



**TECHNIQUES**  
**DE L'INGÉNIEUR**

Réf. : **E6280 V1**

Date de publication :  
**10 octobre 2011**

# Réalisation de surfaces optiques de précision : procédés de fabrication

Cet article est issu de : **Electronique - Photonique | Optique Photonique**

par **François LEPRÊTRE**

**Pour toute question :**  
Service Relation clientèle  
Techniques de l'Ingénieur  
Immeuble Pleyad 1  
39, boulevard Ornano  
93288 Saint-Denis Cedex

**Par mail :**  
infos.clients@teching.com  
**Par téléphone :**  
00 33 (0)1 53 35 20 20

Document téléchargé le : **02/10/2016**

Pour le compte : **7200051155 - epfl biliotheque // yves BELLOUARD // 128.179.253.43**

© Techniques de l'Ingénieur | tous droits réservés

# Réalisation de surfaces optiques de précision : procédés de fabrication

par **François LEPRÊTRE**

Ingénieur Process Optique Thales Angénieux

<b>1. Rappel des principales étapes de réalisation .....</b>	<b>E 6 280 - 2</b>
<b>2. Description des procédés de fabrication des surfaces optiques</b>	<b>— 4</b>
2.1 Classification des procédés.....	— 4
2.2 Ébauche et polissage des matériaux ductiles ou quasi ductiles par usinage à pointe diamant : SPDT .....	— 4
2.3 Ébauche et polissage des matériaux ductiles ou non ductiles par CN : CNE et CNP .....	— 6
2.4 Procédés de retouche de polissage assisté par ordinateur : PAO .....	— 9
2.5 Procédés de moulage verre ou plastique : MOUL .....	— 14
2.6 Procédés de polissage plan : DP et CMP .....	— 16
<b>3. Comment sélectionner les technologies .....</b>	<b>— 17</b>
3.1 Quelles technologies pour quels matériaux ? .....	— 17
3.2 Quelles technologies pour quelles surfaces ? .....	— 17
3.3 Quelles technologies pour quelles performances ? .....	— 17
3.4 Quelle métrologie associée à quelles technologies ? .....	— 17
<b>4. Domaines d'application industriels et comparatif des procédés .....</b>	<b>— 21</b>
<b>5. Conclusion et perspectives .....</b>	<b>— 22</b>
<b>Pour en savoir plus .....</b>	<b>Doc. E 6 280</b>

**L**a fabrication optique couvre de grands domaines et permet d'obtenir une multitude de fonctions optiques :

- fonctions **réflectives** : la lumière se réfléchit sur une surface optique ;
- fonctions **réfractives** : la lumière traverse une surface optique ;
- fonctions **diffractives** : la lumière est diffractée par une surface optique.

Nous nous limiterons dans cet article à étudier principalement les nouvelles technologies de réalisation des composants optiques associés aux fonctions réflectives et réfractives.

Un composant optique simple comporte plusieurs aspects :

- une matière optique approvisionnée auprès des grands verriers du monde : Schott, Ohara, Hoya, Hikari, CDGM. La qualité de cette matière est un enjeu important pour les composants réfractifs et limite de plus en plus souvent ses performances. Pour les composants réflectifs, la matière sert de « support » à la fonction optique et assure une fonction mécanique importante ;
- des surfaces actives pour les composants réfractifs, une seule pour les composants réflectifs ;
- chacune des surfaces a une forme géométrique qui peut être plane, cylindrique, sphérique, asphérique ou de non-révolution (free form). Ces surfaces

sont ébauchées puis polies et leurs formes finales garantissent la performance optique du composant. La forme extérieure est ensuite usinée ;

- pour améliorer les performances optiques ou spectrales du composant, un traitement couche mince est déposé sur les surfaces : antireflet, dichroïque, réfléchissant, polariseur, séparateur ;

- pour améliorer les performances de lumière parasite, il peut être nécessaire de déposer un vernis noir sur les tranches des composants ou sur une partie de la surface.

De nouvelles technologies ont vu le jour ces vingt dernières années pour réaliser l'ensemble du composant optique et nous étudierons dans cet article les procédés modernes de fabrication des surfaces optiques (hors aspect traitement, collage et vernis). Après une revue indispensable des « grands classiques » de la technologie optique, toujours opérationnels en industrie et obligatoires dans certains cas, nous passerons en revue les différentes techniques d'usinage et de polissage. L'utilisation de ces technologies est possible ou non, en fonction du matériau, de la fonction géométrique souhaitée et du besoin en termes de précision. Nous continuerons par une revue de la métrologie nécessaire pour mettre en œuvre ces nouvelles technologies et nous terminerons par leur application dans l'industrie, les limitations actuelles et les axes de développements en cours.

## 1. Rappel des principales étapes de réalisation

■ Avant d'aborder les technologies de réalisation et pour faciliter la lecture de l'article, le glossaire suivant donne les principaux termes qui seront utilisés :

- **défaut de forme** : écart de forme par rapport à la surface théorique souhaitée. Le terme « **planéité** » est souvent aussi utilisé en tant que synonyme que ce soit pour des surfaces planes ou non ;
- **PTV** : *Peak To Valley* ou « crête à crête » : c'est l'amplitude maximale du défaut de forme (maximum – minimum) ;
- **Rms** : *Root mean square* : écart quadratique moyen ;
- **Ra** : terme exprimant l'écart moyen arithmétique ;
- **MRF** : *MagnetoRheological Finishing* ;
- **FJP** : *Fluid Jet Propulsion*.

■ Afin de réaliser une surface optique, les **grands principes suivants** sont applicables que ce soit pour les technologies classiques ou modernes.

- **Étape 1 Mise en forme matière** : à partir de la matière première approvisionnée sous forme de disque, barre ou moulage (figure 1a et 1b), il est procédé à des opérations de sciage, de trépannage. L'objectif est de créer des préformes pour l'ébauche des surfaces ainsi que certaines références mécaniques indispensables, pour les surfaces asphériques et *free form* par exemple. Le choix de la forme de la matière première est primordial selon les objectifs de coût sur la surface à réaliser, les quantités de pièces à fabriquer, les machines disponibles, mais aussi en fonction des performances optiques souhaitées.

- **Étape 2-1 Ébauchage** : l'objectif de cette phase est de réaliser la forme grossière des surfaces avec un état de surface ayant un Ra autour de 0,5 à 1 µm : l'outil utilisé est à abrasif libre ou maintenant quasi systématiquement, c'est un outil diamanté avec différents liants. C'est une étape majeure dans la réalisation de la surface optique.



Figure 1 – Matière brute

• **Étape 2-2 Doucissage** : l'objectif de cette étape est de diminuer la rugosité de la surface autour d'un Ra de 0,3 à 0,5 µm et de s'approcher de la forme finale à 1 ou 2 µm près en termes de défaut de forme.

• **Étape 3 Polissage** : à cette étape, le verre devient transparent, la rugosité se situant entre 0,2 et 5 nm Rms. La forme est finalisée dans la tolérance souhaitée (entre 0,1 et 0,5 µm PTV usuellement pour une application dans le visible). Le document de référence [24] décrit les principes du polissage.

• **Étape 4 Centrage/débordage** : la forme extérieure est finalisée et l'axe optique est rendu concentrique avec l'axe mécanique dans le cas d'une lentille par exemple.

■ De nombreux types de **surfaces** peuvent être réalisés. Les technologies modernes permettent de les obtenir plus facilement avec une meilleure précision :

• **Surface plane** : c'est la forme la plus simple, elle est souvent décrite dans le monde de l'optique comme une sphère avec un rayon infini (figure 2a).

• **Surface sphérique** : c'est une portion de sphère de rayon  $R$  (figure 2b).

• **Surface asphérique** (figure 2c) : c'est une surface de révolution dont le rayon de courbure local varie du centre vers le bord. Sa description mathématique est la suivante :

$$Z = \frac{c h^2}{1 + \sqrt{1 - e c^2 h^2}} + a_4 h^4 + a_6 h^6 + a_8 h^8 + a_{10} h^{10} + a_{12} h^{12} + \dots$$

avec  $Z$  profondeur,  
 $c$  courbure au sommet : inverse du rayon de courbure,  
 $h$  distance par rapport au centre de la lentille,  
 $e$  constante de conicité,  
 $a_4, a_6, a_8, a_{10}, a_{12}$  coefficients asphériques du 4<sup>e</sup> ordre, 6<sup>e</sup> ordre, etc. Ce sont des ordres pairs car l'asphérique est de révolution, il existe les termes  $a_5, a_7$ , etc. pour les asphériques de non-révolution (*free form*). Les termes  $a_4, a_6$  sont parfois notés A, B, C, etc.

Quand  $a_4$  à  $a_{12}$ , etc. sont nuls, on parle de conique pure. Si en plus  $e = 1$ , la surface est une sphère.

• **Surface cylindrique** (figure 2d) : c'est une surface de non-révolution qui présente une génératrice plane dans un axe et une génératrice sphérique dans l'autre axe.

• **Surface free form** (figure 2e et 2f) : c'est une surface complètement de non-révolution dont l'expression mathématique est décrite par un polynôme  $z$  (altitude) =  $f(x, y)$  (abscisse et ordonnée) :

$$z = \frac{\left(\frac{1}{R_x}\right)x^2 + \left(\frac{1}{R_y}\right)y^2}{1 + \sqrt{1 - (1 + k_x)\left(\frac{1}{R_x}\right)^2 x^2 - (1 + k_y)\left(\frac{1}{R_y}\right)^2 y^2}} + \sum_{m,n=0}^{\infty} C_{m,n} x^m y^n$$

avec  $R_x$  et  $R_y$  rayons de courbure respectivement selon  $x$  et  $y$ .

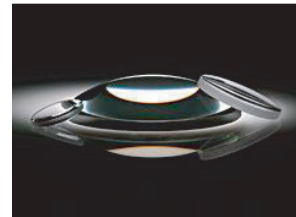
• **Surface diffractive** (figure 2g) : un exemple simple de surface diffractive est une lentille de Fresnel couramment utilisée dans les phares. Ces mêmes surfaces peuvent être réalisées avec des pas de l'ordre de 10 µm et une amplitude de 1 µm.



(a) lame à faces planes et parallèles



(d) lentille cylindrique



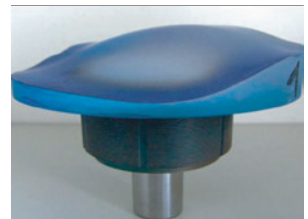
(b) lentille sphérique



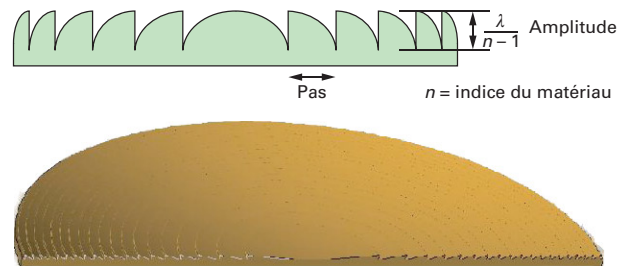
(e) surface free form



(c) lentille asphérique



(f) surface free form



(D. Faklis and G.M. Morris, « Polychromatic diffractive lenses, » U. S. Patent N° 5,589,982, December 31, 1996)

(g) lentille de Fresnel

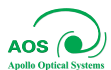


Figure 2 – Exemple de surfaces obtenues

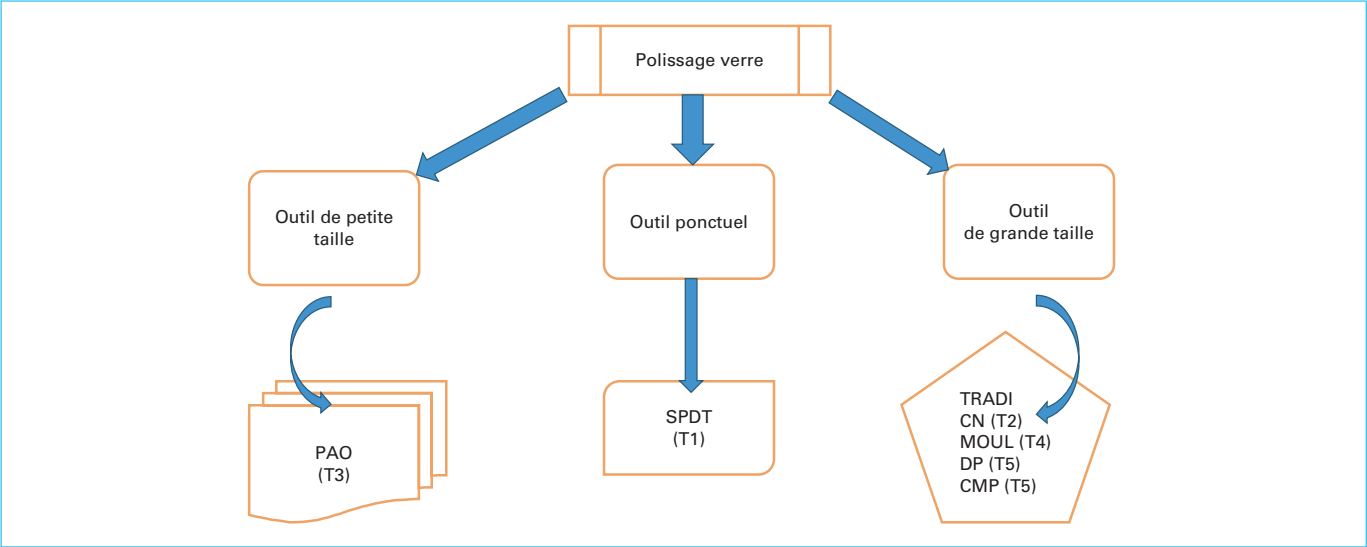


Figure 3 – Classification des procédés de fabrication des surfaces optiques

## 2. Description des procédés de fabrication des surfaces optiques

### 2.1 Classification des procédés

Nous allons dans la suite de l'article décrire les principales technologies de réalisation des surfaces optiques. Le polissage des surfaces est souvent mis en avant par sa difficulté et par les performances de planéité, mais le travail le plus important consiste à obtenir une bonne ébauche de la surface : une ébauche réussie, avec une rugosité régulière et un défaut de forme de l'ordre du micromètre, est la garantie d'un très bon polissage réalisé dans un temps très court. Nous prêterons donc aussi une attention particulière aux nouvelles technologies d'ébauche des surfaces.

