

# Quelques réflexions sur le possible futur de l'horlogerie mécanique

**Florent Boudoire, Emmanuel Dominé**

CSEM - Centre suisse d'électronique et microtechnique  
Jaquet-Droz 1, CH – 2002 Neuchâtel  
[info@csem.ch](mailto:info@csem.ch) – [www.csem.ch](http://www.csem.ch)

**Hatem Ghorbel, Florian Serex**

Ecole d'ingénieurs Arc  
Espace de l'Europe 11, CH – 2000 Neuchâtel  
[ingenierie@he-arc.ch](mailto:ingenierie@he-arc.ch) – [www.he-arc.ch/ingenierie](http://www.he-arc.ch/ingenierie)

**Evelyne Vallat**

ASRH - Association suisse pour la recherche horlogère  
Jaquet-Droz 1, CH – 2002 Neuchâtel  
[info@asrh.ch](mailto:info@asrh.ch) – [www.asrh.ch](http://www.asrh.ch)

**U**n groupe d'acteurs du domaine de la recherche et de l'innovation horlogère s'est réuni pour débattre de leur vision du microcosme de la montre mécanique dans une à deux générations. Le texte ci-après présente le résultat de leurs échanges.

La projection dans le futur met au défi l'esprit créatif et imaginatif de l'humain face au devenir de la montre mécanique. Outre les évolutions technologiques liées à la connectivité augmentée pour les montres électroniques et l'apparition probable des montres optiques ultraprécises, la montre mécanique restera un produit de haute technicité et d'émotion.

Les marques se différencieront par des critères esthétiques, de durabilité, mais aussi par leur technologie et la performance de leurs produits. La montre du futur devra permettre d'offrir une heure précise même après plusieurs semaines d'immobilité, sans être remontée. Elle devra se passer d'entretien et garder son aspect d'origine après plusieurs années. Les moyens de production permettront à de petites marques de développer et de fabriquer de tels produits en petites séries à des prix plus compétitifs que certaines grandes maisons.

L'évolution des moyens de conception, de production et de distribution va aussi conduire à la disparition de certains métiers et à la création de nouveaux. La formation horlogère devra inévitablement évoluer pour répondre à ces besoins.

La durabilité va aussi devenir un critère primordial dans le cadre des différentes phases du cycle de vie d'une montre.

Nous allons traiter ces différents aspects en proposant notre vision d'un potentiel futur du monde de l'horlogerie mécanique.

## Evolution des mouvements horlogers grâce aux nouvelles technologies

Lors des dernières décennies, la base des mouvements mécaniques est restée très similaire. La plupart du temps, l'organe réglant était basé sur la combinaison d'un oscillateur balancier spiral et d'un échappement à ancre suisse.

Les techniques de fabrication liées à l'industrie des semi-conducteurs ont permis de réaliser des structures de très grande précision et d'une extrême finesse. Dans un premier temps, l'industrie a utilisé ces moyens de production pour remplacer des composants, mais toujours sur des principes horlogers traditionnels. Cependant, ces techniques de fabrication permettent d'envisager de tout nouveaux concepts de fonctionnement des mouvements grâce notamment aux guidages flexibles. Il est probable que dans le futur, les marques horlogères vont se différencier par des organes réglants spécifiques à chacune.

La combinaison des guidages flexibles avec les technologies de DRIE<sup>1</sup> nous permet d'envisager des pivots virtuels flexibles en remplacement des balanciers spiraux. La diminution des frottements va conduire à une augmentation de la réserve de marche. Les montres mécaniques du futur auront une réserve de marche supérieure à un mois.

<sup>1</sup> Deep Reactive Ion Etching

Les amplitudes de fonctionnement plus faibles vont nous conduire à concevoir de nouveaux échappements, mais aussi à élaborer de nouvelles méthodes de conception et d'analyse.

Un exemple est l'échappement Siloscape couplé à l'oscillateur Wittrick (voir Fig. 1). Intégré dans un mouvement, la réserve de marche a pu être multipliée par trois par rapport au mouvement standard avec un échappement à ancre suisse et balancier spiral.



