

10 ans de LIGA au service de l'horlogerie

Développements et nouveautés

Grégoire Genolet, Hubert Lorenz, Mimotec SA, Blancherie 61, 1950 Sion
Marc-André Glassey, Sigatec SA, Blancherie 61, 1950 Sion

1) Introduction-Historique

Développée au milieu des années 1980, la technologie LiGA (Lithographie, Galvanoformung und Abformung) [1] a permis la création de structures micromécaniques avec de forts facteurs de forme, en électroformant du métal dans des moules en résines obtenus en utilisant la lithographie à rayons x. Cette approche n'a pas réussi à faire son chemin dans le monde des applications industrielles, principalement en raison du coût engendré par l'utilisation d'un synchrotron nécessaire à l'exposition de la résine photosensible. Les développements technologiques des années 90 ont permis d'élaborer des résines dont la structuration avec des facteurs de formes intéressants était possible en utilisant une source lumineuse ultraviolette [2]. La réduction des coûts y découlant a ainsi permis à cette technologie de s'orienter vers une approche industrielle.

Fondée en 1998, Mimotec SA a été la première entreprise à proposer la fabrication de composants horlogers en utilisant la technologie LiGA basée sur l'irradiation d'une résine avec une source ultraviolette [3].

En 10 ans, cette technique s'est largement répandue dans les bureaux techniques horlogers. Cet article revient sur ses débuts et en résume les principaux avantages pour le monde horloger. Il décrit également quelques réalisations qui n'auraient pas pu voir le jour sans le LiGA.

2) Les débuts du LIGA en horlogerie

Les premières réalisations de pièces en LiGA ont eu pour cadre des micromoules pour l'injection plastique. La fabrication d'empreintes composées de cavités superposées a ainsi été rendue possible avec un positionnement de l'ordre du micron. L'utilisation de cette nouvelle technologie a permis de supprimer avantageusement les erreurs d'empilement et d'orientation des plaquettes découpées (Figure 1). Une caractéristique principale de cette nouvelle manière de faire des micromoules résidait dans l'amélioration de la qualité de surface des composants injectés (Figure 2).



Figure 1. Empreinte « planche – pignon » constituée d'un empilement de deux niveaux électroformés simultanément.

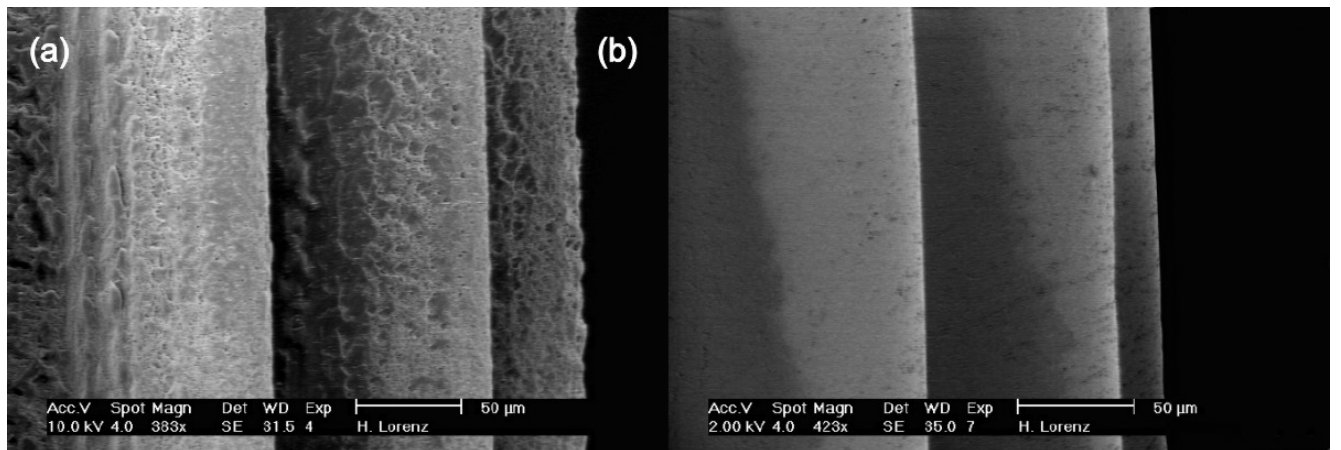


Figure 2. Images au microscope électronique de composants injectés. La rugosité de l'état de surface entre un pignon injecté dans une cavité érodée au fil (a) ou obtenue par procédé LiGA (b) est fortement diminuée.