Ces technologies ne sont pas toutes d'apparition récente mais elles sont actuellement le cœur des technologies industrielles utilisées dans les sociétés. Elles sont répétables, adaptées aux moyennes et grandes séries et font encore l'objet d'améliorations.

Une première classification des technologies peut être effectuée selon le **diamètre de l'outil** utilisé (figure 3).

Elles peuvent ensuite être classées en **cinq catégories** (figure 3) :

- **T1 – Technologie d'usinage** : ébauche et polissage des matériaux ductiles ou quasi ductiles par usinage à pointe diamant : SPDT (*Single Point Diamond Turning*) ;
- **T2 – Technologie par commande numérique (CN)** : ébauchage et polissage des matériaux ductiles ou non ductiles par CN : CNE (Commande Numérique Ébauche) et CNP (Commande Numérique Polissage) ;
- **T3 – Technologie de PAO** (figure 4) : procédé de retouche de polissage assisté par ordinateur : PAO ;
- **T4 – Technologie de moulage** : procédé de moulage verre ou plastique : MOUL ;
- **T5 – Technologie de polissage spécifique pour pièces planes** : polissage double face ou mécano-chimique DP (*Double Face Polishing*) ou CMP (*Chemical Mechanical Polishing*).

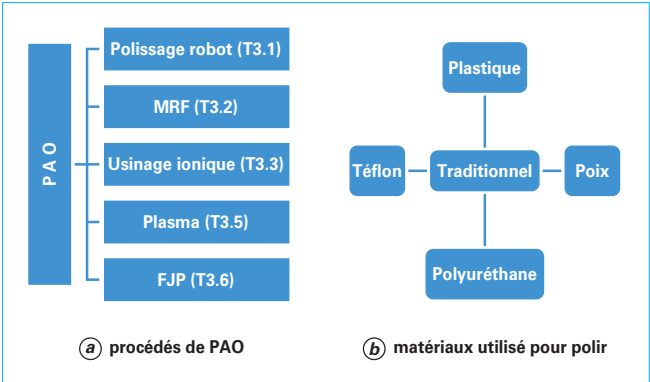


Figure 4 – Technologies PAO

Le tableau 1 fournit un second classement des technologies selon les trois critères suivants :

- taux d'enlèvement matière ;
- défaut de forme visé après application de la technologie ;
- rugosité obtenue.

### 2.2 Ébauche et polissage des matériaux ductiles ou quasi ductiles par usinage à pointe diamant : SPDT

La technologie d'usinage diamant « monopoint » est un des rares procédés à effectuer, avec la même machine et quasiment les mêmes outils (une pointe diamant ébauche ou de finition), l'ébauche et le polissage de certains matériaux (obtention forme et rugosité). C'est une technologie assez ancienne (1960-1970) mais qui fait l'objet de développements permanents et de nouvelles applications grâce à l'amélioration de la précision des machines. Elle était initialement utilisée dans le domaine de la métallurgie. Elle permet de travailler assez facilement des surfaces complexes (*free form*, asphériques), elle est très bien adaptée à l'usinage de

**Tableau 1 – Classification des technologies**

Technologie		Taux enlèvement matière (mm <sup>3</sup> /min)	Rugosité typique (1) (nm Rms)	Défaut de forme visé (2)
T1	SPDT	0,15	3	3
T3.1	PAO robot	5	2	1
T3.2	MRF	0,12	2	1
T3.3	Usion	0,5	2	1
T3.5	Plasma	0,03 à 30	1	2
T3.6	FJP	0,05	1-2	1-2
T2.1	CN ébauche	40	4	4
T2.2	CN polissage	0,7	2	2
T4.1	Moulage verre	NA	3	3
T4.2	Moulage plastique	NA	3	4
T5.1	Double face	0,3 à 0,5	1	2
T5.2	CMP	10 à 30	1-2	1

(1) 1 : superpoli < 0,5 nm.  
2 : très bon poli 1 à 3 nm.  
3 : poli avec possible reste structure 3 à 10 nm.  
4 : douci 100 à 500 nm.

(2) 1 : 10 < PTV < 50 nm.  
2 : 50 < PTV < 150 nm.  
3 : 150 < PTV < 300 nm.  
4 : 300 nm < PTV.


**Figure 5 – Matériaux usinables avec la technologie SPDT**

matériaux mous difficiles à polir. Ce process permet non seulement de réaliser les surfaces mais aussi, durant la même phase de créer des références mécaniques (diamètre, plat) parfaitement connues par rapport à l'axe optique de la surface. Le centrage/débordage d'une lentille en SPDT est par exemple fait en même temps que l'usinage des faces.

Elle offre une large gamme de matériaux usinables (figure 5).

Le **principe** de l'usinage diamant monopoint repose sur plusieurs points :

1. Une phase de surfaçage contrôlé par le déplacement d'un outil sur une pièce à usiner :

- l'enlèvement de matière est en mode ductile (ou quasi ductile selon les cas) ;
- il y a peu de paramètres à contrôler mais de façon très pointue.

2. L'utilisation de machines de type commande numérique multiaxes (4 à 5 axes) avec des déplacements parfaitement maîtrisés :

axes horizontaux rigides et précis ( $\approx 10$  nm), rotation sans mouvement asynchrone.

3. La qualité de l'outil qui est primordiale :

- le matériau doit être extrêmement dur : diamant, CBN, CW... ;
- la géométrie est contrôlée et adaptée au besoin : angle, rayon ;
- l'arête de coupe est parfaitement affûtée.

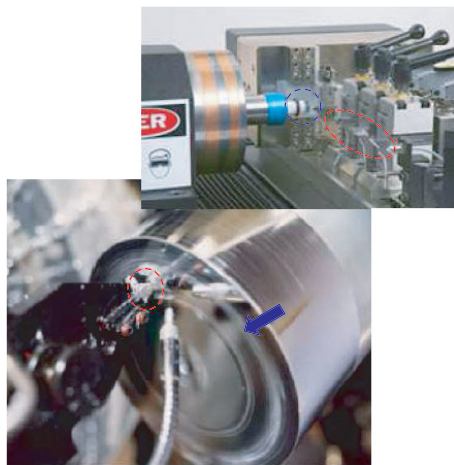
Diverses configurations de machines d'usinage diamant sont disponibles :

- *Single Point Diamond Turning* : l'outil est fixe comme sur un tourret, la pièce est mobile (figure 6a) ;
- *Flycutting* : l'outil est en rotation et la pièce reste fixe (figure 6b).

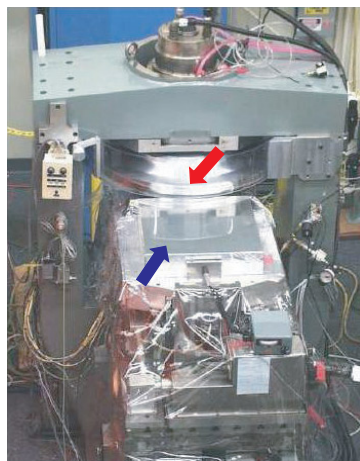
Le process d'usinage présente une certaine analogie avec celui du polissage :

- une série de passes d'usinage de moins en moins profondes avec l'outil d'ébauche jusqu'à obtention d'une forme à 2-3  $\mu$ m de la forme finale : cela permet de supprimer au fur et à mesure les fractures générées par la passe précédente (figure 7) ;





(a) machine SPDT



(b) machine Flycutting

Figure 6 – Machine de type SPDT (a) et Flycutting (b) (source : CEA)

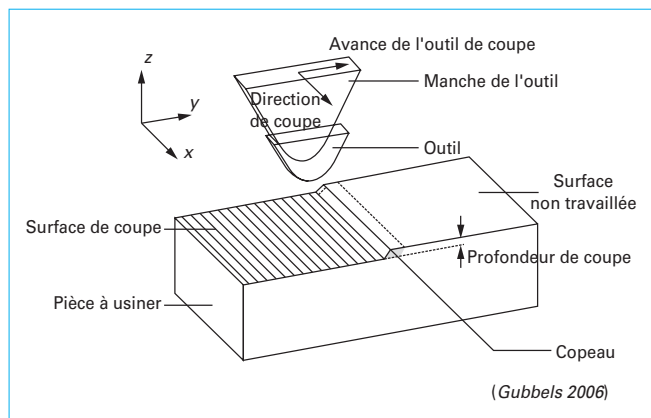


Figure 7 – Détail d'une passe d'outil de SPDT

– une passe d'usinage avec un outil de finition (rayon plus petit) pour obtenir l'état de rugosité et la forme finale (figure 8).

Cette technologie est très répétable et industrielle, et permet, quand elle est applicable, l'obtention de surfaces optiques dans un temps très court et avec d'excellentes performances. Par exemple, une lentille plastique en PMMA bi-asphérique de 30 mm de diamètre est usinée en moins de 3 h avec un défaut de forme final inférieur à  $0,3\text{ }\mu\text{m}$  PTV et une rugosité de l'ordre de quelques nanomètres. La taille des pièces usinables dépend principalement de la taille possible des machines (autour de 500 mm) et des possibilités offertes par les fournisseurs de matériaux. Les meilleures rugosités possibles atteignent  $8\text{ }\text{\AA}$  Rms et les défauts de forme sont très souvent en dessous du demi-micromètre PTV. Cette technologie est très bien adaptée pour réaliser les surfaces diffractives (réseau, lentilles de Fresnel) mais aussi asphériques et maintenant *free form*.

L'inconvénient réside dans la création de défauts haute fréquence sur la surface et potentiellement de défaut central.

Les développements en cours tentent d'utiliser le SPDT sur des matériaux non ductiles (comme le verre par exemple) : voir [1] [2].

Les articles suivants présentent quelques applications pointues : [3] [4] [5].

## 2.3 Ébauche et polissage des matériaux ductiles ou non ductiles par CN : CNE et CNP

Les machines à commande numérique ont révolutionné le monde de la mécanique, elles ont fait de même de l'optique.

Le principe de la technologie CN est similaire au principe du polissage traditionnel en y ajoutant les avantages suivants :

- précision de déplacement des axes ;
- répétabilité dans les déplacements.

Cette technologie est actuellement largement diffusée dans les sociétés optiques de fabrication de composants optiques à grande série, car elle permet une très bonne répétabilité du process mais aussi, ce qui est très intéressant, la possibilité de faire appel à des opérateurs de formation mécanique, donc un plus grand choix de main-d'œuvre.

Toutes les étapes du process de fabrication des composants optiques peuvent être pilotées par des commandes numériques et sont principalement axées pour des surfaces sphériques ou asphériques.

### 2.3.1 Technologie d'ébauche et de doucissage par CN : CNE

**Principe :** la matière, préalablement mise en forme, est montée dans un outillage (serrage ou dépression) positionné sur une broche tournant à grande vitesse. Une autre broche multiaxe comporte les outils d'usinage diamant : meule cloche pour surfaces sphériques, meule disque pour surfaces asphériques, meules avec différents liants possibles (métal, résine) et divers grains de diamants. La position et la vitesse de l'outil sont pilotées par commande numérique. La machine CN d'ébauche vient ainsi générer sur la pièce optique en rotation la surface sphérique ou asphérique de révolution souhaitée.

L'usinage de *free form* est possible sur certaines machines possédant un axe supplémentaire.

