4.3 - APPLICATIONS des FAISCEAUX LASER à la MESURE, au CONTRÔLE NON DESTRUCTIF et à la VISION.

4.3.1 INTRODUCTION

LA LUMIERE, COMME MOYEN DE MESURE				
Paramètres du rayonnement	Type de la modification	Mesurande primaire		
Direction de propagation	Déviation des rayons lumineux	- Déformation - Position angulaire		
Flux énergétique	Atténuation par absorption	 Composition chimique Epaisseur Densité de particules 		
	Modulation en tout ou rien	-Nombres d'objets -Vitesse de rotation		
Fréquence	Effet Doppler	-Vitesse de déplacement		
Intensité spectrale	Distribution spectrale	-Température de source d'émission		
Phase	Déphasage entre 2 ondes	-Position -Dimension -Déplacement		
Polarisation	Rotation du plan de polarisation	-Pression -Contrainte		

Quelques exemples d'utilisation d'un rayonnement pour la mesure.

La nature du rayonnement émis par un laser n'est pas différente de la nature du rayonnement émis par les sources classiques : filament chauffé ou décharge dans un gaz. La lumière laser se distingue toutefois par un spectre très étroit, une cohérence spatiale et temporelle très grande, une luminance également très grande ainsi qu'une divergence très faible. Ces caractéristiques exceptionnelles de la lumière laser ne sont pas toutes utiles en même temps. La cohérence est même parfois gênante dans certaines applications puisqu'elle est à l'origine du bruit dit de speckle qui se manifeste par des petites taches dans l'image d'un objet éclairé par un laser. Chaque application du laser est justifiée par l'une ou l'autre des propriétés mentionnées ci-dessus. Ce chapitre a pour objet de présenter les applications les plus courantes des lasers pour la mesure et le contrôle. L'invention des lasers a permis d'une part d'améliorer considérablement les techniques classiques de métrologie optique, d'autre part d'introduire de techniques nouvelles comme l'holographie et le speckle. La mesure et le contrôle non destructif par faisceau laser font appel aux propriétés suivantes du faisceau :

- faible divergence,
- cohérence temporelle (rayonnement monochromatique),
- cohérence spatiale (mode transverse fondamental),
- stabilité des caractéristiques.

Le mesurande est obtenu sous la forme d'une perturbation sur l'un des paramètres du rayonnement : intensité, fréquence, phase, polarisation.

4.3.2 MESURE DE DISTANCE

4.3.2.1 INTRODUCTION.

Le laser est utilisé pour mesurer aussi bien des distances très petites, inférieures au millimètre que des distances de l'ordre du kilomètre ou plus. Pour les petites distances, le dispositif souvent utilisé est l'interféromètre de Michelson. Lorsque la distance à mesurer dépasse la dizaine de mètres, d'autres techniques sont utilisées, comme la modulation de faisceau ou la mesure du temps de vol de signaux impulsionnels. La précision de la mesure est alors limitée par les turbulences de l'atmosphère.

Les techniques suivantes de mesure de distance font appel à un faisceau laser:

- Interférométrie: distances mesurées pouvant aller jusqu'à 100 m à l'intérieur.

- Télémétrie par modulation de faisceau: mesures à l'extérieur de quelques mètres à quelques kilomètres.

- Télémétrie par mesure du temps de vol: distances très grandes mesurées très rapidement (applications militaires).

-Triangulation : utilisée pour la robotique et le contrôle dimensionnel ; c'est une adaptation de la méthode utilisée en topographie et basée sur la connaissance d'une distance et de deux angles.

Méthode	laser utilisé	Etendue de mesure	Précision	Applications
Interférométrie	He-Ne	100 m (intérieur)	$\Delta I = 0,5 \mu m$	Contrôle de machines-
Télémétrie par Modulation defaisceau	He-Ne - Ga-As	kilomètre	∆l/l = 10 ⁻⁶	Géodésie Etalonnage
Mesure de temps de vol	Laser solide déclenché	kilomètres	ΔΙ/Ι = 10 ⁻⁵	Levé de plans - Télémétrie civile et militaire
Triangulation	AsGa HeNe	mm à quelques m	0,1%	Profilométrie Robotique

Quelques caractéristiques des principales techniques de mesure de distance.