En 1999, de nouveaux développements ont permis la fabrication de composants par la technologie appelée Mimetal™. Des pièces métalliques pour le mouvement ont commencé à être directement fabriquées. La liberté de design découlant de cette nouvelle méthode de fabrication a ainsi pu commencer à être pleinement exploitée.

En particulier, le procédé Mimetal™ permet la fabrication d'une très grande diversité de composants. Des cames, roues dentées, sautoirs, étoiles, ressorts de rappel, (...) peuvent être élaborés par cette technique.

Il est également intéressant de noter que cette méthode permet la fabrication de prototypes (quantité inférieure à 100) et des pièces de série (jusqu'à 500'000) dans une qualité identique. Aucun arrachement, découpe ou « brûlage » de matière n'est utilisé, ce qui permet d'obtenir un état des surfaces fonctionnelles d'une qualité incomparable ($R_a < 20 \text{ nm}$).

La caractéristique principale de cette technologie réside dans le fait qu'il n'y a quasiment aucune limitation dans le dessin des profils de denture, dans les formes des pièces et dans les ajourages fonctionnels ou esthétiques. La fabrication de la pièce se faisant sans enlèvement de matière sur les faces fonctionnelles de la pièce, aucune contrainte de forme ou de taille n'est donnée par l'outil (Figure 3).

La polyvalence de la technique permet de fabriquer des ressorts dont le facteur de forme (rapport hauteur/largeur) des lames peut aller jusqu'à 4 en fabrication de série, avec une précision inférieure au micron dans le positionnement des divers éléments.

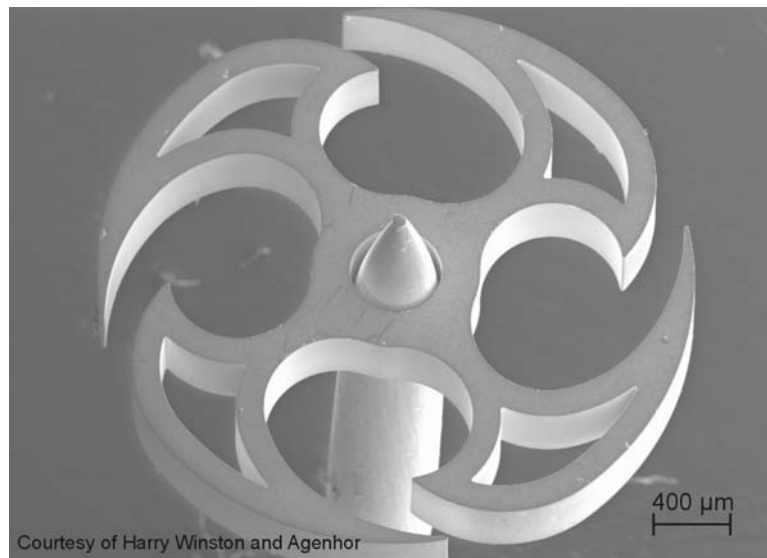


Figure 3. Image MEB d'une étoile illustrant les possibilités de design du procédé Mimetal™.

3) Evolutions marquantes

Comme toutes les nouvelles technologies, la branche du LiGA adaptée aux composants horlogers est en constante évolution. Mimotec SA se doit d'assurer un développement continu de ses procédés de fabrication, ceci afin d'améliorer la qualité de ses composants. Il est également important de permettre une intégration et une complexification plus poussée des fonctions désirées par les constructeurs.

Trois évolutions ont été particulièrement marquantes au cours de ces dernières années.

Le Nickel-Phosphore (NiP)

L'utilisation du NiP est devenu extrêmement complémentaire à celui du Ni pour la fabrication de composants horlogers. Amagnétique, ce matériau s'est profilé comme étant idéal pour l'élaboration de roues d'échappement ou de ressorts de rappel.

Les pièces à deux étages

Début 2002, l'évolution de la technique a autorisé la fabrication de composants à deux étages de façon beaucoup moins restrictive. Il était jusqu'alors très difficile d'obtenir des composants à deux niveaux dont les surfaces respectives étaient très différentes. Actuellement, des composants dont la fabrication ne serait pas réalisable techniquement ou alors à des prix ou à une précision inacceptables font partie de l'assortiment des pièces LiGA.