Le processus d'usinage nécessite un « calage » initial des paramètres machines tels que la vitesse de rotation outil et pièce et la vitesse d'avance, et ce, en fonction des données de la pièce (dureté du verre, surface à générer, tolérance à obtenir).

La figure 9 montre un exemple de machine et des outils associés.

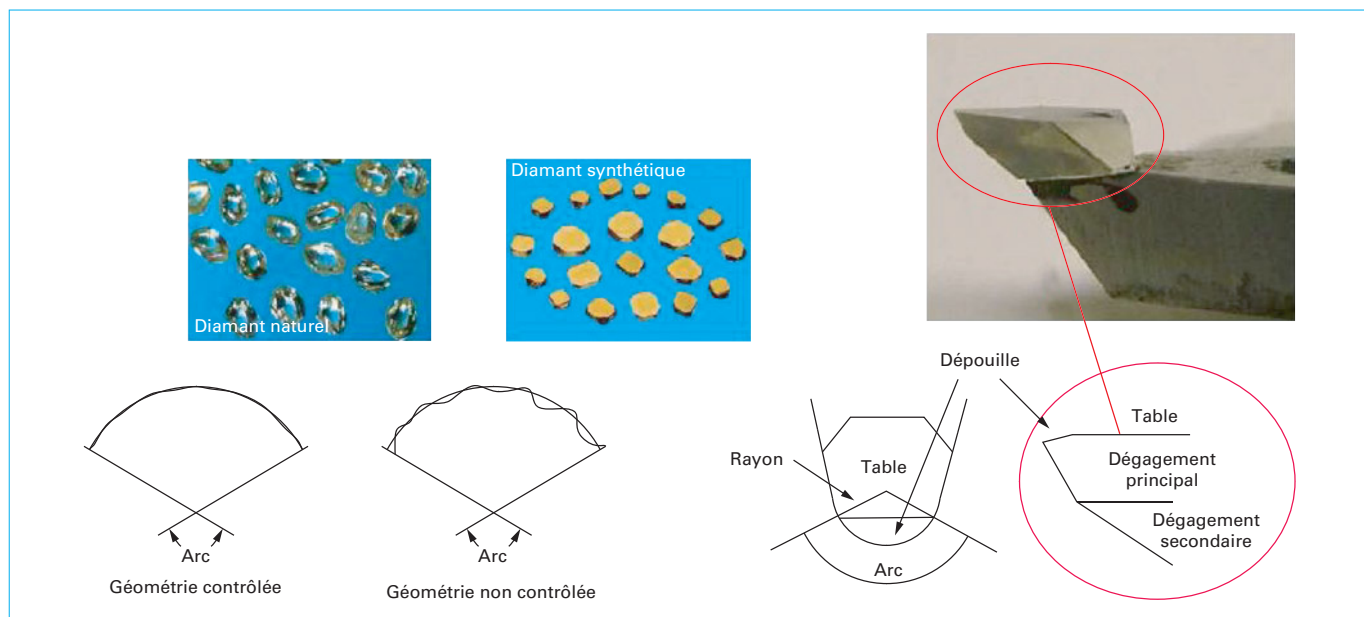


Figure 8 – Détail d'un outil de SPDT



Figure 9 – Exemple de machine d'ébauche et outils associés



Les **performances** suivantes sont atteignables :

- diamètre de pièces allant de 10 à 500 mm (plusieurs gammes de machines) ;
- obtention de la flèche sphérique ou asphérique souhaitée à  $\pm 2 \mu\text{m}$  ;
- écart de forme PTV (crête à crête) par rapport à la surface souhaitée de  $\pm 1$  à  $2 \mu\text{m}$  ;
- épaisseur souhaitée à  $\pm 4 \mu\text{m}$  ;
- rugosité Ra de la surface inférieure à  $0,3 \mu\text{m}$ .

Ces machines d'ébauche peuvent, pour certaines, effectuer des opérations de chanfreinage, réalisation de diamètre ou forme plus complexes.

Les **avantages** de ce process d'ébauche par CN sont la précision, la répétabilité, la vitesse d'usinage (3 à 4 min pour générer une surface sphérique sur un diamètre de 40 mm) et la possibilité d'usiner quasiment tous les verres.

Quelques **inconvénients** sont à signaler :

- du fait de l'usure de l'outil diamant, les paramètres process doivent être recalés toutes les 20 à 50 pièces : cependant, des améliorations sont en cours de développement : procédé ELID, procédé de contrôle d'usure des outils (voir paragraphe 5) ;
- la surface générée peut présenter des structures périodiques de type spirales produites par le mouvement des outils dû à un mauvais réglage des axes, ce qui n'était pas le cas dans le cadre d'un procédé traditionnel ;
- la surface peut présenter des arrachements (SSD *Sub-Surface Damage*), ce qui conduira au niveau du process de polissage à enlever un minimum de matière : aller trop vite à l'ébauche peut

donc ainsi faire perdre beaucoup de temps au polissage et un bon compromis doit être trouvé.

### 2.3.2 Technologie de polissage par CN : CNP

Le polissage par commande numérique reprend les mêmes **principes** que l'ébauchage par commande numérique, l'outil diamant étant remplacé par un outil de polissage (figure 10b). Cet outil se présente généralement sous la forme d'une pièce sphérique avec un rayon opposé à celui de la pièce à polir. Sur cet outil, classiquement une feuille de polyuréthane est déposée, puis l'outil est rodé dans la machine.

Dans le cas d'un polissage de pièces sphériques, l'outil est souvent rigide et d'une taille allant du simple au double du diamètre de la pièce à polir. Pour le polissage asphérique, l'outil présente en plus une souplesse due à un ajout de mousse de raideur contrôlée et sa taille est souvent très inférieure à celle de la pièce à polir.

La pièce à polir est maintenant, soit en pression, soit en dépression selon les technologies employées par les fabricants de machines.

Les produits de polissage utilisés sont identiques à ceux du polissage traditionnel, à savoir cerrox, ZOx et opaline.

Les **performances** atteintes par cette technologie sont excellentes :

- un diamètre de pièce allant de 10 à 500 mm (selon la gamme de la machine) ;
- une rugosité de surface  $< 2 \text{ nm Rms}$  ;
- un défaut de forme par rapport à la forme souhaitée  $< 150 \text{ nm}$  pour du sphérique et  $< 300 \text{ nm}$  pour de l'asphérique.



(a) machine de polissage (source : Optotech)



(b) outillage de polissage

(c) rodoir et bague de supportage

Figure 10 – Exemple de machine de polissage et outils associés

Les **avantages** de cette technologie sont :

- une bonne répétabilité (temps de polissage, défaut de forme) une fois le process calé (pression et vitesse de l'outil, vitesse d'oscillation) ;
- une grande vitesse de polissage sachant que celle-ci est très dépendante de la qualité de surface en sortie de l'ébauche CN.

Quelques **inconvénients** sont à noter :

- le calage du process peut être long en fonction de la composition du verre ;
- la convergence du process n'est pas toujours suffisante en fonction des tolérances demandées.

Pour conclure, la technologie CN (ébauche + polissage) permet actuellement de réaliser des pièces sphériques et asphériques avec de très bonnes performances, de façon répétable et dans des temps très courts. Elle est actuellement en cours d'industrialisation pour les surfaces de type *free form*. Pour compléter cette technologie, de nombreux industriels y associent des technologies de PAO (retouche de polissage local) afin d'obtenir de meilleures performances en termes de défauts de forme.

## 2.4 Procédés de retouche de polissage assisté par ordinateur : PAO

### 2.4.1 Introduction

Dans cette gamme de technologie (Polissage Assisté par Ordinateur), on inclut toutes les technologies de polissage ponctuel avec un outil de petite taille en comparaison des technologies CN ou traditionnel avec un grand outil.

Il convient de noter que ces technologies, à proprement parler, ne sont pas des procédés de polissage mais de « retouche de polissage ». En effet, le polissage avec un petit outil est bien trop long pour une application industrielle et celui-ci est fait en amont avec de « grands outils ». Par contre, cette technologie est indispensable pour l'obtention de défauts de forme très faibles sur certaines surfaces.

Trois éléments sont nécessaires :

- une machine de pilotage avec plusieurs axes de type CN ;
- un logiciel de pilotage couplé à un moyen de métrologie ;
- un outil associé à sa fonction d'usure.

**Principe** : à partir d'une cartographie des défauts de surface de la pièce à corriger, le système de PAO vient plus ou moins « polir/user » à l'endroit convenu. Par exemple, si une pièce à 3 mm du bord et 47° par rapport à un axe, possède un défaut en

forme de bosse, le système va venir passer l'outil plus longtemps. Si juste à côté, le défaut est en forme de trou, le système va venir passer l'outil moins longtemps. Mathématiquement, une cartographie de défauts est transformée en une cartographie de vitesse et/ou de temps associée à une fonction d'usure du petit outil (figure 11).

Ce sont des technologies, pour la plupart, de retouche de polissage à partir d'une surface déjà polie par une autre méthode (par exemple, CN) et donc l'enlèvement matière est faible. Mais ces procédés sont indispensables pour faire des pièces autres que sphériques et planes, typiquement des asphériques ou des *free form*. Ces technologies sont aussi très répétables et convergentes.

Le petit outil peut être :

- un petit outil traditionnel en poix, politron, polyuréthane ;
- un faisceau d'ions ;
- un outil plasma ;
- un jet de fluide abrasif ;
- un jet de sable (exemple : SAO).

Le principe de chaque machine est donc de piloter, selon plusieurs axes, un petit outil et de faire tourner en même temps la pièce.

Pour chaque outil, il est nécessaire au préalable de calibrer la fonction d'usure sur une pièce semblable à celle que l'on veut corriger avec la meilleure précision possible. Ce type de technologie nécessite donc absolument l'utilisation de moyens de métrologie performants avec possibilité d'analyse de fichiers numériques : la convergence de cette technologie tient dans la qualité de la mesure de la pièce.

**Avantages** :

- forte convergence ;
- performances élevées.

**Inconvénients** :

- process pouvant être long ;
- création de moyennes/hautes fréquences qui peuvent être rédhitoires.

### 2.4.2 Technologie de polissage par robot

Cette technologie de PAO utilise pour machine un « robot » :

- soit un système multiaxe linéaire avec une pièce en rotation à vitesse variable ;
- soit un robot polyarticulé.

Très souvent, cette technologie de PAO par robot est « propriétaire », c'est-à-dire développée par l'industriel lui-même.

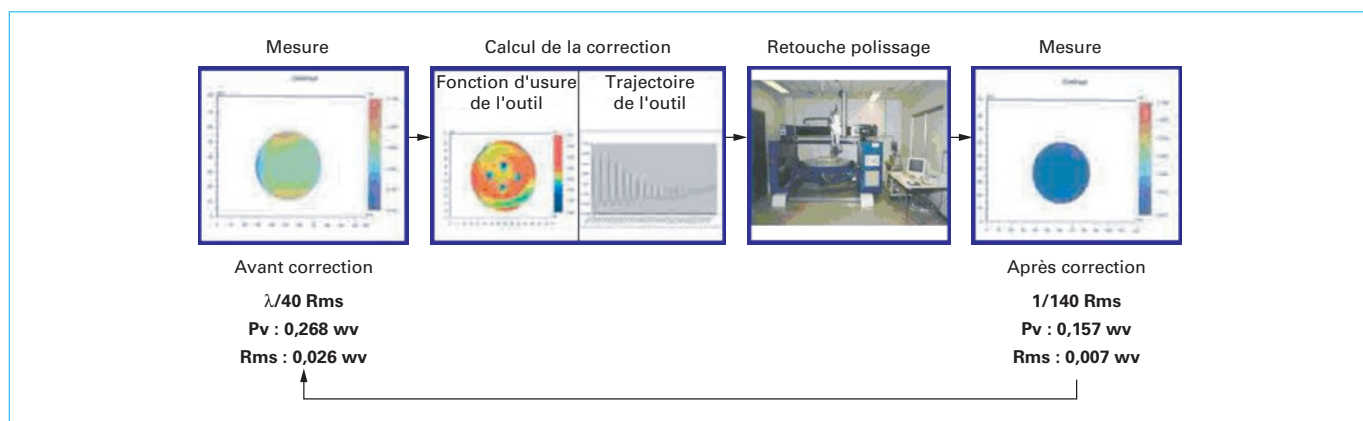


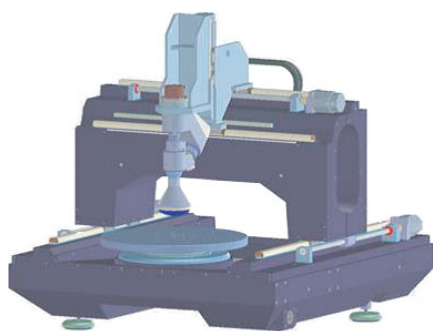
Figure 11 – Cycle typique de retouche de polissage par PAO



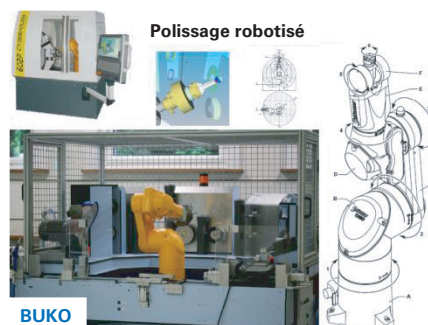
(a) (source : SESO)



(c) (source : SAGEM)



(b) (source : ZEEKO)



Polissage robotisé

BUKO

(d) (source BUKO)

Figure 12 – Exemple de robots de polissage

La figure 12 illustre quelques machines actuellement en production.

