de 1 s/j.

Ramené à une oscillation, cela correspond environ à une précision de 4 μ s pour une fréquence de 3 Hz.

Ces valeurs deviennent moins critiques pour des mesures avec une période d'intégration plus grande.

Fenêtre de l'élongation pour la recherche des intersections permettant la mesure de la marche



La mesure de la marche est réalisée par la recherche des intersections entre la courbe d'élongation et la position de repos (points B, D, F et H de la figure 4).

De part ces intersections, il est possible de mesurer l'écart entre les périodes théorique et réelle et déterminer ainsi la marche.

Cette mesure est réalisée quand la vitesse du balancier est maximale ($\approx 4.5^\circ/\text{ms}$ pour une fréquence de 3 Hz). La courbe de l'élongation étant considérée linéaire dans ces instants, une régression simple permet d'améliorer la précision de mesure (cf. figure 6).

En tenant compte de la variation de marche et de la vitesse importante du balancier, il est possible de fixer une fenêtre d'acquisition de 10 ms (40 images) correspondant à une plage angulaire d'environ $\pm 20^\circ$.

La précision temporelle des mesures est liée à l'horodatage de chaque image. Celui-ci est garanti par une synchronisation de la caméra par la base de temps externe.

La définition de la position de repos du balancier est réalisée de manière différente selon qu'il s'agisse de la mesure en mode libre ou entretenu :

- **Mode libre**

Une image du balancier à l'arrêt est acquise avant son excitation, sa position angulaire peut ainsi être mesurée pour définir sa position de repos.

- **Mode entretenu**

A/ La position de repos peut être définie par la position médiane du balancier sur une alternance.

B/ La position de repos approchée peut être un référentiel acquis sur le signal acoustique, il s'agit du dégagement de l'ancre.

C/ La définition de la position de repos peut être effectuée par le décalage d'1/4 de période après le premier point de rebroussement.

Remarque :

On considère que la position de notre référentiel fixée par la solution A est suffisante pour placer notre courbe de fréquence théorique. (cf. fig. 4).

Cadence de mesure et synchronisation

Pour obtenir une mesure continue en temps réel, le temps de traitement d'images devrait être inférieur à la période. Ceci impliquerait, dans le cas du calibre 3120 (3 Hz), le traitement de quatre fenêtres (deux à 60 images et deux à 40 images) à 3 Hz donc 600 images par seconde. Le traitement d'images pour la détection des objets doit donc être simple et très rapide. Les mesures partielles sont acceptées au rythme de deux oscillations successives acquises, puis quatre oscillations de temps de traitement.

Repères pour la détection automatique

Ces éléments doivent être visibles et bien contrastés. Le nombre de ceux-ci sur la circonférence ainsi que la portion angulaire visible du balancier impose un champ de vision et donc une précision de mesure. Les données indiquées dans ce document sont basées sur un système à 8 objets (tous les 45°) et une portion angulaire visible de 120°.