La roue de décaleur de la Figure 4 est un parfait exemple de composant à deux étages qui tire parti des possibilités offertes par cette technologie.

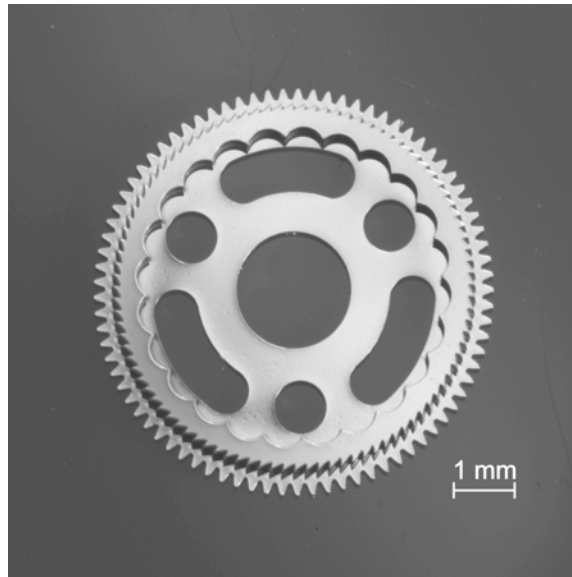


Figure 4. Roue de décaleur monobloc. Les 3 dentures sont parfaitement positionnées les unes par rapport aux autres et sont de forme totalement différente.

Ce composant à triple denture démontre également la diversité de géométrie que l'on peut obtenir avec ce procédé, tout en garantissant un positionnement et une concentricité inégalés des divers éléments.

Les dents fendues

En 2001, la société Agenhor imagine une forme de denture fendue ayant pour but de rattraper le jeu d'engrenage [4]. La géométrie asymétrique de la dent est composée d'une partie rigide ayant pour fonction de transmettre les forces, et d'une partie élastique qui rattrape les jeux. La technologie LiGA est à ce jour la seule méthode de fabrication qui permet d'obtenir des engrenages avec une telle fonctionnalité. La largeur de la lame ressort de la dent ainsi que la distance entre la partie flexible et la partie fixe sont de l'ordre de 20 μm (Figure 5) pour une épaisseur de 120 μm .

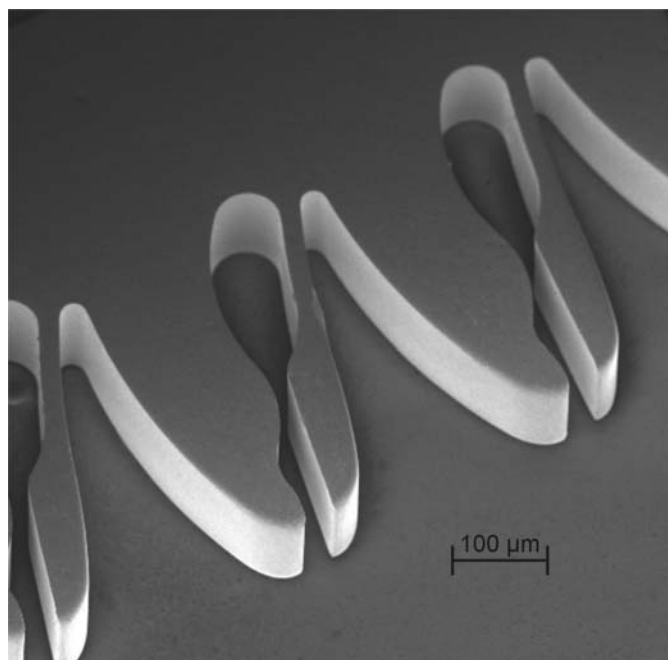


Figure 5. Image au MEB de dents fendues asymétriques. L'ouverture ainsi que la plus petite largeur de lame sont de 20 μm .

En plus de résoudre le problème de flottement des aiguilles décentrées, cette innovation apporte également un rendement supérieur à une denture classique. La géométrie asymétrique permet en effet d'amortir les perturbations et de supprimer la chute et l'arc-boutement dans les engrenages [5].