Cette technologie est souvent utilisée pour des pièces optiques de diamètre supérieur à 150 mm et pouvant aller jusqu'à 8 m. Les dimensions des outils utilisés sont en regard du diamètre de la pièce (diamètre outil autour de diamètre pièce/8 à 10). Leur taille, leur forme, leur pression d'application déterminent la fonction d'usure de l'outil qui est régulièrement modifiée lors du process de polissage en fonction notamment de la taille et de l'amplitude des défauts à corriger. On parle souvent de « stratégie de polissage » et c'est là que réside notamment le savoir-faire de l'industriel qui met en œuvre cette technologie.

Des performances en termes de défaut de forme résiduel telles que quelques nanomètres Rms sur des diamètres de plusieurs mètres sont atteignables en production. Ce process s'applique plutôt pour des pièces unitaires ou de très petites séries, étant donné le temps souvent assez long de la retouche.

Un article de référence sur cette technologie est donné dans [6].

De nombreux développements sont en cours sur cette technologie ; nous en parlerons au paragraphe 5.

### 2.4.3 Technologie MRF

La technologie MRF (*MagnetoRheological Finishing*) développée par QED technologies est un système de post-polissage piloté par ordinateur. C'est une technologie très performante avec un des meilleurs taux de convergence disponible sur le marché ; elle devient assez présente dans les industries. Il convient de noter que le procédé MRF ne polit pas et donc procède uniquement à des retouches de polissage. Les paramètres d'un composant à retou-

cher sont enregistrés par un interféromètre de type SSI, Zygo/GPI ou des profilomètres mécaniques de type Talysurf.

**Principe :** après un calibrage minutieux de la machine, une première analyse de forme est effectuée sur la pièce à polir, à l'aide du système de métrologie. Les données de correction sont saisies dans la machine qui opère alors un polissage des surfaces à retoucher. L'ablation de matière se fait grâce au fluide magnétorhéologique (figure 13). Un petit outil souple constitué de particules magnétiques et abrasives est alors constitué, sa viscosité, et donc sa fonction d'usure sont modifiées par le champ magnétique. La MRF dispose donc d'un outil de taille et d'usure variables, ce qui en fait un excellent outil pour obtenir des défauts de forme très bas, la difficulté résidant dans la gestion des moyennes et hautes fréquences. Une ou plusieurs itérations sont nécessaires en fonction des résultats à obtenir. Des exemples de machines de MRF sont présentés figure 14.

Cette technologie permet des retouches sur de nombreuses matières, en premier lieu, le verre, les matériaux infrarouges, les plastiques, aussi bien pour des prototypes que des moyennes séries. Pour les grandes séries, l'organisation de la production doit être adaptée du fait de la nécessité d'une métrologie importante.

Cette technologie est souvent utilisée en complément de la technologie CN pour terminer les surfaces en termes de défauts de forme, elle est aussi associée à l'usinage diamant afin d'améliorer l'état des surfaces des pièces en sortie.

Des pièces allant jusqu'à 1 m de diamètre peuvent être retouchées, cette technologie est très souvent utilisée sur les asphériques et les surfaces *free form* mais aussi sur les surfaces de miroirs allégés ou déformables du fait de la faible pression exercée et de son mode de fonctionnement.





Figure 13 – Principe du polissage par MRF (société QED)

Les performances en termes de défauts de forme sont souvent limitées par la performance de la métrologie mais aussi par la création des défauts de moyennes et hautes fréquences : en effet, du fait de la retouche ponctuelle, si le point de retouche n'est pas parfaitement déterminé par la métrologie (distorsion, erreur de mesure, défaut angulaire, etc.), le polissage ne se fait pas à l'endroit souhaité et une fréquence apparaît qui ne peut ensuite se retirer que si l'outil est encore plus petit : le process ne converge plus. De nombreux industriels combinent donc aussi cette technologie avec des procédés de polissage à grand outil pour « lisser » les formes et permettre la convergence future de la MRF.



Figure 14 – Machines de MRF (société QED)

Il est assez courant d'avoir des surfaces de l'ordre de quelques nanomètres rms en termes de défauts de forme avec une rugosité en dessous de 1 nm rms.

#### Avantages :

- très forte convergence et répétabilité ;
- temps de retouche assez court.

#### Inconvénients :

- création des moyennes et hautes fréquences ;
- coût assez élevé du process (fluide, maintenance machine) ;
- temps global process par lentille assez long du fait d'une métrologie pointue et donc longue.

Quelques articles ou applications sont fournis dans les références [7] [8] [9] [10] [11].

### 2.4.4 Technologie d'usinage ionique

Ce procédé fait partie des technologies de PAO et a été développé dans les années 1990. Il utilise pour outil un faisceau d'ions de diamètre compris entre 1 et 60 mm. Les ions, argon, xénon, sont projetés sur la surface déjà polie afin de l'éroder. Cette technologie s'apparente donc plus à une technologie d'usinage, elle conserve la rugosité de la pièce existante mais ne polit pas.

**Principe :** le canon à ions est installé à l'extrémité d'une machine multiaxe (entre 3 et 5 axes), l'ensemble étant nécessairement sous vide pour le bon fonctionnement du canon. La reproductibilité et la précision du positionnement de l'ensemble supportant la source ionique sont les clés de la réussite de l'équipement. Comme toute technologie de PAO, il est nécessaire de connaître la fonction d'outil à savoir le profil d'usure du faisceau d'ions (souvent gaussien) sur le matériau à usiner.

#### Avantages :

- l'outil ne s'use pas en fonction du temps et de l'usinage car il n'y a pas de contact avec la pièce ;
- l'outil ne change pas de forme ;
- il en résulte un taux d'enlèvement matière très stable, qui permet une excellente convergence du procédé ;
- du fait de l'absence de contact entre l'outil et la pièce, il n'y a pas d'effet de bord en périphérie de la pièce, ce qui n'est pas le cas avec les autres technologies de PAO ;
- la surface est maintenue propre, sans aucune contamination moléculaire ni particulaire car le fonctionnement se fait sous vide : cela est très intéressant notamment pour des pièces optiques travaillant dans le spectre UV et sensibles à la diffusion ;
- possibilité d'ajuster en cours de process par l'ajout de masque et/ou la taille de l'outil, ce qui permet d'optimiser la stratégie de retouche et de fortement en diminuer sa durée : correction dans une première phase des fréquences basses avec un « gros » outil, puis ensuite correction des moyennes fréquences avec un petit outil, sans casser le vide : cette technologie de PAO est probablement celle qui crée le moins de moyennes/hautes fréquences ;
- technologie plus performante que la MRF sur des matériaux durs.

#### Inconvénients :

- du fait de la nécessité de fonctionner sous vide, les machines sont assez coûteuses en termes d'investissement et les contraintes du vide sont présentes : temps de pompage, qualité vide, comportement thermique sous vide ;
- pendant de nombreuses années, les taux d'usure étaient faibles et l'usinage ionique était souvent utilisé pour les retouches finales. Les nouveaux canons à ions permettent d'obtenir un enlèvement matière de 0,5 mm<sup>3</sup>/min, ce qui est même plus performant que la plupart des technologies de PAO ;
- localement, la surface de la pièce peut monter à des niveaux de température importants (> 150 °C) et peut donc provoquer des changements irréversibles de l'état de la matière (par exemple, Zerodur). Les temps de passage de l'outil doivent alors être adaptés.

L'obtention des **performances** suivantes est possible avec l'IBP (*Ion Beam Polishing*) dans un mode « industriel » :

- diamètre pièce allant jusqu'à 200 mm : il existe des machines permettant d'usiner des pièces de 1 à 2 m de diamètre pour les miroirs segmentés par exemple ;
- conservation de la rugosité pièce ;
- défaut de forme inférieur à quelques nanomètres Rms ;
- réduction importante des moyennes et hautes fréquences.

Le principe du procédé IBP est donné figure 15.

La figure 16 présente deux machines utilisées de façon industrielle.

Un article d'application est fourni dans la référence [12].

### 2.4.5 Technologie par plasma (PACE)

Dans cette technologie de PAO, la matière est évaporée par l'intermédiaire d'une réaction chimique entre un plasma réactif (CF<sub>4</sub>, SF<sub>6</sub>) et la surface. Les matières utilisables par ce procédé sont à base de Si : silice pure, silicium, quartz :

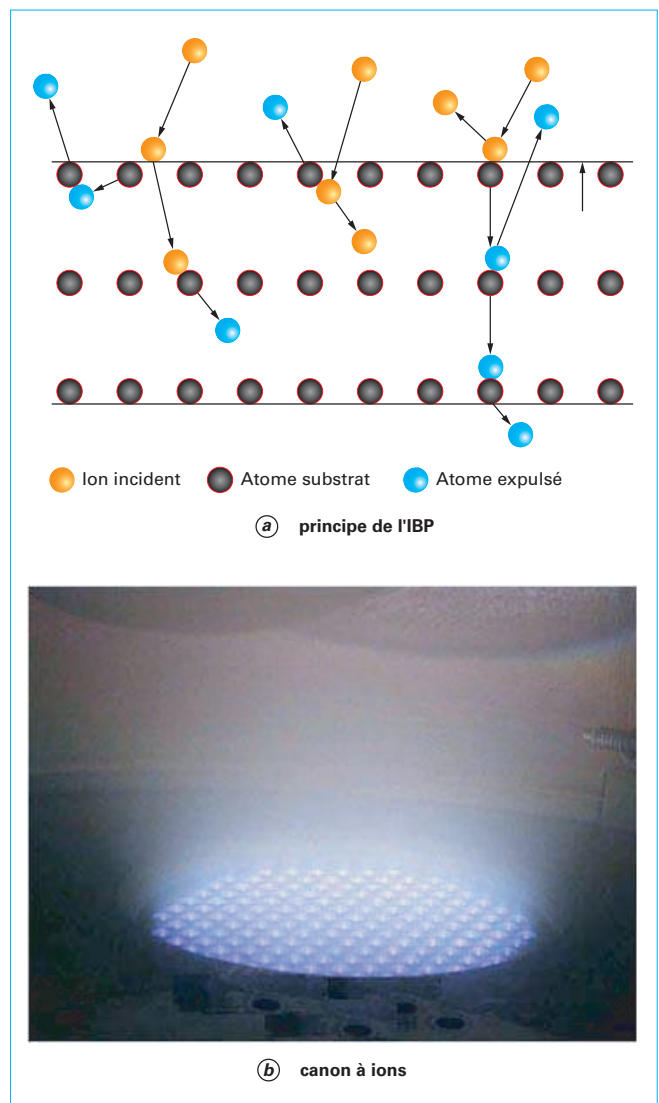
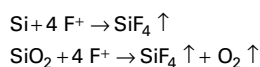


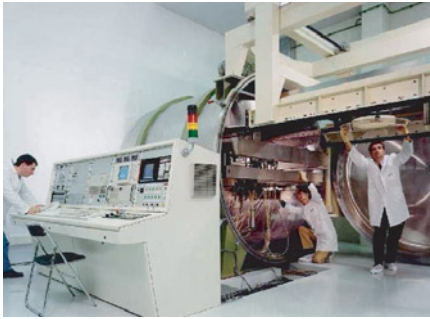
Figure 15 – Principe de l'IBP (*Ion Beam Polishing*) et outil correspondant (canon à ions)

Le principe est décrit dans la figure 17 (machine Nikon).

Le procédé PACE ne polit pas la matière mais peut améliorer sa rugosité pour atteindre des valeurs subnanométriques (domaine du superpolissage). Il est très efficace pour diminuer les SSD (défauts de surface). Il est très stable dans le temps car l'outil, étant sans contact, ne s'use pas. Son inconvénient se situe dans son faible taux d'usure et sa limitation à certains matériaux. Localement, le matériau peut s'échauffer et la fonction d'usure peut ainsi être modifiée après plusieurs passages sur la pièce. Le diamètre des pièces compatibles avec cette technologie va de 1 mm à 1 m, pour une performance autour de 100 à 150 nm PTV pour des petites pièces.

