Une Introduction aux outils de prototypage rapide et aux méthodes de rétro-conception (reverse engineering)

Sébastien Thibaud

- La rétro-conception, c'est quoi ?
- Digitalisation : Méthodes de mesures avec et sans contact
- Traitements des nuages de points
- Métrologie et qualifications de pièces par utilisation des techniques de rétro-conception
- Pourquoi utiliser des techniques de prototypage rapide ?
- Les techniques de prototypage rapide : intérêts et inconvénients
- Couplage entre CAO/CFAO – Prototypage Rapide – Digitalisation

Rétro-conception

(Reverse Engineering)

Où comment digitaliser une maquette physique

La rétro-conception, c'est quoi ?

- De nos jours, il n'y a pas un bureau d'études qui ne possède une station CAO voire de CFAO
- Cet outil permet notamment de développer plus rapidement un ensemble
- Il permet aussi d'envisager
  - Plusieurs possibilités,
  - De les paramétrer (CAO Paramétrique),
  - De prendre en compte son assemblage,
  - De visualiser les éventuelles interférences entre pièces
  - D'optimiser certains composants (par un couplage avec les outils adéquats)
  - De les dimensionner (utilisation d'outils de calculs : résistance, vibration, fatigue, crash, …)
  - …
- Ceci est donc associé à la notion de maquette numérique (voir cours sur le PLM)
- Néanmoins, que faire des anciennes conceptions sur papier ?
- La réponse est associée à une redigitalisation de ces plans (**remasterisation**)
- Oui, mais qu'en est-il lorsque l'on dispose uniquement de la maquette physique ?
- Le problème est donc associée à une numérisation d'une maquette physique (réelle) en une maquette numérique (virtuelle)
- Cette problématique est associée aux méthodes dites de **rétro-conception** (**reverse engineering**)

Digitalisation

- Les outils de rétro-conception sont doubles :
    1. Les techniques (physiques) de mesures
    2. Les techniques (numériques) de reconstruction de la pièce

Les techniques de mesures avec et sans contacts

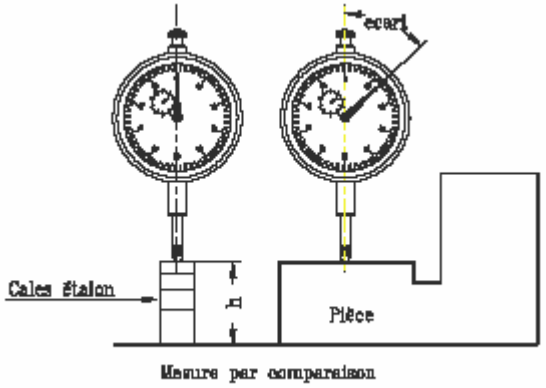
- Le principe de la digitalisation d'un composant réel est associé à la mesure et au relevé topologique de celui-ci
- Il existe deux techniques de mesures :
    - Techniques avec contact physique entre le composant et le moyen de mesures
    - Techniques sans contact physique entre le composant et le moyen de mesures
- La digitalisation souhaitée peut être surfacique (relevé topologique des surfaces frontières) ou volumique

Méthodes directes

- Les méthodes directes consistent à faire un relevé d'une dimension à partir d'une référence
- On peut citer différents moyens de mesures basés sur ce principe :
  - Appareil à traits : Le mètre
  - Appareils à vernier : le pied à coulisse, colonnes de mesures, trusquin, …
  - Appareils à vis micrométrique : le micromètre

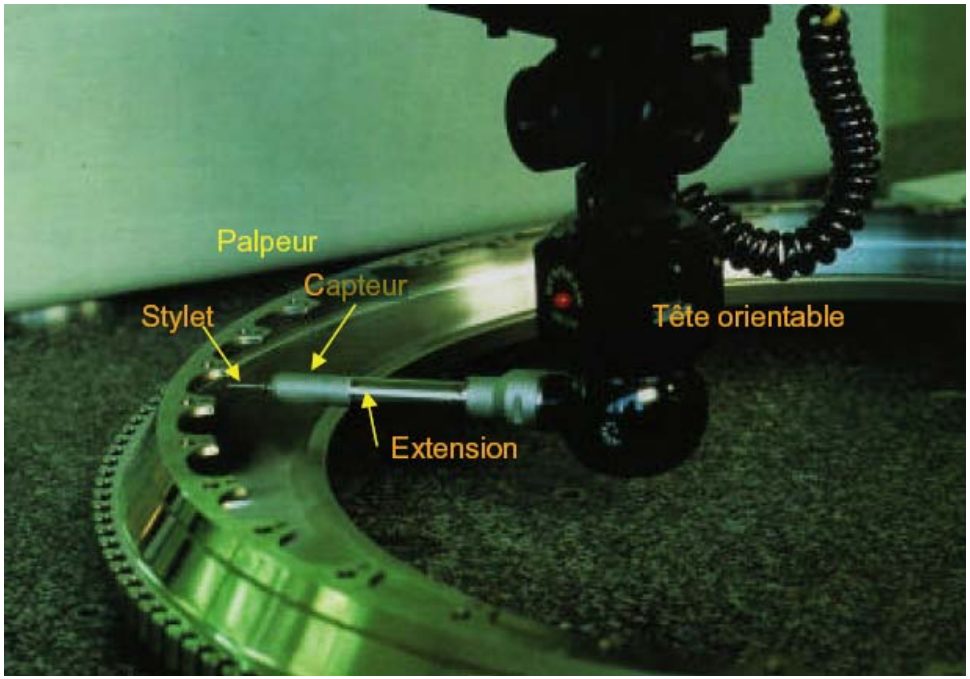
Méthodes indirectes

- Les méthodes indirectes sont associées à un relevé à l'aide d'un capteur de l'écart entre une pièce à mesurer et un étalon (pièce de référence).
- C'est donc une mesure par comparaison
- On utilise alors des comparateurs (comparateurs à levier, palpeurs 3D, MMT, …)



Méthodes indirectes – Machines à Mesurer Tridimensionnelle

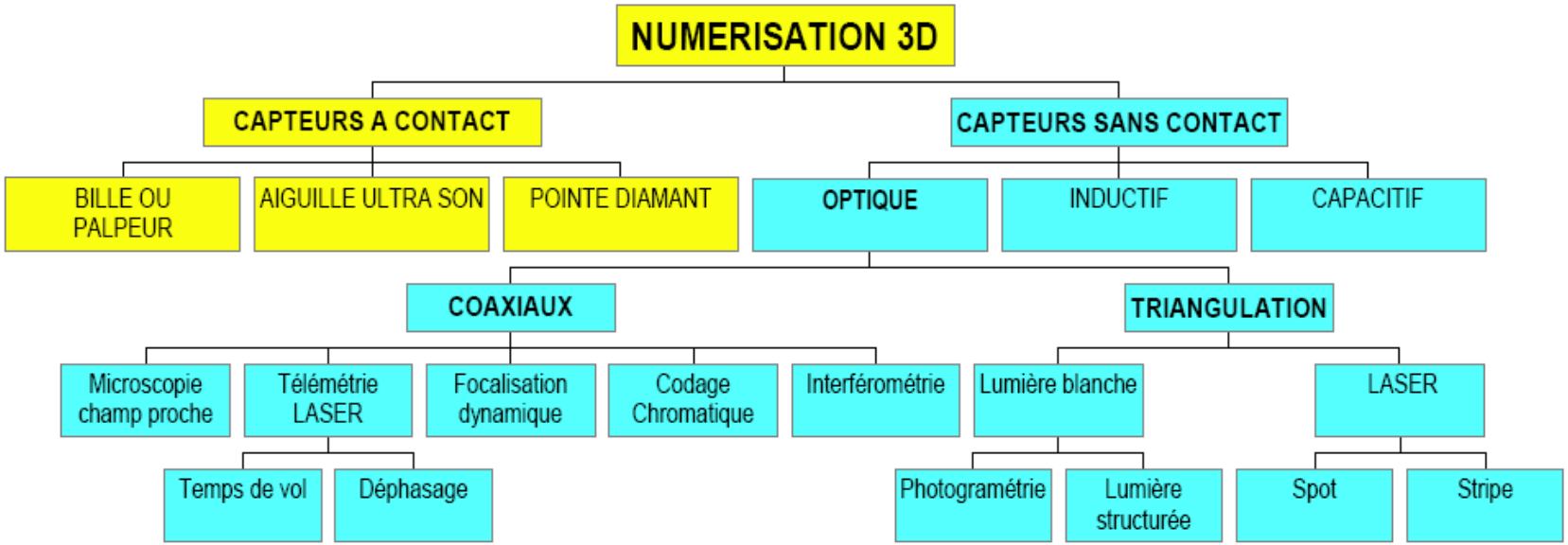
- Les machines à mesurer tridimensionnelle par contact consistent à venir mesurer la géométrie à l'aide de palpeurs
- Ces palpeurs (dynamiques ou statiques) sont constitués d'une tête orientable, d'une extension, d'un capteur et d'un stylet
- La stylet est constitué en son extrémité d'une sphère calibrée qui servira à la mesure
- Le système MMT connaît alors pour chaque mesure la position du centre de la sphère, i.e. un point de mesure