Fig. 1 : Oscillateur Wittrick réalisé par microfabrication

De plus, l'utilisation de méthodes de traitement de surface et de nanostructuration, par exemple grâce au laser, permet de fonctionnaliser les pièces en changeant les caractéristiques de la matière ou même en rendant une surface hydrophile. Il est imaginable que la lubrification sera mieux maîtrisée voire superflue grâce à des traitements de surface qui garantissent un coefficient de frottement bas et stable dans le temps.

Ces traitements de surfaces vont aussi nous permettre d'améliorer l'esthétique et la résistance, dans la durée, du produit.

### Technique et organisation de la production

D'ici quelques décennies, les procédés de fabrication microtechniques soustractifs auront connu une transformation radicale. Le cœur de cette évolution résidera dans l'autonomie croissante des moyens de production, rendue possible par la maturité des jumeaux numériques, de l'intelligence embarquée et de l'apprentissage machine. Les machines de production ne seront plus de simples exécutantes: elles construiront elles-mêmes leur gamme opératoire en fonction de la pièce à produire, choisissant les outils, adaptant les paramètres d'usinage et réalisant leur propre mise en train sans intervention humaine. Cette autonomie technique permettra une supervision continue du processus, intégrant des capteurs intelligents capables de détecter la moindre dérive et de valider en temps réel la conformité des pièces. Le contrôle qualité deviendra ainsi une fonction intégrée, discrète, mais omniprésente, chaque pièce quittant la machine avec un protocole de fabrication et de validation complet.

À l'échelle de l'atelier, cette intelligence distribuée transformera l'organisation industrielle (voir Fig. 2): les flux linéaires séquentiels figés céderont la place à des îlots autonomes interconnectés, partageant leurs ressources à la demande. Il ne s'agira plus d'optimiser une ligne de production, mais de coordonner un réseau modulaire de procédés de fabrication capable de répondre avec agilité aux besoins changeants. Cette architecture distribuée permettra une gestion à capacité finie, même dans de petites structures, tout en offrant une résilience inédite: une panne sur une machine n'interrompra plus la chaîne, le besoin étant automatiquement redirigé vers une ressource équivalente disponible.



Fig. 2: La micro-usine: exemple d'architecture de production distribuée (crédit photo: patriceschreyer.com)

La précision exigée par la microtechnique restera un défi, mais sera gérée avec une nouvelle approche. L'appareillage intelligent deviendra une stratégie clé: chaque composant portera avec lui sa signature dimensionnelle, et les assemblages se feront par compatibilité optimale, minimisant ainsi l'impact des variations de tolérances sans recourir à des ajustements ou retouches coûteuses.

En parallèle, la chaîne d'approvisionnement s'intégrera pleinement au système de production. Les flux seront tirés d'un bout à l'autre, coordonnés par des plateformes numériques régionales reliant fournisseurs, sous-traitants et recycleurs. L'effet coup de fouet, source majeure d'instabilité, disparaîtra au profit d'un écosystème fluide, réactif et piloté par la demande réelle. Cette fluidité ne pourra être atteinte qu'avec des matériaux choisis autant pour leurs propriétés que pour leur compatibilité avec des chaînes de recyclage courtes, locales, et peu impactantes.

Enfin, la durabilité ne sera plus un objectif secondaire mais un critère d'optimisation à part entière. Les outils, lubrifiants et autres consommables seront pensés pour durer, être entretenus, reconditionnés ou recyclés dans une logique circulaire. L'impression 3D d'outillage à la demande permettra de réduire les stocks et d'adapter finement les moyens aux besoins.

L'ensemble de ces évolutions conduira à une démocratisation de la fabrication microtechnique: concevoir et produire un mouvement ou un habillage de haute précision

ne sera plus réservé à quelques ateliers spécialisés, mais deviendra possible pour de petites structures innovantes, connectées à un réseau de production intelligent. L'outil industriel ne sera plus une contrainte, mais un partenaire invisible, fluide, au service de la création et de l'innovation.