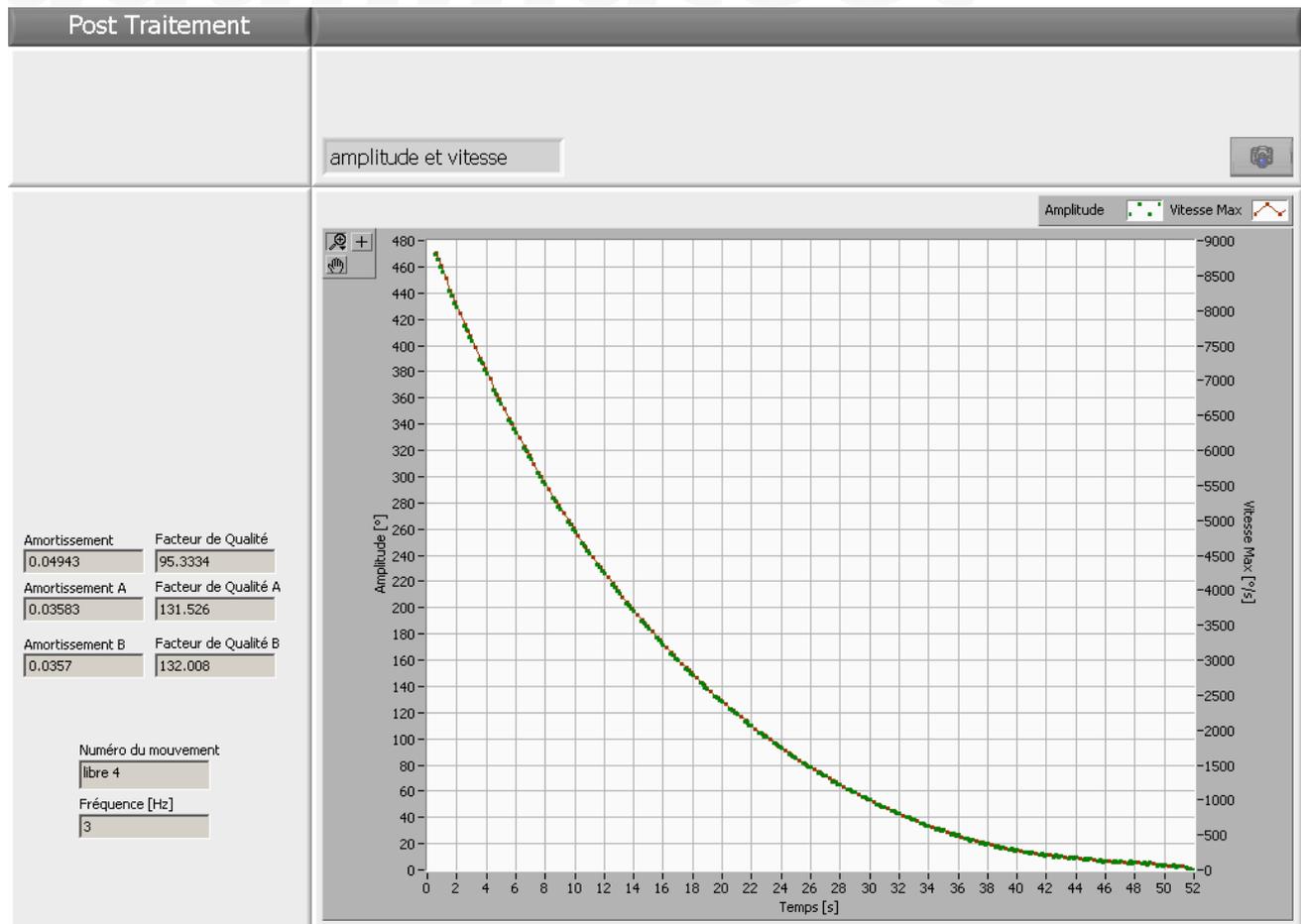
Plusieurs éléments sur le balancier peuvent servir de repères pour la détection :

- Masselottes ;
- Bras ;
- Vis réglantes ;
- Divers marquages de la serge.

Cas particulier du mode libre

Etant donnée que sans échappement il n'y a pas de signal acoustique, les mesures d'amplitude, de marche et de vitesse sont faites uniquement par vision.

Le fonctionnement est légèrement différent de la mesure en mode entretenu, la détection des images de vitesse nulle est identique mais la méthode de calcul de l'amplitude est différente. Les images correspondants aux points de rebroussement du balancier (moment où le balancier s'arrête et repart dans l'autre direction) et les images correspondants aux moments où la vitesse est maximale sont enregistrées et une fois que le balancier est immobile le VidéoBalisomètre® analyse les images enregistrées afin de tracer la courbe d'amortissement, la courbe de marche et la courbe de vitesse max.