Méthodes avec contact : inconvénients pour la reconstruction de géométries

- Les méthodes de mesure par contact sont nombreuses
- Néanmoins, elles peuvent être longues et fastidieuses et permettent de définir que partiellement la géométrie
- En effet, même en utilisant une MMT classique, il est nécessaire de définir et de mettre en place la gamme opératoire de métrologie et cela pour un nombre de points limités
- Dans le cas de la reconstruction de géométries, l'utilisation de ces méthodes devient très vite caduque
- Existe-t-il alors d'autres techniques ?
- Dans la suite on présentera essentiellement les méthodes optiques comme moyens utilisés pour faire de la reconstruction de composants
- Néanmoins, il existe d'autres méthodes de mesures sans contacts : magnétique, ultra-sons, capteurs inductifs, capacitifs, magnéto-acoustique, radar, …
- Le lecteur intéressé pourra se renseigner en regardant par exemple les articles associés dans les Techniques de l'ingénieur : http://www.techniques-ingenieur.fr/

Méthodes de numérisations 3D – Méthodes optiques



Techniques de numérisation sans contact

Principe des méthodes optiques

- Pour réaliser capteur optique, on retrouve toujours les mêmes éléments à savoir
  - Une source lumineuse
  - Un détecteur de lumière
  - Des optiques de focalisation

Les sources lumineuses

- La source lumineuse peut être naturelle mais bien souvent il s'agit d'une source artificielle
- Ces sources artificielles sont souvent des LED ou des sources lasers

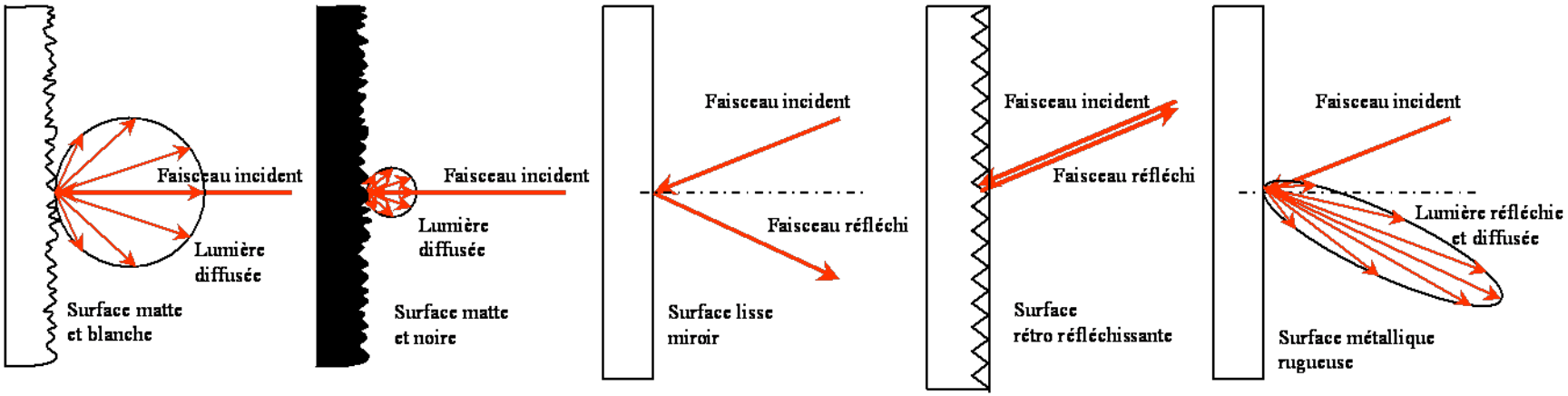
Les détecteurs

- Le détecteur le plus largement utilisé est la **photodiode**
- Cette cellule transforme l'énergie lumineuse en énergie électrique
- Utilisée en mode photoconducteur, une photodiode présente un temps de réponse très faible
- Assemblées en barrettes, elles permettent de mesurer une répartition d'intensité sur une ligne
- Les barrettes CCD (Charge Coupled Device) permettent de segmenter la ligne en plusieurs milliers d'éléments
- Les matrices CCD (plusieurs barrettes) réalisent la même opération sur une surface dont le nombre peut atteindre plusieurs millions. Ce nombre augmente avec l'évolution des détecteurs …

Techniques de numérisation sans contact

Les pièces à digitaliser

• Les pièces à éclairer **absorbent**, **diffusent** et/ou **réfléchissent** la lumière incidente selon leur couleur, leur état de surface et leur nature (transparente, opaque, isolante ou conductrice)

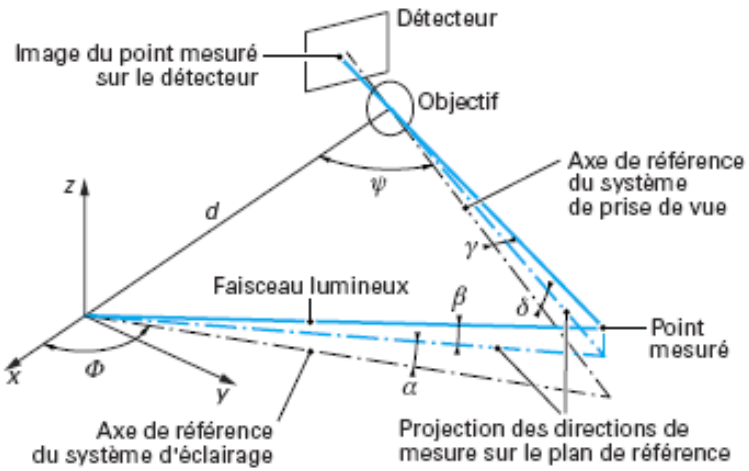


• Donc selon les caractéristiques de la pièce à digitaliser, il sera peut être nécessaire de prendre des précautions particulières selon le couple pièce/système optique utilisé.

Techniques de numérisation sans contact

Méthodes par triangulation

- Les méthodes de mesures de position des points par triangulation sont basées sur la détermination de l'intersection de deux directions
  - Direction de l'éclairage du point à mesurer sur la pièce (par ex : la direction du faisceau laser)
  - Direction d'où l'on voit le point éclairé du système de mesure (la direction de visualisation de la caméra CCD)



$$x = \frac{d \tan(\Psi + \gamma)}{\tan(\Phi + \alpha) - \tan(\Psi + \gamma)}$$

$$y = \frac{d}{\tan\left(\Phi + \alpha + \frac{\pi}{2}\right) - \tan\left(\Psi + \gamma + \frac{\pi}{2}\right)}$$

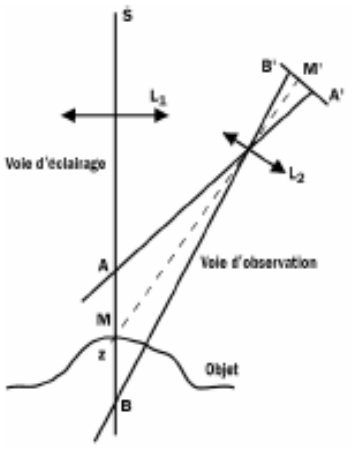
$$z = \sqrt{x^2 + y^2} \tan \beta$$

d	distance entre le dispositif de projection de faisceaux lumineux et le système de prise de vue,
Φ	direction de l'axe de référence du système d'éclairage,
Ψ	direction de l'axe du système de prise de vue,
α, β et γ	angles qui varient en fonction de la position du point mesuré.

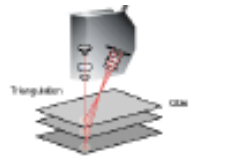
Techniques de numérisation sans contact

Méthodes par triangulation - Principe

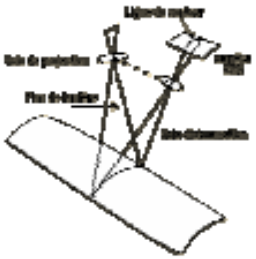
- La diode laser S émet un faisceau droit à l'aide d'un collimateur (lentille convergente L1)
- Après réflexion, le rayon incident MM', focalisé grâce à une lentille convergente L2, est capté par une ligne de cellules photosensibles
- Le capteur photosensible est placé à la même altitude que la diode laser, mais légèrement décalé latéralement de telle sorte qu'un changement d'altitude d'un objet devant le collimateur se traduise par un changement de position du rayon incident au niveau du capteur photosensible



a / principe de la triangulation



b / capteur laser « mono-point »



c / principe du capteur

Exemples de système de triangulation par source laser / caméra CCD

Système
KREON ZEPHYR
sur bras FARO/ROMER
ou MMT

FARO
La mesure du succès

ROMER

STEINTEK

Steintek MobileScan 3D
Disponible à l'AIP PRIMECA
Franche-Comté

steinbichler

Steinbichler T SCAN

METRIS

Système LED/CCD
KRYPTON de METRIS

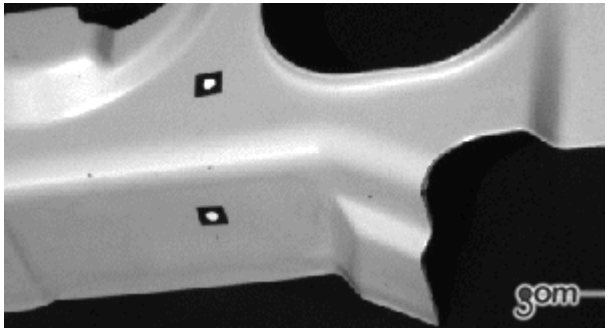
CREAFORM

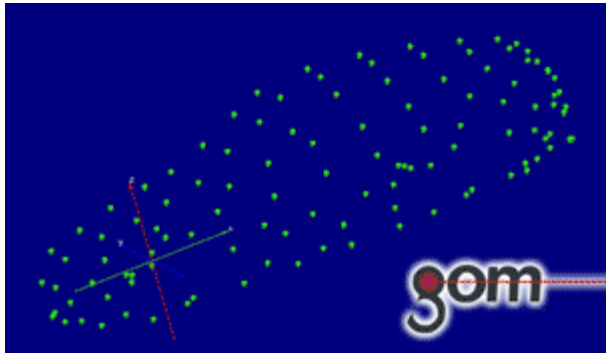
HANDYSCAN de CREAFORM
Disponible à l'IUT GMP de
Besançon