Il faut noter que cette technologie peut aussi s'utiliser hors cadre PAO, à savoir dans le but d'effectuer un usinage plasma sur l'ensemble de la surface de la pièce pour améliorer sa rugosité et baisser les SSD et le niveau de contrainte. Elle peut aussi s'utiliser en phase d'ébauche de la silice, par exemple pour la réalisation des substrats de masque pour l'industrie des semi-conducteurs.





(a) (source SAGEM)



(b) (source Roth & Rau)

Figure 16 – Exemple de machines IBP

Les industriels utilisant ce procédé en phase de finition restent très rares et pour des applications produit très spécifiques.

Une référence d'application de ce procédé est fournie dans [13].

#### 2.4.6 Technologie FJP

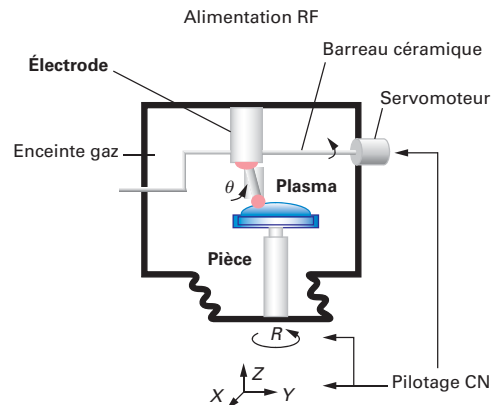
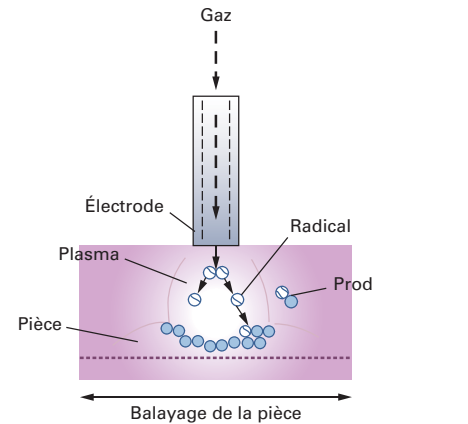
**Principe :** l'outil utilisé dans cette technologie de PAO est une buse qui crée un jet de fluide de polissage (souvent les mêmes fluides que dans le polissage traditionnel ou CN, à savoir, cérium, opaline, ZOx, etc.). Un exemple est présenté figure 18. Plusieurs variantes de cette technologie existent selon les paramètres suivants :

- pression du jet ;
- distance de travail du jet par rapport à la surface ;
- dans certains cas, mise en œuvre d'un outil ponctuel (poussée par la pression du jet de fluide) en contact avec la pièce.

Cette technologie peut polir les surfaces mais elle est rarement employée dans ce cadre, car polir avec un petit outil prendrait beaucoup trop de temps. Ce procédé est donc souvent utilisé en complément d'une technologie de type CN ou SPDT.

##### Avantages :

- création moindre des structures à fréquences intermédiaires avec la technologie de FJP est observée ;
- implantation possible de cette technologie assez facilement dans les machines de type CN de polissage ;
- technologie efficace pour améliorer la rugosité d'une pièce usinée en SPDT.



(a) principe (machine Nikon)



(b) exemple de machine (source Zeiss)

Figure 17 – Principe de la technologie PACE et machine

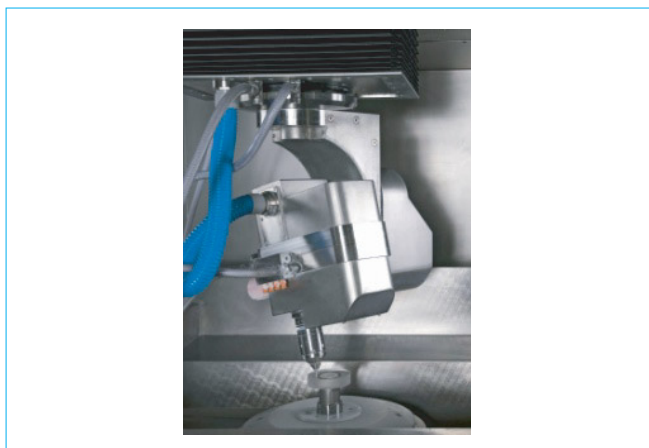


Figure 18 – Outil AFJP dans machine CN (source : Optotech)

#### Inconvénients :

- taux d'enlèvement matière assez faible ;
- les paramètres de pression peuvent influencer rapidement sur la rugosité de la pièce obtenue, notamment dans le cadre de fortes pressions ;
- le taux de convergence peut être plus faible dans le cas de pièces déformables, dû à la pression importante sur la pièce.

Les **performances** atteignables sont un peu moins bonnes que celles des autres technologies de PAO.

Document de référence d'une application : [14].

## 2.5 Procédés de moulage verre ou plastique : MOUL

### 2.5.1 Procédé de moulage verre

Le procédé de moulage est une technologie relativement ancienne mais qui a connu des développements technologiques continus. En effet, c'est une des rares technologies qui permet d'obtenir des composants optiques « directement » à partir de la matière brute (pas d'ébauche et obtention directe d'une surface polie), avec un bon niveau de performances et surtout des prix de pièces faibles. Elle est souvent utilisée pour des séries supérieures à 500 unités, elle nécessite un investissement assez conséquent (un moule série par type de pièce) et son retour sur investissement doit être étudié au cas par cas.

Dans la plupart des cas, cette technologie est utilisée pour fabriquer des composants asphériques ou *free form*, les autres technologies ne permettant pas d'obtenir des coûts compétitifs pour de la fabrication série.

Le **principe** est le suivant (figure 19) :

- A : fabrication d'une préforme (sphère, disque, gob) de volume identique à la lentille devant être moulée. La qualité du verre et la qualité de la surface de cette préforme doivent être identiques à celle de la lentille finie. Un moule en matière dure avec un revêtement de type nickel ou carbone est usiné diamant puis poli (technologie SPDT puis PAO) avec la forme de la surface de la pièce.
- B, C : le verre est ensuite chauffé jusqu'à ramollissement dans une atmosphère neutre.
- D, E : la pièce est formée dans le moule sous vide.
- F : la lentille est ensuite refroidie.

#### Avantages :

- facilité d'obtention de surfaces asphériques de tout type ou *free form* ;

- coût faible pour des séries importantes ;
- répétabilité importante ;
- possibilité de faire des formes extérieures spécifiques en même temps que la surface, donc référencées mécaniquement.

#### Inconvénients :

- tous les verres ne sont pas moulables : la  $T_g$  (température de ramollissement) du verre doit être inférieure à 550/600 °C ;
- la variation des caractéristiques optiques du verre après moulage (indice, constringence) doit être prise en compte lors du calcul ;
- dans certains cas, le retrait de la matière lors du refroidissement limite les performances finales ;
- coût du moule non amorti dans le cas de petite série ;
- limitation des pièces en termes de diamètre : < 40 mm ;
- limitation dans la forme des pièces moulables : épaisseur au bord, ratio diamètre sur épaisseur au centre, forme des dioptries.

En termes de **performances** optiques, il est possible de descendre autour de 3 à 5 nm Rms en termes de rugosité et 0,2 µm en termes de planéité.

Quelques documents de référence peuvent compléter ce paragraphe : [15] [16].

### 2.5.2 Procédé de moulage plastique

Il est principalement utilisé pour réaliser des surfaces asphériques, diffractives ou *free form* sur des composants optiques de différents polymères (PMMA, PC, Zeonex, OKP4, etc.). Cette technologie est couramment utilisée pour des produits où il existe une problématique liée à la masse de l'optique, le plastique étant nettement moins lourd, la contrepartie est une performance optique moindre et située dans le domaine de 3 à 10 µm de planéité. C'est un procédé de très grande série (plusieurs milliers voire millions d'unités) avec un prix d'obtention des pièces très faibles (entre 1 et 30 €).

De même que pour le moulage verre, il est nécessaire de fabriquer une carcasse de moule dans lequel de 1 à 4 empreintes de la surface injectée sont positionnées : ces empreintes (cavités) sont souvent usinées par technologie SPDT.

Le **principe** d'injection d'un polymère (figure 20) peut être décomposé en trois phases :

- remplissage (ou injection) : le polymère remplit l'empreinte et occupe le volume de la cavité. On se sert de la vis comme d'un piston ;
- maintien : le polymère est compacté dans l'empreinte pendant le refroidissement ;
- refroidissement : le polymère est figé et la pièce éjectée quand sa rigidité est suffisante.

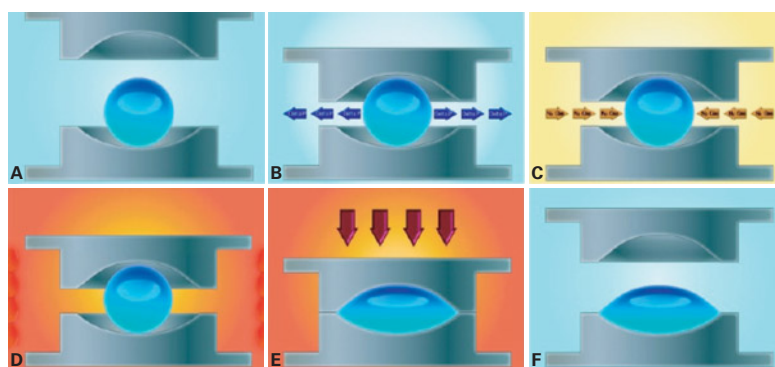
Et le cycle reprend : une nouvelle quantité de matière est dosée pour la pièce suivante pendant le refroidissement de la pièce précédente, qui est ensuite amenée en bout de vis (buse) grâce à sa rotation.

En termes de **performances**, il est couramment obtenu entre 3 et 10 µm de planéité avec une rugosité autour de 5 nm rms. Ces performances dépendent de la taille des pièces. Pour des lentilles bi-asphériques dans le téléphone portable, la planéité se situe autour de 0,5 µm tandis qu'elle dépasse les 10 µm voire plus pour des pièces supérieures à 80 mm de diamètre.

Les composants « à haute performance » peuvent descendre entre 0,5 et 1 µm de défaut de planéité sur 30 mm de diamètre, cela étant obtenu à la suite d'un travail de conception important qui prend en compte les contraintes de l'injection.

#### Avantages :

- facilité d'obtention de surfaces asphériques de tout type ou *free form* ou diffractives ;
- coût faible pour de grandes séries ;
- répétabilité importante ;
- possibilité de faire des formes extérieures spécifiques en même temps que la surface, donc référencées mécaniquement.



(a) principe du moulage

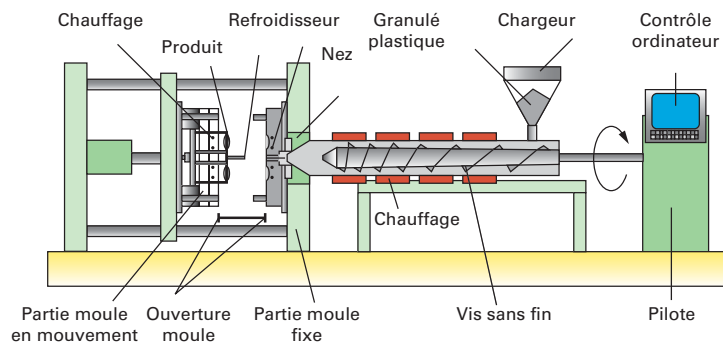


(b) photo de préforme (Fisba Optik)



(c) photo de moule

Figure 19 – Principe du moulage verre



(a) principe de l'injection/moulage plastique



(b) moule



(c) lentilles plastiques



(d) lentille plastique en mesure

Figure 20 – Principe de l'injection/moulage plastique

**Inconvénients :**

- les pièces plastiques ne peuvent pas s'utiliser si la température du produit final peut dépasser les 120/150 °C ;
- dans certains cas, le retrait de la matière lors du refroidissement limite les performances finales ;
- coût du moule non amorti dans le cas de petite série ;
- limitation dans la forme des pièces moulables ;
- limitation dans les performances de planéité atteignables ;
- limitation dans la taille des pièces : < 60/80 mm et les épaisseurs ;
- le process peut engendrer des contraintes importantes dans le plastique, ce qui limite les performances optiques du composant.

Quelques références : [17] [25].

## 2.6 Procédés de polissage plan : DP et CMP

### 2.6.1 Polissage double face DP

Cette technologie, déjà ancienne mais toujours performante, est très utilisée de façon industrielle pour la réalisation de composants à surface plane : miroirs, lames, hublots. Des formes très variées (carrées, rectangulaires, trapézoïdales, rondes, elliptiques ou polygonales) peuvent être polies.

