

Les meilleures techniques de fabrication d'engrenages et pièces horlogères à profils complexes

Pierre Falbriard - Responsable R&D

Louis Bélet SA
Les Gasses 11, CH – 2943 Vendlincourt
pfallbriard@louisbelet.ch – www.louisbelet.ch

Décembre 2023

55

Bulletin SSC n° 96

Les roues dentées et autres pièces de transmission constituent des éléments cruciaux dans les mouvements horlogers, en transmettant l'énergie d'un organe à l'autre le plus efficacement possible. Pour avoir le meilleur rendement dans les déplacements voulus, les designers de mouvements conçoivent des formes de dents complexes et d'une grande précision. Une fois imaginées et dessinées, ces roues doivent être produites avec les technologies actuelles et à un coût raisonnable. L'adage dit : « Toute pièce à usiner qui a un axe de rotation et des parties répétées autour de cet axe, typiquement une roue dentée, est sujette à pouvoir être produite par usinage synchronisé ». Utopie ou réalité ?



Figure 1 : Pièces aptes à l'usinage synchronisé

L'usinage synchronisé est une opération d'usinage où la pièce à usiner et l'outil de coupe sont en rotation. Positionnés l'un par rapport à l'autre d'une manière déterminée (Figure 2). Le rapport de rotation entre les deux est un rapport calculé et fixe.

La constance de ce rapport est primordiale et va influencer grandement la faisabilité et la qualité de la pièce usinée.

Les machines ont parfois tendance à perdre les positions angulaires des deux broches, surtout à basse vitesse de rotation. C'est un point à surveiller pour éviter des problèmes.

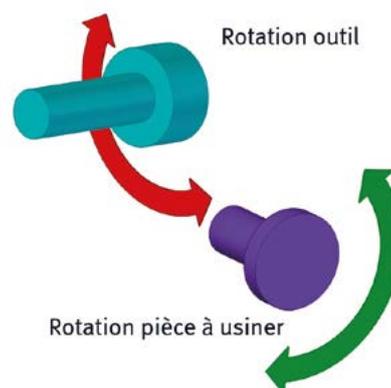


Figure 2 : Synchronisation outil-pièce

Taillage par génération

La méthode la plus répandue et connue d'usinage synchronisé est le taillage par génération à la fraise-mère. Elle est généralement l'option la plus rentable car elle est éprouvée et permet la production rapide et en volume de ces roues, même dans des cas spéciaux avec des formes de dents originales.



Figure 3: Taillage à la fraise-mère

Principe

Supposons une fraise-mère à un filet, c'est-à-dire qu'elle taille une dent par tour.

La fraise et la roue sont en rotation l'une par rapport à l'autre selon la formule¹ :

$$N_{pièce} = \frac{N_{fraise}}{Z_{pièce}}$$

La fraise-mère est positionnée angulairement de l'angle d'hélice α (Figure 4), par rapport à la pièce à tailler. Cet angle d'inclinaison α se calcule comme suit :

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{m}{\varnothing_{primitif\ fraise}} \right)$$

La fraise peut ensuite traverser la pièce d'une face à l'autre pour avoir un taillage bien cylindrique.

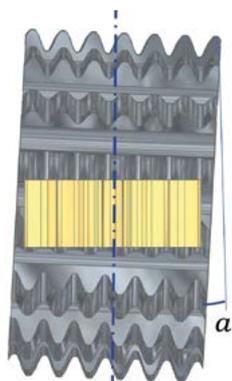


Figure 4: Angle d'inclinaison

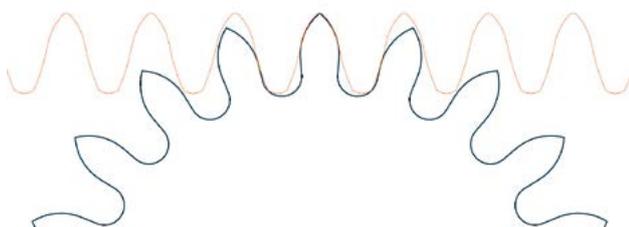


Figure 5: Roue NIHS et profil de fraise-mère

Le profil de la fraise ne « colle » pas au profil de la denture à tailler (Figure 5). Ce profil est calculé en fonction de la forme de la denture. En orange le profil de la fraise-mère, en noir le profil de la roue à usiner.