Techniques de numérisation sans contact

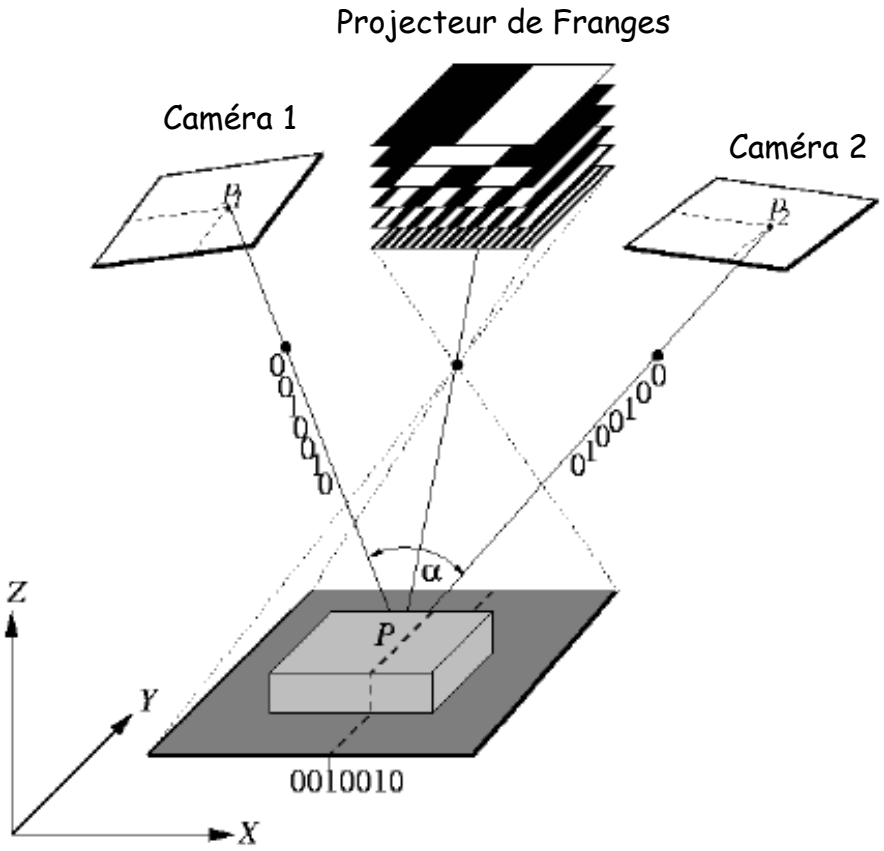
Méthodes par triangulation – Méthodes par projection de franges (Lumière Structurée)

- Le principe des méthodes par projection de franges est d'utiliser un projecteur de franges avec un ou deux caméras
- Le projecteur permet d'éclairer la pièce par des trames (franges) de pas de plus en plus fins afin de designer les lignes à mesurer et permettre d'enlever les ambigüités de mesures
- Le pas du réseau ne doit pas être trop fin afin d'éviter un effet de moiré qui pourrait perturber la mesure
- Les images sont alors mémorisées pour chaque réseaux de trames par la (ou deux) caméra(s)
- Le résultat de mesure procure un patch (nuage de points) de plusieurs millions de points (par ex :4 Millions de points pour le système ATOS de GOM) pour une position donnée
- La mesure dure quelques secondes et doit être répétée pour différentes positions
- Pour repositionner automatiquement toutes les digitalisations des cibles sont alors collées sur la structure de manière aléatoire





Méthodes par triangulation – Méthodes par projection de franges (Lumière Structurée)

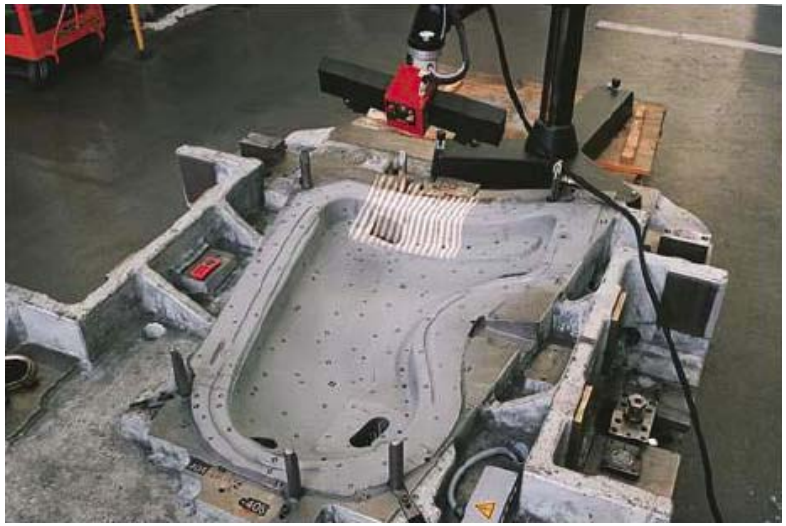


Chaque point est identifié par sa phase

Techniques de numérisation sans contact

Méthodes par triangulation – Méthodes par projection de franges (Lumière Structurée)

Système ATOS - GOM



steinbichler

Steinbichler COMET V

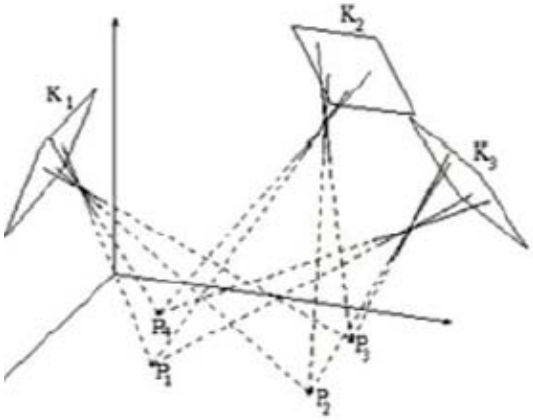
Techniques de numérisation sans contact

Stéréoscopie/ Photogrammetrie / Vidéogrammétrie

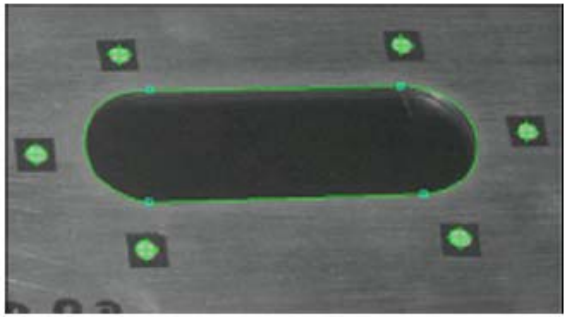
- La stéréoscopie est l'ensemble des techniques mises en œuvre pour reproduire une perception du relief à partir de deux images planes
- Elle se base sur le fait que la perception humaine du relief se forme dans le cerveau lorsqu'il reconstitue une seule image à partir de la perception des deux images planes et différentes provenant de chaque oeil.

Stéréoscopie/ Photogrammetrie / Vidéogrammétrie

- Le mot **photogrammétrie** vient du grec « photos » (lumière), « gamma » (quelque chose d'écrit ou de dessiné) et « metron » (mesure).
- Cette technique a pour but de déterminer les dimensions, les positions et la forme d'objets, à partir de clichés photographiques (points de vue stéréoscopique)
- Par combinaison mathématique, ces images fournissent les coordonnées 3D d'une scène
- La photogrammétrie est donc une technique de mesure par laquelle les coordonnées en trois dimensions des points d'un objet sont déterminées par des mesures faites sur une ou plusieurs images photographiques prises à partir de positions différentes
- Il est alors nécessaire de traiter l'ensemble des points de vue pour reconstituer l'image 3D



Les points P_i sont les projections des points communs des différentes prises de vue. Les coordonnées 3D de l'ensemble des points sont alors obtenues par triangulation de ces projections et des vues

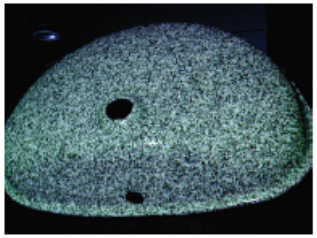
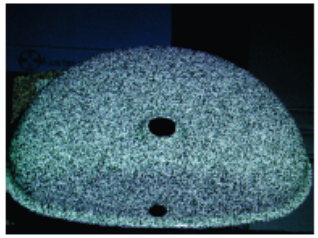
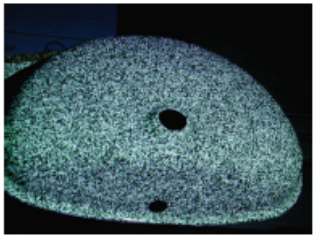
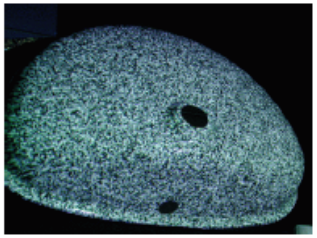


