

RAPPORT DE PROJET de LICENCE PROFESSIONNELLE



Sujet de projet :

**Détection et mesures d'impacts sur
les bords d'attaques**

SOMMAIRE

<u>Introduction</u>	3
<u>1. Cahier des charges</u>	4
<u>1.1. Saisie du besoin</u>	4
<u>1.2. Enoncé du besoin</u>	8
<u>1.3. Validation du besoin</u>	8
<u>Étude de faisabilité</u>	9
<u>2.1. Identification des fonctions</u>	9
<u>2.2. Critères à respecter</u>	10
<u>Recherche des solutions</u>	11
<u>PRINCIPE DE MISE EN OEUVRE</u>	12
<u>Schéma de principe</u>	12
<u>Explications fondamentales</u>	13
<u>2. La Société Jet Aviation</u>	16
<u>a) Historique</u>	16
<u>b) Critères d'acceptation de défauts sur les ailes d'avion</u>	18
<u>c) Nature de l'échantillon</u>	19
<u>3. Méthode de détection et de mesures par projection de franges</u>	20
<u>3.1 Etude théorique</u>	20
<u>3.1.1. Projection de franges sur un profil non plan</u>	21
<u>3.1.2. Décalage de phase</u>	21
<u>3.2. Mise en œuvre</u>	22
<u>3.2.1. Le pas des franges</u>	23
<u>3.2.2. Etalonnage</u>	23
<u>4. Méthode de détection et de mesures par triangulation laser</u>	25
<u>4.1. Etude théorique</u>	26
<u>ETAPE 1 : Projection d'une ligne laser sur l'objet</u>	26
<u>ETAPE 2 : Acquisition d'images</u>	27
<u>ETAPE 3 : Traitement d'images</u>	27
<u>4.2. Mise en œuvre</u>	28
<u>MONTAGE</u>	28
<u>ACQUISITION</u>	29
<u>PROBLEMES RENCONTRES</u>	31
<u>5. Conclusion et remerciements</u>	33

Introduction

Lors d'un vol, des impacts peuvent survenir dans les bords d'attaques des ailes des avions. Il existe des critères de surfaces permettant de juger si les ailes, suite à ces impacts, doivent être réparées. Jusqu'à présent, les détections et mesures d'impacts sont faites à l'œil nu, d'où un manque de précision et un risque d'erreur lors de la décision de réparer ou non l'aile. Afin de remédier à ces problèmes, notre projet sera basé sur deux techniques de mesures : la première étant le Moiré par projection de franges et la seconde, la triangulation laser.

La société pour laquelle, nous avons effectué ce projet est Jet Aviation, qui est basée à **Saint-Louis (68)**.

1. Cahier des charges

DETECTION ET MESURES DES IMPACTS SUR LES BORDS D'ATTAQUES.

DEFINITION DU CAHIER DES CHARGES

L'objectif de ce chapitre est de saisir et d'énoncer le besoin, c'est-à-dire l'exigence fondamentale nécessitant la mise en œuvre du système.

Analyse du besoin

1.1. Saisie du besoin

Projet à contenu technique affirmé et en collaboration avec une entreprise.

Comment une aile génère-t-elle de la portance? La première loi de Newton stipule qu'un corps au repos reste au repos, et qu'un corps en mouvement continue en suivant un mouvement rectiligne à moins qu'il soit soumis à l'application d'une force extérieure. Cela signifie que si l'on observe une déviation dans le flux de l'air, ou que si l'air à l'origine au repos est accéléré en mouvement, une force y a donc été imprimée. La troisième loi de Newton stipule que pour chaque action, il existe une réaction opposée de force égale. Par exemple, un objet qui repose sur une table exerce une force sur cette table (son poids) et la table applique une force égale et opposée sur l'objet qu'elle soutient. De façon à générer de la portance, l'aile doit faire quelque chose à l'air. Ce que fait l'aile sur l'air est l'action tandis que la portance est la réaction. La *figure 1* montre les lignes de flux. L'air passe au dessus de l'aile et est dévié vers le bas. La déviation de l'air est donc l'action et la portance de l'aile, la réaction.

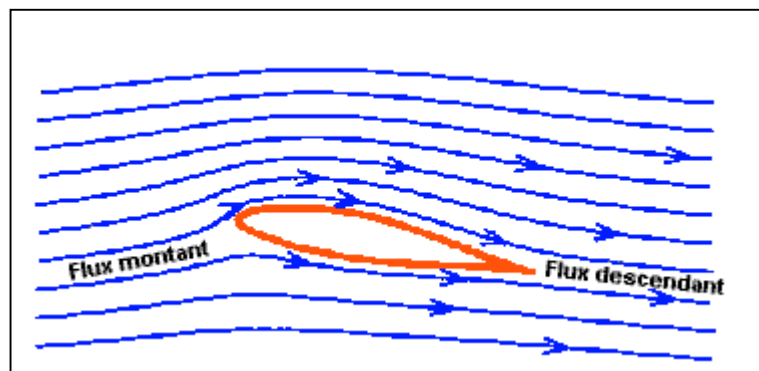


Fig. 1 Flux d'air autour d'une aile générant de la portance, montrant le flux montant et le flux descendant.

Comme le suggère les lois de Newton, l'aile doit modifier quelque chose dans l'air pour obtenir de la portance. Des modifications du moment de l'air résulteront des forces sur l'aile. Pour générer de la portance, l'aile doit dévier de l'air vers le bas, beaucoup d'air. La portance d'une aile est égale à la modification du moment de l'air qu'elle dévie vers le bas. Le moment est le produit de la masse par la vitesse. La portance d'une aile est donc proportionnelle à la

quantité d'air dévié vers le bas multipliée par la vitesse verticale de cet air (ici nous avons utilisé une version dérivée de la seconde loi de Newton qui lie l'accélération d'un objet à sa masse et à la force qui y est appliquée, $F=m.a$). Pour obtenir plus de portance, l'aile peut soit dévier plus d'air (masse) ou augmenter la vitesse verticale de cet air. Cette vitesse verticale derrière l'aile est appelée " flux descendant ". La *figure 2* montre comment le flux descendant apparaît du point de vue du pilote. La *figure 2* montre aussi comment le flux descendant pourrait être visualisé par un observateur au sol qui regarde l'aile avancer. Pour le pilote, l'air quitte l'aile en suivant en gros son angle d'attaque. Pour l'observateur au sol, s'il était capable de voir l'air, l'air semblerait quitter l'aile presque verticalement. Plus l'angle d'attaque augmente, plus la vitesse verticale est élevée. De même, si pour un angle d'attaque identique, la vitesse de l'aile augmente, la vitesse verticale sera aussi augmentée. Ainsi schématiquement, aussi bien l'augmentation de la vitesse que l'augmentation de l'angle d'attaque participent à l'allongement de la flèche représentant la vitesse verticale. C'est cette vitesse verticale qui donne à l'aile sa portance.

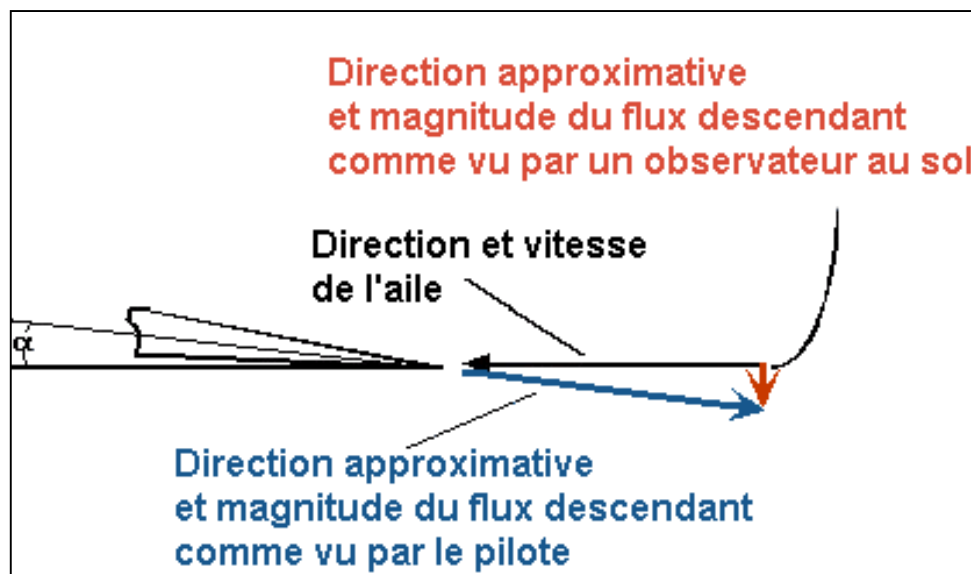


Fig. 2 Comment le flux descendant apparaît au pilote et à l'observateur au sol.

Mais comment une aile aussi fine peut-elle dévier autant d'air ? Quand l'air contourne le sommet de l'aile, il tire sur l'air se situant au dessus de lui et accélère cet air vers le bas, sinon il y aurait des vides au dessus de l'aile. L'air est tiré d'en haut pour éviter les vides. Cette traction entraîne la diminution de la pression au dessus de l'aile. C'est l'accélération de l'air au dessus de l'aile en direction du flux descendant qui génère la portance. Comme nous avons vu sur la *figure 1*, une complication dans l'image de l'aile est l'effet de " flux montant " au bord d'attaque de l'aile. Comme l'aile se déplace, l'air est non seulement dévié vers le bas à l'arrière de l'aile mais est aussi attiré vers le haut au bord d'attaque. Ce flux montant contribue à une portance négative ce qui engendre que plus d'air doit être dévié vers le bas pour compenser.

Normalement, pour un observateur, l'air s'écoule sur l'aile dans le cadre de référence de l'aile. En d'autres mots comme pour le pilote, l'air se déplace et l'aile est fixe. Nous avons déjà établi que pour un observateur au sol l'air semble sortir de l'aile presque verticalement. Mais que fait l'air au dessus et en dessous de cette aile ? La *figure 3* montre les mouvements des molécules d'air au moment où l'aile passe. Rappelez vous que c'est l'air qui était au

repos au départ et que c'est l'aile qui se déplace. En avant du bord d'attaque, l'air se déplace vers le haut (flux montant). Au bord de fuite, l'air est dévié vers le bas (flux descendant). Au dessus de l'aile, l'air est accéléré vers le bord de fuite. En dessous, l'air est à peine accéléré vers l'avant voire pas du tout.