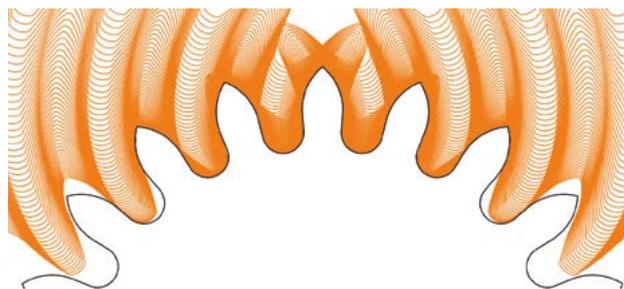


Figure 6: Génération du profil de la roue

C'est la rotation des deux pièces et le fait que les deux profils sont constamment en mouvement qui font que le profil de denture est généré (Figure 6), d'où le terme « taillage par génération ».

Dentures particulières

Les moyens de calculs et les machines de production de fraises de taillage modernes offrent maintenant des possibilités de tailler des formes de dents éloignées des standards, par exemple des dentures asymétriques (Figure 7, avec en rouge le profil de la fraise-mère).

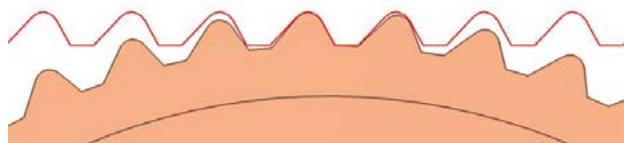


Figure 7: Roue à denture asymétrique

C'est une fraise-mère standard et qui s'utilise comme telle mais avec un profil qui est lui-même asymétrique.

Au-delà des roues dentées

Le taillage par génération ne se limite pas aux roues dentées. Il peut également être utilisé pour produire des cannelures sur des poussoirs ou des couronnes, ainsi que d'autres pièces tels des embouts de tournevis.

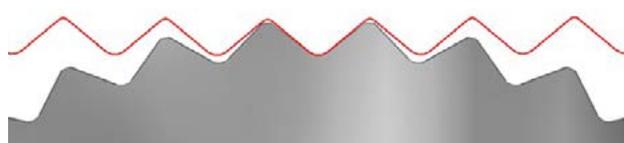


Figure 8: Profil de couronne

Autres formes spéciales :



Figure 9: Fraisage par génération d'embouts de tournevis

¹ Les termes et abréviations utilisés dans cet article se trouvent à la page xx

Fraise à plusieurs filets et application

Dans les exemples cités précédemment, nous avons supposé une fraise qui taille une dent par tour, c'est-à-dire une fraise-mère à un filet. Il est toutefois tout à fait possible de concevoir des fraises à plusieurs filets [1], qui taillent plusieurs dents par tour.

Le rapport de rotation se calcule alors ainsi :

$$N_{pièce} = \frac{N_{fraise} \times i}{Z_{pièce}}$$

La vitesse de rotation de la fraise est multipliée par ce nombre de filets. Le gain de temps de taillage peut être très avantageux surtout pour des planches avec un grand nombre de dents.

Une application du fraisage multi-filets intéressante : une roue à 35 dents où une dent sur 7 est manquante (Figure 10). Avec la fraise-mère à 7 filets, on va tailler 7 dents par tour. Il suffit d'enlever le profil sur un filet et il devient possible de tailler par génération. Une telle roue (Figure 11).

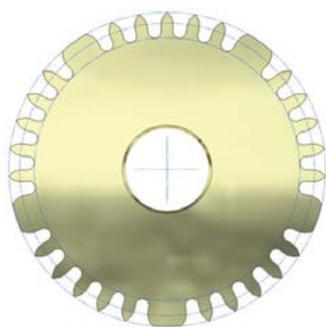


Figure 10: Roue à denture irrégulière une telle roue (Figure 11).

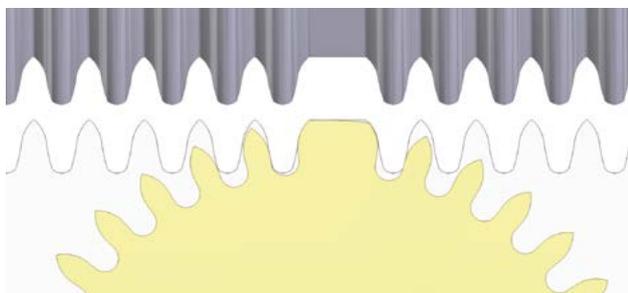


Figure 11 : Taillage à la fraise multi-filets

Le taillage index

Pour des profils vraiment très complexes, comme les roues d'ancre, le taillage par génération atteint ses limites. On utilisera plutôt le taillage avec une fraise index.