Influence du milieu sur la précision des mesures de distance [Bender, 1965]

La longueur mesurée est exprimée en termes de longueur d'onde λ de la source. Mais λ dépend des caractéristiques du milieu de propagation : composition du mélange gazeux, température, pression, degré hygrométrique. Dans les conditions normales de métrologie (Température = 20°C, pression atmosphérique = 760 mm de Hg, pression partielle en vapeur d'eau = 10 mm de mercure, pression partielle en CO₂ = 0,23 mm de mercure), la longueur d'onde d'un laser à HeNe stabilisé est égale à 632,81980 nm; dans le vide λ_0 = 632,99143 nm. Si la pression de CO₂ ne dépasse pas 0,3 mm de Hg, son influence peut être négligée. Pour obtenir la longueur d'onde pour d'autres conditions, la relation suivante doit être utilisée :

(4.3-1)
$$\lambda_0 - \lambda = 10^{-6} \lambda$$
. [0,93 (T - 20) - 0,36 (P_t - 760)] + 0,05 (P_{H2O} - 10)].

T: température en °C,

Pt : pression totale en mm de Hg,

PH₂O : pression partielle de vapeur d'eau en mm de Hg.

Compte tenu de la précision avec laquelle on peut mesurer et stabiliser T et P_t , il est difficile d'obtenir dans l'air des précisions meilleures que 10⁻⁶, soit 1 µm par mètre.

Il est possible de tenir compte des conditions réelles de propagation d'un rayonnement dans l'air en utilisant la formule suivante pour l'indice de réfraction:

(4.3-2)
$$n = 1 + \frac{n_g - 1}{1 + \alpha T} \frac{P_t}{760} - \frac{55x10^{-9}}{1 + \alpha T} p_{H2O}$$

 $\alpha = 0,003$ 661 est le coefficient de dilatation thermique de l'air;

 n_g est l'indice de groupe de la lumière modulée (voir ci-après). La formule ci-dessus s'applique pour des températures comprises entre -40°C et 50°C et des pressions comprises entre 533 mb et 1067 mb.

L'indice de l'air sec, à 0°C et 1013,25 mb et contenant 0,03% de CO₂ dépend de la longueur d'onde suivant la relation :

(4.3-3)
$$n = 1 + 10^{-6} \left[287,604 + \frac{1,6288}{\lambda^2} + \frac{0,0136}{\lambda^4} \right].$$

Propagation d'une onde modulée : Vitesse de groupe [Orszag-Heppner, 1980]

 $La propagation d'un rayonnement à large spectre dans un milieu dispersif est caractérisée par une vitesse de groupe v_g et un indice de groupe n_g.$

Considérons deux ondes de même amplitude et de fréquences voisines ω_1 et ω_2 :

(4.3-4) (a)
$$E_1(x, t) = E_0 \cos(k_1 x - \omega_1 t)$$
 et

(b) $E_2(x, t) = E_0 \cos(k_2 x - \omega_2 t)$ (Fig. 9-1).



Fig. 4.3-1 : Superposition de deux ondes de fréquences voisines.

Λ : longueur d'onde de battement (
$$\Lambda = \frac{\lambda_1 \ \lambda_2}{\lambda_1 \ - \ \lambda_2}$$
)

L'onde résultant de la superposition de E_1 et E_2 est égale à :

(4.3-5) $E(x, t) = 2 E_0 \cos(k x - \omega t) \cos(k_{mod} x - \omega_{mod} t) = 2 E_0 \cos(\varphi) \cos(\varphi_{mod}),$

avec k = $\frac{k_1 + k_2}{2}$, le nombre d'onde moyen,

 $\omega = \frac{\omega_1 + \omega_2}{2}$, la fréquence angulaire moyenne,

 $k_{\text{mod}} = \frac{k_1 - k_2}{2}$, le nombre d'onde de l'onde de modulation, et $\omega_{\text{mod}} = \frac{\omega_1 - \omega_2}{2}$ la fréquence angulaire de l'onde de modulation.

L'onde E peut être décrite comme une onde en déplacement, de fréquence angulaire ω , dont l'amplitude A est modulée par la fonction cos (ϕ_{mod}) :

(4.3-6) $E(x, t) = A(x,t) \cos(\varphi_{mod})$.

La densité de puissance I portée par l'onde varie comme :

(4.3-7)
$$I \sim A^2 = 2 E_0^2 [1 + \cos 2 (k_{mod} x - \omega_{mod} t)].$$

I oscille à la fréquence $2 \omega_{mod}$ appelée fréquence de battement.