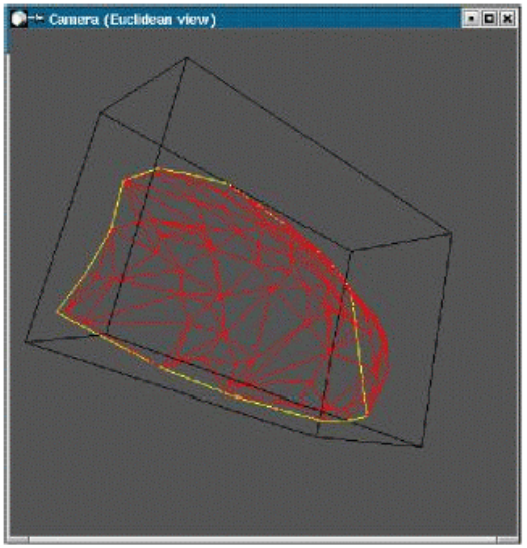
Exemple de mesure d'un trou oblong par le système TRITOP de GOM

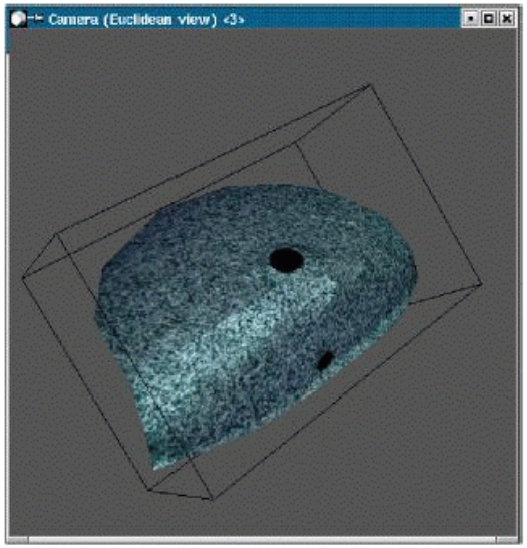
Techniques de numérisation sans contact

Vidéogrammétrie

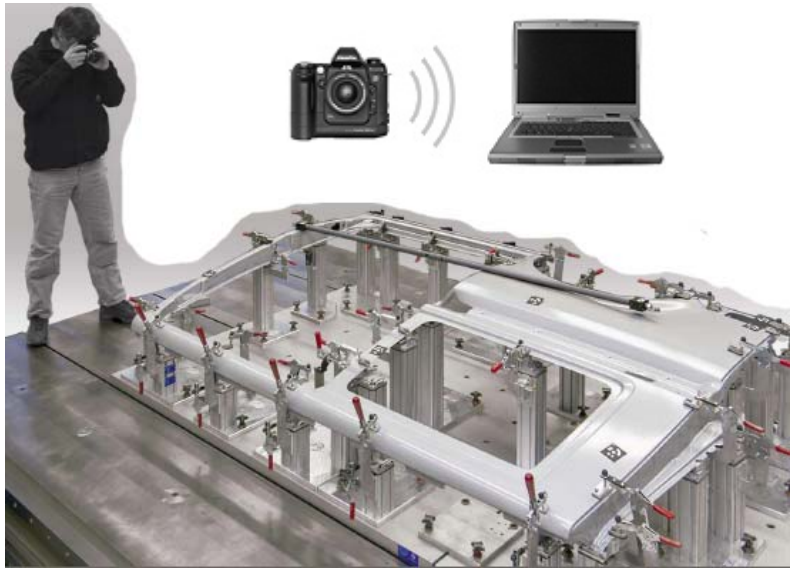
- Le principe de la **vidéogrammétrie** est basé sur celui de la photogrammétrie mais en remplaçant l'appareil photo numérique par une caméra numérique (donc une vidéo)
- Ceci permet un traitement en quasi-temps réel et une reconstruction rapide de la pièce





Exemples de systèmes par photogrammétrie / vidéogrammétrie



Système TRITOP de GOM

Système DPAPro de AICON

Vidéogrammétrie : Système FLASHPOINT5000 pour le médical

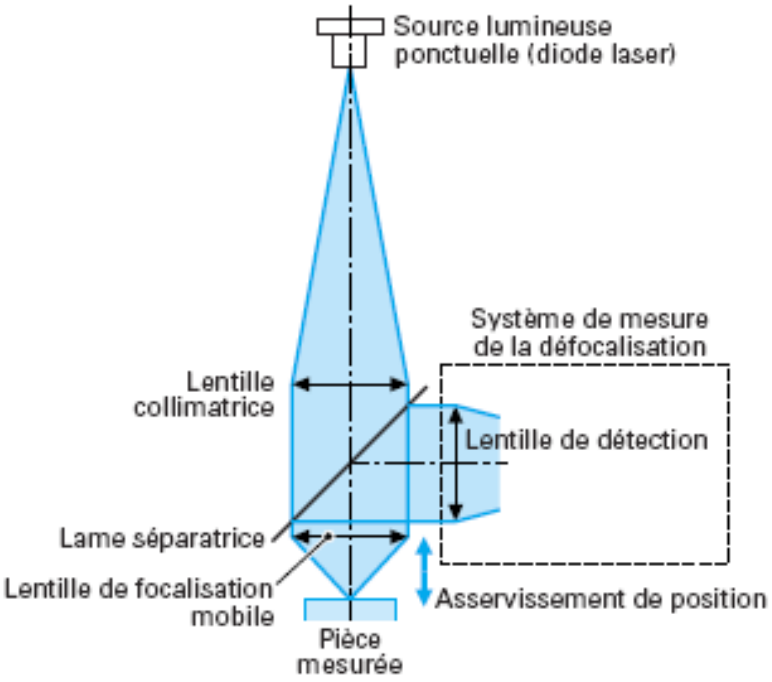
Méthode par défocalisation (Shape from Focus)

- Les méthodes de défocalisation ou Shape from Focus regroupent les techniques reposant sur la mesure du flou
- Lors du processus de formation des images, seuls les rayons réfléchis par l'objet à distance focale du centre optique convergent parfaitement sur le plan image
- Cette convergence est à l'origine d'une zone nette, alors que l'on observe des zones floues pour les points situés en dehors du plan focal
- La profondeur des points de l'image est déterminée en faisant varier la focale, ou bien en éloignant le capteur de l'objet
- C'est le principe du microscope 3D InfiniteFocus de la société ALICONA
- L'acquisition d'images, obtenues pour des hauteurs de focalisation différentes, permet de créer une image de profondeur

Techniques de numérisation sans contact

Méthode par défocalisation (Shape from Focus)

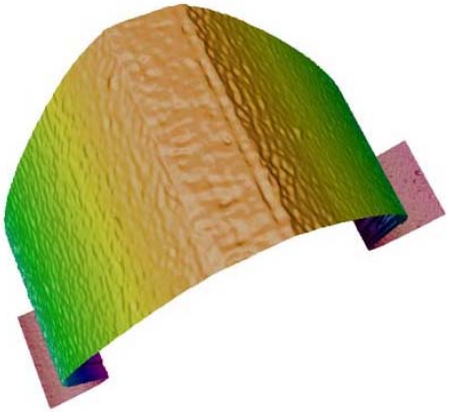
- Le système de mesures est composé
- d'une source lumineuse ponctuelle,
- d'une lentille de collimation qui permet de réaliser un faisceau parallèle
- d'une lentille de focalisation (objectif à grande ouverture numérique) qui permet d'éclairer la pièce à mesurer avec un point lumineux très petit (de l'ordre de la résolution de l'appareil)



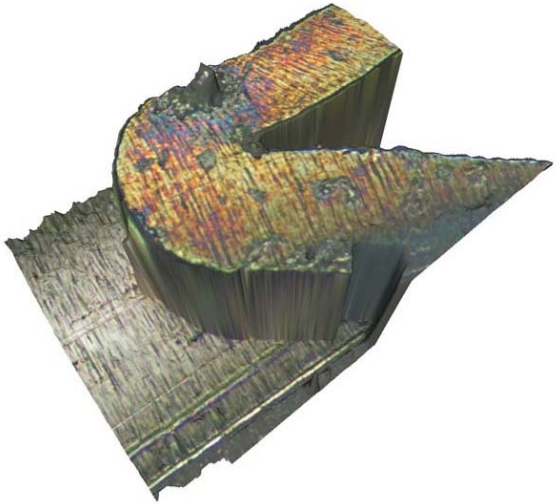
Méthode par défocalisation (Shape from Focus)

alicona

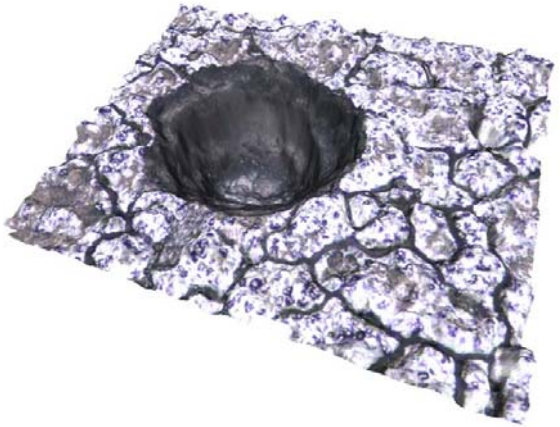
Système InfiniteFocus
de la société ALICONA
Disponible au Laboratoire de
Microanalyse des Surfaces
(LMS) de Besançon