Si la cinématique est la même que pour le taillage par génération, l'outil est complètement différent. Chaque couleur de la Figure 13 correspond au profil

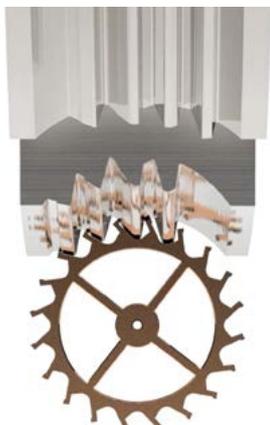


Figure 12: Taillage à la fraise index

d'une dent. Ces profils suivent la rotation de la pièce à tailler et coïncident avec la position de la denture au moment où la dent correspondante de la fraise passe à travers la matière.

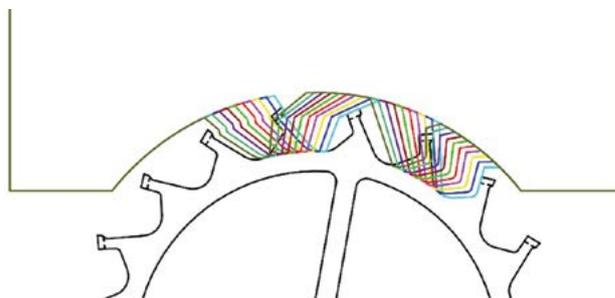


Figure 13: Détails des profils

Pour éliminer les bavures

La bavure est un problème récurrent de l'usinage, le taillage n'y échappe pas. Depuis longtemps les tailleurs utilisent le principe du taillage à deux fraises. C'est un procédé éprouvé mais complexe à régler, la moindre erreur ne pardonne pas. Le principe est simple : on taille dans un sens, et on vient toucher la sortie d'outil sur la pièce taillée avec l'autre fraise qui est inversée pour éliminer la bavure.

Les fraises sont souvent empilées sur un même tasseau (Figure 14), ce qui en fait un empilement d'erreurs qui peut engendrer du mal-rond et un fort battement axial.



Figure 14: Taillage à deux fraise

Il existe aujourd'hui un moyen qui simplifie grandement ce processus d'ébavurage : les outils de taillage DUPLEX (Figure 15). Ce sont des outils monobloc qui ont deux sens de coupe. Les positions des profils sont connues et maîtrisées ce qui permet de réduire les temps de réglage et d'augmenter considérablement la qualité du taillage car les profils sont parfaitement positionnés lors du contact avec la matière.