L'onde E(x,t) décrite ci-dessus est caractérisée par une vitesse de phase v_{ϕ} telle que:

(4.3-8)
$$\mathbf{v}_{\varphi} = \frac{\begin{bmatrix} \partial \varphi \\ \partial t \end{bmatrix}_{x}}{\begin{bmatrix} \partial \varphi \\ \partial x \end{bmatrix}_{t}} = \frac{\omega}{k} \neq \text{Const.}$$

 v_{ϕ} est la vitesse à laquelle se déplace les maximums du champ électrique de l'onde (figure 9.5). Dans le cas de l'onde modulée, les maximums varient en cours de propagation. La notion de vitesse de phase ne suffit pas pour une onde modulée, et de façon générale pour une onde polychromatique; dans ce cas, on définit également une vitesse de groupe v_g donnée par la relation suivante :

(4.3-9)
$$V_g = \frac{\omega_{mod}}{k_{mod}} = \frac{\omega_1 - \omega_2}{k_1 - k_2} = \frac{\Delta\omega}{\Delta k}$$

Pour l'onde modulée ci-dessus, $v_g = v_{mod}$, v_{mod} étant la vitesse à laquelle se déplace l'enveloppe de la modulation. Dans un milieu dispersif, ω dépend de k suivant une relation $\omega = \omega(k)$ dite relation de dispersion. Pour un intervalle de fréquence $\Delta \omega$ petit, on peut écrire $V_g = \frac{d\omega}{dk}$.

La modulation se déplace à une vitesse v_g qui peut être supérieure, égale ou inférieure à la vitesse de la lumière dans le vide. Ce résultat n'est pas en contradiction avec la théorie de la relativité puisque v_g n'est pas la vitesse de déplacement de l'énergie du rayonnement.

Si v est la vitesse de propagation d'une onde de vecteur d'onde k dans le milieu, on peut écrire la relation $\omega = kv$. La vitesse de groupe est donc égale :

(4.3-10)
$$\mathbf{v}_{\mathbf{g}} = \mathbf{v} + \mathbf{k} \ \frac{d\mathbf{v}}{d\mathbf{k}}.$$

Dans un milieu non dispersif où v ne dépend pas de λ et donc de k, on a :

 $v_g = v = c$. Dans un milieu dispersif $\omega = kv = k \frac{c}{n}$. La vitesse de groupe est alors donnée par la relation :

relation.

(4.3-11)
$$V_g = \frac{d\omega}{dk} = \frac{c}{n} - \frac{kc}{n^2} \frac{dn}{dk} = v\left(1 + \frac{k}{n} \frac{dn}{dk}\right)$$

Par analogie avec l'indice de réfraction, on définit un indice de groupe ng :

(4.3-12)
$$n_g = \frac{c}{v_g} = n - \lambda \frac{dn}{d\lambda}$$

4.3.2.2 MESURE INTERFÉROMÉTRIQUE DE DISTANCE.

Il est possible de suivre, avec une précision inférieure au micron, le déplacement d'un objet en l'introduisant dans le bras d'un interféromètre; l'interféromètre de Michelson est le plus souvent utilisé dans ce but. Le laser à Hélium-Néon est la source de rayonnement la plus souvent utilisée dans les dispositifs de mesure interférométrique de longueur. La longueur d'onde est égale à 0,6328 µm. Sans stabilisation de fréquence, le laser à HeNe émet un spectre dont la largeur est d'environ 1 GHz. Cet étalement des fréquences émises entraîne une incertitude de 0,2.10⁻⁵ sur les mesures de distances. Lorsque le laser est utilisé en monomode axial et que la fréquence est stabilisée, la largeur du spectre n'est plus que de 1 MHz. Notons qu'un interféromètre ne permet qu'une mesure relative par comptage de franges, c'est-à-dire de demi longueurs d'onde parcourues par le composant qui réfléchit le faisceau. L'interféromètre peut se présenter sous la forme d'un boîtier de faibles dimensions grâce aux progrès récents réalisés dans l'intégration des composants optiques.