Mesure acoustique

La mesure acoustique est réalisée par l'appareil S1 de Witschi, elle est intégrée à l'équipement de deux manières :

- **Acoustique directe**

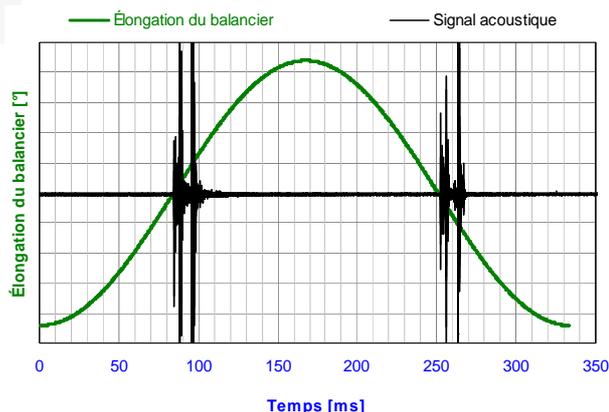
Le signal analogique du microphone est acquis simultanément aux images (synchronisation par la base de temps au rubidium) avec une fréquence de 40 kHz.

Son traitement permet la mesure de la marche et du repère, le calcul de l'amplitude n'a pas été intégré.

- **Acoustique RS232**

Les valeurs calculées par le Witschi S1 sont transférées par le port RS232. Ces mesures sont cadencées par la base de temps Witschi, mais pas synchronisées sur les mesures vision. Ce sont ces valeurs qui sont prises en compte par les horlogers lors des contrôles standard dans les ateliers.

Signal acoustique superposé à la courbe d'élongation



Base de temps / synchronisation des mesures

Toutes les acquisitions réalisées par le VidéoBalisomètre® sont cadencées par une base de temps au rubidium ayant une précision de 0.1 ppm (1 seconde pour 270 années).

Les images et le signal acoustique (direct / RS232) sont acquis simultanément. Le traitement est réalisé par l'analyse de deux oscillations complètes successives pour calculer les caractéristiques souhaitées.

	Vision	Acoustique	
		Direct	RS232
Marche [s/j]	Alternances paire et impaire		Mesures intégrées
Amplitude [°]	Amp+ / Amp-	---	
Repère [ms]	---	Oui	
Vitesse [°/ms]	Vmax	---	---

L'ensemble des données de deux oscillations listé ci-dessous est automatiquement sauvegardé selon une périodicité paramétrable :

Les images.

- La courbe d'élongation mesurée par vision.
- Le signal acoustique synchronisé avec la vision.
- Le signal de vitesse mesuré par le SMEV.
- Le signal acoustique synchronisé avec le SMEV.

La périodicité peut être définie en écart temporel, en variation d'amplitude ou de marche.

Ces données permettent une analyse pointue des alternances et une éventuelle vérification des calculs. Il est ainsi possible de :

- Tracer les courbes de marche et d'amplitude.
- Comparer les mesures réalisées par les différentes technologies pour permettre la calibration et les vérifications.
- Analyser des alternances afin de réaliser des études pointues.

Rapports de mesure et données

Le système permet l'édition de rapports standard en format Excel ainsi que l'exportation de toutes les données afin d'effectuer les analyses spécifiques ultérieures.

Acquisition d'images à haute vitesse

Le système intégrant une caméra rapide, il est bien entendu possible d'utiliser l'équipement pour acquérir toutes sortes de séquences d'images. Le tableau 4 ci-dessous liste les configurations possibles.

Mode	Dimensions	Vitesse
Complet	1'300 x 1'000 pixels 14.3 x 11 mm	500 images/s
A	1'300 x 512 pixels 14.3 x 5.6 mm	1'000 images/s
B	1'300 x 256 pixels 14.3 x 2.8 mm	2'000 images/s
Partiel	1'300 x 128 pixels 14.3 x 1.4 mm	4'000 images/s
C	1'300 x 64 pixels 14.3 x 0.7 mm	8'000 images/s

Tableau 4 - Configurations d'acquisition disponibles