Exemple d'une dent d'un
µPignon



Exemple d'un Stent

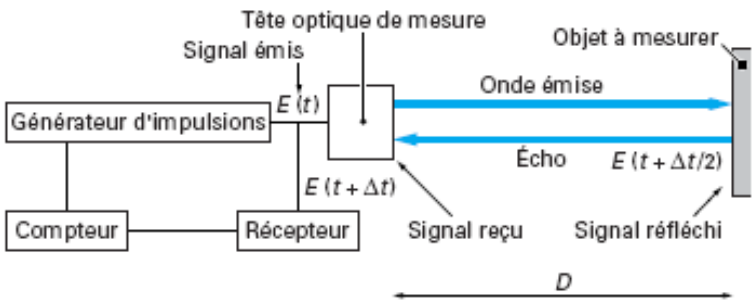


Détail d'une pièce an aluminium
corrodée

Techniques de numérisation sans contact

Méthode Temps de Vol – Télémétrie LIDAR

• La télémétrie par mesure de temps de vol (télémétrie laser) est une méthode de mesure sans contact basée sur la mesure du temps de propagation d'une impulsion lumineuse entre le capteur et la pièce à mesurer



• Pour mesurer le temps de propagation qui peut être très court (1 ns pour une distance à mesurer de 15 cm), **deux méthodes** sont utilisées

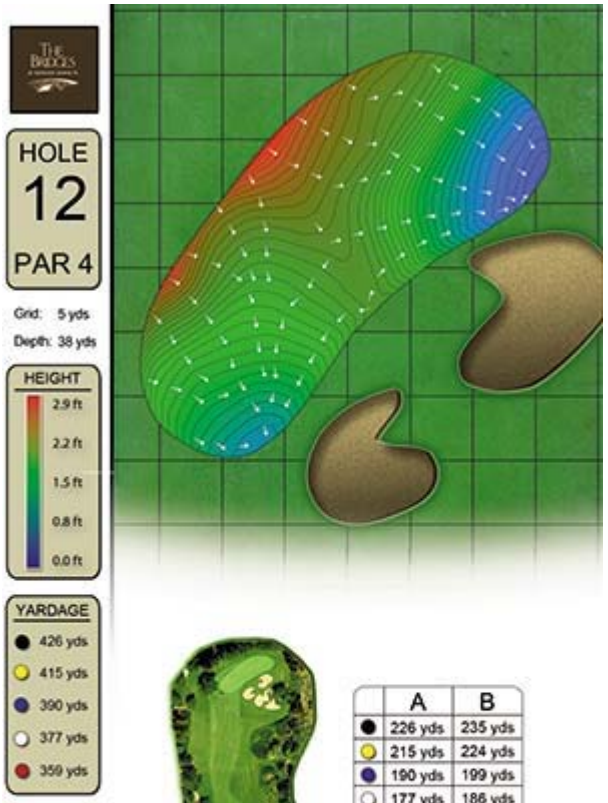
• Pour les **grandes distances** : une impulsion lumineuse très courte est produite, soit directement par une diode laser, soit à l'aide d'un modulateur optique et un tube laser. Un détecteur mesure l'écho lumineux, le temps entre l'émission et la réception est mesuré

• Pour les **courtes distances** : l'amplitude du faisceau lumineux émis est modulé sinusoïdalement, le retard de phase de l'écho lumineux recueilli est mesuré.

Exemples de systèmes de type Temps de Vol

Système Temps de vol Couleur GS101 de Trimble

Scanner Temps de vol LS de FARO



	A	B
●	226 yds	235 yds
●	215 yds	224 yds
●	190 yds	199 yds
○	177 yds	186 yds
●	159 yds	168 yds

Tip: Long hitters play a 3 wood from the tee. The safe shot is to the left side of the green.

Système Tracker (Poursuite Laser)

- Le principe des systèmes Tracker (suivis de position) est basé le suivi d'une cible mobile (déplacée manuellement ou par un système automatique)
- L'appareil de mesure émet signal lumineux sinusoïdal en direction de cette cible
- L'onde est alors réfléchie par la cible et le capteur mesure le retard de phase du signal réfléchi
- On mesure alors la distance qui sépare le système de la cible et donc la position 3D de celle-ci

Système Laser Tracker (Poursuite Laser)

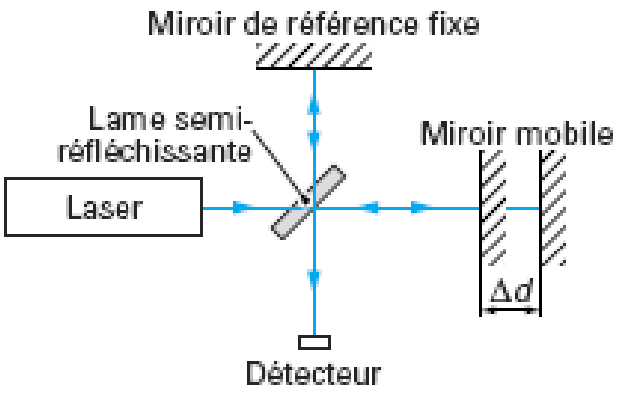
Système LTD840 de Leica

Laser Tracker X et Xi de FARO

Système Laser Tracker II+ de CMA

Techniques de numérisation sans contact

Interférométrie Laser – Rappels d'optique



- Reprenons l'expérience de Michelson (Interféromètre de Michelson)
- Soit une source laser de longueur d'onde λ projetée sur une lame semi-réfléchissante
- Le faisceau lumineux d'intensité I_0 est alors séparé vers deux miroirs perpendiculaires : un miroir de référence et un miroir mobile (la pièce à mesurer)
- Les faisceaux réfléchis s'ajoute grâce à la lame semi-réfléchissante et le faisceau résultant est mesuré par un photodétecteur
- La lumière émise par le laser étant cohérente, il se produit des interférences pour des grandes variations Δd de la position de la pièce à mesurer

Interférométrie Laser – Rappels d'optique

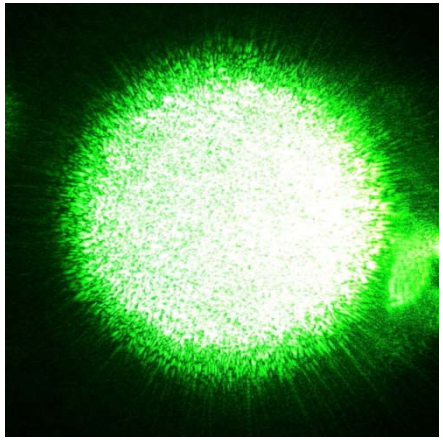
- Lorsque les deux demi-faisceaux arrivent en phase, l'intensité mesurée par le détecteur est maximale
- Lorsqu'ils sont en opposition de phase, elle est minimale
- D'après ces concepts et l'aspect ondulatoire de la lumière, l'intensité I mesurée présente une variation sinusoïdale dont la phase est fonction des variations de la distance

$$I = 2I_0\left(1+\cos\varphi\right) \qquad \varphi = \frac{4\pi\Delta d}{\lambda}$$

- Le principe de la mesure sans contact utilisant le principe d'interférométrie est donc associée à la mesure du déphasage et donc à la variation de distance