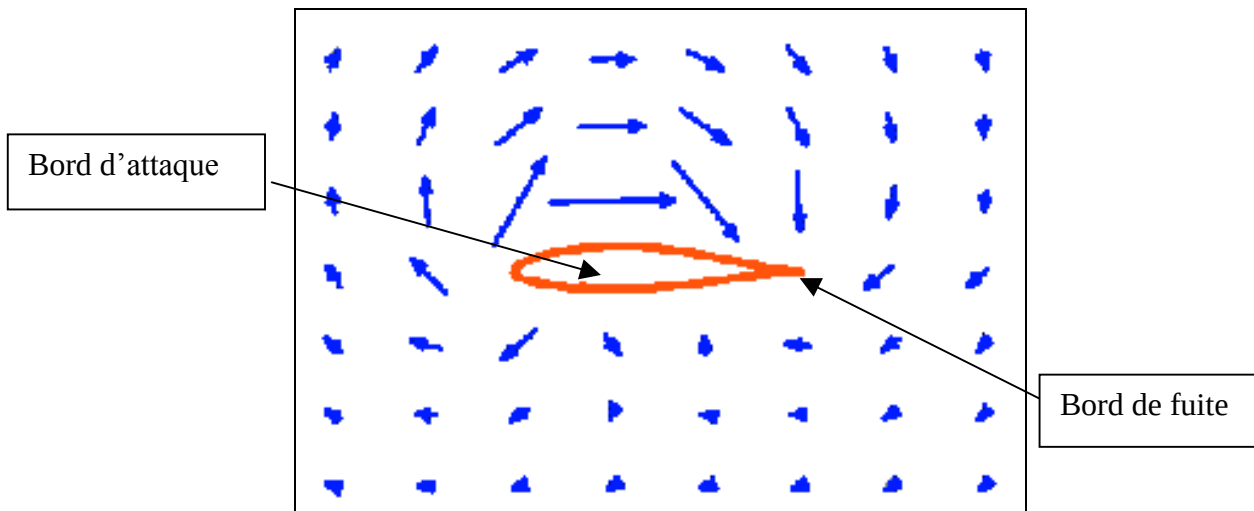


Fig. 3 Direction des déplacements d'air autour d'une aile du point de vue d'un observateur au sol.

A partir de la *figure 3* nous pouvons observer que la surface supérieure de l'aile fait beaucoup plus pour déplacer l'air que l'inférieure. La surface supérieure est donc la surface la plus critique. Ainsi, les avions peuvent transporter des charges extérieures sous les ailes (telles que des réservoirs largables) mais pas au dessus car ces charges interféreraient avec la portance. C'est aussi pour cela que les *haubans** en dessous des ailes sont courants alors que les haubans au dessus de l'aile sont si rares. Un hauban, ou n'importe quelle obstruction, sur le sommet de l'aile interférerait donc avec la portance.

Les fluides (ici l'air) suivent une surface courbe à cause de leur viscosité, c'est à dire la résistance à l'avancement qui donne à l'air une sorte d'adhérence. La viscosité de l'air est très faible mais est suffisante pour que les molécules d'air se collent à la surface. La vitesse relative entre la surface et les molécules d'air les plus proche est absolument nulle. Un peu au dessus de la surface, le fluide a un peu de vitesse. Plus on s'éloigne de la surface, plus la vitesse du fluide s'élève jusqu'à atteindre la vitesse du flux extérieur.

La portance doit être perçue comme fonction de l'angle d'attaque. L'aile dévie l'air vers le bas ou plus exactement tire l'air du dessus vers le bas. Ce que toutes les ailes ont en commun est leur angle d'attaque par rapport à l'air qu'elles traversent. C'est cet angle d'attaque qui est le premier paramètre déterminant de la portance. Le pilote ajuste l'angle d'attaque pour ajuster la portance à la vitesse et à la charge.

Pour mieux comprendre le rôle de l'angle d'attaque, il est utile d'introduire un " véritable " angle d'attaque, définit de telle façon que l'angle de l'aile par rapport à l'axe du vent donnant

une portance nulle soit défini comme étant zéro degrés. Si on change l'angle d'attaque aussi bien vers le haut ou vers le bas, on remarque que la portance est proportionnelle à cet angle. La *figure 4* montre le coefficient de portance (portance normalisée à la taille de l'aile) pour une aile standard en fonction de l'angle d'attaque effectif. Une relation similaire entre portance et angle d'attaque peut être trouvée pour toutes les ailes, indépendamment de leur conception. Le rôle de l'angle d'attaque est plus important, que les détails de la forme du profil, dans la compréhension de la portance.

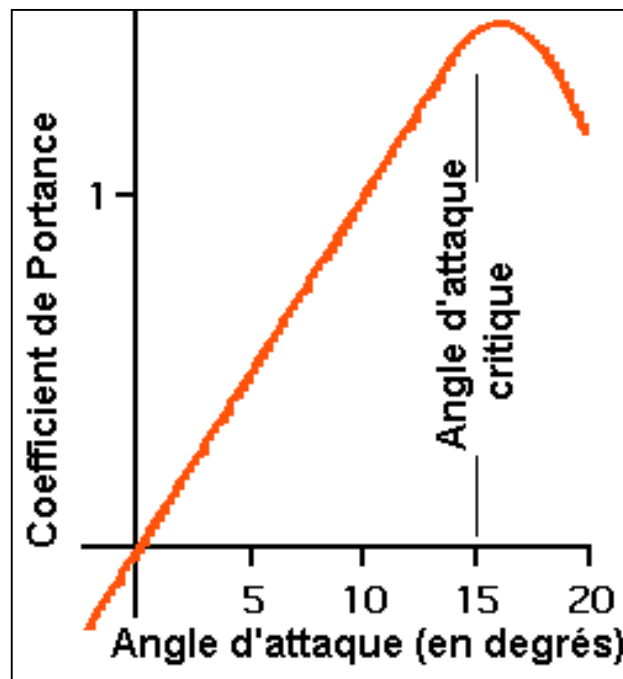
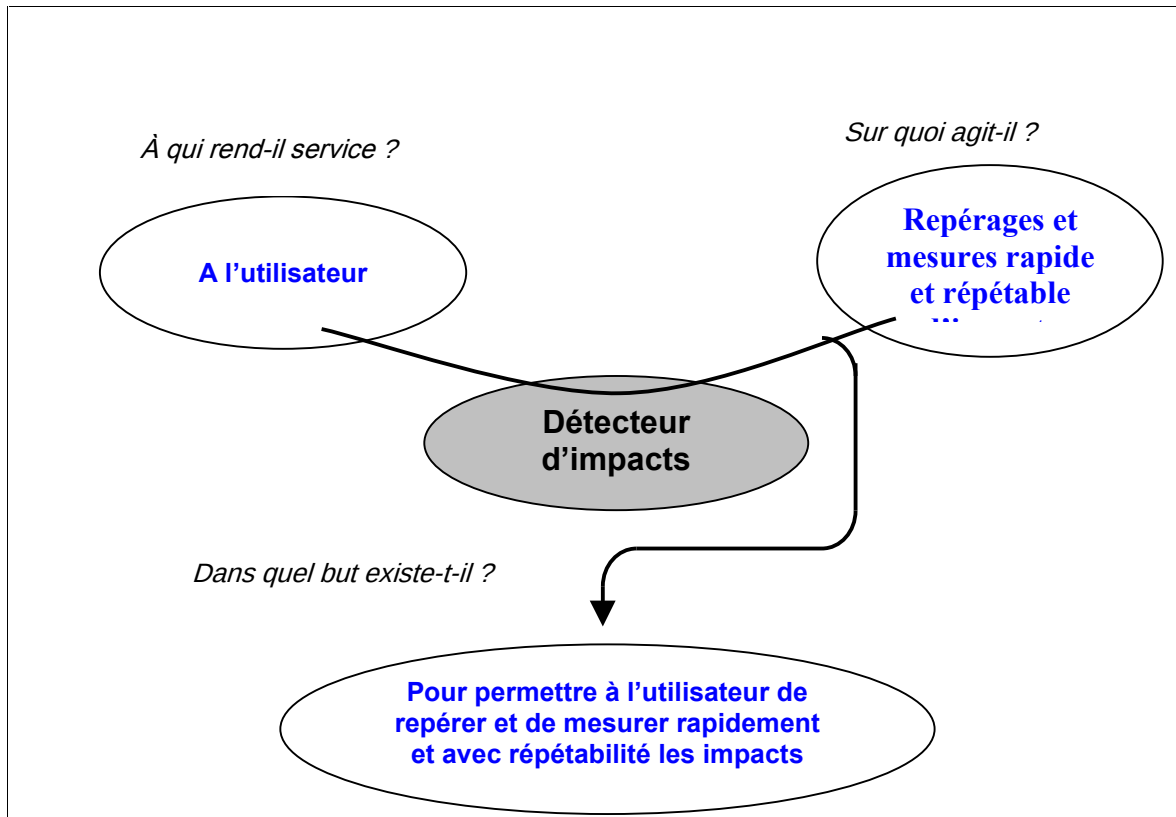


Fig. 4 Coefficient de portance en fonction de l'angle d'attaque effectif.

Généralement, la portance commence à décroître à partir d'un angle d'attaque de 15 degrés. Les forces nécessaires pour dévier l'air d'un angle aussi grand sont plus grandes que ce que la viscosité de l'air peut supporter, et l'air commence à se séparer de l'aile. Cette séparation du flux d'air du dessus de l'aile est un décrochage.

L'importance des bords d'attaques est donc primordiale dans le bon fonctionnement de la portance de l'avion. C'est pourquoi la présence d'impacts, atteignant une certaine dimension, n'est pas négligeable. Ces impacts engendreraient une perte dans la maîtrise de la portance de l'avion et donc une perte dans la maîtrise du procédé de vol, augmentant ainsi l'insécurité du vol, pouvant même le rendre dangereux.

1.2. Enoncé du besoin



Cadre 1 : Diagramme bête à cornes.

1.3. Validation du besoin

Pourquoi ce besoin existe-t-il ?

- Manque de répétabilité lors de la détection et de la mesure des impacts (besoin d'une méthode unique et répétable).
- Manque de précision lors de la détection et de la mesure des impacts (détection et mesures effectuées à l'œil nu).

Qu'est-ce qui peut le faire disparaître ? Le faire évoluer ?

- Evolution : Innovation technologique, création de matériaux résistants aux chocs.
- Disparition : L'avion n'est plus utilisé comme moyen de transport.

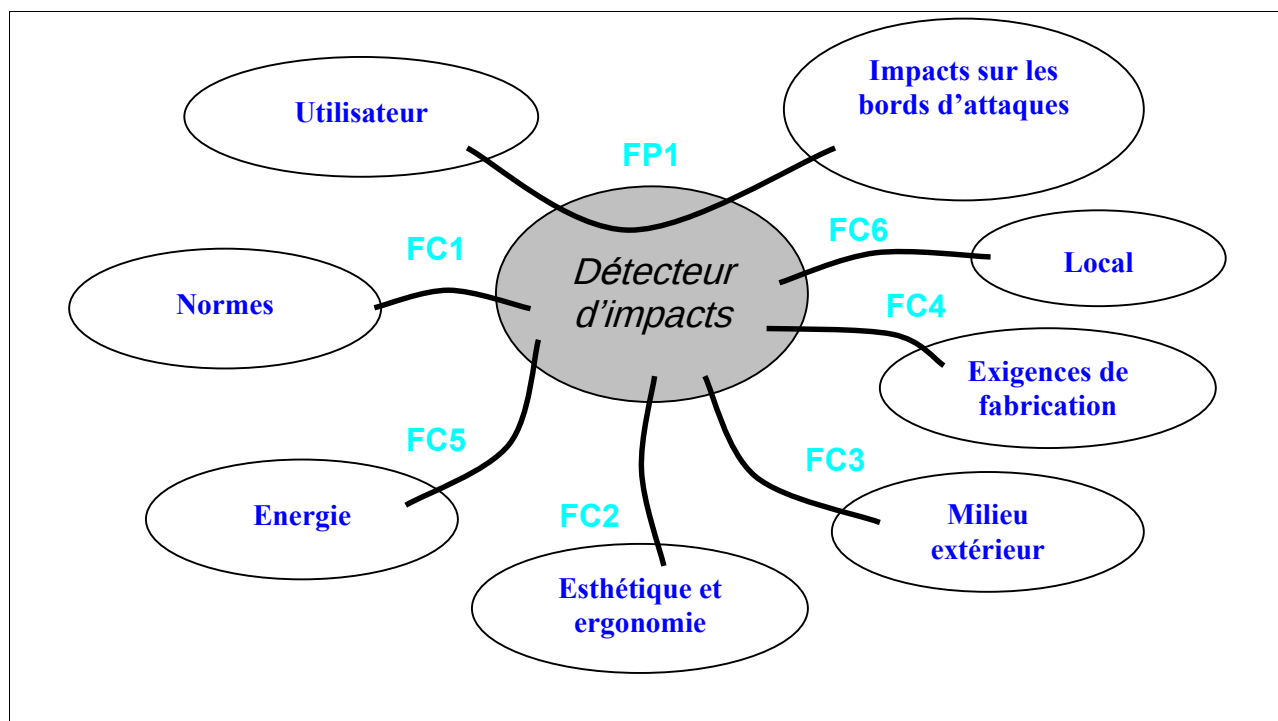
Conclusion :

- Ce besoin est bien réel, donc validé.