4) Exemples typiques innovants

En 2007, Mimotec SA a produit plus de 2500 articles différents basés sur le procédé Mimetal™. La conception de pièces plates à un ou deux étages est sans limites quant à la géométrie. Lors des dernières foires horlogères de Bâle et de Genève, un grand nombre de nouveautés ont tiré parti des possibilités offertes par ce procédé. Nous avons choisi de présenter deux exemples de pièces plates qui illustrent la liberté de design et de construction offerte.

a) composants utilisés pour des fonctions de correction de mécanisme de quantième annuel ou perpétuel intégrés aux mouvements manufacturés du Groupe Sowind.

Pour permettre un gain de place et une économie de pièces différentes, Sowind Manufactures a opté, dès l'étude de faisabilité, pour ces systèmes innovants et fiables obtenus par le procédé LiGA. Ces éléments équipent donc des montres prestigieuses de la marque Girard-Perregaux. Ils ont été conçus dans le but de répondre à des exigences volumiques, à une production homogène et aux normes d'essais et de tests requis. Les pièces uniques représentées par la Figure 6 (a) et (b) permettent de remplacer ainsi bon nombre de pièces dissociées en se basant sur le principe des éléments flexibles.

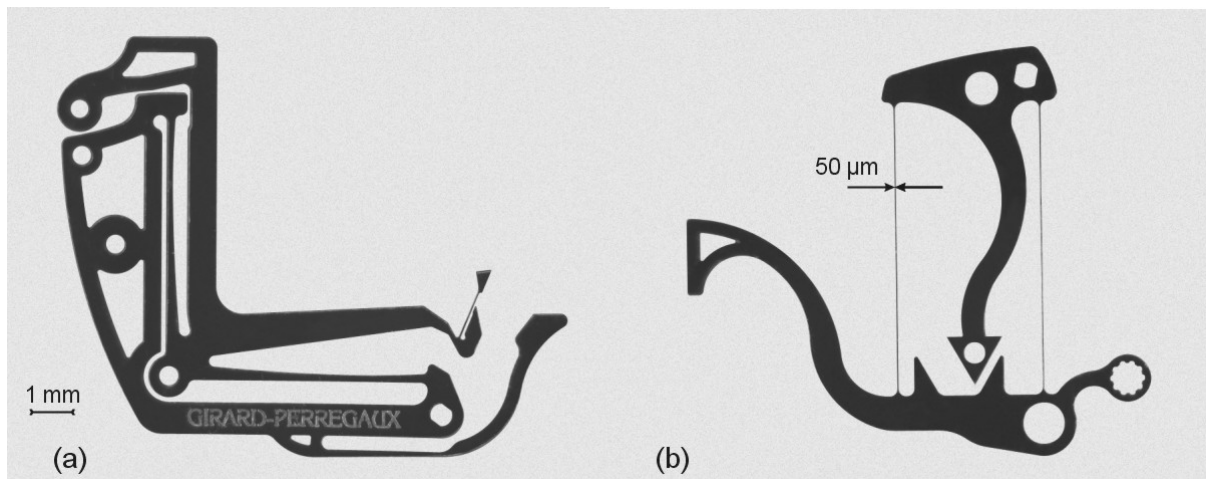


Figure 6. Correcteurs multiple (a) et latéral (b) dont la conception est basée sur le principe des éléments flexibles. Plusieurs fonctions sont assurées par un seul composant.

La Figure 7 représente le correcteur multiple assemblé. Il réunit plusieurs fonctions de par sa géométrie. L'articulation flexible va ainsi permettre une poussée jusqu'en butée puis une remise en position automatique sans la nécessité d'ajouter un sautoir. La même pièce aura également une action sur le pignon afin de corriger l'affichage. Une sécurité est de plus intégrée afin de ne pouvoir avancer qu'une seule dent à la fois.