Dimensions : 147 mmx186 mm x 262 mm
 Amplitude de mesure : 100 mm
 Résolution : 0,1 μm
 Précision : 0,1 μm
 Sources de rayonnement : diode laser, λ = 780 nm, Δλ/λ = 10⁻⁶
 Vitesse maximale de déplacement de la cible : 200 mm/s
 Exemple de caractéristiques d'un dispositif interférométrique réalisé par intégration des composants sur une plaquette de silicium [CSO]

Divers effets viennent limiter la précision des mesures. Sur une distance de l'ordre du mètre ou plus en atmosphère libre, il existe des fluctuations de densité qui entraînent des fluctuations d'indice et donc des sauts d'intensité du signal détecté. Ces fluctuations se manifestent de la même façon qu'une variation de distance, par un défilement de franges. L'utilisation simultanée de 2 fréquences permet d'éliminer cet inconvénient.

4.3.2.2.1 Interféromètre à 2 fréquences.

Il est possible de faire fonctionner un laser à He-Ne simultanément sur 2 fréquences voisines v_1 et v_2 ; les 2 composantes du rayonnement émis sont polarisées circulairement l'une droite, l'autre gauche. Les intensités sur les 2 fréquences sont identiques si la longueur de la cavité est calée convenablement à l'aide d'un dispositif piézo-électrique. Le schéma de l'interféromètre est présenté ci-après.



Fig. 4.3-2 : Schéma d'un interféromètre à 2 fréquences.



Une lame $\lambda/4$ transforme les deux polarisations circulaires en polarisations rectilignes orthogonales. Le prisme séparateur PS1 agit de la même façon sur les deux polarisations: réflexion d'une partie des signaux vers le détecteur D₁, transmission de l'autre partie vers l'interféromètre. Le prisme séparateur PS2, au contraire, laisse passer totalement l'une des polarisations, alors qu'elle réfléchit totalement l'autre. Le signal à la fréquence v₂ est dirigé vers un rétroréflecteur fixe alors que le signal à la fréquence v_1 est envoyé vers le réflecteur mobile. Dans chacun des bras de l'interféromètre, terminés par des trièdres rétroréflecteurs T1 et T2, est disposée une lame demi-onde qui fait tourner la polarisation de 90°. Au retour, le signal à la fréquence v_1 est totalement réfléchi alors que le signal à la fréquence v_2 est totalement transmis. Le trièdre T₁ est animé d'une vitesse V. Les signaux d'interférence détectés par D₂ sont modulés à la fréquence $v_1 - v_2 + \Delta v$ avec $\Delta v =$ $\frac{2V}{c}$.

Le détecteur D₁ fournit un battement à la fréquence $\Omega = v_1 - v_2$. Les signaux issus de D₁ et D₂, sont amplifiés puis doublés. Les informations sont ensuite introduites dans des convertisseurs d'impulsions. Une soustraction est alors effectuée pour obtenir l'écart de fréquence dû à l'effet Doppler. Le calculateur qui suit, dispose d'une horloge interne très précise et prend en compte les corrections de température et de pression pour déterminer, puis afficher, la distance parcourue par le trièdre mobile. L'information sur la vitesse est également accessible.

Un interféromètre à 2 fréquences est insensible aux fluctuations des caractéristiques du milieu de propagation qui agissent de la même façon sur v_1 et v_2 . Les appareils faisant appel à cette technique sont utilisés pour la métrologie d'atelier sur quelques dizaines de mètres.

4.3.2.3 TÉLÉMÉTRIE PAR COMPARAISON DE PHASES DE SIGNAUX MODULÉS

La technique de modulation de faisceau consiste à moduler une onde électromagnétique en amplitude ou en phase avant de le diriger vers la cible dont l'éloignement doit être déterminé.





La source de rayonnement est un laser à He-Ne ou une diode laser. La cible est constituée par un prisme rétroréflecteur. Une surface diffusante (mur, arbre ...) peut aussi convenir mais la portée est alors plus restreinte qu'avec un ou plusieurs prismes (quelques mètres au lieu de 5000 m ou plus). Le signal de retour est collecté par un télescope et concentré sur un photodétecteur. Le signal reçu est ensuite superposé au signal de modulation émis par l'oscillateur. La différence de phase $\Delta \Phi$ entre les 2 signaux est donnée par la relation :

(4.3-13)
$$\Delta \Phi = 2\pi \text{ ng } \frac{2L}{\lambda_{\text{mod}}}$$

L est la distance à mesurer; λ_{mod} est la longueur d'onde dans le vide du signal de modulation; n_g est l'indice de groupe. A la longueur d'onde de la lumière d'un laser à He-Ne et aux conditions suivantes : T = 15° C, P = 760 mm de Hg, concentration de CO₂ = 0,03 %, n_g est égal à 1,0002845073.