Étude de faisabilité

Le besoin étant validé, il s'agit de recenser et d'expliquer dans ce chapitre les satisfactions et performances attendues du système.

2.1. Identification des fonctions



Cadre 2 : Diagramme pieuvre.

Fonction principale

FP1	L'utilisateur détecte et quantifie les impacts sur les bords d'attaques.
-----	--

Fonctions contraintes

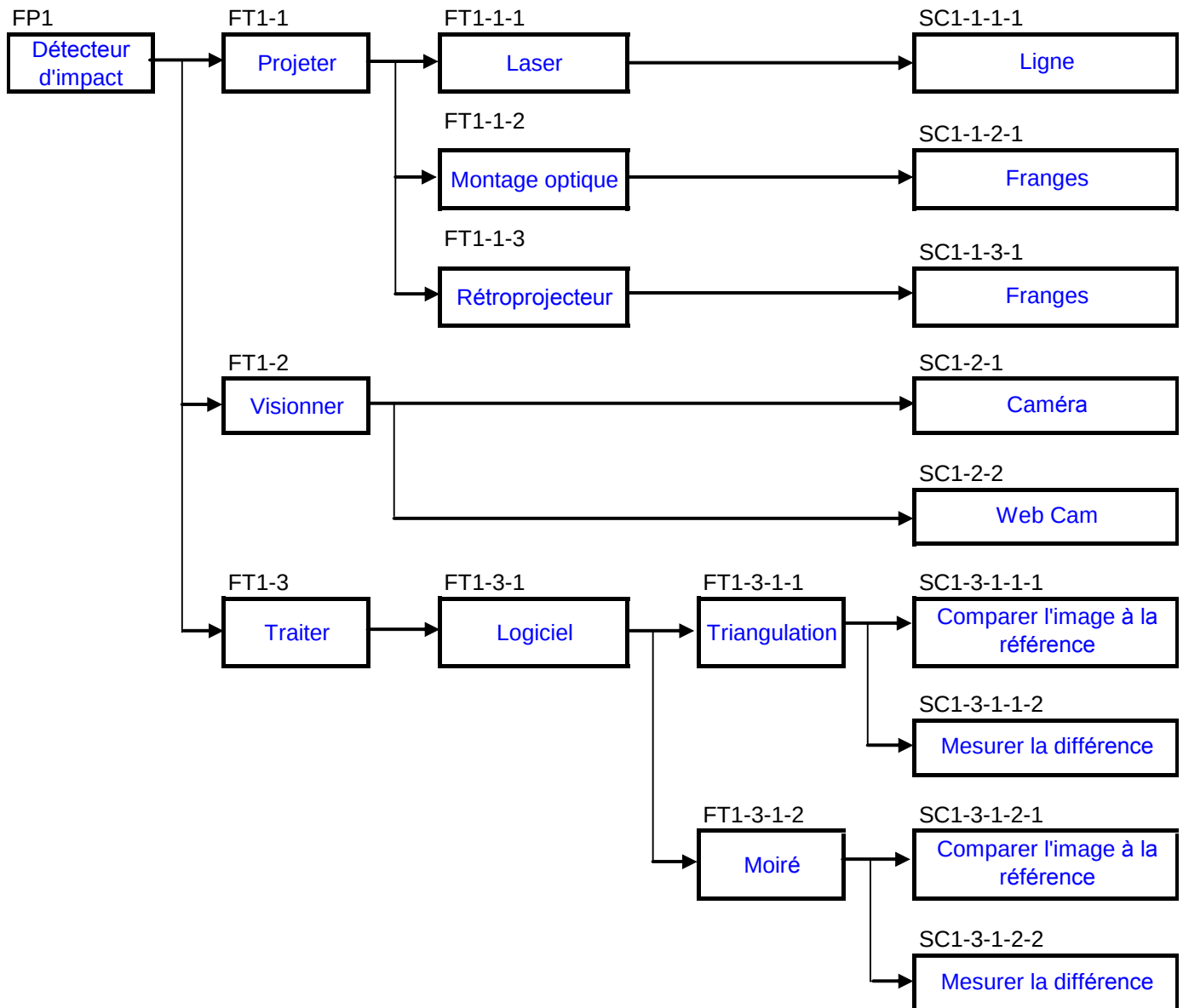
FC1	Assurer la sécurité de l'utilisateur d'un point de vue électrique, mécanique et optique.
FC2	Etre agréable à l'œil, et facile d'utilisation.
FC3	Fonctionner dans le milieu ambiant (laboratoire de mise en œuvre).
FC4	Respecter les exigences de fabrication.
FC5	Le détecteur doit être alimenté en énergie
FC6	Ranger le système dans un local

2.2. Critères à respecter

Fonctions de service	Critères	Niveaux - Limites
FP1 : Détecter et quantifier,,,	* Projection de franges (lumière structurée)	* Surface d'analyse
	* Balayage par plan laser : Mesure de la déformation	* He-Ne * $\lambda = 632,8\text{nm}$
	* Résolution en z : * Caméra * Web cam	* Résolution * Résolution
FC1 : Assurer la sécurité,,,	* Sécurité mécanique * Sécurité électrique	* Respect des normes
FC2 : Etre facile d'utilisation	* Logiciel d'acquisition des mesures et calcul de la déformation * Ensemble compact * Esthétique	* Prise en compte des numériseurs définis dans le logiciel (cartes d'imagerie, caméras USB, ...) * Prise en compte des déphaseurs définis dans le logiciel (axes motorisés, vidéo projecteurs,...) * Démodulation des images phasées * Mesures suivant z * Visualisation 3D de la déformation * Système transportable
FC3 : Fonctionner dans,,,		
FC4 : Respecter les exigences,,,	* Réaliser le système :	* Avec les moyens du laboratoire * Avec le matériel mis à disposition par l'entreprise
FC5 : Le détecteur doit,,,		

Recherche des solutions

Pour les solutions constructives non précisées, il s'agit de faire un inventaire des solutions et de choisir la plus appropriée.



Légende :

FP : Fonction principale, FT : Fonction technique, FC : Fonction contrainte, SC : Solution constructive.

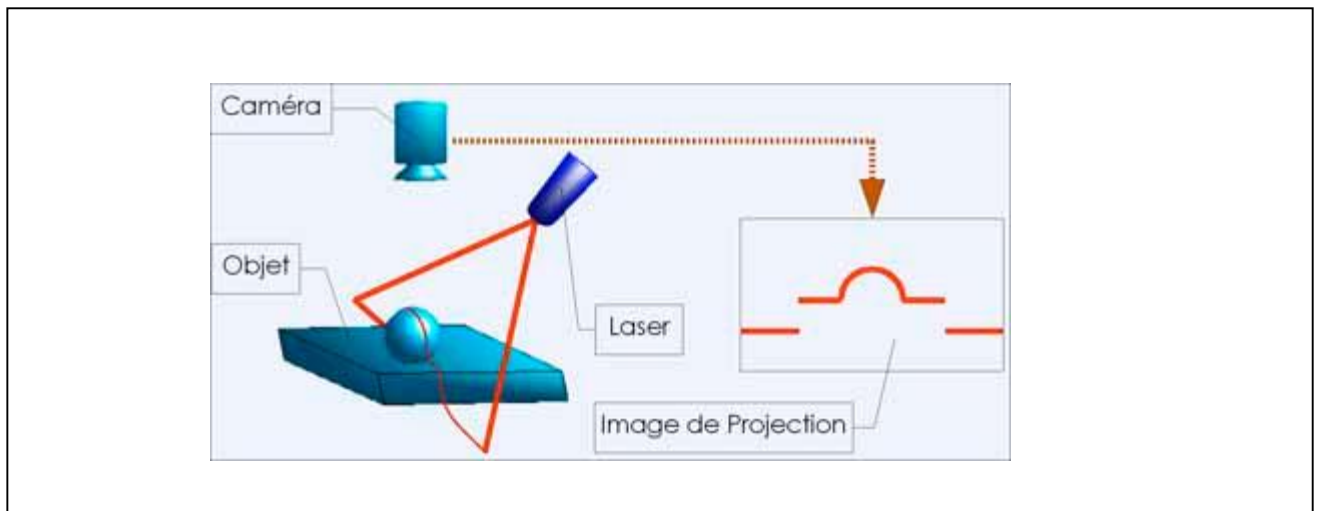
() : Coefficient de difficulté de mise en œuvre de la fonction (1 : facile et/ou rapide, ..., 4 : long et/ou difficile).

PRINCIPE DE MISE EN OEUVRE

- **Triangulation laser.**
- **Projection de franges (Moiré).**

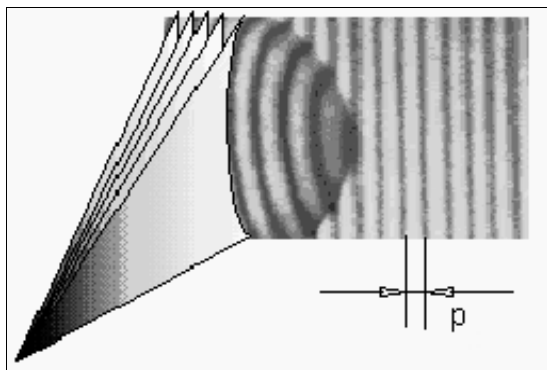
Schéma de principe

- **Triangulation laser.**

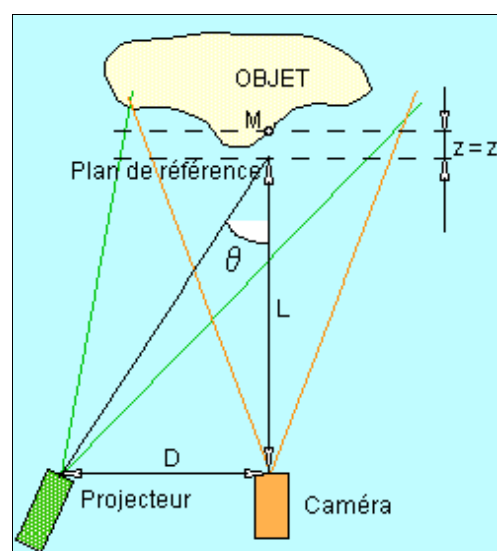


Cadre 3 : Principe de triangulation laser.