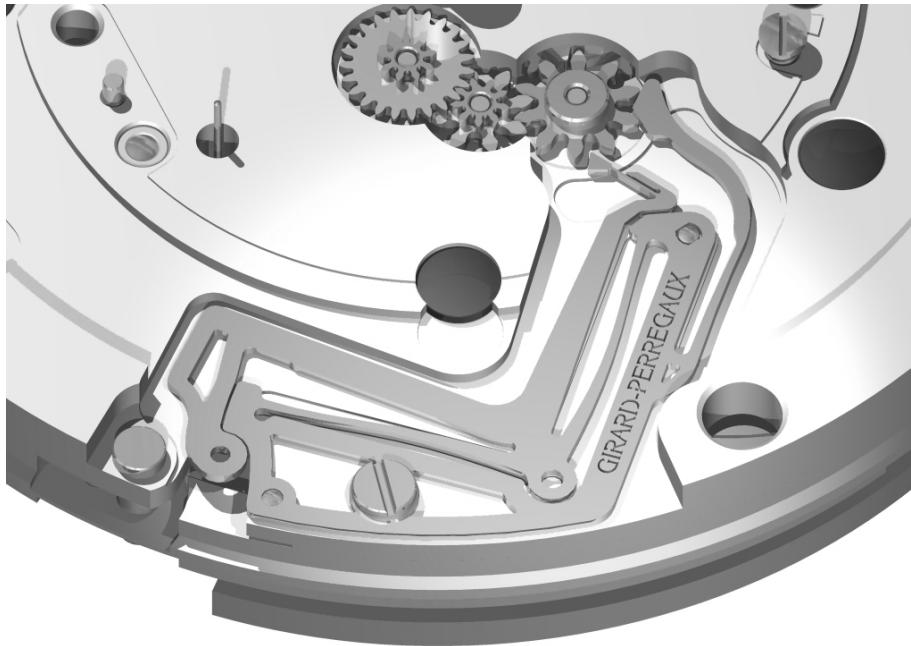


Figure 7. Correcteur multiple en position poussée.

Le correcteur latéral, quant à lui, permet l'ajustement ou la correction d'un deuxième affichage. L'action sur le correcteur peut être effectuée des milliers de fois sans risque de casse et avec une répétitivité garantie.

De façon identique au correcteur multiple, le correcteur latéral est basé sur une articulation flexible dont les positions sont visibles sur le graphique de la Figure 8.

Une came à ergots commande la bascule qui va agir sur le correcteur. Ce dernier, par son déplacement latéral, va permettre à des doigts situés sous le pignon fixé à son extrémité de faire avancer d'une ou plusieurs unités le deuxième affichage. A l'extrémité du correcteur, une pierre a été chassée de façon à limiter un élément supplémentaire en hauteur, la place pour un pont n'étant pas disponible.

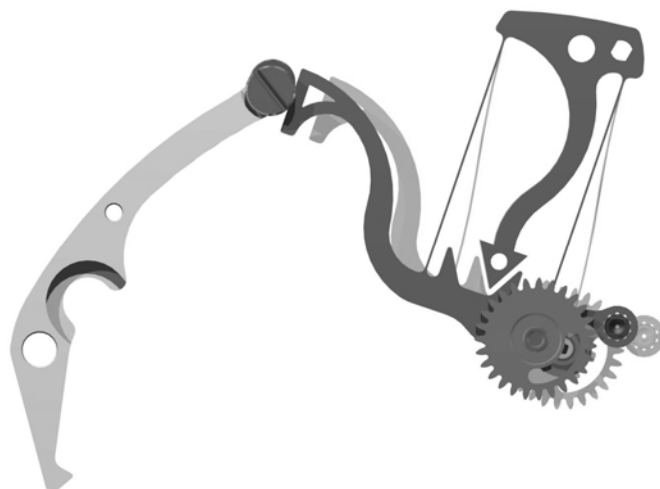


Figure 8. Correcteur latéral assemblé. La position de correction est visible en gris clair.

b) secteur des minutes et des heures, Agenhor pour Van Cleef & Arpels

Le mouvement rétrograde de la pièce « Féerie » de Van Cleef & Arpels est également l'illustration parfaite d'un mécanisme qui utilise les possibilités offertes par la technologie LiGA.

Les composants principaux de ce mécanisme développé par Agenhor consistent en un secteur des minutes et un secteur des heures multifonctionnels en NiP (Figure 9).