**Principe de base :** les pièces sont entraînées entre deux outils animés d'un mouvement planétaire imposé par la rotation de satellites porte-pièces entre un pignon rotatif et une couronne fixe (figure 21a). La cinématique des pièces génère des faces planes et parallèles entre elles. La qualité du parallélisme est directement liée au nombre de pièces à roder ou polir, et donc à la surface en contact avec les plateaux. Ceux-ci exercent une pression importante sur les pièces, ce qui permet d'avoir un taux d'usure plus élevé. Ils sont équipés de polyuréthane pour le polissage ou bien de feutre pour le superpolissage à basse rugosité. Les abrasifs utilisés sont classiques et identiques à ceux du polissage traditionnel : oxyde d'aluminium (taille des grains environ 6 µm) pour les opérations de rodage, oxyde de cérium ou silice colloïdale (grains de 30 à 50 nm) pour le polissage avec plateaux équipés de feutre ou de mousse de polyuréthane.

Les **performances** obtenues sont les suivantes :

- les pièces peuvent atteindre un diamètre entre 10 et 700 mm ;
- possibilité de polir des lames très minces de 80 à 250 µm ;
- cette technologie, de par son principe de polissage sous pression des deux faces en même temps, permet d'obtenir un très bon parallélisme, ce qui est un point fort ;
- la rugosité des faces peut descendre à 0,2 nm Rms ;
- la planéité des pièces est meilleure que 100 nm PTV mais surtout du fait de l'excellent parallélisme, le front d'onde transmis est souvent meilleur que 50 nm PTV.

**Avantages :**

- très peu de fréquences spatiales intermédiaires sont créées par cette technologie : cela est un point fort qui explique son utilisation régulière par le CEA dans le cadre du projet MEGAJOULES. En effet, les défauts de type oscillation périodique provoquent des augmentations locales de la densité de puissance du laser sur la surface, ce qui peut provoquer la casse locale du verre ;
- très bon parallélisme des pièces et de l'onde transmise ;
- processus très industriel avec un taux de convergence correct et qui permet d'obtenir des coûts réduits sur les pièces ;
- outil très flexible en industrie permettant à de nombreux types de pièces d'être polis sur la même machine et avec des coûts d'outillages assez faibles ;
- possibilité d'obtention d'une basse rugosité ;
- beaucoup de pièces peuvent être polies en même temps : jusqu'à 500 pièces de diamètre 25 mm sur des grosses machines.



Figure 21 - Exemple de machines DP

**Inconvénients :**

- investissement pouvant devenir élevé et encombrant pour des pièces de dimensions supérieures à 400 mm ;
- nécessité d'un nombre minimal de pièces (remplissage du plateau inférieur) pour l'obtention de bonnes performances.

Une référence [18].

### 2.6.2 Polissage mécano-chimique CMP

Nous mentionnerons pour information la technologie de CMP qui est une autre technologie de polissage de surface plane très utilisée dans le domaine des semi-conducteurs et pour divers matériaux (silicium, polysilicium, ainsi que les couches métalliques). Elle est apparue dans les années 1980 aux États-Unis dans des laboratoires, et implantée industriellement au milieu des années 1990. Dans le domaine de l'optique de précision, cette technologie n'est pas implantée chez les industriels.

Le **principe** du CMP est le suivant : le CMP fait intervenir, d'une part, des agents chimiques qui font réagir la surface et la transforment et, d'autre part, des particules abrasives qui viennent enlever cette couche de matière transformée. C'est cette transformation chimique qui permet à la fois d'accélérer et d'améliorer le polissage, par rapport à un simple polissage mécanique. Il existe de nombreux CMP différents, faisant intervenir plus ou moins la partie chimique ou la partie mécanique du polissage.

Le procédé de polissage mécano-chimique fait donc intervenir deux grands types d'interaction :

- une interaction chimique qui vient transformer la surface pour en changer la structure chimique et donc les propriétés mécaniques ;
- une interaction mécanique qui vient arracher, par le biais de particules abrasives présentes dans les liquides de polissage, la couche transformée chimiquement.





Figure 22 – Principe du CMP et exemple de machine

La figure 22 présente un dispositif schématisé du polissage mécanochimique. Le système est composé d'une tête et d'un plateau tournant sur eux-mêmes. Un bon contrôle de la vitesse est important. La tête, qui maintient le wafer à polir grâce à un système de pression, peut également effectuer un mouvement de balayage par rapport au plateau afin de faire varier le champ de vitesse.

Sur le plateau, un pad est collé (tissu à base de polyuréthane). Des liquides de polissage (*slurries*) sont amenés sur le pad *via* des canules. Un *slurry* chimique transformera la surface et un *slurry* contenant des particules abrasives arrachera cette couche transformée. En fonction du procédé recherché, les abrasifs sont différents : leurs caractéristiques dépendent de la taille de grain, de son matériau, et de la chimie qui l'accompagne, dont le pH. En règle générale, les abrasifs sont basiques pour le silicium, l'oxyde, le nitrure, et sont acides pour les métaux. La température du procédé joue aussi sur les conditions d'enlèvement mais de façon différente en fonction des matériaux. Pour cela, le plateau est équipé d'un système de régulation de la température, qui peut ajuster la température entre 10 et 70 °C.

Cette technologie est principalement utilisée sur les wafers en silicium pour des tailles allant jusqu'à 6/12 pouces. Une excellente rugosité est obtenue, souvent inférieure à 1 nm Rms. La technologie actuellement implantée sur les wafers nécessite une planéité meilleure que 50 nm PTV.

Une référence : [19].

### 3. Comment sélectionner les technologies ?

#### 3.1 Quelles technologies pour quels matériaux ?

Nous allons synthétiser dans ce paragraphe les utilisations possibles de chaque technologie en fonction du matériau de la surface à polir : verre, plastique, matériau infrarouge, matériau pour miroir.

Un échantillonnage « typique » mais non exhaustif de matériaux est sélectionné. Pour chacun de ces matériaux, il est indiqué dans le tableau 2 la technologie la plus adaptée, une technologie possible et les technologies non adaptées à l'heure actuelle.

#### 3.2 Quelles technologies pour quelles surfaces ?

Nous avons décrit de nombreuses technologies de réalisation de surfaces optiques, certaines sont adaptées pour tel ou tel type de surface (plan, sphère, cylindre, asphérique, *free form*, diffractif), d'autres ne peuvent pas les faire ou bien difficilement.

Le tableau 3 présente une synthèse. Il n'est pris en compte que le critère typologie de surface. En utilisant ensuite le tableau 2, nous pouvons faire une présélection de la technologie souhaitée pour un matériau et une typologie de surface donnée.

#### 3.3 Quelles technologies pour quelles performances ?

Pour terminer cette revue des technologies et leur classification, les performances réalisables par chacune d'elles sont résumées dans le tableau 4.

En fonction du diamètre de la pièce, des performances de planéité recherchées et de la rugosité visée, un premier choix entre les technologies peut être effectué. Une analyse plus fine est ensuite nécessaire, notamment sur l'impact du diamètre de la pièce et sur sa planéité en final.

#### 3.4 Quelle métrologie associée à quelles technologies ?

La métrologie est de plus en plus indispensable : ce n'est plus seulement un outil de contrôle et de vérification des performances mais un outil de fabrication nécessaire et obligatoire pour certaines technologies.

Nous nous intéresserons plus particulièrement aux métrologies des défauts de forme :

Il existe trois grands domaines modernes et industriels :

- la profilométrie mécanique ou optique ;
- l'interférométrie ;
- les analyseurs de surface d'onde (déflectométrie).

##### 3.4.1 Profilométrie

###### 3.4.1.1 Profilométrie mécanique

Le principe de profilomètre mécanique (figure 23) est d'obtenir une cote de hauteur entre un palpeur et la forme à mesurer par déplacement de ce capteur sur un méridien. La forme théorique à obtenir de la pièce est retirée et les écarts sont analysés. Les profilomètres sont, à leur origine, dotés d'une pointe très fine en diamant qui lit l'altitude lorsque l'on la déplace le long de la surface. Ce principe est toujours très utilisé, mais il est aujourd'hui complété par de nombreux dispositifs optiques (sans contact).



**Tableau 2 – Choix de la technologie en fonction du matériau (1)**

Catégorie	Technologie	Matériaux																			
		Verres		Plastiques				Matériaux infrarouges ou multispectraux								Matériaux pour miroir					
		Moulable L-LAM 60	Non moulable S-LAH55	PMMA	PC	Zeonex	OKP	Si	Ge	KDP	CAF2	AsGa	ZnS	ZnSe	Sapphire	Métaux	Zérodur	Sic	C-Sic	Silice	ULE
T1	SPDT	C	C	A	A	A	A	A	A	A	B	A	A	A	A	A	C	B/C	B/C	C	C
T3.1	PAO robot	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	A	A	A	A	A	A
T3.2	MRF	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B
T3.3	Usion	B	B	C	C	C	C	C	B	C	B	C	B	B	C	C	A	B	B	B	B
T3.5	Plasma	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	B	B	B	B
T3.6	FJP	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B
T2.1	CN ébauche	A	A	B	B	B	B	B	B	B	A	B	B	B	B	B	A	A	A	A	A
T2.2	CN polissage	A	A	B	B	B	B	B	B	B	A	B	B	B	B	B	A	A	A	A	A
T4.1	Moulage verre	A	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C
T4.2	Moulage plastique	C	C	A	A	A	A	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C
T5.1	Double face	B	B	C	C	C	C	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B
T5.2	CMP	C	C	C	C	C	C	A	C	C	C	C	C	C	C	A	C	C	C	C	C
(1) A Technologie adaptée. B Technologie possible. C Technologie non adaptée.																					

**Tableau 3 – Choix de la technologie en fonction de la surface (1)**

Catégorie	Technologie	Surfaces planes	Surfaces sphériques	Surfaces cylindriques	Surfaces asphériques	Surfaces <i>free form</i>	Surfaces diffractives
T1	SPDT	A	A	A	A	A	A
T3.1	PAO robot	A	A	B	A	B	C
T3.2	MRF	A	A	C	A	B/C	C
T3.3	Usion	A	A	B	A	B	C
T3.5	Plasma	A	A	B/C	B/C	C	C
T3.6	FJP	A	A	B	A	B	C
T2.1	CN ébauche	A	A	B	A	A/B	C
T2.2	CN polissage	A	A	B	A	B/C	C
T4.1	Moulage verre	A	A	A	A	A	B
T4.2	Moulage plastique	B	A	A	A	A	A
T5.1	Double face	A	C	C	C	C	C
T5.2	CMP	A	C	C	C	C	C

(1) A Technologie adaptée.  
B Technologie possible.  
C Technologie mal adaptée/impossible.

**Tableau 4 – Choix de la technologie en fonction des performances visées**

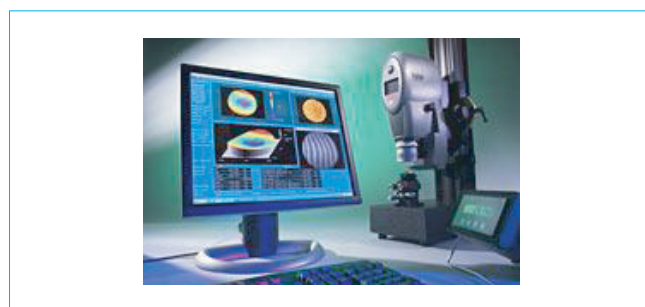
Catégorie	Technologie	Diamètre maximal (mm)	Taux enlèvement matière (mm <sup>3</sup> /min)	Rugosité typique (1) (nm Rms)	Défaut de forme visé (2)	Niveau des fréquences spatiales intermédiaires (3)
T1	SPDT	500	0,15	3	3	2
T3.1	PAO robot	8 000	5	2	1	2
T3.2	MRF	1 000	0,12	2	1	3
T3.3	Uision	2 000	0,5	2	1	2
T3.5	Plasma	1 000	0,03 à 30	1	2	2
T3.6	FJP	500	0,05	1-2	1-2	2-3
T2.1	CN ébauche	500	40	4	4	1
T2.2	CN polissage	500	0,7	2	2	1
T4.1	Moulage verre	40	NA	3	3	1
T4.2	Moulage plastique	80	NA	3	4	1
T5.1	Double face	700	0,3 à 0,5	1	2	1
T5.2	CMP	300	10 à 30	1-2	1	1
(1) 1 : superpoli < 0,5 nm. 2 : très bon poli 1 à 3 nm. 3 : poli avec possible reste structure 3 à 10 nm. 4 : douci 100 à 500 nm.			(2) 1 : 10 < PTV < 50 nm. 2 : 50 < PTV < 150 nm. 3 : 150 < PTV < 300 nm. 4 : PTV > 300 nm.		(3) 1 : très peu. 2 : moyen. 3 : important.	

**Figure 23 – Profilomètre mécanique Talysurf** (source : Taylor Hobson)**Avantages :**

- dynamique importante de mesure ;
- possibilité de mesurer quasiment tout type de forme : sphère, plan, asphère, cylindre, *free form*.