- **Projection de franges (Moiré).**



Cadre 4 : Projection de franges.



Cadre 5 : Principe du montage.

Explications fondamentales

- **Triangulation laser (voir cadre 3).**

Principe :

Un trait laser plan est projeté sur l'objet à digitaliser.

Une caméra filme la scène qui est numérisée en temps réel.

Ce trait est transformé en un ensemble de points 3D.

L'ensemble se déplace tout autour de la pièce.

Les données collectées sur la surface permettent d'obtenir rapidement un modèle 3D virtuel de l'objet réel.

La technologie de digitalisation est basée sur une triangulation laser / caméra :

Le choix de l'angle est très important : il assure un bon compromis entre une perception suffisante du relief et une gestion efficace des parties cachées : à 0° la caméra ne percevrait aucun relief, à 90° le relief serait optimum, mais la moindre variation d'altitude empêcherait la caméra de voir la ligne laser.

La scène caméra est en 2D, comme la ligne laser réelle, qui appartient à un plan. Grâce à une procédure de "calibration", il est possible de traduire une information "ligne et colonne dans l'image vidéo" en information "x,y", c'est à dire dans un système métrique de coordonnées cartésiennes 2D.

Chaque image vidéo est composée de pixels dont la valeur ("hauteur") dépend de l'intensité lumineuse captée. L'électronique extrait, pour chaque ligne de cette image, l'information "colonne" d'un point, correspondant au maximum de l'énergie lumineuse. C'est l'algorithme du subpixel. La résolution en colonne ainsi obtenue, qui influe directement sur la résolution métrique, dépend de l'angle de triangulation, et des paramètres optiques (focale, zoom, ...)

Passage de la vidéo au monde 3D XYZ :

Image vidéo brute. Cette image est paramétrable pour ne conserver que l'information adéquate pour le traitement électronique :

- Puissance Laser (jouant sur l'épaisseur du trait),
- Temps d'intégration Caméras (jouant sur la hauteur des pixels)
- Seuil (pour éliminer le bruit de fond)

Numérisation :

Il s'agit d'un traitement électronique en temps réel qui, pour chaque ligne vidéo, extrait le point associé. Le résultat est un ensemble de points dans un système de coordonnées (colonne, ligne), avec la résolution du subpixel en colonne.

Calibration :

Détermine la relation entre le monde 2D des caméras et le système de coordonnées cartésiennes (x,y). Après application des formules de calibration, le résultat est un ensemble de points (sections) dans un monde 2D, métrique, lié à l'ensemble (caméra/laser).

Les informations de positionnement de l'ensemble (caméra/laser) par rapport à l'objet permettent de localiser les points de la trace laser dans l'espace. On peut alors assembler les sections et constituer des informations 3D sur toute la surface de l'objet (nuage de points, ou, plus exactement, nuage de

lignes de points).

- **Projection de franges (Moiré) (voir cadres 4 et 5).**

Le moiré est un effet de contraste qui change avec la déformation d'un objet, indépendamment des effets d'ombre. D'une manière générale, le moiré est une figure composée de lignes sombres et claires résultant de la superposition de deux réseaux (ensemble de lignes globalement parallèles). Il s'agit en fait d'un phénomène d'interférences spatiales entre les deux réseaux. Ce phénomène est utilisé pour analyser la déformation d'un objet, il permet aussi d'expliquer le phénomène de tramage que l'on a lorsque l'on numérise une image composée de points (comme une photo du quotidien), ou bien l'effet étrange produit par une chemise à rayures à la télévision (superposition de la trame de la chemise et de la trame de l'écran).

→ RESEAUX PARALLELES DE PAS DIFFERENTS

Approche géométrique.

Moiré de réseaux parallèles : Considérons deux réseaux constitués de lignes parallèles équidistantes, par exemple verticales. Le premier réseau a un pas p , le second a un pas $p + \delta p$, avec $\delta p > 0$. Si nous faisons coïncider les traits les plus à gauche des réseaux, le décalage entre les traits des deux réseaux s'accroît lorsque l'on va vers la droite. Au bout d'un certain nombre de traits, les deux réseaux seront en opposition, c'est à dire que les traits du deuxième réseau seront entre les traits du premier réseau. De loin, on va donc avoir une impression de clair lorsque les traits des deux réseaux sont superposés (il y a du blanc entre les traits), et une impression de sombre lorsque les traits sont en opposition. La première ligne sombre apparaît lorsque le décalage est $p/2$. Le trait n du second réseau est décalé de $n \cdot \delta p$ par rapport au trait n du premier réseau. La première ligne sombre apparaît

$$n = \frac{p}{2\delta p}$$

donc pour $n \cdot \delta p = p/2$, soit :

La distance d séparant une ligne sombre d'une ligne claire est donc :

$$d = n \cdot p = \frac{p^2}{2\delta p}$$

La distance séparant deux lignes sombres, qui est également la distance séparant deux lignes claires, est :

$$2d = \frac{p^2}{\delta p}$$

On voit de cette formule que :

- plus le pas est grand, plus les lignes claires et sombres sont espacées.
- plus l'écart de pas δp est grand, plus les lignes claires et sombres sont rapprochées, des lignes très espacées signifient que les réseaux ont des pas très proches.

Approche sinusoïdale.

Si l'on ne considère plus des réseaux de lignes de fort contraste, mais des réseaux transparents ayant un contraste I variant de manière continue selon une sinusoïde :

$$I_1(x) = I_0 \cdot \sin(2\pi \cdot k_1 \cdot x) \quad \text{et} \quad I_2(x) = I_0 \cdot \sin(2\pi \cdot k_2 \cdot x)$$

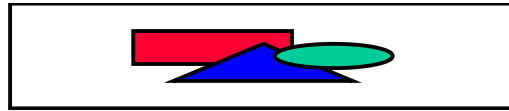
Les pas sont respectivement de $p_1 = 1/k_1$ et $p_2 = 1/k_2$, l'intensité lorsque l'on superpose les deux réseaux est alors :

$$I(x) = I_0 \cdot (\sin(2\pi \cdot k_1 \cdot x) + \sin(2\pi \cdot k_2 \cdot x))$$

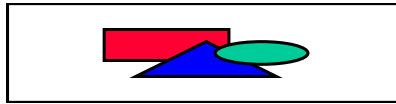
Soit, d'après la formule de la somme de deux sinus dérivée des formules d'Euler :

$$I(x) = I_0 \cdot 2 \cos \left(2\pi \frac{(k_1 - k_2)}{2} \cdot x \right) \cdot \sin \left(2\pi \frac{(k_1 + k_2)}{2} \cdot x \right)$$

On voit donc que l'intensité résultante est composée d'une sinusoïde ayant une « fréquence spatiale » (nombre d'onde) élevée qui est la moyenne des fréquences spatiales des deux réseaux, et d'une sinusoïde ayant une fréquence spatiale faible qui est la moitié de la différence des fréquences spatiales des deux réseaux. Cette deuxième composante est une « enveloppe » pour l'autre sinusoïde. La longueur d'onde λ de cette composante est l'inverse de la fréquence spatiale :



Soit si l'on pose $p_1 = p$ et $p_2 = p + \delta p$:



Les zéros de cette enveloppe sont espacés de $\lambda/2$, et les maxima d'amplitude en valeur absolue sont espacés également de $\lambda/2$; on retrouve donc le résultat de l'approche classique, à un écart de $p/2$ près qui correspond à l'inexactitude de position du trait sombre selon que l'on considère un trait du réseau 1 ou du réseau 2. Cette erreur est négligeable si $\delta p \ll p$.

2. La Société Jet Aviation

a) Historique

Fondée en 1967 en Suisse, Jet Aviation est aujourd'hui dans le monde l'une des compagnies leader pour les prestations d'aviation d'affaires et privée. 5'200 collaborateurs/-trices sont attentifs aux besoins de leurs clients dans quelques 20 installations aéroportuaires et stations en Europe, au Moyen et en Extrême-Orient (EMEA), en Amérique du Nord et en Amérique du Sud.

Plus de cinquante pour cent des activités commerciales de Jet Aviation sont réalisées en Europe, suivie par l'Amérique du Nord, le Moyen-Orient et l'Asie. Tandis que la croissance mondiale de Jet Aviation se poursuit grâce à de nouvelles acquisitions ou à l'extension d'infrastructures existantes, la compagnie va continuer à proposer à ses clients une gamme de prestations supplémentaires toujours plus large, tout en maintenant un niveau de qualité optimale de son service à la clientèle.

Jet Aviation offre les prestations suivantes:

- vols à la demande dans le monde entier
- gestion d'aéronefs et services d'assistance dans le monde entier et assistance aux agences de voyages internes de grandes compagnies
- assistance et service au sol pour l'aviation d'affaires / Fixed Base Operations (FBO)
- aménagements et transformations d'intérieurs d'aéronefs
- maintenance technique et réparation d'aéronefs ainsi que soutien avionique
- travaux d'ingénierie
- vente d'aéronefs et courtage
- handling de passagers et de fret ainsi que assistance technique aux compagnies aériennes

Détenue par la famille Hirschmann depuis sa création en 1967, Jet Aviation a changé de mains en octobre 2005, lorsqu'elle fut reprise par Permira Funds, l'un des principaux fonds d'investissement européen en « capitaux propres ».

Voilà environ quarante ans, Carl W. Hirschmann acquiert les hangars de l'ancienne Globe Air à Bâle (Suisse) où il installe la Jet Aviation, premier centre de maintenance d'appareils d'affaires en Europe. À peine deux années plus tard, il reprend les activités de maintenance et assistance au sol pour les vols charters de Pilatus à Zurich et à Genève (Suisse).

Dans les années 70, la compagnie continue de se développer en fournissant des services de gestion d'appareils et d'affrètement à des clients d'Europe et du Moyen-Orient. La première base de maintenance hors de Suisse est créée en 1975 à Düsseldorf en Allemagne. En 1979, est formé un partenariat avec un groupe d'hommes d'affaires en Arabie Saoudite : il s'agit d'exploiter une infrastructure d'assistance au sol pour appareils d'entreprises et privés à Djeddah. En 1977, Jet Aviation ajoute l'équipement à sa gamme de services à Bâle et les installations bâloises de la compagnie sont ainsi devenues le plus gros centre indépendant d'aménagement d'aéronefs du monde.