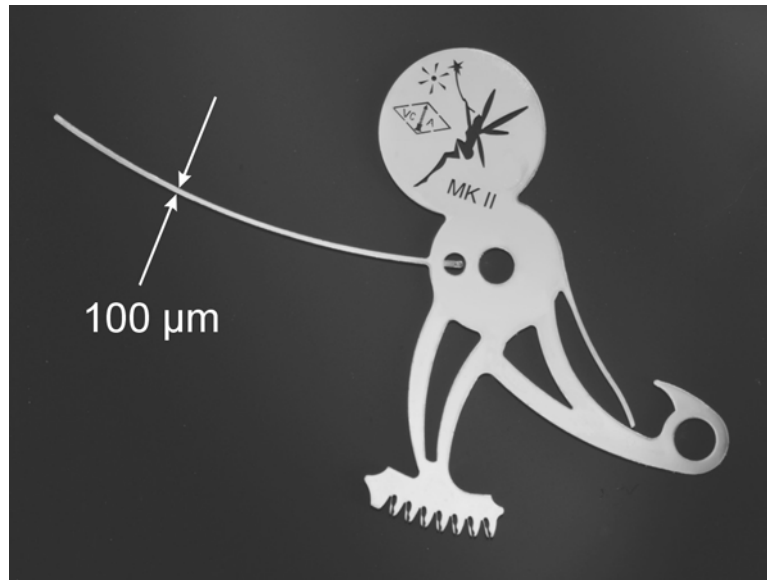


Figure 9. Secteur des Heures avec entre autres, un numéro d'identification, un décor esthétique, deux lames ressorts, un secteur denté avec rattrapage de jeu et un pivotement pour lecteur de came.

Ces secteurs sont composés de plusieurs éléments ayant pour tâche d'assurer des fonctions bien précises. La longue lame ressort maintient la partie qui glisse sur la came sous tension et assure la fonction rétrograde de l'aiguille. Le gain de place est important et permet la configuration proposée. Une deuxième lame intégrée au même composant maintient en position un cliquet. Il est à noter que ces lames ont subi plusieurs millions d'allers-retours et ne présentent aucune marque de fatigue ni aucun fluage. Les dents fendues permettent la suppression des ébats et évitent l'utilisation d'un spiral supplémentaire afin d'éviter des flottements sur le pignon. En l'occurrence, l'utilisation d'un spiral pour chaque pignon aurait été impossible, car leur position aurait été trop proche. L'encombrement disponible est insuffisant (Figure 10). Le jeu sur les engrenages aurait été visible sur l'affichage. Ces imprécisions auraient été particulièrement visibles sur ce mouvement en raison de la forte inertie des aiguilles utilisées. En or serti de diamants, ces dernières ont en effet une masse dix fois supérieure à celles d'aiguilles standard. La mise en mouvement de ce type d'aiguilles nécessite une force importante. Les dents fendues prouvent ici leur grande résistance et leur forte élasticité. Finalement, l'ajout de motifs décoratifs ou fonctionnels permet une personnalisation intéressante au sein même du mouvement.

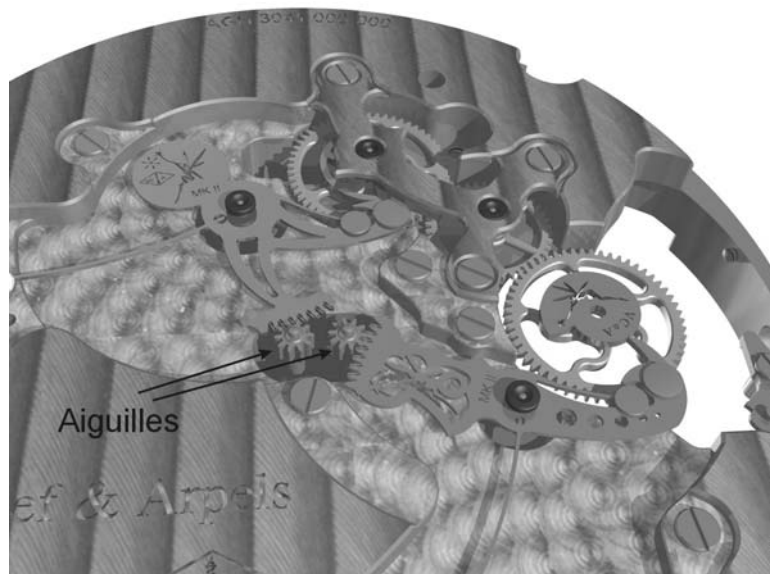


Figure 10. Vue d'ensemble du mécanisme rétrograde « Van Cleef & Arpels ». Les aiguilles sont trop proches pour permettre l'utilisation de spiraux de rappel sur les pignons d'aiguilles.