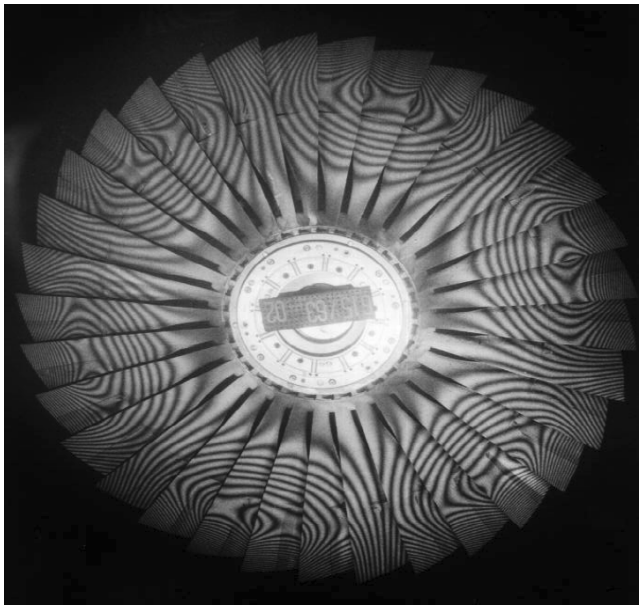
Interférométrie de Speckle

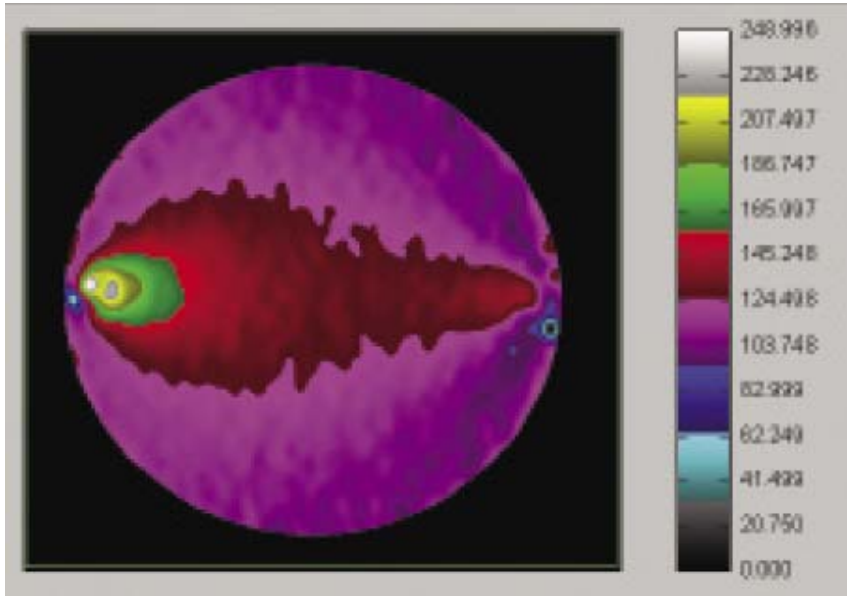
- Le **speckle** (ou encore **tavelures** en français) est l'aspect granuleux que prend un écran réfléchissant qui diffuse la lumière lorsqu'il est éclairé par un faisceau de lumière cohérente spatialement (source laser par exemple)
- Ce phénomène est dû au fait qu'il y a interférence entre les rayons diffusés par chaque point de l'écran. Ces interférences donnant de manière aléatoire des points lumineux ou sombres l'écran prend un aspect granuleux avec une image qui « fourmille »
- **L'interférométrie de speckle** est une technique d'imagerie qui utilise la lumière laser et permet de visualiser et quantifier les déplacements à la surface d'un objet entre deux états



Interférométrie de Speckle – Mesures des vibrations et déplacements

- L'interférométrie Speckle se prête bien à l'analyse des vibrations et aux déplacements
- La résolution de mesure est très importante (supérieure à 0,1 µm)
- Le résultat de mesure est une représentation globale des déplacements de la surface étudiée
- La mise en œuvre de la mesure est très rapide
- La mesure par une caméra CCD permet de visualiser quasi-instantanément les résultats





Mesure en vibrations des aubages d'une turbine et mesure de contraintes sur un disque – Système HALO3

Sébastien Thibaud - sebastien.thibaud@univ-fcomte.fr - http://sebastien.thibaud.free.fr - Novembre 2007

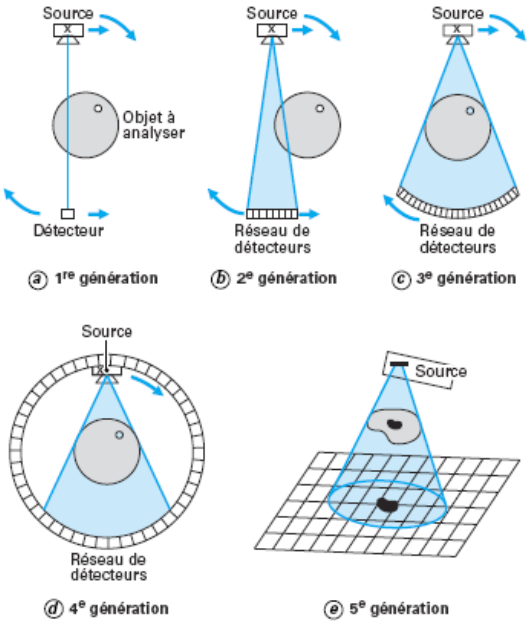
Numérisation volumique – Tomographie à rayons X / IRM

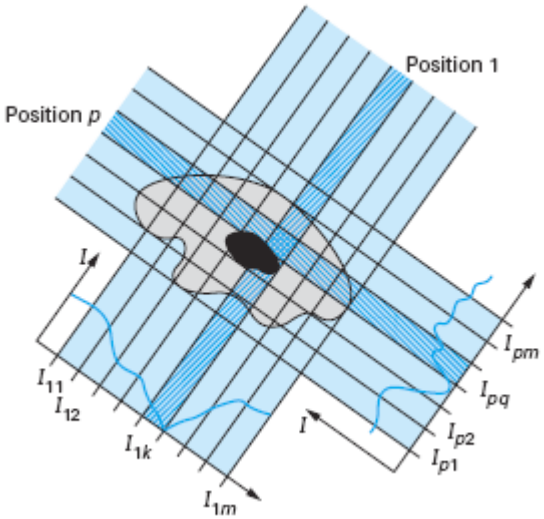
- Les techniques présentées précédemment permettent uniquement la digitalisation des surfaces d'une pièce volumique
- Dans certains cas, il peut être nécessaire de disposer d'une reconstitution volumique, i.e. de ce qui se trouve dans le volume
- Le meilleur exemple est l'homme : comment étudier ce qui se passe à l'intérieur de notre corps ?
- Une réponse est l'utilisation de la technique dite de Tomographie
- La tomographie est une technique qui consiste à reconstruire le volume d'un objet (le corps humain dans le cas de l'imagerie médicale, une structure géologique dans le cas de la géophysique) à partir d'une série de mesures déportées à l'extérieur de l'objet

Techniques de numérisation sans contact

Numérisation volumique – Tomographie à rayons X / IRM

- Le principe de la tomographie à rayons X est de placer la pièce à analyser dans l'appareil
- Cet appareil va alors tourner autour de la pièce couche par couche et émettre des rayons X à travers celle-ci
- Pour chaque position angulaire, on sauvegarde la réponse et on reconstitue pixel par pixel l'intersection de ces réponses
- On peut alors reconstituer la pièce couche par couche et ce de manière volumique





Techniques de numérisation sans contact

Autres techniques

- Il existe d'autres techniques optiques telles que les techniques de moiré, d'ombroscopie, de diascopie, les théodolites
- Le lecteur intéressé sur ces techniques, pourra s'informer en lisant le document de J.-L. CHARRON dans les techniques de l'ingénieur

Caractéristiques des principales méthodes optiques

Technique	Type de pièces	Milieu traversé	Bande passante	Etendue de Mesure	Distance de Mesure
Optique par triangulation	Réfléchissante	Transparent	20 kHz	1 m à 0,5 mm	qq. m à qq.mm
Optique par mesure de temps de vol	Tous	Transparent	25 kHz	10 cm à qq. km	10 cm à qq. km
Optique par défocalisation	Tous	Transparent	10 Hz à 400 Hz	mm à qq. µm (voir nm)	qq. mm
Optique par réflexion	Tous	Transparent	20 kHz	qq. mm à 0,5 mm	qq. mm
Optique par ombroscopie	Tous	Transparent	20 kHz	qq. cm à 0,05 mm	qq. m à qq. mm
Optique par interférométrie	Réfléchissante	Transparent	MHz	10 cm à qq. 10 m	10 cm à qq. 10 m

Performances des principales méthodes optiques

Technique	Bruit/Résolution	Erreur	Plage de Température	Commentaires
Optique par triangulation	mm à 0,5 µm	0,1%	0°C à 40°C (capteur)	Les meilleurs résultats sont obtenus sur une surface blanche diffusante, mesures sur des pièces à plus de 1000°C possibles
Optique par mesure de temps de vol	0,01 mm	3 mm au cm	-35°C à 50°C	La portée est fonction de la pièce, une surface rétro-réfléchissante augmente l'étendue des mesure
Optique par défocalisation	1µm à 0,01 µm	1%	10°C à 30°C	Surtout utilisé pour la mesure de rugosité
Optique par interférométrie	1 nm	2.10^{-6} à 10^{-9}	0°C à 40°C (capteur)	Mesure sur miroir; cette méthode est utilisée comme référence pour les mesures de longueur

Que faire des nuages de points ?

- Une fois qu'une (ou plusieurs) des techniques de numérisation a été effectuée, que faire des de l'ensemble des nuages de points (quelques milliers à quelques millions de points) ?
- Il est donc nécessaire de posséder des outils de traitements de ces nuages de points
- Ces outils permettent :
  - L'alignement et le recalage des différents nuages de points,
  - Les corrections éventuelles : nettoyage, suppressions des aberrations, lissage…
  - L'échantillonnage : l'ensemble des points n'est pas forcément
  - Transformation du nuage de points en maillage STL
  - Traitements du maillage : réduction du bruits, remplissage des trous, connexions de mailles, …
  - Fermeture du maillage
  - Création de surfaces et donc rétro-conception de la pièce digitalisée

Les principaux outils commerciaux de reconstruction : Geomagic et RapidForm

- Les principales industries des moyens de digitalisation ont pour la plupart développées des outils permettant de traiter les nuages de points (Metris, Leica, Steinbichler, …)
- Néanmoins, deux logiciels se détache dans le traitements des nuages de points : Geomagic et RapidForm
- Dans le cadre de l'AIP PRIMECA de Franche-Comté, l'outil utilisé est Geomagic
- Ces outils sont souvent séparés en deux :
  - Digitalisation/Traitements des Nuages : Geomagic Studio
  - Outils d'inspections : Geomagic Qualify
- Certains logiciels tels que CATIA V5 proposent des outils de traitements des nuages de points :
- Digitized Shape Editor : Traitement des nuages de points
- Quick Shape Reconstruction : Reconstruction d'entités géométriques à partir des nuages traités
- Generative Shape Design : Reconstruction surfacique à partir des entités géométriques puis fermeture du volume pour obtenir une pièce volumique
- Dans le cadre des TP, nous utiliserons uniquement Geomagic Studio et Qualify

Sébastien Thibaud - sebastien.thibaud@univ-fcomte.fr - http://sebastien.thibaud.free.fr - Novembre 2007

Une petite conclusion

Les difficultés

- Les méthodes de numérisation peuvent être assez simples et très rapide, notamment les méthodes par triangulation
- On notera donc que l'acquisition des nuages de points ne posent pas de problèmes lorsque l'on dispose du matériel nécessaire
- Par contre, le traitement des nuages de points et surtout la reconstruction des surfaces puis des volumes est bien plus complexe qu'il n'y paraît
- La technicité est donc associée à l'outil logiciel

Une démonstration ?