La compagnie continue de se développer dans les années 80 en Europe et au Moyen-Orient, mais surtout, Jet Aviation prend pied sur le marché américain et devient le premier « global player » de l'aviation d'affaires. Depuis le milieu de la décennie, la compagnie rachète deux unités de services au sol pour l'aviation d'affaires (Fixed Base Operations, FBO) à Boston/Bedford (Massachusetts) et à Palm Beach (Floride), auxquelles vient s'ajouter celle de Teterboro (New Jersey) en 1988. Cette dernière acquisition permet à la chaîne de desservir l'aviation d'affaires de New York, d'une importance stratégique. La même année,

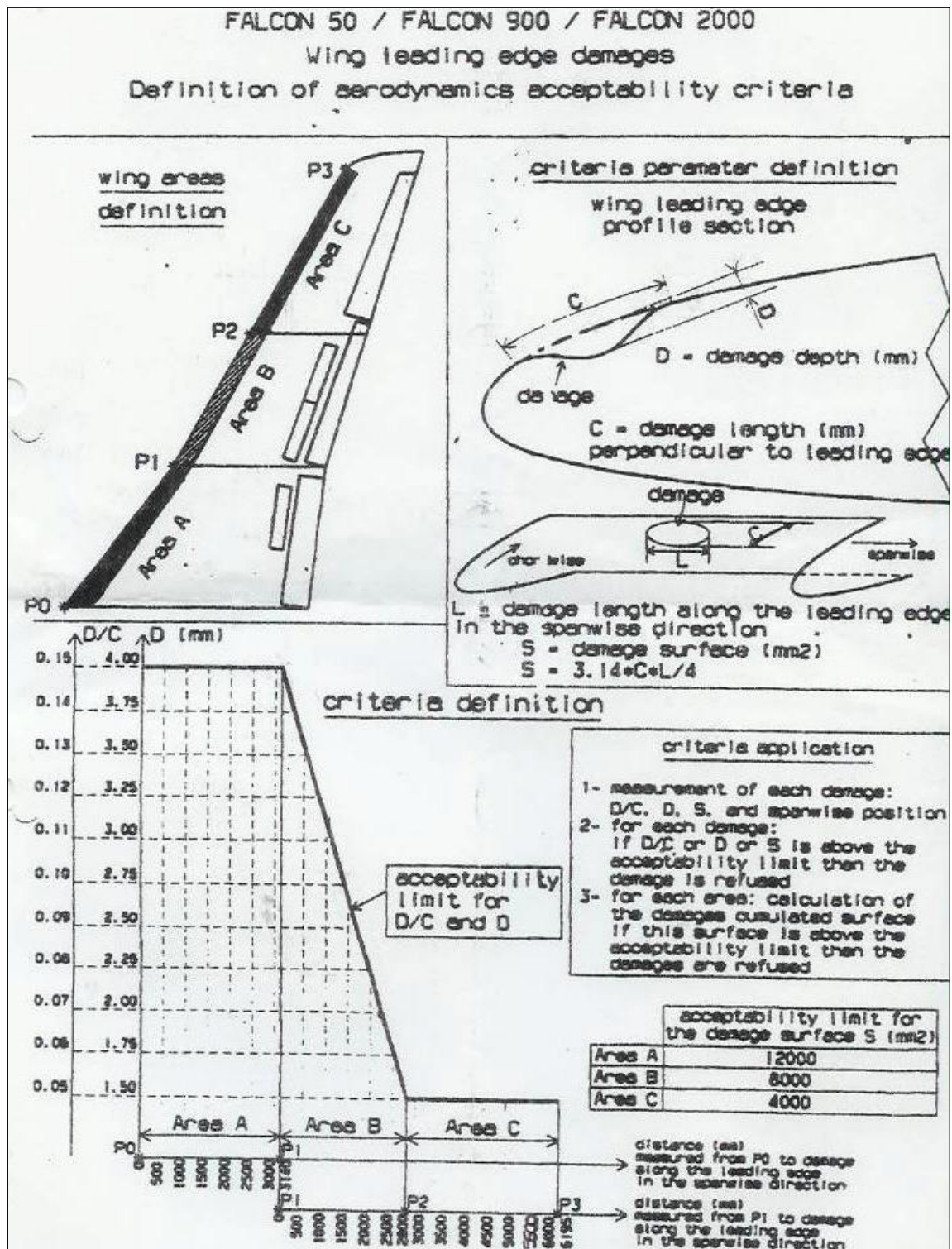
Jet Aviation reprend la Executive Air Fleet (EAF), elle aussi basée à Teterboro et qui au moment du rachat, était déjà le plus gros prestataire de cette catégorie en Amérique du Nord.

Les années 90 auront été marquées par la consolidation et une croissance régulière dans la zone EMEA et en Amérique du Nord. Jet Aviation Bâle (Suisse) et les trois unités FBO à Boston/Bedford, Palm Beach et Teterboro ont été étoffées afin d'améliorer la qualité en général et les services dans ces centres. En 1994, Jet Aviation obtient le droit d'étendre en Suisse, à Zurich et à Genève, ses activités d'assistance aux compagnies régulières et aux transporteurs IATA. En 1995, le marché asiatique connaît un tournant majeur avec l'ouverture d'une unité de maintenance et de services au sol pour l'aviation d'affaires à Singapour. Deux unités sont ajoutées au réseau Jet Aviation mondial, dont une unité de maintenance à Hanovre, en Allemagne et en 1999, une unité FBO offrant une gamme complète de services à Love Field/Dallas (Texas) aux Etats Unis.

Jet Aviation a commencé le nouveau millénaire en changeant de mains et en continuant à s'étendre, à la fois dans la zone EMEA et en Amérique du Nord. Jet Aviation a ainsi acquis à l'aéroport de Londres Biggin Hill, au Royaume-Uni, une installation offrant des services de maintenance, de remise à neuf d'intérieurs d'aéronefs et de services au sol pour l'aviation d'affaires, ce qui lui permet de mieux desservir le marché de Londres. La même année a été ouverte à Hong Kong (Chine), une société de gestion d'appareils et d'affrètement. Près de San Antonio (Texas), la société a créé Jet Aviation Engineering Services qui fournit des services d'ingénierie à ses propres centres d'aménagement et de transformations d'intérieurs de Bâle (Suisse) et de Palm Beach (Floride), mais aussi à des centres de modification extérieurs. En avril 2005, la présence de Jet Aviation au Moyen-Orient a été renforcée lorsque la société a ouvert une nouvelle unité de maintenance et de FBO à Dubaï (Émirats Arabes Unis), en partenariat avec des entrepreneurs locaux.

Finalement en octobre 2005, Permira Funds rachète Jet Aviation, marquant ainsi la fin de 38 années d'entreprise familiale et en mars 2006, la compagnie, désormais aux mains de son nouveau propriétaire, annonce l'acquisition de Midcoast Aviation à St-Louis (Missouri), l'une des compagnies leader en Amérique du Nord dans les services ayant trait à la maintenance, la réparation et la révision, aux modifications et à l'aménagement d'intérieurs d'aéronefs. Les clients ne remarqueront pas immédiatement le changement de propriétaire, puisque les deux compagnies sont convenues que Midcoast Aviation conserverait son nom et son identité, ajoutant simplement l'intitulé « une société de Jet Aviation » à son logo.

b) Critères d'acceptation de défauts sur les ailes d'avion



Critères d'acceptation d'impacts

Ce document, nous a été fourni par la société Jet Aviation, il nous présente les différents critères avec lesquels on jugera un impact. Les différents critères dont il fait mention sont les suivants :

Une aile est découpée en trois parties ; A, B et C. A étant la partie de l'aile la plus proche du corps de l'avion et C en étant l'extrémité.

- La surface de l'impact dans la zone A doit être inférieure à 12000mm^2 , dans la zone B, elle doit être inférieure à 8000mm^2 et dans la zone C, elle doit être inférieure à 4000mm^2 .
- La position de l'impact sur l'aile correspondant au rapport D/C et à D doit être comprise dans les critères de définitions (il s'agit d'une lecture graphique). D étant la profondeur de l'impact et C la longueur de l'impact qui est perpendiculaire au bord d'attaque. Les différentes positions étant données dans le schéma en haut à gauche du document (position des points P_0 , P_1 , P_2 et P_3).

Il faut donc que l'ensemble de ces critères soit respecté pour pouvoir considérer l'impact comme négligeable.

c) Nature de l'échantillon

Jet Aviation nous a fourni des échantillons afin que nous puissions procéder à plusieurs essais. Il s'agit de parties de bords d'attaques fournies par la société Jet Aviation. Le matériau dont est conçu les échantillons est le même que celui des bords d'attaques des avions, il s'agit d'un alliage d'aluminium : le 20,24 T3 T6.

3. Méthode de détection et de mesures par projection de franges

3.1 Etude théorique

Mesurer la forme d'un objet existant présente un grand intérêt, aussi bien en ingénierie que dans d'autres secteurs d'activités (médecine, arts, biens de consommation, contrôle de qualité, topographie, fabrication, etc.).

Il s'agit de mesurer la forme d'un objet, sans contact, permettant d'obtenir les coordonnées tridimensionnelles d'un grand nombre de points. Le relief de l'objet est une fonction décrivant l'altitude $z = f(x,y)$ du point de la surface.

On projette des lignes $z_i = f(x,y_i)$ sur la surface. Les lignes peuvent provenir d'un projecteur diapo, d'une vidéo projection de l'ombre d'une trame ou d'un interféromètre. Nous utiliserons un vidéo projecteur.

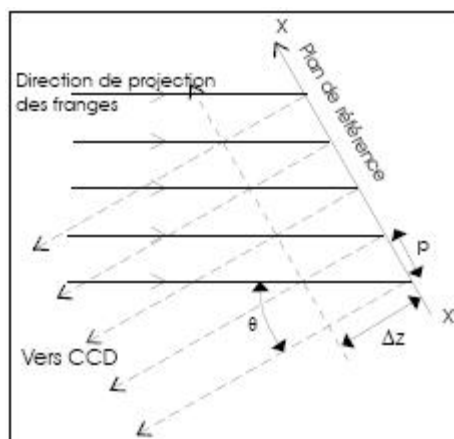
Une grille noire et blanche à traits parallèles (le réseau) est projetée sur l'objet à mesurer. Une caméra, dont l'angle d'observation fait un angle θ avec la direction de projection, enregistre l'image du réseau déformé par le relief de l'objet. Cette image d'intensité lumineuse enregistrée peut s'écrire sous la forme :

$$I = I_0 (1 + m \cdot \cos \Phi)$$

avec I_0 : Intensité moyenne

m : contraste des franges

Φ : Phase optique



C est le contraste :
$$C = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}$$

φ est la phase : d'une frange à l'autre, la phase varie de 2π . Un point d'abscisse x est caractérisé par la phase $\varphi_{ref} = 2\pi \frac{x}{p}$. Elle est périodique de période p .

3.1.1. Projection de franges sur un profil non plan

Les franges sont projetées sur un objet non plan et observées avec la caméra.
Un point d'abscisse x et d'altitude z est caractérisé par la phase :

$$\varphi_{obj} = 2\pi(x + z \times \tan \theta) \times p$$

On en déduit la différence $\varphi = \varphi_{obj} - \varphi_{ref}$ est proportionnelle à z :

$$\varphi = \frac{2\pi \cdot \tan \theta}{p}$$

La variation d'altitude est alors de $\Delta z = \frac{p}{\tan \theta}$

3.1.2. Décalage de phase

La méthode consiste à enregistrer trois autres images des franges déphasées de $\pi/2$, π et $3\pi/2$ pour l'objet de référence (plan) et pour l'objet dont le relief est à étudier.
Il suffit pour cela de décaler les franges de $p_{(lcd)}/4$, $p_{(lcd)}/2$ et $3p_{(lcd)}/4$.
Les intensités sont les expressions :

$$\begin{aligned} I_{00} &= I_0 (1 + C \cdot \cos(\varphi(x, y))) \\ I_{90} &= I_0 (1 + C \cdot \cos(\varphi(x, y) + \frac{\pi}{2})) \\ I_{180} &= I_0 (1 + C \cdot \cos(\varphi(x, y) + \pi)) \\ I_{270} &= I_0 (1 + C \cdot \cos(\varphi(x, y) + \frac{3\pi}{2})) \end{aligned}$$

La résolution de ce système d'équations donne le déphasage $\varphi(x, y)$ (modulo 2π) en tout point de la surface étudiée.