5) Dernières Innovations

Le silicium est un matériau de plus en plus présent dans les mouvements horlogers. En collaboration avec Sigatec SA, Mimotec SA a fabriqué un composant qui combine les technologies LiGA et silicium [6]. Le mariage des deux matériaux a été utilisé par Ulysse Nardin qui a développé une solution originale pour le pont des minutes de sa montre conceptuelle Innovision. La combinaison des deux procédés photolithographiques amène une précision extrême. Le silicium apporte de très bonnes propriétés tribologiques, alors que le nickel permet de rigidifier le tout grâce à ses propriétés mécaniques (Figure 11).

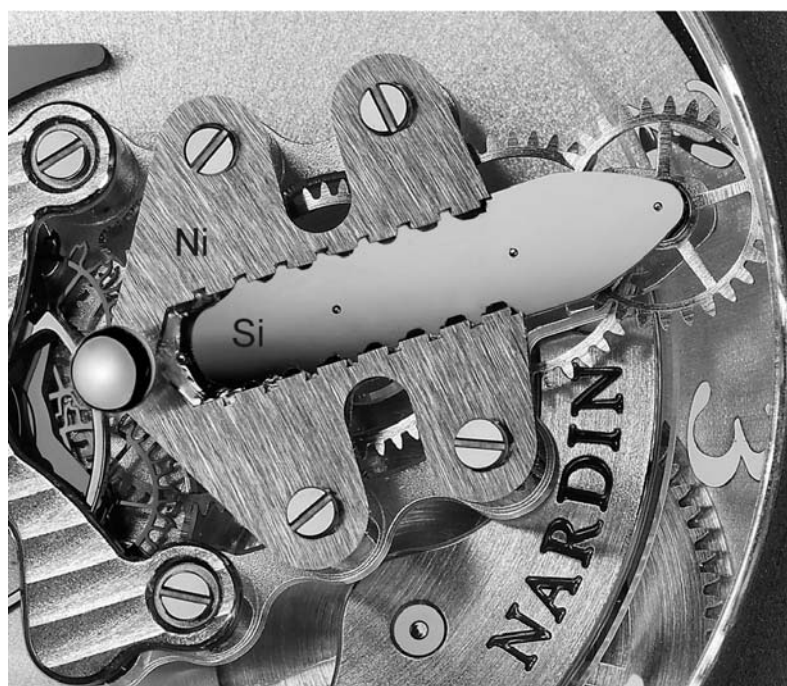


Figure 11. Pont des minutes en bi-matériau qui intègre les avantages du nickel et du silicium

Pour terminer et dans un souci constant d'innovation, Mimotec SA a présenté lors du dernier salon EPHJ l'intégration de décors dans certains de ses composants. Cette nouvelle étape dans la fabrication de pièces LiGA permet de personnaliser les pièces en y ajoutant des effets optiques inaccessibles par méthodes conventionnelles. La finesse des détails qui sont réalisables autorise une protection accrue. Le décor peut être appliqué dans des zones bien définies de la pièce. Les bavures résultantes des procédés traditionnelles sont éliminées, car le décor est réalisé en même temps que la pièce. Il n'est pas obtenu par un usinage ultérieur. Les images de la Figure 12 montrent différents effets produits par les décors intégrés des composants Mimetal™. (a) soleillage (b) tressage et (c) motifs irisés.