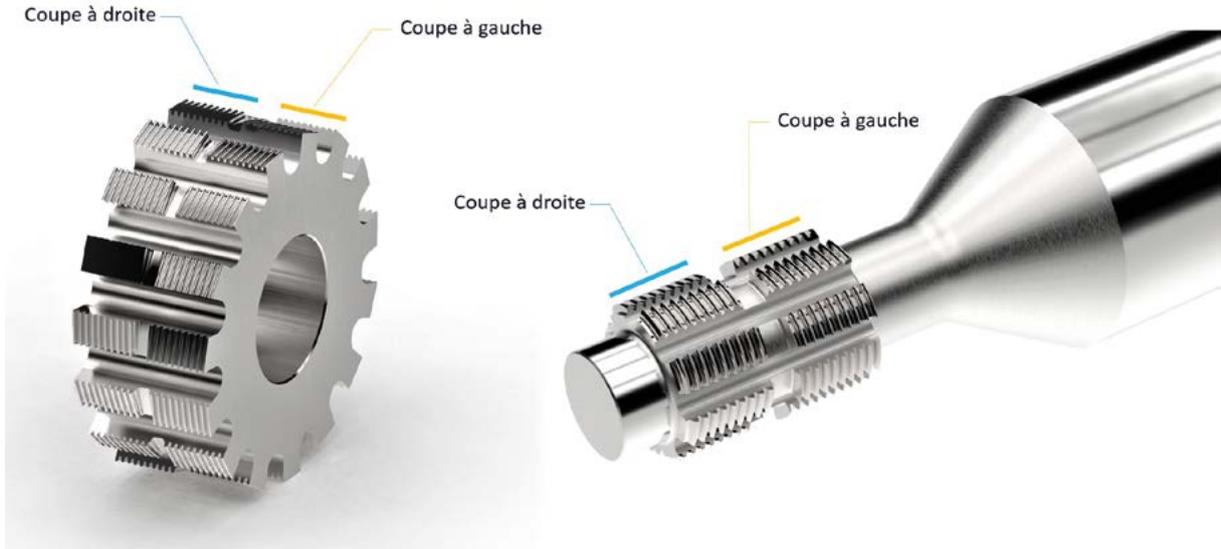


Figure 15: Fraises-mères DUPLEX

Les dentures intérieures

Des roues dentées à denture intérieure sont parfois nécessaires selon la conception du mouvement. Si des roues à denture intérieure sont courantes dans le monde de la mécanique, la grosse difficulté dans le monde horloger est la grandeur du module généralement $m0.2000$.

Il existe un procédé de fabrication de ces roues dentées appelé «skiving», qui nous vient de la mécanique générale.

Concernant le principe de taillage, c'est toujours une rotation synchronisée de la roue et de l'outil. L'outil est incliné de l'angle A_i par rapport à l'axe de la pièce à tailler (Figure 17). Cette inclinaison est directement proportionnelle à la vitesse de coupe :



Figure 16: Roue à denture intérieure m0.1000

Cette technique est de plus en plus employée ces dernières années. Il existe de nombreux fabricants d'outils de skiving à l'étranger, mais, et il y a un gros mais, la limite inférieure se situe presque toujours à $m0.5000$ ce qui est complètement hors contexte en horlogerie.

Skiving

Micro skiving

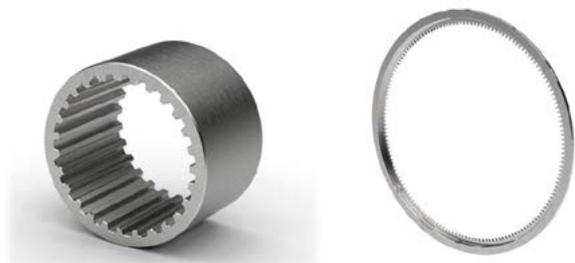


Figure 18: Skiving DIN m0.15000 et Micro skiving NIHS m0.14000

Heureusement, il existe aujourd'hui la possibilité de fabriquer des outils de skiving pour des modules horlogers. S'ils sont très difficiles à produire par les fabricants d'outils, la plupart des machines de production modernes permettent de les utiliser. Ils sont appelés «outils de Micro skiving».

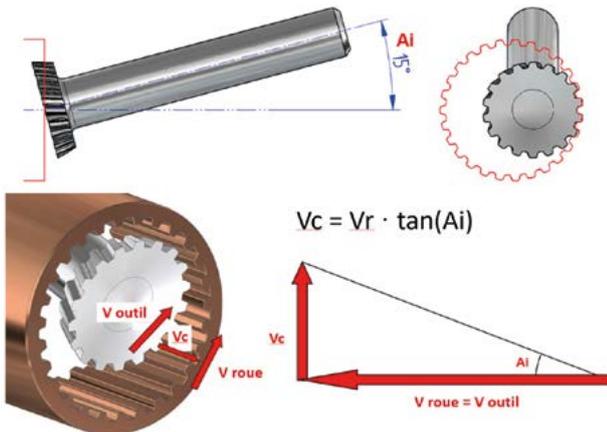


Figure 17: Principe du skiving



Figure 19: Résultat m0.1200 après taillage

Le polygonage

Le polygonage est également un procédé de fabrication qui permet d'usiner efficacement et avec une haute qualité des pièces avec des motifs répétés. Régulièrement employé pour usiner rapidement des tiges carrées par exemple.

Le polygonage peut être toutefois particulièrement utile pour certaines pièces horlogères qui contiennent des dentures Breguet ou frontales comme les pignons coulants ou les lunettes à crans.