L'opération $\varphi \times \frac{255}{2\pi}$ donne l'image phasée où l'éclairement de chaque point est l'image de sa phase (exprimée en niveaux de gris NG modulo 256)

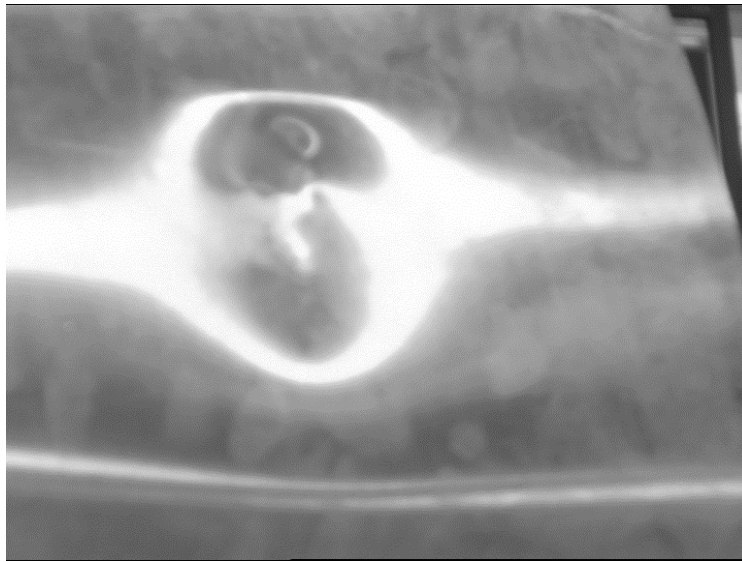
3.2. Mise en œuvre

Le montage est relativement simple : on utilise un vidéo projecteur, qui, relié à un ordinateur, générera un réseau de franges, une caméra CCD.

Fonctionnement du logiciel Visulm :

On génère tout d'abord une mire sinusoïdale qui sera projetée sur l'objet. Lors de l'acquisition, le logiciel créera 4mires, qui se déplaceront sur l'objet, puis calculera une image phasée (voir figure 1). On répétera l'opération pour le bord d'attaque dit « de référence » et le bord d'attaque déformé. Il faudra ensuite soustraire les deux images phasées et démoduler le résultat de la différence pour obtenir l'image de la déformation.

Pour la mesure de la bosse, il faut procéder à un étalonnage : pour se faire, on place une règle sur la plaque et on fait une conversion pixel/mm.



Ci-dessus : Photo de l'impact sur le bord d'impact

Nous allons ensuite projeter sur cette bosse des franges :

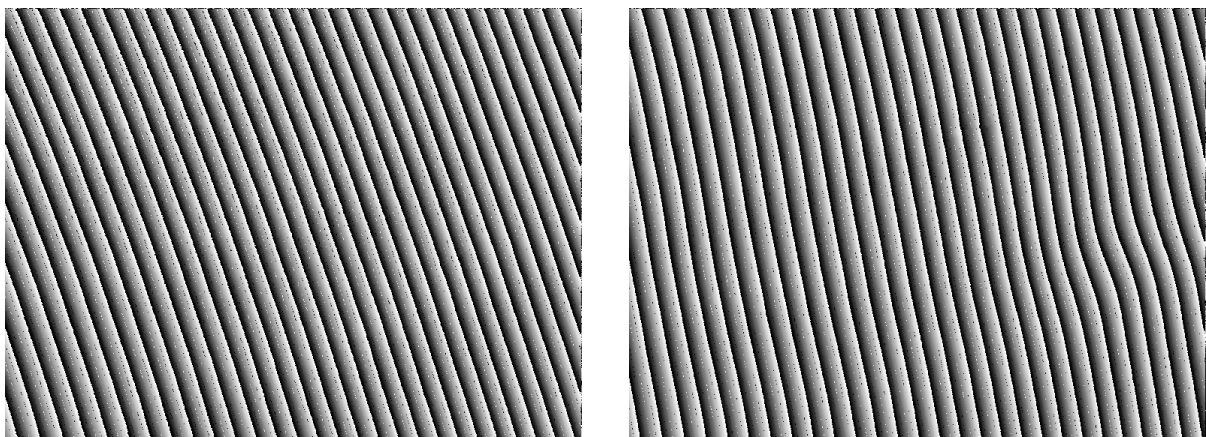


Figure 1 : A droite, on a l'acquisition de l'image phasée de la plaque de référence, et à gauche l'image phasée de la plaque avec un impact.

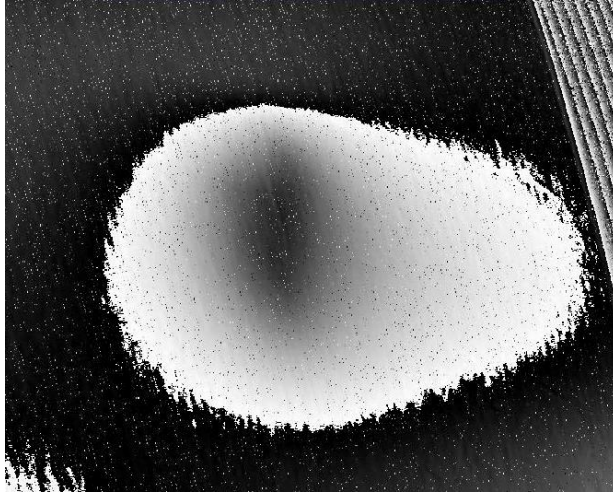


Figure 2 : On procède à une soustraction absolue et on obtient l'image ci dessus. On observe la forme de la bosse.

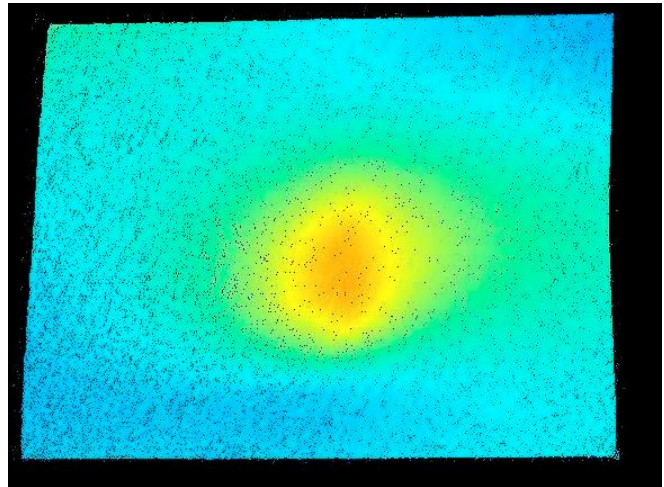
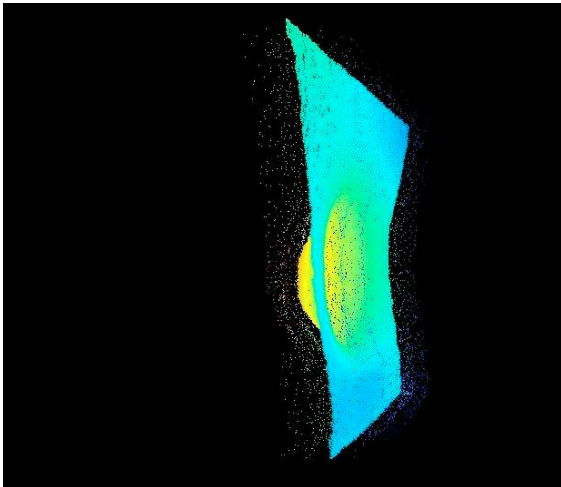


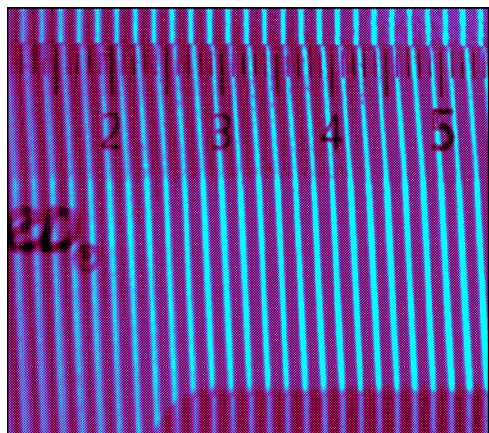
Figure 3 : On peut ensuite visualiser la bosse en 3D grâce au logiciel.

3.2.1. Le pas des franges

On a utilisé un pas de 15pixels : plus le pas est petit plus la résolution est grande. Des tests ont été fait avec des pas allant de 10 à 30pixels.

3.2.2. Etalonnage

Pour pouvoir mesurer la déformation, il faut étalonner le logiciel. Pour se faire, on dispose un réglet sur la surface de référence où l'on projette les franges, et on fait une acquisition figée. Cette acquisition nous permet d'étalonner en X et Y (la surface de l'impact).



Ci-dessus : Etalonnage en (x ,y)

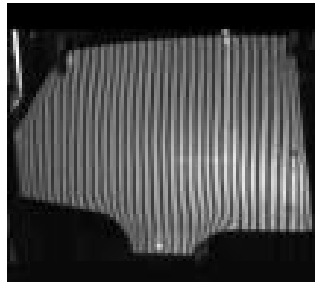
Pour étalonner en Z (profondeur de l'impact), on lance une acquisition permanente et on déplace le bord d'impact de référence en z, jusqu'à ce qu'une frange prenne la place de celle qui la suivait (ou précédait). On mesure alors Δz .

Mesures N°	1	2	3	4	5	Moy
p(pixels)	256	379	310	280	408	326,6
p(mm)	100	150	130	110	160	130
franges	13	19	17	14	20	16,6

3.3. Présentation d'une autre solution pour mesurer les impacts

Il existe un autre procédé, notamment utilisé par NDT Expert, ou Holo3 (St Louis). Voici le descriptif du système d'Holo3 :

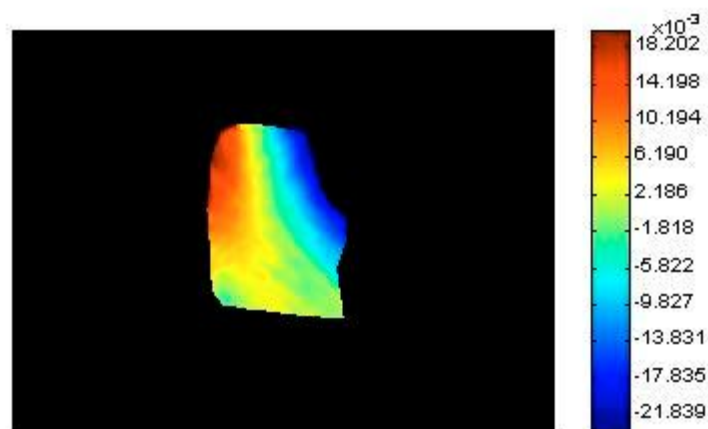
Le procédé "HOLOMAP" ® , basé sur la réflexion d'un réseau sur la surface à étudier, permet d'accéder aux caractéristiques géométriques de cette surface : pentes, courbures, forme 3D. Le procédé est utilisé pour le contrôle géométrique de surfaces réfléchissantes.



Le principe consiste à analyser l'image d'un réseau par réflexion sur la surface à contrôler.

Le réseau est déformé par le relief de la surface.