Prototypage Rapide

Comment réaliser des maquettes physiques à partir d'un modèle numérique lors d'une phase de conception ?

Le principe du prototypage rapide

- Le **prototypage rapide** regroupe un ensemble d'outils qui, agencés entre eux, permettent d'aboutir à des projets de représentation intermédiaire de la conception de produits : les modèles numériques (au sens géométrie du modèle), les maquettes, les prototypes et les préséries.
- Ces modèles contribueront à valider les différentes fonctions que doit remplir le produit (fonctions de signe, d'usage, d'échange et de productibilité).
- Le prototypage rapide intègre trois notions essentielles :
  - Temps : l'objectif du prototypage rapide est de réaliser rapidement les modèles, dans un but de réduction des temps de développement des produits.
  - Coût : le prototypage rapide permet de réaliser des prototypes sans qu'il soit nécessaire de recourir à des outillages coûteux, tout en garantissant les performances du produit final. On est donc en mesure d'explorer différentes variantes du produit en cours d'élaboration afin de retenir la solution la plus appropriée.
  - Complexité des formes : les machines procédant par ajout de matière sont capables de réaliser des formes extrêmement complexes (inclusion, cavité…), irréalisables par des procédés tels que l'usinage par exemple.

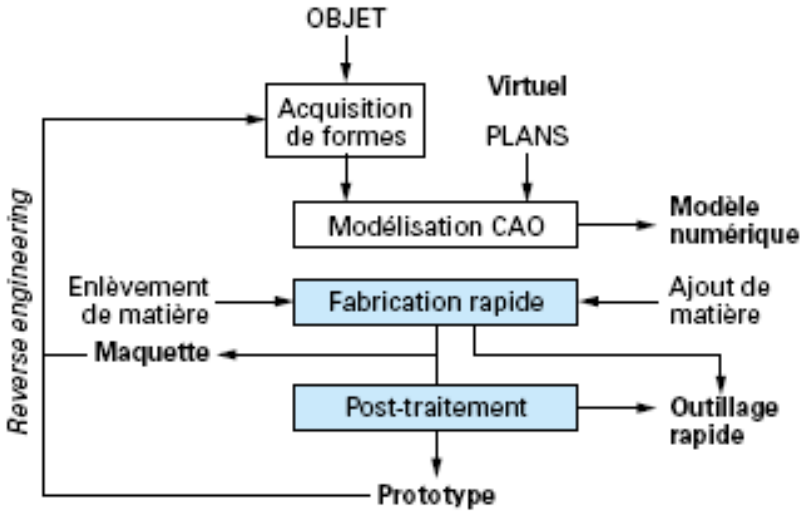
Le principe du prototypage rapide

• Les moyens informatiques intervenant aujourd'hui dans le prototypage rapide sont :

▪ le **reverse engineering**

▪ la conception assistée par ordinateur (**CAO**), les **procédés de fabrication** par ajout et par enlèvement de matière

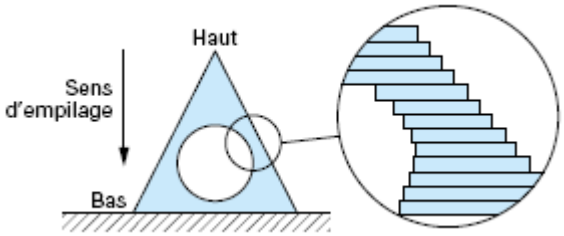
▪ des **post-traitements**, tels que la duplication par moule au silicone (coulée sous vide), la fonderie à modèle perdu…



Le principe du prototypage rapide

Outils de prototypage rapide – Procédés de fabrication par couches

- Les procédés de fabrication par couches utilisent tous le même principe de fabrication
- L'objet à réaliser est conçu en utilisant la CAO ou les outils de numérisation, puis il est facetisé au format STL.
- L'opération suivante consiste à définir les sections de l'objet à réaliser par un découpage successif de plans parallèles
- La distance entre chaque section correspond à l'épaisseur d'une couche.
- Pour reconstituer l'objet, les sections sont empilées séquentiellement les unes sur les autres
- Selon les procédés, les **matériaux employés peuvent être des**
  - résines liquides photosensibles (acrylates, époxydes),
  - des matériaux en feuilles (métaux, papier, plastiques),
  - des matériaux thermofusibles,
  - des cires ou des poudres métalliques, plastiques,céramiques.

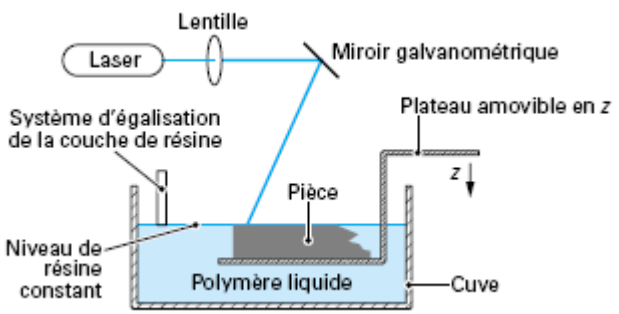


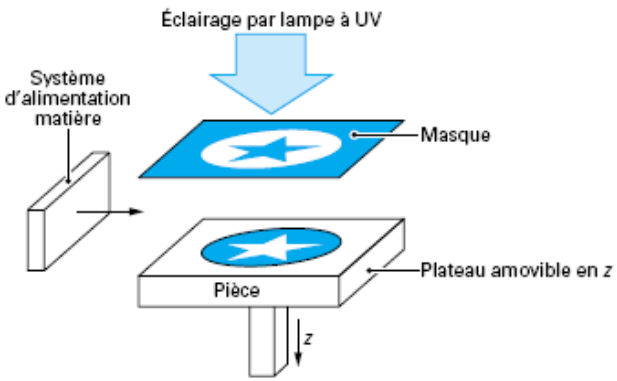
- Il est important de préciser que ces procédés ne permettent pas de disposer de modèle classé « bonne matière » (matière qui est utilisée en production finale).
- Les caractéristiques mécaniques diffèrent de celles d'un modèle de production. Par conséquent, une phase de duplication des modèles dans le matériau final peut s'avérer nécessaire.

Le principe du prototypage rapide

Procédés de fabrication par couches liquide/solide : Stéréolitographie

- Les procédés liquide/solide utilisent le principe de la **stéréolithographie.**
- Ils se caractérisent par l'emploi d'une résine photosensible liquide qui se solidifie sous l'action d'une source lumineuse
- En l'absence de rayonnement, la solidification cesse instantanément.
- Il est possible de classer ces procédés en deux catégories selon le mode d'éclairage :
- **solidification par faisceau laser**, dite stéréolithographie point par point
- **solidification par flashage**, c'est-à-dire par utilisation d'un masque et d'une lampe à ultraviolet, dite stéréolithographie par couches entières.





Le principe du prototypage rapide

Procédés de fabrication par couches liquide/solide : Stéréolitographie

Le principe du prototypage rapide

Procédés de fabrication par couches Solide/Solide

- Les procédés solide/solide se déclinent en trois classes :
  - extrusion et laminage d'un filament ;
  - découpage et collage de strates ;
  - projection de matières

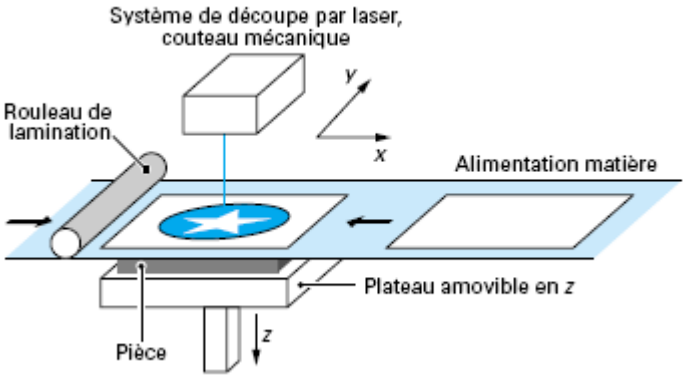
Extrusion et laminage d'un filament :

- Le principe consiste à extruder un filament de matière à l'aide d'une tête se déplaçant dans le plan x-y. La tête est constituée d'une chambre chauffant le matériau au-dessus de son point de fusion, et d'une buse qui permet de déposer et de laminer le filament entre la couche précédente et sa surface plane
- Le filament au contact de la couche précédente se solidifie instantanément.
- Chaque couche est remplie par des balayages successifs de la tête.
- La **tête** peut être constituée de deux buses : l'une servant à la fabrication du modèle, l'autre à la fabrication des supports.
- Les **matériaux employés** sont des **thermofusibles** [ABS, élastomère, PA (polyramide)...] et de la cire pour un usage en fonderie à modèle perdu.