**Inconvénients :**

- lenteur : ces dispositifs nécessitant le passage d'une pointe sur la surface, la vitesse de balayage est en général de l'ordre du millimètre par seconde. Le temps de mesure devient important si plusieurs méridiennes sont mesurées ;
- rayure : la pointe en diamant peut rayer la surface (pièces plastiques) ;
- mesure monodimensionnelle sur un méridien sur la plupart des appareils ;
- limite quand la pente est trop forte ;
- prix : assez cher : appareil de l'ordre de 200 k€.

**Figure 24 – Profilomètre optique (Zygo)****3.4.1.2 Profilométrie optique**

Le **principe** de la profilométrie optique consiste à former une cavité optique entre la surface à caractériser et l'étalon de surface (appelé aussi référence) qui travaille en transmission.

Le profilomètre 3D (figure 24) est un appareil de mesure topographique à balayage. Le capteur mesure l'altitude d'un point de l'échantillon à un instant donné et la platine sur laquelle il est positionné permet de déplacer l'objet à étudier pour palper complètement la zone de mesure. Dans la majorité des cas, la sonde utilisée est un capteur optique (lumière blanche) utilisant le principe optique de l'aberration chromatique, qui focalise en chaque point de mesure, la longueur d'onde du spectre sur une dynamique verticale en 300 nm et un spot de 5 µm environ. Le signal retour est analysé par un spectrophotomètre qui traduit chacune des longueurs d'onde mesurées en distances entre la lentille et la surface de l'échantillon.

L'utilisation de la sonde optique nécessite que la surface de l'échantillon analysé ait un pouvoir réfléchissant suffisant. Dans le cas contraire, un capteur mécanique (avec contact) peut être utilisé. Lorsque le capteur oscille verticalement, il déplace un noyau magnétique à l'intérieur d'une bobine, modifiant l'ajustement d'un circuit électronique. La position verticale du capteur est ensuite traduite en une tension qui est numérisée par la centrale.

**Avantage :** absence de contact lors de la mesure.

**Inconvénients :**

- limitation dans la dynamique de mesure ;
- limitation forte sur certaines typologies et tailles de pièces (sphère très convexe ou asphérique).

### 3.4.2 Interférométrie

L'interférométrie est sûrement un des principes les plus utilisés et les plus précis. Cette technique permet de mesurer les planétés et rayons de courbures des surfaces planes, sphériques ou asphériques.

**Principe :** l'écart est observé entre une onde de référence parfaite et l'onde de mesure issue du composant sous test. Cet écart est modulé à l'aide d'un système de modulation de phase par balayage piézo-électrique qui détermine le sens de l'écart et accroît la dynamique de mesure. L'onde issue du composant représente habituellement deux fois la déformée de sa surface. Une figure « identique » à celle des lignes de niveau sur une carte topographique est créée. Chaque ligne de niveau représente les points à la même hauteur sur la surface et l'écart entre deux lignes de niveau est égal à  $0,3\ \mu\text{m}$  (si la source lumineuse a une longueur d'onde de  $0,6\ \mu\text{m}$ ).

Selon l'interféromètre utilisé, la taille du faisceau de sortie, le type de l'objectif créant l'onde de référence, il est possible de

mesurer, soit des surfaces planes, soit des surfaces sphériques concaves ou convexes de différents diamètres et rayons de courbure. En intercalant un correcteur holographique ou dioptrique entre l'objectif de référence et la surface à mesurer, il est possible de mesurer des surfaces asphériques ou *free form*.

**Avantages :**

- précision ;
- mesure bidimensionnelle.

**Inconvénients :**

- dynamique de mesure assez faible (la déformée de la surface ne doit pas dépasser 2 à  $3\ \mu\text{m}$  par rapport à la surface de référence) ;
- limitation pour les faces convexes et asphériques et *free form* ;
- sensibilité aux vibrations et aux variations thermiques.

Les interféromètres les plus puissants utilisés en industrie sont : SSI (interférométrie par sous-pupille ou *stitching*) et Verifire AT de Zygo (figure 25).

### 3.4.3 Analyseur de surface d'onde : déflectométrie

Son principe est de décomposer un front d'onde (FO) en front d'onde élémentaire (FOE) et de déterminer pour chacun de ces FOE son orientation (pente).

La mesure de ces orientations permet de reconstituer la forme du front d'onde (dans le cas d'une mesure « classique », il représente le double de la planéité de la surface de la pièce sous test. En effet, la mesure de ces déplacements, appelés « pentes locales », correspond à la mesure de la dérivée du front d'onde. L'intégrale de cette mesure permet de remonter à la forme du front d'onde du composant sous test.



Figure 25 – Deux modèles d'interféromètre

**Tableau 5 – Choix de la métrologie en fonction de la technologie (1)**

Catégorie	Technologie	Profilométrie		Interférométrie			Analyseur surface d'onde
		Mécanique	Optique	Classique	Stitching (par sous-pupille)	Avec correcteur	
T1	SPDT	C	P	P	P	P	P
T3.1	PAO robot	P	P	C	C	C	P
T3.2	MRF	P	P	C	C	C	P
T3.3	Usion	P	P	C	C	C	P
T3.5	Plasma	P	P	C	C	C	P
T3.6	FJP	P	P	C	C	C	P
T2.1	CN ébauche	P	D	D	D	D	D
T2.2	CN polissage	P	P	C	C	C	P
T4.1	Moulage verre	C	P	P	P	P	P
T4.2	Moulage plastique	C	P	P	P	P	P
T5.1	Double face	P	P	C	P	P	P
T5.2	CMP	P	P	C	P	P	P

(1) C conseillé.  
P possible.  
D déconseillé ou impossible.

**Avantages :**

- facilité d'utilisation ;
- compacité ;
- très grande dynamique de mesure (300 à 500  $\mu\text{m}$  PTV), tout type de forme possible à mesurer y compris asphérique et *free form* ;
- insensibilité aux vibrations ;
- mesure absolue sans référence.

**Inconvénients :**

- limitation en ouverture (les rayons courts ne sont pas mesurables) ;
- résolution spatiale plus faible qu'en interférométrie mais de nouvelles technologies arrivent sur le marché (technologie d'interférométrie à décalage multilatérale).

Des exemples d'analyseur sont montrés sur la figure 26.

**3.4.4 Comparatif des différentes métrologies**

Pour conclure ce paragraphe, la métrologie classiquement associée à la technologie de réalisation de la surface est synthétisée dans le tableau 5.

## 4. Domaines d'application industriels et comparatif des procédés

Dans le tableau 6, nous allons passer en revue l'utilisation de ces différentes technologies dans les sociétés d'optique, en prenant en compte des critères « industriels » : – technologie facilement accessible, à savoir : les investissements nécessaires sont-ils lourds ? L'expérience à acquérir est-elle importante avant de pouvoir sortir des pièces ?


**Figure 26 – Analyseurs de surface d'onde**

- technologie adaptée à des prototypes (1 à 10), petites séries (10 à 500) ou grandes séries (> 500) ;
- coût d'obtention de la pièce ;
- niveau d'utilisation de cette technologie : beaucoup de sociétés l'ont-elles adoptée ? Est-elle utilisée à travers le monde ? ;
- application produit : astronomie, spectrométrie, civil, défense.

Tableau 6 – Comparatif des procédés

Catégorie	Titre procédé	Accessibilité technologie		Adaptation quantité			Coût obtention pièce	Niveau d'utilisation	Application produit
		Investissement	Acquisition expérience	Prototypes	Petites séries	Grandes séries			
		1 léger, 3 lourd	1 facile, 3 difficile	Oui/Non	Oui/Non	Oui/Non	1 pas cher/ 3 cher	1 courant/ 3 rare	A astronomie, S spectrométrie C civil, D défense
T1	SPDT	2	1	O	O	O	1	1	CD
T3.1	PAO robot	2	2	O	O	N	3	2	ASCD
T3.2	MRF	2	2	O	O	N	2	2	CD
T3.3	Usion	2	2	O	O	N	3	3	ASCD
T3.5	Plasma	3	3	O	O	N	3	3	SC
T3.6	FJP	1	2	O	O	N	2	2/3	SCD
T2.1	CN ébauche	1/2	1	O	O	O	1/2	1/2	SCD
T2.2	CN polissage	1/2	2	O	O	O	1/2	1/2	SCD
T4.1	Moulage verre	3	3	N	O	O	1	2	SCD
T4.2	Moulage plastique	3	3	N	O	O	1	1	SCD
T5.1	Double face	2	1	N	O	O	1	1	SCD
T5.2	CMP	2	2	O	O	O	1	1	CD

## 5. Conclusion et perspectives

Nous avons revu l'ensemble des nouvelles technologies implantées industriellement dans les sociétés. Elles ont toutes en commun plusieurs points :

- très forte amélioration de la répétabilité par rapport au process traditionnel ;
- possibilité offerte à la réalisation de nombreuses formes qui étaient autrefois impossibles : asphériques à fortes déformées, *free form* ;
- amélioration des performances en termes de planéité ;
- certaines limites subsistent pour l'obtention de formes et font toujours appel à l'utilisation de procédés traditionnels.

Ces derniers nécessitent, pour l'obtention de bonnes performances une main-d'œuvre très spécialisée voire experte. Pendant de nombreuses années, les polisseurs étaient considérés comme des maîtres d'art. L'arrivée de ces nouvelles technologies permet à l'optique de rentrer dans le monde industriel avec des machines à commande numérique, des procédés répétables et une main-d'œuvre de qualification plus industrielle (process, machines outils).

La demande toujours plus forte dans des surfaces plus précises et plus complexes, oblige ces nouvelles technologies à de **nouveaux développements**. Citons parmi ceux-ci :

### • Dans le domaine de la PAO :

- technologie de PAO à spot variable (enfonceur ou pression variable) en fonction de l'endroit de la pièce à polir : voir article 1 paragraphe 5 PAO amélioré ;
- ajout d'axes supplémentaires pour polir des *free form* ;
- début de généralisation d'utilisation combinée d'un outil souple de moyen diamètre pour lisser les moyennes fréquences et d'un petit outil pour la correction de forme [20] ;

– principe du « *grolishing* » (*grinding* : ébauche + *polishing* : polissage), à savoir utilisation d'un pad diamanté souple pour améliorer la forme en sortie d'ébauche et sa rugosité pour préparer un meilleur polissage [21] [22] ;

– technologie EEM (*Elastic Emission machining*) : cette technologie s'apparente à la MRF mais avec une utilisation de fines particules dans une eau ultrapure et création d'une réaction chimique entraînant un enlèvement matière.

### • Dans le domaine de la technologie CN :

– le facteur limitant les performances actuellement est la gestion de l'usure des outils diamant : la technologie ELID qui ravive les meules par électrolyse durant le process d'usinage permet d'améliorer nettement l'état de surface (20 nm rms) mais surtout la répétabilité du process car l'outil a toujours une usure constante pièce après pièce. Cette technologie permet d'envisager l'usinage du verre avec un outil ponctuel [23] ;

– le principe du « *grosishing* », de l'outil combiné petit/moyen diamètre, ainsi que la prise en compte des différences de taux d'usure des outils en fonction de leur position sur la pièce sont des axes majeurs de développement pour logiciels des CN de polissage.

• **Dans le domaine des outils ponctuels** : la technologie de SPDT se développe sur les matériaux non ductiles (verre) [1].

Il ne faut pas oublier la recherche en métrologie, qui est de plus en plus, l'élément majeur de la bonne performance d'une technologie :

- amélioration constante de la dynamique pour la profilométrie optique sans contact ;
- amélioration des techniques d'interférométrie par stitching (mesure par sous-pupille) pour les mesures des asphériques à forte déformée.