Cette déformation est analysée pour fournir en tout point les composantes du vecteur normal à la surface ainsi que les coordonnées X, Y, Z de la surface.



L'équipement est composé d'une structure, d'un ou plusieurs projecteurs et d'une ou plusieurs caméras. Une procédure de calibrage brevetée permet de définir un volume de l'espace dans lequel les mesures peuvent être faites.

L'incertitude de mesure est de +/- 0,1mm pour une surface de 2m².

Le procédé permet également d'accéder aux défauts de courbure de surface (ondulations, marquage,...) grâce à la grande densité des points mesurés (jusqu'à 1 million de points).

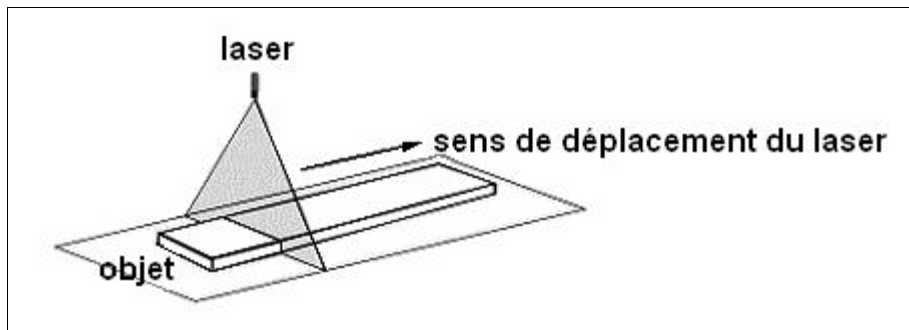
4. Méthode de détection et de mesures par triangulation laser

4.1. Etude théorique

Une des méthodes retenue dans ce projet est la triangulation laser. Il s'agit de projeter soit un point, soit un plan (ligne), soit une structure laser de faible puissance sur la surface de l'objet.

L'élément projeté est visualisé par une ou deux caméras et le système d'acquisition calcule ensuite les coordonnées du ou des points par triangulation. L'objet ou le laser doit défiler à vitesse constante.

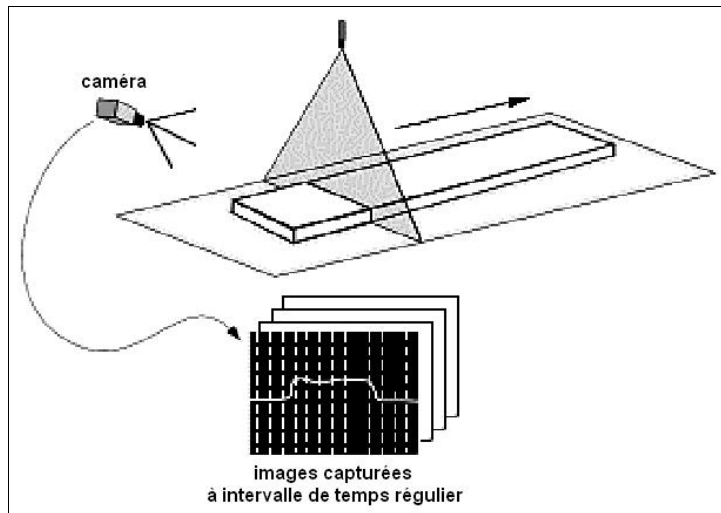
ETAPE 1 : Projection d'une ligne laser sur l'objet.



Projection d'une ligne laser sur un objet

Sur ce schéma, on observe une ligne laser projetée à vitesse constante sur un objet ou un objet qui défile à vitesse constante sous une ligne laser. Ces deux possibilités sont tout à fait envisageables. Mais pour des raisons pratiques, c'est la première solution qui a été retenue : il est plus facile d'envisager le déplacement d'une ligne laser sur un avion que le déplacement d'un avion sous une ligne laser.

ETAPE 2 : Acquisition d'images.



Caméra filmant le défilement d'une ligne laser sur un objet

Une caméra, ayant un angle fixe, filme la totalité du passage de la ligne laser sur l'objet, ce qui nous permet de faire des acquisitions à intervalle de temps régulier. Plus l'intervalle sera petit, plus les détails seront apparents (la précision sera augmentée).

ETAPE 3 : Traitement d'images.

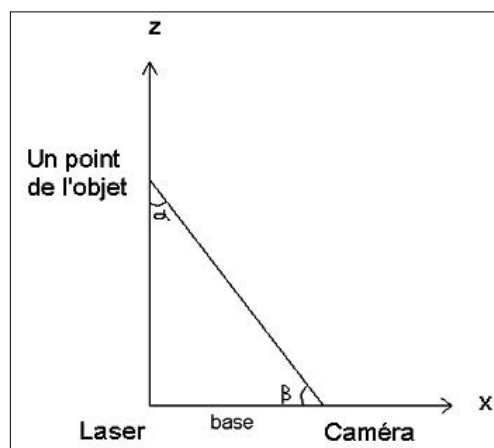


Schéma représentant la position des différents éléments lors de la triangulation laser

Les différentes équations régissant ce principe de triangulation laser sont :

- soit A un point de l'objet
- soit B le laser
- soit C la caméra
- les angles α et β sont connus
- la distance B-C est connue (distance laser-caméra)

On peut alors appliquer de la trigonométrie :

$$\cos \beta = \frac{AB}{AC}$$

$$AB = AC \cos \beta$$

Cette méthode, nous permet donc de connaître les coordonnées de points de l'objet dans l'espace, nous permettant ainsi de le matérialiser en 3D sur l'écran d'un PC.

4.2. Mise en œuvre

MONTAGE

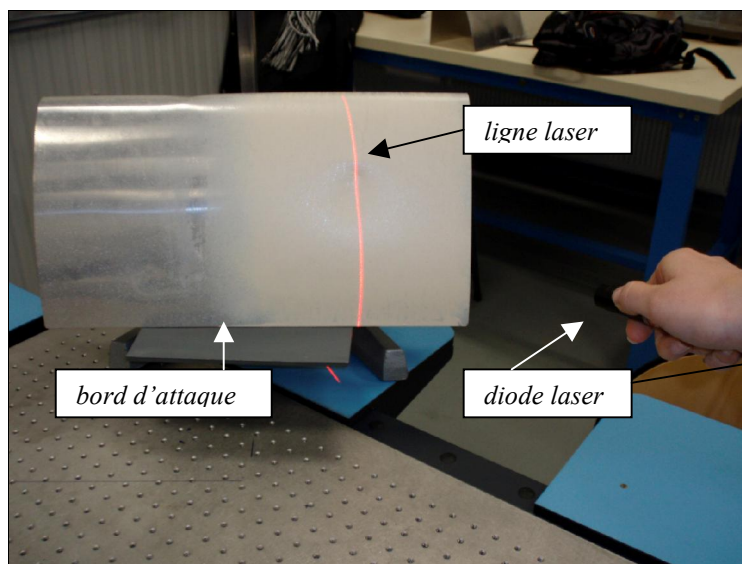
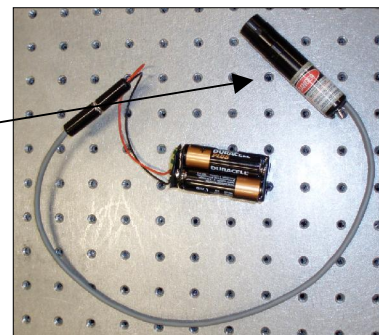
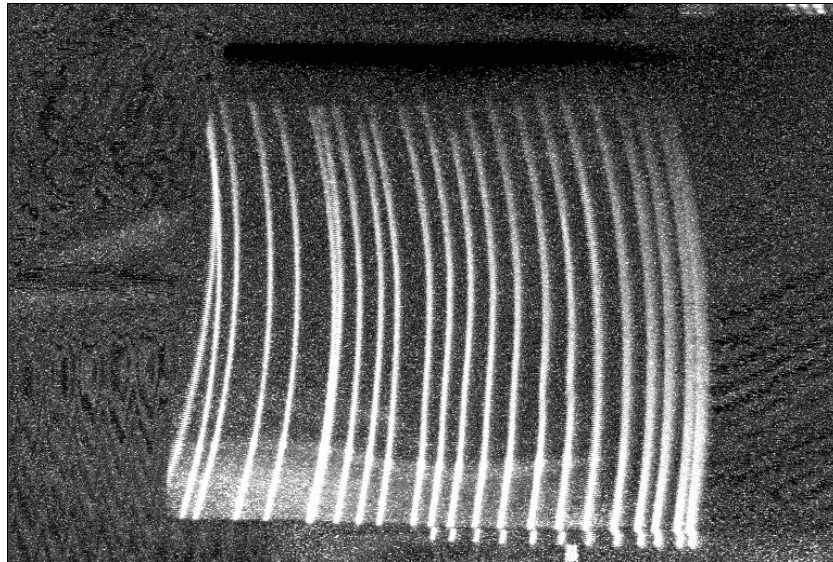


Photo du montage



Comme on peut l'observer, la projection de la ligne laser est faite manuellement, d'où une vitesse de balayage avec le faisceau laser et une position du laser non constantes.

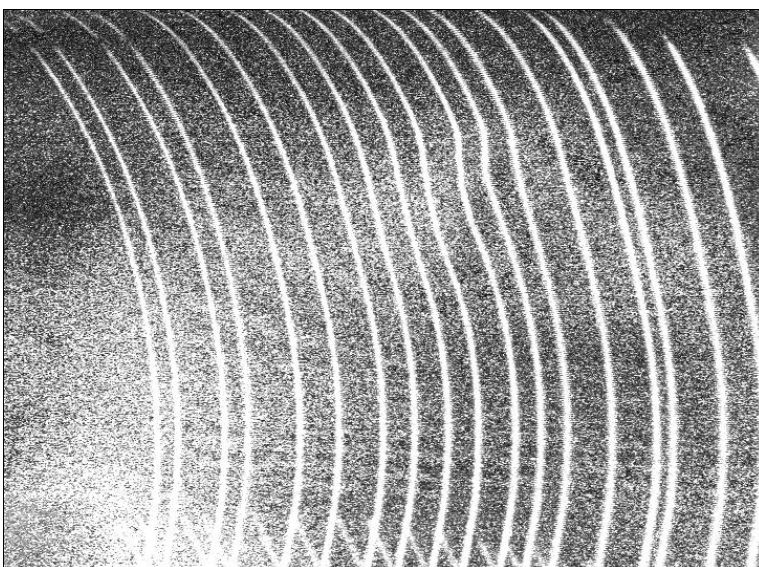
ACQUISITION



*Acquisition d'une image sur laquelle,
on observe la projection de lignes lasers*