## Fabrication additive

Dans un horizon de trente à cinquante ans, l'horlogerie mécanique pourrait intégrer plus largement la fabrication additive pour concevoir et produire des composants horlogers jusqu'alors impensables. Si la fabrication additive, dans le monde horloger, reste aujourd'hui principalement cantonnée au prototypage rapide et à la fabrication d'outillage en appui des méthodes traditionnelles, son potentiel dépasse déjà ce cadre. Il est désormais possible d'identifier un ensemble de technologies émergentes dont l'impact sur l'industrie horlogère pourrait être déterminant. Parmi ces procédés, certains s'avèrent plus adaptés à la fabrication de composants d'habillage, tandis que d'autres ouvrent des perspectives concrètes dans la réalisation de pièces de mouvements. Cette différenciation s'explique par un compromis fondamental en fabrication, toujours valable dans le contexte de la fabrication additive, entre le rendement et la résolution. Cette distinction recoupe globalement la frontière entre les résolutions à l'échelle microscopique et mésoscopique.



Fig.3: Carrures de démonstration en titane produites par fabrication additive

Pour répondre aux exigences de précision des composants horlogers, deux grandes familles de technologies additives se distinguent: les procédés à balayage, offrant des résolutions submicrométriques mais à faible débit (comme la lithographie à deux photons ou la déposition électrochimique FluidFM), et les procédés à projection, plus rapides mais limités à une résolution d'environ  $10\mu\text{m}$ , comme la micro-SLA combinée au moulage. Des recherches visent à repousser les limites de ces approches, notamment en augmentant les vitesses de scan ou en améliorant la résolution au-delà des tailles de pixels. L'hybridation des deux types de technologies apparaît aussi comme une voie prometteuse pour combiner précision et rendement.

Pour les composants d'habillage, plusieurs procédés offrent des solutions intéressantes. La stéréolithographie

avec résines chargées (voir Fig.3), le binder jetting, l'additive screen printing et le micro LPBF<sup>2</sup> permettent de produire des pièces complexes dans une grande variété de matériaux. Ces procédés permettent d'atteindre des états de surface comparables à ceux obtenus par moulage par injection mais avec une plus grande liberté de design. Dans le futur, l'amélioration de la fiabilité de ces procédés émergents et leur intégration avec des post-traitements adaptés permettront de répondre aux exigences de l'horlogerie.

Ayant établi le potentiel de la fabrication additive pour la production horlogère, il est essentiel de se demander comment cette technologie peut impacter ce métier, notamment à travers la liberté de design qu'elle propose. Ces méthodes de fabrication couvrent plusieurs étapes de la chaîne de production. Elles accélèrent le prototypage rapide, permettant de passer en quelques heures d'un modèle CAO à une pièce réelle testable. De plus, elles facilitent la fabrication de pièces de rechange à la demande, éliminant ainsi le besoin de stock et réduisant les délais. La fabrication additive autorise également la production de détails décoratifs intégrés dès le départ, tels que des gravures internes, des structures ajourées et des micro-ornements.

Cette technologie redéfinit le rôle du design horloger, offrant aux ingénieurs la possibilité de travailler en symbiose avec des algorithmes génératifs pour optimiser chaque composant, en tirant parti d'itérations et de simulations avancées. La généralisation de la fabrication additive transformerait profondément l'organisation de la filière horlogère.

## Intelligence artificielle

Le pilotage intelligent transforme radicalement le cycle de développement. Il devient plus rapide, plus souple, mais aussi plus créatif. L'IA explore des milliers de configurations mécaniques, simule leur comportement, et propose des géométries inédites, alliant performance, esthétique et originalité. Elle intervient également dans la modélisation biomimétique, traduisant des structures naturelles — tendons, toiles d'araignée, coquilles — en composants horlogers innovants, alliant finesse, robustesse et poésie.

Des assistants intelligents accompagnent chaque geste, chaque étape du développement et de la fabrication, suggèrent des variantes basées sur des compétences digitalisées toujours nourries des nouvelles expériences. Des interfaces intuitives en langage naturel participent à la perpétuation de ce savoir-faire.

Enfin, toute la chaîne de production, de l'approvisionnement à l'assemblage, est pilotée par des systèmes intelligents. Capables d'anticiper les crises logistiques, de localiser la production selon la demande, et de garantir une

tracabilité complète, ces systèmes inscrivent l'horlogerie dans une logique durable, distribuée et régénérative.

Ainsi, en 2050, l'horlogerie suisse ne sera pas simplement technologique: elle sera sensible, augmentée et profondément réinventée — une fusion subtile entre intelligence, tradition et créativité.