Figure 20: Pignon coulant



Figure 21: Lunette crantée



Figure 22: Principe du polygonage

Le principe de taillage est le suivant :

La pièce à tailler et la fraise tournent simultanément selon le rapport :

$$N_{\text{pièce}} = \frac{N_{\text{fraise}} \times Z_{\text{fraise}}}{Z_{\text{pièce}}}$$

Il est important que le rapport des nombres de dents $Z_{\text{pièce}}/Z_{\text{fraise}}$ ne soit pas un nombre entier (dans notre exemple $40/6 = 6.667$), pour permettre à chaque dent de l'outil de tailler chaque dent de la pièce. La denture sera ainsi plus régulière.

Filetage par polygonage

Le filetage de vis horlogère aux normes NIHS se fait également fréquemment par un procédé de polygonage, c'est une méthode simple et efficace et qui permet une qualité très élevée en un temps de cycle très court, de l'ordre de la seconde.

Le rapport de rotation est quasiment toujours 1:1 :

$$N_{\text{pièce}} = N_{\text{fraise}}$$

Le profil sur la fraise correspond au profil du filet à usiner (Figure 23).

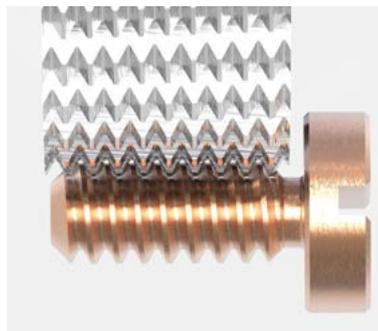


Figure 23: Le profil de la fraise correspond au profil du filetage

Un décalage sur chaque dent est réalisé pour qu'il y ait un pas d'écart sur un tour complet. Comme le rapport de rotation est 1:1, le pas créé sur la vis est le même que sur l'outil.

L'outil fait uniquement un déplacement latéral par rapport à l'axe de la vis. Déplacement qui est égal à la profondeur du filet.



Figure 24: Principe du filetage par polygonage

Filetage par polygonage de forme

S'il est possible de polygoner des filetages standard à profil régulier, pourquoi en serait-il autrement pour des filetages de formes, irréguliers et hors normes ?

La Figure 25 nous montre un filetage de forme, partiellement conique et avec un pas non constant.



Figure 25: Vis filetée à profil spécial

Ce type de filetage est parfaitement usinable avec des méthodes traditionnelles de tourbillonnage, peignage au burin ou simplement par fraisage. Ces opérations sont tou-

tefois difficiles à programmer et les temps de cycles sont longs.

Avec le filetage par polygonage de forme, la conception et la fabrication de la fraise (Figure 26) est certes complexe pour le fabricant d'outils, mais le temps d'usinage de la vis est sans commune mesure avec les procédés cités précédemment.



Figure 26: Fraisage de filetage par polygonage de forme

Le programme d'usinage devient le même qu'avec des profils standard, la fraise fonce dans la matière et recule une fois arrivée en fond de filet (Figure 27).



Figure 27 : Filetage par polygonage de forme

Il devient ainsi possible de produire rapidement, en grande quantité et avec une très haute qualité, des formes de filet de vis qui sont normalement difficiles à usiner. Les formes peuvent être très variées (Figure 29). La rapidité d'usinage permet aussi d'en réduire les coûts de production.