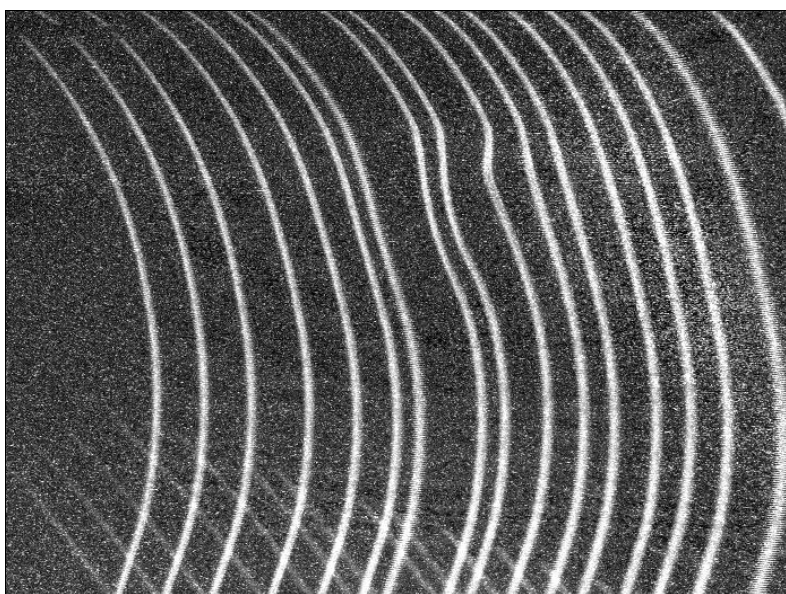
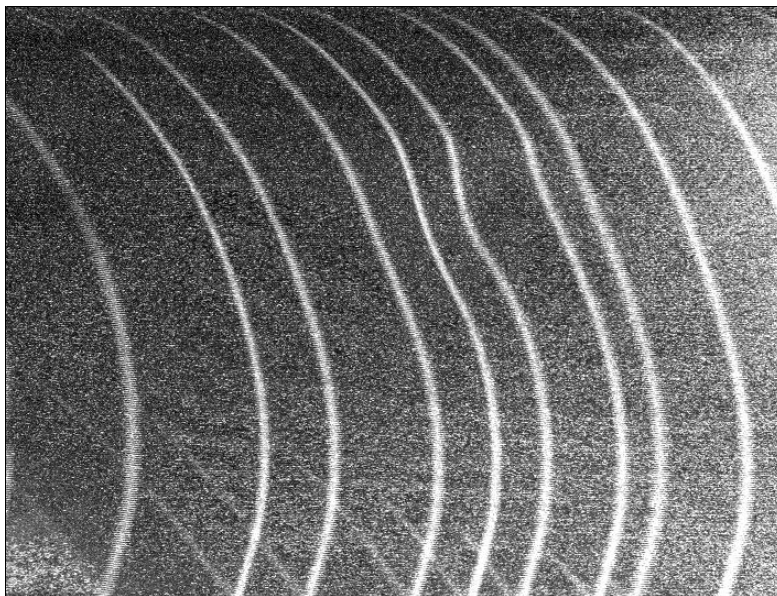
Un programme nous a été fourni. Son principe est le suivant : une acquisition de l'objet est faite sans qu'aucune ligne laser ne balaye la surface, il s'agit de l'image de référence. Ensuite pendant que l'on passe la ligne laser sur l'objet, on fait l'acquisition d'images à intervalle de temps régulier. Puis, de ces images, on soustrait l'image de référence. Cela nous permet donc d'obtenir l'image précédente (où l'on observe que les lignes lasers).

Les lignes observées ne sont pas régulières, d'où une possible mauvaise interprétation 3D (perte d'information).



*Acquisition d'une image sur laquelle,
on observe la projection de lignes lasers
avec un angle laser/objet de 30°*

*Acquisition d'une image sur laquelle,
on observe la projection de lignes lasers
avec un angle laser/objet de 45°*



*Acquisition d'une image sur laquelle,
on observe la projection de lignes lasers
avec un angle laser/objet de 60°*

On peut observer que plus l'angle est grand plus la déformation sera visible. Les acquisitions devront donc être faites avec l'angle le plus grand possible sans toutefois dépasser les limites détectables par un programme informatique.

PROBLEMES RENCONTRES

Lors de l'acquisition, nous avons rencontré le problème suivant : le déplacement de la ligne laser n'étant pas uniforme, un traitement convenable des données n'a pu être réalisé, dans le sens où entre deux lignes, il y a une perte d'information et si l'on effectue de nouveaux passages avec la ligne laser, on ne pourra plus distinguer les différentes lignes donc on ne pourra plus calculer les coordonnées de chaque point et avoir une image 3D.

La solution serait un programme calculant les coordonnées de chaque point à chaque fois que l'on fait une ligne avec le laser. Ce programme, pour ne pas perdre trop de temps, devrait également ne pas recalculer les coordonnées d'un point dont il avait déjà calculé les coordonnées, cela même si la ligne laser est plusieurs fois à un emplacement identique (quand on revient en arrière avec la ligne laser pour avoir le plus d'informations possibles).

Une autre solution serait de réaliser un montage où la distance entre le laser et la caméra serait fixe et connue, où la caméra serait fixe ainsi que l'angle caméra/objet et où le laser serait mobile selon un axe, aurait une vitesse constante et donc un angle laser/caméra connu. Avec ce montage, le programme pourrait être simplifié, on pourrait occulter la partie où il faut faire attention à ce que le programme ne recalcule pas plusieurs fois les mêmes coordonnées, la distance entre deux lignes laser successives étant constante et pouvant être programmée selon l'incertitude que l'on souhaite avoir.

Le montage serait alors le suivant :

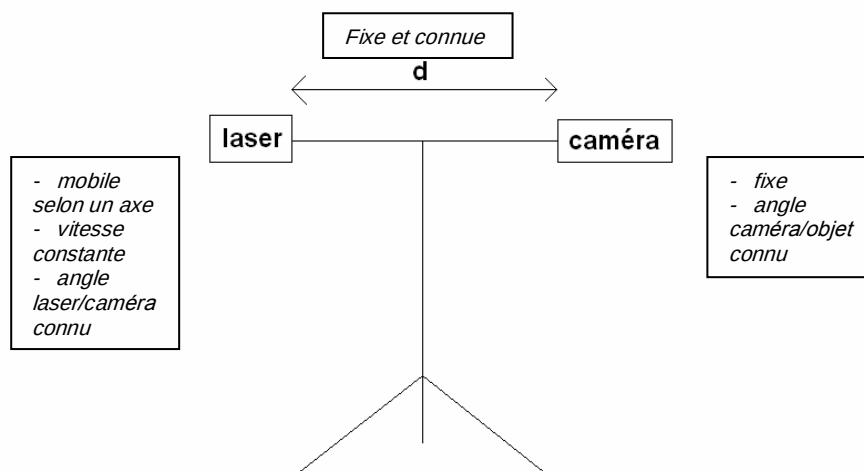
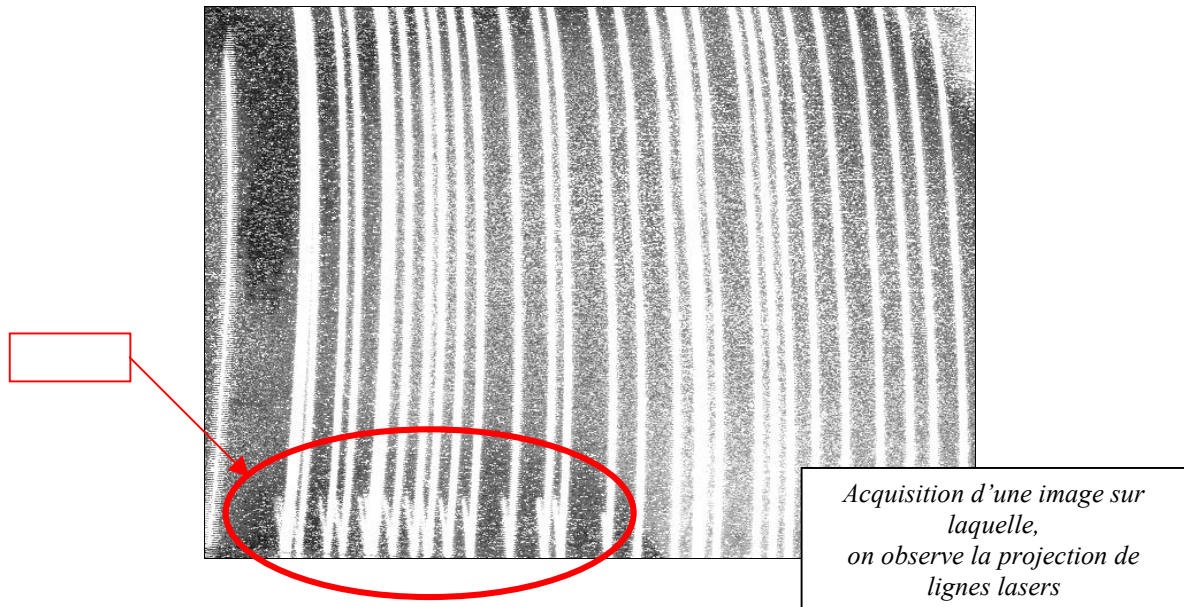


Schéma représentant le montage permettant d'avoir une distance, entre deux lignes laser successives, constante

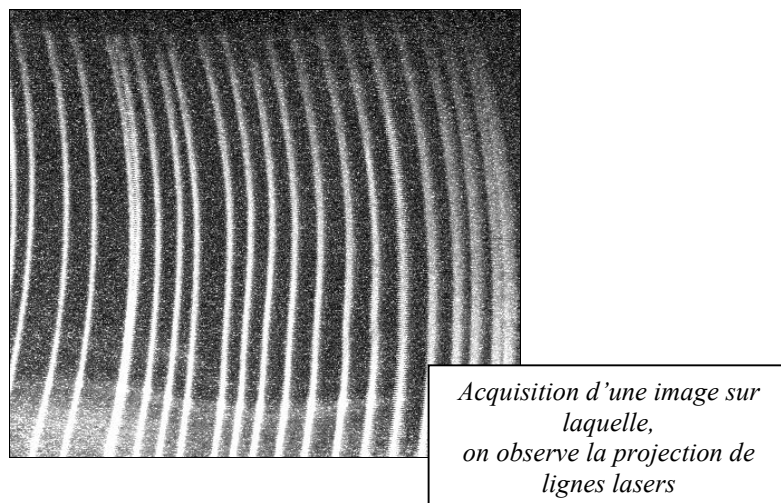
Ce type de montage, nous permettrait de quantifier facilement les impacts.

Un autre problème que nous avons rencontrés, et le problème des reflets, comme nous pouvons le voir sur cette image :



Pour ne pas avoir à faire les mesures dans une pièce privée de lumière, nous avons décidé de recouvrir les échantillons de peinture. Des tests ayant été fait dans un premier temps sur l'échantillon à l'état brut (c'est à dire comme il nous a été fourni), mais n'étant pas concluant nous avons effectué de nouveaux test sur une surface recouverte de peinture.

Une des acquisitions alors effectuée est la suivante :



On observe que les problèmes de reflets ont disparu.

Cependant, on nous a fait part que la recherche d'impacts s'effectue aussi bien sur des ailes peintes que sur des ailes sans peinture, un nouveau problème est alors posé.

5. Conclusion et remerciements

- A la fin de notre projet, nous avons appris que les bords d'attaques d'ailes d'avion ne sont pas peints, alors que notre étude s'est menée sur des surfaces peintes, pour des raisons de médiocrité des résultats obtenus (reflets sur la surface ou franges pas assez bien contrastées).
- La méthode par triangulation laser n'a pas pu être menée à bien : en effet, la ligne laser doit être déplacée à une vitesse homogène, afin d'exploiter les images obtenues. L'idée de la mise en place d'une platine motorisée n'a pas pu être mise en œuvre par cause de manque de temps.

Nous tenons à remercier M. KEMPF, qui nous a fourni le logiciel informatique. Nous remercions également M. BURGET pour nous avoir fourni les échantillons.