Dans le cas où le trajet aller-retour est différent d'un nombre entier de demi longueurs d'onde, la différence de phase mesurée peut se mettre sous la forme :

$$(4.3-14) \qquad \Delta \Phi = 2\pi \cdot (N + \alpha).$$

N est un nombre entier; α est un nombre inférieur à 1. La mesure de $\Delta \Phi$ donne α mais pas N. Le déphasage $\Delta \Phi$ peut être déterminé avec une incertitude relative comprise entre 10⁻³ et 10⁻⁴.

La distance L est obtenue par la relation :

(4.3-15)
$$L = N \frac{\lambda_{mod}}{2} + \frac{\Delta \Phi}{2} \frac{\lambda}{2}$$

La relation ci-dessus montre que la précision de la mesure est limitée par la plus petite longueur d'onde (plus haute fréquence) que l'appareil utilisé peut générer; en pratique la fréquence de modulation est comprise, suivant les appareils, entre 1 et 500 MHz.

Les 2 méthodes suivantes peuvent être utilisées pour obtenir N, puis par calcul, à l'aide des relations ci-dessus, la distance L.

1^{ère} méthode:

On commence avec une fréquence de modulation suffisamment faible pour que N soit égal à 0 ($\Delta \Phi < 2\pi$). On augmente ensuite la fréquence de modulation suivant une progression géométrique, par exemple 1, 10, 100 kHz et on détermine les nouvelles valeurs de α , N étant obtenu en tenant compte de la mesure précédente. Après quelques étapes, $\Delta \Phi$ est connu avec une bonne précision.

2^{ème} méthode:

On ne mesure pas $\Delta \Phi$ directement mais on repère les valeurs de la fréquence de modulation pour lesquelles le signal détecté présente un minimum, ce qui correspond à une opposition de phase entre signal émis et signal détecté ($\Delta \Phi = \pi$). Cette situation se présente lorsque la distance parcourue par la lumière, soit 2L, est égale à un nombre entier de demi longueurs d'onde de modulation. Si les deux signaux ont des amplitudes identiques, la méthode consiste à repérer des 'zéros'. Le repérage de plusieurs 'zéros' est nécessaire pour obtenir la distance avec une précision de 10⁻⁶ environ.

Les corrections à faire pour tenir compte des conditions réelles de mesure sont difficiles à déterminer. Comme en interférométrie une mesure réalisée avec 2 fréquences différentes permet de s'affranchir des fluctuations du milieu de propagation. La précision peut être de 10⁻⁷ sur des distances de l'ordre du kilomètre. Lorsque les paramètres de propagation ne sont pas bien connus, il est préférable d'utiliser un appareil faisant appel à plusieurs fréquences.

4.3.2.3.1 Quelques exemples de télémètres à modulation de faisceau.

<u>Géodimètre HP 3850 A</u>. Laser utilisé: laser à As-Ga de 1mW. Fréquences de modulation: 15.10⁶, 375.10³ et 3,75.10³ Hz ($\lambda_{mod} = 20$ m, 800 m et 80 km). $\Delta \Phi$ est mesuré avec une incertitude de +/- 0,6 mrad. Les distances sont mesurées avec une incertitude de +/- (5 mm + 1 mm par km).

Géodimètre AGA: mêmes performances que le modèle HP. Le laser utilisé est un laser à He-Ne.

Mékomètre de Kern [Meier]. C'est un télémètre à modulation de la polarisation du faisceau. Le schéma de l'appareil est donné sur la figure 9-4.

L'appareil comprend les éléments suivants:

- un laser à Hélium-Néon,
- un modulateur et un démodulateur,
- un synthétiseur de fréquence,

- un détecteur sensible à la phase.





A: atténuateur de faisceau; PS: Prisme séparateur de faisceau; M: cristal électro-optique de modulation; D : diode photodétectrice.