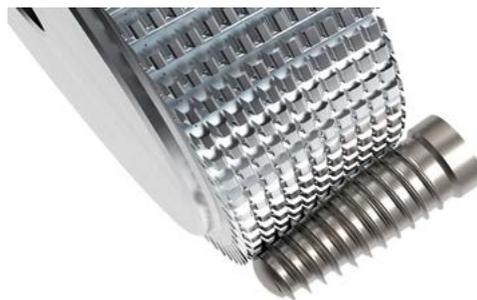


Figure 28: Détail polygonage de forme

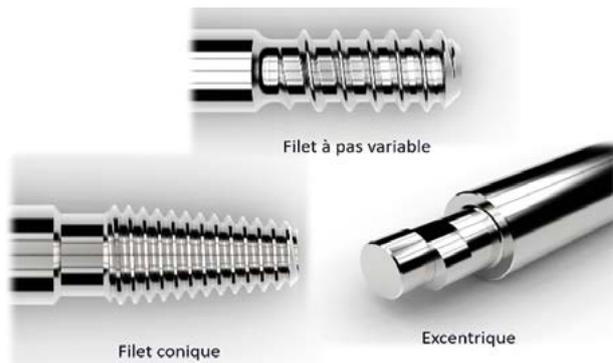


Figure 29: Exemple de profils spéciaux

Conclusion

L'usinage synchronisé, avec des techniques telles que le taillage par génération, le skiving et le polygonage, offre des possibilités dans la fabrication de roues dentées, de vis, et de pièces horlogères complexes, qui sont souvent méconnues. Ces méthodes permettent aux concepteurs de mouvements de repousser les limites de la créativité tout en maintenant une qualité et une très haute précision. Elles permettent aussi et surtout de pouvoir produire à un coût raisonnable et avec le parc machines existant. Il ne faut pas hésiter à prendre contact avec les fabricants de machines et les concepteurs d'outils spécialisés dans la microtechnique et l'horlogerie pour connaître les opportunités.

Si l'adage:«Toute pièce à usiner qui a un axe de rotation et des parties répétées autour de cet axe, est sujette à pouvoir être produite par usinage synchronisé» n'est dans la pratique par toujours vrai, il n'empêche que les possibilités sont nombreuses. ■

Termes et abréviations utilisés dans cet article :

| | | |
|-------------------------|----|---|
| Module | m | Facteur qui définit la taille des dents d'une roue dentée |
| Ø primitif d'une roue | Ød | Ø de tangence de la roue sur le Ø primitif de la roue conjointe |
| Ø primitif d'une fraise | | Ø de tangence de la fraise sur le Ø primitif de la roue |
| Zroue | | Nombre de dents de la roue à tailler |
| Zfraise | | Nombre de dents de la fraise |
| Nfraise | n | Nombre de tours par minute de la fraise |
| Npièce | n | Nombre de tours par minute de la roue à tailler |
| Angle d'hélice | a | Angle de l'hélice de l'hélicoïde des profils de fraise-mère |
| Nombre filets | i | Nombre de dents taillées par la fraise pour un tour sur elle-même |
| Vitesse de coupe | Vc | Vitesse de déplacement de l'arête de coupe de l'outil dans la matière |

FORCEMETRE-*suite*

Presses microtechniques 4.0 avec mesure combinée de la force et du déplacement



WWW.VOH.CH



witschi

LEADING SWISS PRODUCTS



CHRONOMASTER® AUTO
PRECISION IS PRECIOUS

WITSCHI.COM

Plateforme d'échange, de communication et de promotion des micro et nanotechnologies en Suisse occidentale

Fondé par les sept cantons de la Suisse occidentale, Micronarc développe et promeut la place scientifique, technique et économique régionale du domaine des micro et nanotechnologies et la met en réseau avec les infrastructures de formation, de R&D, de transferts de technologies et d'accueil.



PROMOUVOIR

Faites-vous connaître. Nous vous aidons à montrer vos activités par une présence active lors d'événements (salons, foires) ou dans nos publications.



CONNECTER

Restez en contact. Nous vous offrons de nombreuses occasions de réseauter et d'échanger au travers de rendez-vous réguliers.



COMMUNIQUER

Informez-vous. Nos actualités et celles du réseau des micro-nanotechnologies sont diffusées sur notre site web, nos réseaux sociaux ainsi que notre newsletter.

PRESTATIONS

Stands groupés

Micronarc propose la tenue de stands collectifs sur différents salons et événements professionnels du domaine, avec des espaces « clé-en-main » pour les entreprises.

Nous serons présents en 2024 sur les salons suivants :

- SIAMS
- EPHJ
- TWS
- Micronora

Les inscriptions sont ouvertes sur notre site.

Nombre de places limité.

Ateliers thématiques

- Économie circulaire
- Transformation digitale
- Sensibilisation au développement international
- Le travailleur augmenté

Participation & sponsoring à des événements partenaires

- RobotYx
- ETFT
- NanoBioTech
- Journée d'Étude SSC

Micronarc Alpine Meeting

La conférence Micronarc Alpine Meeting se concentre sur les équipements, procédés et technologies innovantes pour les microproduits, avec des sessions ciblées dans l'horlogerie, le medtech, les capteurs et le novel manufacturing. Elle s'adresse aux professionnels industriels, académiques et institutionnels.

Mise en relation et échange d'informations

Micronarc

c/o FSRM
Ruelle DuPeyrou 4
2000 Neuchâtel, Suisse

Tél : +41 (0)32 720 09 00

E-mail : info@micronarc.ch