# Réalisation de surfaces optiques de précision : procédés de fabrication

par **François LEPRÊTRE**

Ingénieur process optique Thales Angénieux

## Sources bibliographiques

- [1] FANG (F.Z.), LIU (X.D.) et LEE (L.C.). – *Micro-machining of optical glasses – A review of diamond-cutting glasses*. Sadhana, vol. 28, part 5, oct. 2003.
- [2] BLACKLEY (W.S.) et SCATTERGOOD (R.O.). – *Ductile-regime machining model for diamond turning of brittle materials*. Precision Engineering, vol. 13, Issue 2, p. 95-103, avr. 1991.
- [3] BUHLER (S.), FUHRERL (J.), CHERVAZ (F.), MEIER (Ch.), OPPLIGER (C.), ROQUIER (F.) et BAUME (P.). – *Aspherical toroidal mirror fabricated by single-point diamond turning*. Hochschule für Technik und Informatique.
- [4] BHATTACHARYA (B.), PATTEN (J.A.) et JACOB (J.). – *Single point diamond turning of CVD coated silicon carbide*. Proceedings of MSEC2006, ASME International Conference on Manufacturing Science and Engineering, Ypsilanti, Michigan, 8-11 oct. 2006.
- [5] MARSH (E.R.), JOHN (B.P.), COUEY (J.A.), WANG (J.), GREJDA (R.D.) et VALLANCE (R.R.). – *Predicting surface figure in diamond turned calcium fluoride using in-process for measurement*. J. Vac. Sci. Technol. B, vol. 23, n° 1, American Vacuum Society, janv.-fév. 2005.
- [6] WALKER (D.), FREEMAN (R.), HOBBS (G.), KING (A.), McCAVANA (G.), MORTON (R.), RILEY (D.) et SIMMS (J.). – *Zeeko 1 metre polishing system*. JSPE, sept. 2008.
- [7] QED Technologies. – *Polishing PMMA and other optical polymers with magnetorheological finishing*. LLE Review, vol. 96.
- [8] DUMAS (P.R.), FLEIG (J.), FORBES (G.W.), DON GOLINI, KORDONSKI (W.I.), MURPHY (P.E.), SHOREY (A.B.) et TRICARD (M.) (QED Technologies, Inc., Rochester, NY). – *Flexible polishing and metrology solutions for free-form optics*. In AccessScience, ©McGraw-Hill Companies (2005).
- [9] QED Technologies. – *Developments for MRF® of large optics*. <http://www.qedmrf.com>.
- [10] DUMAS (P.), DON GOLINI et TRICARD (M.) (QED Technologies). – *Improve figure and finish of diamond turned surfaces with magneto-rheological Finishing (MRF®)*. Window and Dome Technologies and Materials IX, Proceedings, RANDAL (W.) Tustison, Editors, vol. 5786, p. 296-304.
- [11] DUMAS (P.), HALL (C.), HALLOCK (B.) et TRICARD (M.) (QED Technologies, International). – *Complete sub-aperture pre-polishing and finishing solution to improve speed and determinism in asphere manufacture*. Optics and Photonics 2007, Proceedings of SPIE, vol. 6671, août 2007 [dumas@qedmrf.com](http://www.qed-mrf.com), <http://www.qed-mrf.com>.
- [12] CONCONI (P.), GHIGO (M.), PARESCHI (G.), SALA (M.) et ANTONELLO (E.) (INAF-Osservatorio Astronomico di Brera). – *The ultraviolet telescope UVISS : ion beam figuring and multilayer technology*. Mem. SA It. Suppl., vol. 5, p. 391 (2004).
- [13] SUBRAHMANYAN (P.), GARDOPEE (G.), VERMA (Y.), LI (N.), YU (T.), KYLER (T.), FISKE (P.) et SOMMER (P.). – *Rapid fabrication of lightweight SiC aspheres using reactive atom plasma (RAPTM) processing*. US Army contract W911NF-04-2-001.
- [14] MESSELINK (W.A.C.M.), WÄGERA (R.), MEEDERB (M.), LOOSERA (H.), WONSB (T.), HEINIGERA (K.C.) et FÄHNLEB (O.W.) (Fisba Optik AG). – *Optimization of fluid jet polishing CNC tool design*. Swiss innovation promotion agency KTI/CTI.
- [15] MADAPUSI (S.), KIM (N.-H.) et TOMHE (Y.). – *Predictive molding of precision glass optics*.
- [16] DEEGAN (J.), HURLEY (W.), BUNDSCHUH (B.) et WALSH (K.) (Rochester Precision Optics). – *Precision glass molding technical brief*. [http://www.rpoptics.com/glass\\_index.html](http://www.rpoptics.com/glass_index.html).
- [17] MAYER (R.) (Viaoptic GmbH). – *Precision injection molding : how to make polymer optics of high volume and high precision applications*. Optik and Photonik, n° 4, déc. 2007.
- [18] NASELARIS (M.) (Stefan Sydor Optics, Inc.). – *Double-sided lapping : polishing optical materials*. The Photonics handbook (2005).
- [19] ZANTYEA (P.B.), KUMARA (A.) et SIKDERB (A.K.). – *Chemical mechanical planarization for microelectronics applications*. Materials Science and Engineering R, 45, p. 89-220 (2004).
- [20] DeGROOTE NELSON (J.), LIGHT (B.), SAVAGE (D.), WIEDERHOLD (B.) et MANDINA (M.) (Optimax Systems Inc.). – *VIBE™ finishing to remove mid-spatial frequency ripple*. OSA/IODC/OF&T (2010).
- [21] WALKER (D.D.), BEAUCAMP (A.T.H.), DOUBROVSKI (V.), DUNN (C.), FREEMAN (R.), HOBBS (G.), McCAVANA (G.), MORTONB (R.), RILEY (D.), SIMMS (J.) et WEI (X.). – *New results extending the precessions process to smoothing ground aspheres and producing freeform parts*.
- [22] WALKER (D.D.), BALDWIN (A.), EVANS (R.), FREEMAN (R.), HAMIDI (S.), SHORE (P.), TONNELIER (X.), WEI (S.), WILLIAMS (C.) et YU (G.). – *A quantitative comparison of three groishing techniques for the precessions™ process*.
- [23] PRABHU (S.). – *Nano surface generation using electrolytic in-process dressing (elid) technique*. International Journal of Nanotechnology and Applications, ISSN 0973-631X, vol. 1, n° 2, p. 45-59 (2007).
- [24] EVANS (C.J.), PAUL (E.), DORNFELD (D.), LUCCA (D.A.), BYRNE (G.), TRICARD (M.), KLOCKE (F.), DAMBON (O.) et MULLANY (B.A.). – *Material removal mechanisms in lapping and polishing*. Precision Manufacturing Group, 1<sup>er</sup> janv. 2003.
- [25] *Handbook of optical plastics*. Edited by BAUMER (S.).



**TECHNIQUES  
DE L'INGÉNIEUR**

# L'expertise technique et scientifique de référence

**Techniques de l'Ingénieur** vous apporte une information précise et fiable pour l'étude et la réalisation de vos projets.

Actualisées en permanence, les **ressources documentaires** profitent aujourd'hui à plus de **300 000 utilisateurs** et sont la référence pour tout ingénieur, bureau d'études, direction technique et centre de documentation.

Depuis près de 70 ans, **3 500 experts** contribuent quotidiennement à développer, enrichir et mettre à jour cette documentation professionnelle unique en son genre.

L'intégralité de ces ressources représente plus de **9 000 articles**, répartis dans plus de **430 bases documentaires**, accessibles sur internet, en téléchargement PDF, et sur tablette.

## 4 BONNES RAISONS DE CHOISIR TECHNIQUES DE L'INGÉNIEUR

- Une **actualisation permanente** du fonds documentaire
- Un **comité d'experts** scientifiques et techniques reconnus
- Une **collection scientifique et technique incontournable** sur le marché francophone
- L'espace actualité pour suivre les **tendances et innovations** de vos secteurs



## DES SERVICES ASSOCIÉS À CHAQUE ABONNEMENT

- **Service de questions-réponses** <sup>(1)(2)</sup> : interrogez les plus grands spécialistes des domaines couverts par vos bases documentaires. Votre abonnement vous permet en effet de poser des questions techniques ou scientifiques.
- **Les articles Découverte** : un article vous intéresse, mais ne fait pas partie de votre abonnement ? Techniques de l'Ingénieur vous offre la possibilité de l'ajouter.
- **Le Dictionnaire technique multilingue** : 45 000 termes scientifiques et techniques – avec illustrations et légendes – en français, anglais, espagnol, allemand.
- **Les Archives** : vos bases documentaires s'enrichissent et sont mises à jour en ligne en permanence. Les Archives conservent la mémoire de ces évolutions et vous permettent d'accéder aux versions antérieures de vos articles, ainsi qu'à ceux qui traitent des technologies plus anciennes.

Profitez également de l'impression à la demande <sup>(1)</sup>, pour commander une ou plusieurs éditions papier supplémentaires de vos bases documentaires (sur devis).

(1) Disponible pour la France, le Luxembourg, la Belgique, la Suisse et Monaco.

(2) Non disponible pour les établissements scolaires, écoles, universités et autres organismes de formation.

ILS NOUS FONT CONFIANCE :

**SAGEMCOM**



**SAFRAN**  
AEROSPACE DEFENCE SECURITY



**ARKEMA**

**groParisTech**

**3M**

**SIEMENS**

**ROLEX**

**COS**  
A Division of the American Chemical Society

**DASSAULT**  
AVIATION

**EADS**

**L'ORÉAL**

**SAINT-GOBAIN**



**Schneider**  
Electric

**THALES**





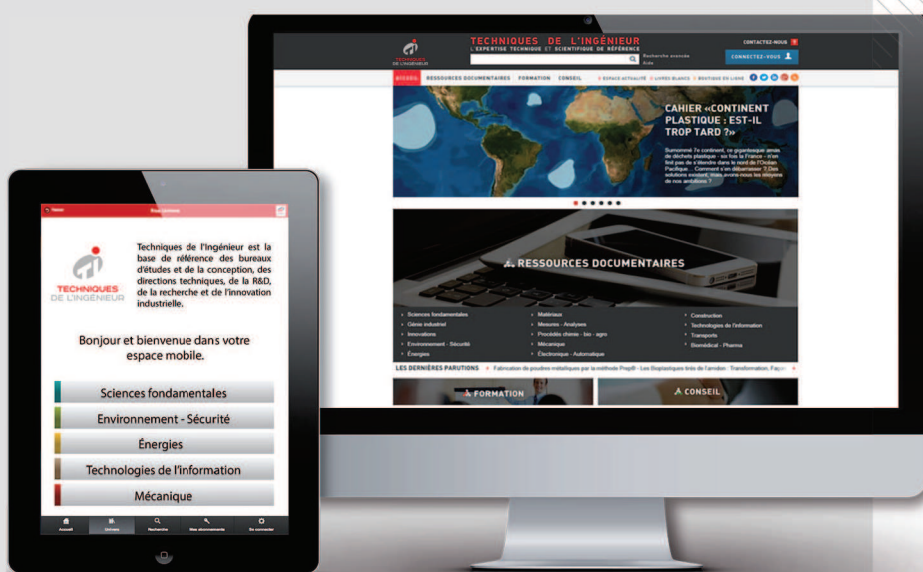
## LES + DES OFFRES PACK

- Un large choix de **+ de 60 thématiques** pour des besoins de contenu plus larges
- Des **tarifs préférentiels sur mesure** adaptés à vos besoins

## LES UNIVERS DOCUMENTAIRES

- Plus de 430 bases documentaires et plus de 9 000 articles en 14 univers

	Sciences fondamentales
	Environnement - Sécurité
	Énergies
	Technologies de l'information
	Mécanique
	Innovations
	Génie industriel
	Biomédical - Pharma
	Procédés Chimie -Bio - Agro
	Matériaux
	Mesures - Analyses
	Électronique - automatique
	Construction
	Transports



## POUR EN SAVOIR PLUS SUR LES OFFRES DE PACKS...

... contactez le service Relation Clientèle  
qui se chargera de vous rediriger vers un chargé d'affaires :

**Tél : +33 (0)1 53 35 20 20**

Email : [infos.clients@teching.com](mailto:infos.clients@teching.com)  
[www.techniques-ingenieur.fr](http://www.techniques-ingenieur.fr)

## LES AVANTAGES **TECHNIQUES DE L'INGÉNIEUR**

Le droit d'accès, annuel ou pluriannuel, permet une consultation illimitée des ressources documentaires sélectionnées, ainsi que le téléchargement des versions PDF des articles de référence ou fiches pratiques inclus dans ces ressources. Les droits d'accès sont proposés en monoposte ou multiposte.

### ■ ACTUALISATION PERMANENTE

Mises à jour permanentes, publication de **nouveaux articles** de références et fiches pratique : un contenu complet sur le sujet qui vous intéresse, des alertes par email.

### ■ DES SERVICES INCLUS

En plus de l'accès aux ressources documentaires, chaque souscription offre un **accès privilégié** à un **ensemble de services**.

### ■ MOBILITÉ



Votre abonnement étant **100 % web**, vous pouvez le consulter à tout moment, sur n'importe quel ordinateur ou sur nos versions **iPad et Android**.



Pour accompagner vos équipes et projets,  
**CHOISISSEZ**

les offres de formation et conseil

## MONTEZ EN COMPETENCE

- Des formations personnalisées, réalisées au sein de votre établissement et à vos dates
- Un accompagnement à la mise en conformité réglementaire
- Des missions d'audit et de recommandations techniques

## LES ENGAGEMENTS **TECHNIQUES DE L'INGÉNIEUR**

- Un réseau d'experts reconnus pour vous conseiller
- Une veille scientifique et technique pour mieux décider
- Les dernières obligations HSE pour être en règle
- Les clés en management des hommes et des projets pour gagner en efficacité

Consultez l'intégralité  
des programmes sur le site  
de Techniques de l'Ingénieur,  
espaces **FORMATION** et **CONSEIL**

[www.techniques-ingenieur.fr](http://www.techniques-ingenieur.fr)



RESSOURCES  
DOCUMENTAIRES



FORMATION



CONSEIL