Le rayonnement émis par le laser à He-Ne a une longueur d'onde de 0,6328 µm; la polarisation est linéaire. Le faisceau passe à travers un diviseur qui ne modifie pas la polarisation. Le faisceau est ensuite modulé en polarisation par un cristal électro-optique; la fréquence de modulation est fournie par un synthétiseur de fréquence. La lame $\lambda/4$ permet la compensation en température du cristal modulateur. Le faisceau est expansé avant d'être dirigé sur une cible placée à l'autre extrémité de la distance à mesurer où un rétroréflecteur le renvoie vers un détecteur placé après la lame $\lambda/4$ et le cristal, qui se comporte alors en démodulateur. Si la phase du signal de modulation fournie par l'amplificateur est la même qu'au départ, la polarisation linéaire est rétablie. Dans ce cas, le détecteur donne un signal nul. La phase de l'onde de modulation est annulée par ajustement de la fréquence de modulation. Ce zéro est obtenu pour une distance L égale à un nombre entier de demi longueurs d'onde de modulation (30 cm environ) (figure).



Fig. 4.3-5 : Variation du déphasage du signal de modulation sur une distance à mesurer L.

L est un nombre entier de demi longueur d'ondes de modulation λ_0 ou λ_k . k est utilisé dans la formule de calcul de la distance.

La relation entre la distance L, la fréquence de modulation Ω et l'intensité I du rayonnement détecté est donné par [Froome et al, 1966] :

(4.3-16)
$$I = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \cos \Theta \quad J_0 \left(2\pi \frac{V}{V_m} \cos\left(2\pi L \frac{\omega}{c}\right) \right)$$

 Θ est la rotation de la polarisation au cours de la propagation en dehors du cristal;

V est la tension de modulation; V_m est la tension de modulation pour une profondeur de modulation de 1; J_0 est la fonction de Bessel du premier type d'ordre 0; c est la vitesse de la lumière.

Afin de déterminer avec précision la fréquence de modulation au zéro de la réponse du détecteur, un wobulateur module la fréquence du signal de modulation à 2 kHz avec une déviation de fréquence de +/-5 ou +/- 25 kHz (figure).



Fig. 4.3-6 : Intensité du signal détecté en fonction de la fréquence de modulation. $\Delta\Omega$ est la largeur de bande de modulation.

A la fréquence correspondant à un minimum de signal de détecteur, le signal est modulé à la fréquence de 2 kHz; pour une fréquence voisine, le signal est modulé à la fréquence 4 kHz (figure).



Fig. 4.3-7 : Détermination de la fréquence de modulation correspondant à un zéro du signal par introduction d'une modulation supplémentaire à 2 kHz.

Le signal est introduit dans un détecteur synchrone, puis dans une unité de traitement après conversion analogique-digitale. On détermine les fréquences correspondant à plusieurs zéros successifs. La distance est ensuite obtenue par la relation suivante :

(4.3-17)
$$L = M k \frac{\Omega_0}{\Omega_k - \Omega_0} \frac{c}{2\Omega_0}$$

M : nombre entier; k: nombre de zéros entre le départ et le retour de l'onde; Ω_0 : fréquence correspondant au premier zéro; Ω_k : fréquence correspondant au zéro d'ordre k. L'expression k

 $\frac{\Omega_0}{\Omega_k - \Omega_0}$ est arrondie au zéro le plus proche. La précision sur la distance mesurée ne dépend pas de

l'ordre du premier zéro mesuré.

La plage de mesure s'étend de 10 m environ à quelques kilomètres. Le temps de mesure est d'environ 1 minute et demi (exemple du ME 5000 de Kern). La précision, limitée par les fluctuations des paramètres atmosphériques, est de 0,1 mm+/- 0,2 ppm pour des conditions idéales.

<u>Le Terramètre et le Géorant II</u> : Appareil de mesure de distances comprises entre 1 et 2 kilomètres, permettant une incertitude relative de 10⁻⁷.

L'appareil utilise deux ondes modulées, l'une issue d'un laser à HeNe (λ =632,8 nm), l'autre issue d'un laser à HeCd (λ =441,6 nm). L'utilisation de deux longueurs d'onde permet d'éliminer les fluctuations de l'indice de l'air. Le principe de mesure utilisé est celui de la détection d'un déphasage nul entre les signaux émis et les signaux réfléchis pour plusieurs fréquences de modulation (2^{ème} méthode présentée plus haut).

Télémètre à 2 fréquences GEORAN [Sopra]

Deux faisceaux (vert et rouge) sont générés par un laser à HeNe puis modulés en phase par un cristal de KDP. La mesure est faite par comparaison des phases des signaux émis et reçus.

Étendue de mesure : 200 m à 30 km . Précision : 0,2 mm + -10-7 L.