### Réorientation des filières de formation

Des changements rapides et profonds sont entre autres la caractérisation d'une révolution, mais le temps de la formation est un temps long. Les innovations technologiques liées à l'IA, l'évolution des modes de production et de distribution de l'énergie, les transformations des modes de fabrication et des fonctionnements des chaînes de valeur, les évolutions et les redéploiements géopolitiques sont les indicateurs de la quatrième révolution industrielle. La formation doit se réinventer pour permettre aux jeunes d'arriver sur le marché du travail équipés d'une palette d'outils de base leur permettant d'évoluer efficacement dans un environnement en mutation rapide. Ce sont ces outils qui doivent rapidement être identifiés par un travail collaboratif entre instituts de formation et acteurs du marché du travail.

Un de ces outils est sans conteste une méthode d'analyse de cycle de vie (ACV) adaptée aux produits horlogers. L'amélioration continue commence par la définition des méthodes de mesures de l'état actuel. Parler de durabilité dans la branche horlogère nécessite de mettre en place un standard de mesures de l'impact économique et socio-environnemental des activités de la branche. La Fédération horlogère suisse s'est attelée à cette tâche en créant un groupe de travail pour l'élaboration d'une nouvelle norme NIHS. La mise en œuvre de cet outil par la branche horlogère permettra d'évaluer la situation initiale et de prioriser les actions de réduction des impacts de ses activités sur la durabilité.

### Durabilité

Le bilan carbone est le premier indicateur auquel nous avons pensé dans le cadre de cette thématique, l'élévation soudaine des coûts de l'énergie ayant par exemple été le déclencheur ponctuel d'efforts de réduction de la consommation énergétique. Plusieurs cadres de référence, normes et indicateurs ont été développés à l'échelle internationale. Un ensemble de normes ISO (par exemple ISO 26000) ou les objectifs de développement durable de l'ONU (SDG) qui définit 17 objectifs dans l'Agenda 2030 permettent déjà d'évaluer et d'orienter les actions industrielles vers la durabilité de leurs activités.

Un arsenal réglementaire et normatif se met également en place pour contraindre les activités entrepreneuriales dans la voie de la durabilité. Si nous ne préparons pas des scénarii qui répondent aux défis de l'évolution des contraintes normatives, nous serons démunis quand elles devront être mises en œuvre. Dans ce cadre, l'ensemble de la communauté horlogère anticipe la mise en conformité de certaines opérations ou produits. Celle-ci touche par exemple certains alliages traditionnellement utilisés dans les montres mécaniques (le laiton au plomb ou l'alliage cuprobéryllium). Dans un futur proche, horizon de quelques années, il s'agit d'introduire de nouveaux alliages dans les environnements de production horlogers actuels. Afin d'identifier des alliages alternatifs conformes à l'évolution des réglementations et d'anticiper leur mise en production dans les délais imposés, un effort d'amélioration continue est en cours. Il réunit les acteurs de la chaîne d'approvisionnement et de production, partant des fondeurs d'alliages, via les sous-traitants et jusqu'aux marques et manufactures.

La hauteur de la marche à franchir pour introduire de nouveaux alliages en production dépend du contexte particulier à chaque entreprise. Néanmoins, des critères de choix initiaux incluant des critères de durabilité, tels que non-toxicité, disponibilité et potentiel de recyclage, permettent de limiter le nombre des alliages candidats à la substitution. Le cahier des charges horloger est particulier, puisqu'il comprend des exigences très spécifiques quant à l'usinabilité des alliages, leurs performances fonctionnelles (performances tribo-mécaniques) et leurs aptitudes à être décorés ou revêtus. Une méthode systématique de comparaison des performances des alliages candidats permet de proposer un choix initial d'alliages alternatifs à la communauté.

L'effort est en cours, la montre du futur sera forcément plus durable dans les décennies à venir.

### Conclusion

Depuis l'invention de l'échappement à ancre et du balancier spiral au 17<sup>e</sup> siècle, la montre mécanique a subi de nombreuses évolutions technologiques et cette évolution va certainement continuer et même s'accélérer.

Le monde horloger sera confronté à de profondes transformations que ce soit dans le produit lui-même, dans ses méthodes de réalisation ainsi que dans l'organisation des entreprises et la qualification du personnel.

En revanche, la beauté de la montre mécanique et l'émotion qu'elle apporte tant au niveau des prouesses techniques nécessaires à sa réalisation que par son esthétique irréprochable sera pérenne. ■