Le principe du prototypage rapide

Découpage et collage de strates

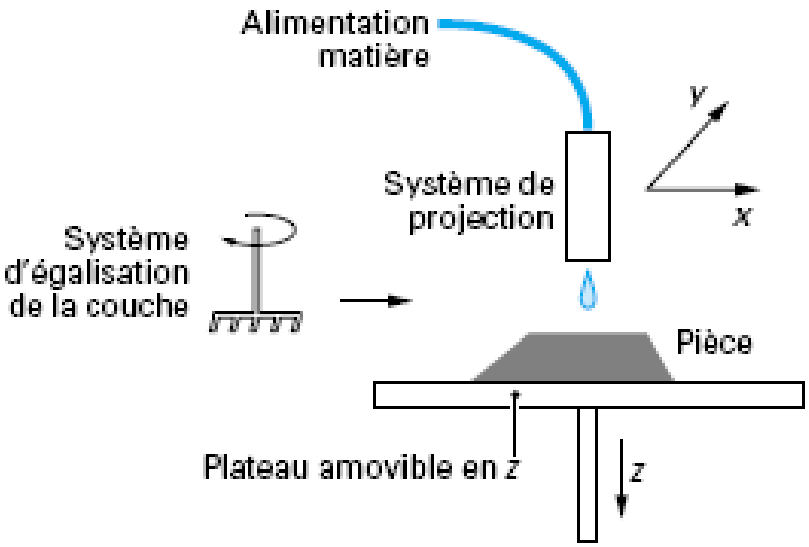
- Le principe repose sur le **découpage des sections de pièces** dans des feuilles ou des plaques de matériaux calibrés
- Chaque section réalisée est ensuite empilée manuellement ou automatiquement.
- L'assemblage est réalisé par collage, par fusion des matériaux ou mécaniquement [15] [16].
- Le découpage peut être réalisé avec un laser, un couteau, une fraise (fraisage à commande numérique), un jet d'eau...
- Ce type de technologie peut présenter certaines difficultés pour réaliser des formes creuses.
- Tous les matériaux se présentant sous la forme d'une feuille peuvent théoriquement être employés. Il faut s'assurer de la compatibilité avec le mode de découpage et d'assemblage



Le principe du prototypage rapide

Projection de matières

- Le principe utilisé peut être comparé avec la technologie des imprimantes à jet d'encre
- Une tête se déplaçant dans le plan x-y projette des gouttes de matière liquide à une température au-dessus du point de fusion
- Simultanément, les supports nécessaires à la fabrication du modèle sont fabriqués dans de la cire (nécessitant de doubler le système de projection)
- Les matériaux utilisables sont la cire et les thermofusibles.
- Les supports sont supprimés par dissolution



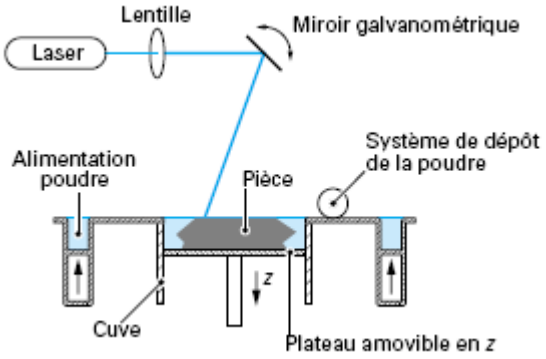
Le principe du prototypage rapide

Procédés de fabrication par couches Poudre/Solide

- On distingue deux types de procédés Poudre/Solide
- Par **frittage de poudre**
- Par **Projection de liant**

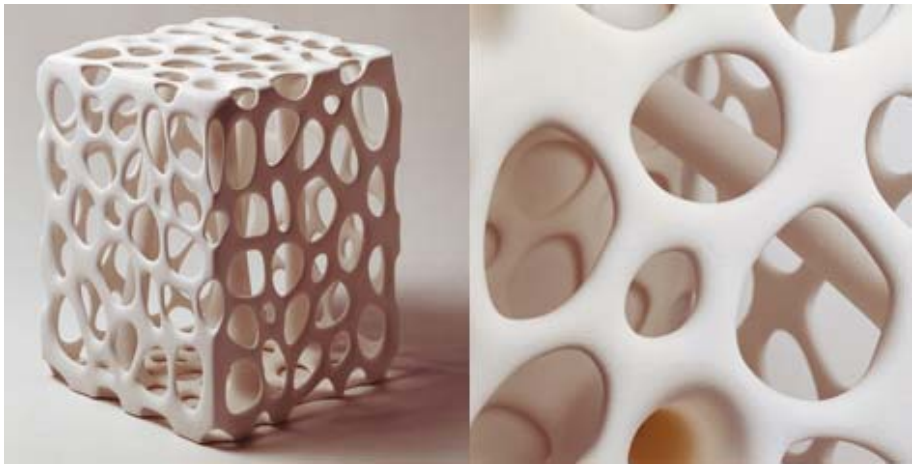
Frittage de poudre – Procédé SLS (Selective Laser Sintering)

- Le principe est analogue à celui de la stéréolithographie : la résine photopolymérisable est remplacée par de la poudre et le laser argon (ou HeCd) par un laser infrarouge (CO2).
- Le laser balaie la surface dans le plan x-y, provoquant une agglomération ou une fusion du matériau
- La poudre est préchauffée afin que le laser apporte juste l'énergie nécessaire pour provoquer la fusion.
- Un plateau, supportant le bac rempli de poudre, descend d'une épaisseur de couche après chaque passage.

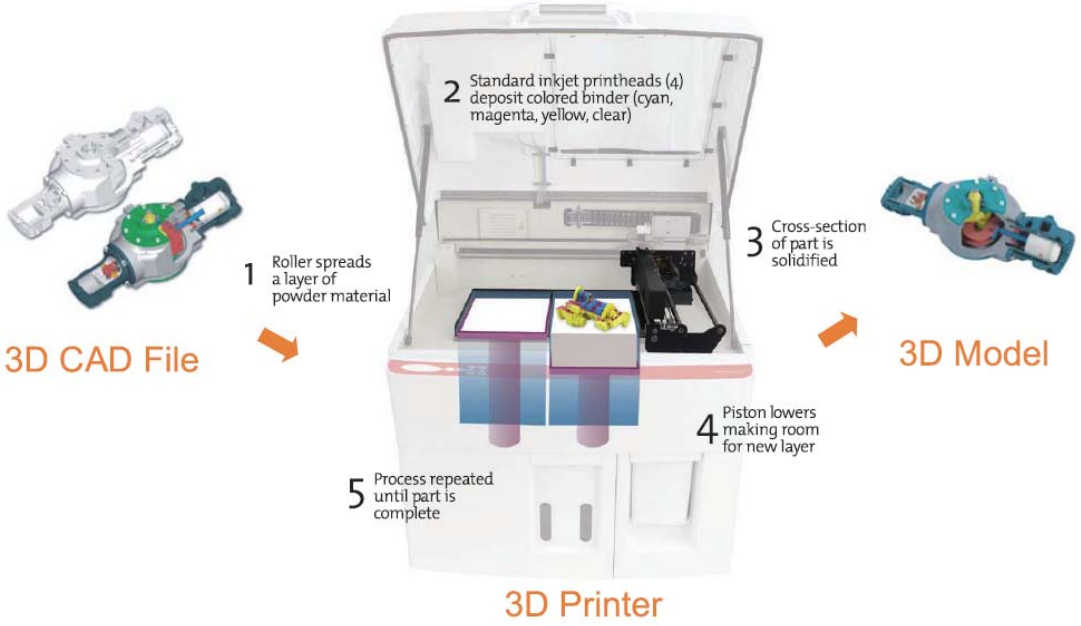


Frittage de poudre – Procédé SLS (Selective Laser Sintering)

- Divers types de poudre sont proposés selon les constructeurs de machine [18] :
  - plastique (Nylon, ABS, polycarbonate, Nylon composite, polystyrène)
  - métaux (acier avec infiltration de cuivre en post-traitement mélange bronze-nickel…) ;
  - céramique ;
  - cire ;
  - sable.
- Le SLS est investigué en recherche par le Pr. Boudeau du LMARC de Besançon



Le principe du prototypage rapide

Par projections de liant

- Le principe repose sur la projection d'un liant liquide à la surface d'une cuve remplie de poudre
- La projection est effectuée grâce à une tête se déplaçant dans le plan x-y [19].
- À l'issue de la fabrication d'une section d'objet, le plateau support descend d'une épaisseur.
- C'est le principe de l'imprimante couleur 3D disponible à l'AIP PRIMECA de Franche-Comté
- Cette imprimante utilise du plâtre comme poudre et de l'eau colorée comme liant
- On utilise après impression une résine pour rendre pour assurer l'agglomération du plâtre