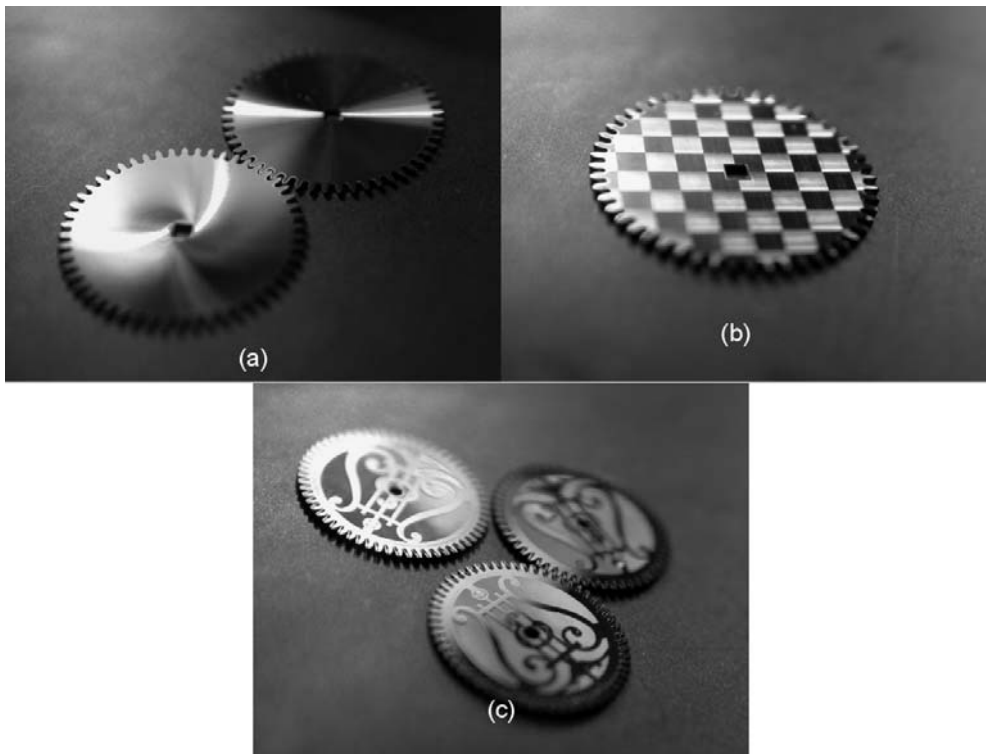


Figure 12. Motifs intégrés sur les composants Mimetal™. Exemples de (a) décor classique (soleillage), (b) décor fantaisiste (c) décor irisé.

6) Conclusions

Le LiGA est maintenant devenu une technique qui a fait ses preuves pour la fabrication de micro-composants mécaniques. En dix ans, l'évolution de la technologie adaptée aux applications horlogères a été continue. Il n'en reste pas moins que cette technologie reste jeune et nécessite encore et toujours un travail important de R&D :

Remerciements

Le Groupe Sowind et les maisons Agenhor et Ulysse Nardin sont particulièrement remerciées pour avoir gracieusement mis à notre disposition le matériel et le temps nécessaires à la compréhension de leurs inventions.

[1] E. W. Becker, W. Ehrfeld, P. Hagmann, A. Manner, and D. Münchmeyer, *Microelectronic Eng.* **4**, 35, (1986).

[2] H. Lorenz, thèse EPFL N°1770, (1998).

[3] www.mimotec.ch

[4] EP1520123

[5] C. Charrot, diplôme de technicienne en microtechnique, Ecole d'horlogerie de Genève CPT, (2008).

[6] demande de brevet EP 07122526.2

Légendes des Figures

- Figure 1.** Empreinte « planche – pignon » constituée d'un empilement de deux niveaux électroformés simultanément.
- Figure 2.** Images au microscope électronique de composants injectés. La rugosité de l'état de surface entre un pignon injecté dans une cavité érodée au fil (a) ou obtenue par procédé LiGA (b) est fortement diminuée.
- Figure 3.** Image MEB d'une étoile démontrant les possibilités de design du procédé Mimetal™.
- Figure 4.** Roue de décaleur monobloc. Les 3 dents sont parfaitement positionnées les unes par rapport aux autres et sont de forme totalement différente.
- Figure 5.** Image au MEB de dents fendues asymétriques. L'ouverture ainsi que la plus petite largeur de lame sont de 20 µm.
- Figure 6.** Correcteurs multiple (a) et latéral (b) dont la conception est basée sur le principe des éléments flexibles. Plusieurs fonctions sont assurées par un seul composant.
- Figure 7.** Correcteur multiple en position poussée.
- Figure 8.** Correcteur latéral assemblé. La position de correction est visible en gris clair.
- Figure 9.** Secteur des Heures avec entre autres, un numéro d'identification, un décor esthétique, deux lames ressorts, un secteur denté avec rattrapage de jeu et un pivotement pour lecteur de came.
- Figure 10.** Vue d'ensemble du mécanisme rétrograde « Van Cleef & Arpels ». Les aiguilles sont trop proches pour permettre l'utilisation de spiraux de rappel sur les pignons d'aiguilles.
- Figure 11.** Pont des minutes en bi-matériau qui intègre les avantages du nickel et du silicium.
- Figure 12.** Motifs intégrés sur les composants Mimetal™. Exemples de (a) Décor classique (soleillage), (b) décor fantaisiste (c) décor irisé.