4.3.2.4 TÉLÉMÉTRIE PAR MESURE DE LA DURÉE DE PROPAGATION D'IMPULSIONS LASER.

La télémétrie à lasers impulsionnels est basée sur la mesure du temps de vol d'impulsions de très courte durée. L'instrument repère l'instant t1 de départ de l'impulsion par prélèvement d'une très petite partie du signal, ainsi que l'instant t2 de retour du signal réfléchi par la cible. Le signal se déplace à la vitesse de groupe V_g . La distance L entre l'instrument et la cible est calculée par la

relation
$$L = \frac{1}{2} V_{g} (t_{2} - t_{1}).$$

Les impulsions ultracourtes (10 à 40 ns) sont obtenues dans le régime de l'oscillation déclenchée (Ch. 4). Cette technique de mesure de distance est essentiellement utilisée dans les domaines militaire et spatial (localisation de satellites).

Un télémètre à laser impulsionnel est composé des éléments suivants (figure):

- un laser,
- un télescope pour collecter le signal de retour,
- un photodétecteur,

- une horloge de précision servant à mesurer le temps de vol de l'impulsion entre l'instant d'émission et l'instant d'arrivée.



Fig. 4.3-8 : - Télémètre à mesure de temps de vol.

Une partie du faisceau est prélevée et dirigée sur un détecteur D1 qui fournit un signal S1 à un oscilloscope (O). Le signal qui revient de la cible est interceptée par une antenne (A), passe à travers un filtre (F) avant d'être reçu par le détecteur D2 qui fournit alors le signal S2. La durée du délai entre S1 et S2 permet de calculer la distance d'éloignement de la cible.

4.3.2.4.1 Le laser.

Le laser utilisé dans les télémètres à impulsions est en général du type Nd:YAG. Les impulsions générées ont les caractéristiques suivantes :

- durée voisine de 20 ns,
- énergie d'impulsion : 150 mJ à quelques joules,
- fréquence de répétition: 1 ou 10 impulsions par seconde.

Le faisceau émis par le laser a une divergence voisine du milliradian. Un radar fonctionnant à la longueur d'onde de 10 cm, devrait avoir une antenne de 1 km de diamètre pour fournir un faisceau aussi étroit. Il est possible de réduire la divergence du faisceau émis jusqu'à 10^{-4} à 10^{-5} radian à l'aide d'un système optique. Il n'est pas utile en pratique de descendre en dessous de ces valeurs car la précision des mécanismes de pointage et les fluctuations de la réfraction atmosphérique sont de cet ordre de grandeur.

4.3.2.4.2 La cible.

La cible peut être constituée par une surface diffusante. Les performances sont cependant améliorées par l'emploi d'une cible coopérative (ou Cataphote) constituée d'une lentille et d'un miroir ou d'un prisme à trois faces. Le faisceau est renvoyé dans un cône d'angle solide $(\lambda/D)^2$ stéradian de même axe que le faisceau incident.



Fig. 4.3-9 : Cible coopérative

(a) à miroir (M) et lentille (L) - b : Cible coopérative en coin de cube; les 3 miroirs M1, M2 et M3 forment un trièdre rectangle.

4.3.2.4.3 Réception.

Le récepteur présente une grande sensibilité, un bruit de fond réduit, une grande rapidité de réponse. On utilise de préférence un photomultiplicateur placé au foyer d'une optique assez grande pour collecter un maximum de lumière et limiter le champ d'observation. Un filtre interférentiel permet de sélectionner uniquement le signal de mesure. Le filtre présente un maximum d'efficacité lorsque le rayonnement le traverse sous la forme d'un faisceau parallèle. La largeur de la bande spectrale $\Delta\lambda$ détectée est alors telle que: $\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{i^2}{2}$, où i est l'inclinaison maximale des rayons à l'entrée du filtre. Si le faisceau est parfaitement parallèle, c'est la bande passante du filtre qui fixera la

limite à environ 0,05 nm dans le meilleur des cas, ce qui est suffisant puisque le spectre du rayonnement laser présente la même largeur.

4.3.2.4.4 Performances .

Le principal avantage de la technique de mesure de temps de vol par rapport à la technique de modulation de faisceau réside dans la rapidité de la mesure : une dizaine de microsecondes. La résolution d'un télémètre à laser impulsionnel dépend de la durée des impulsions émises par le laser. Une résolution de l'ordre du mètre est obtenue pour des impulsions de la dizaine de nanosecondes. Avec un laser à Nd:YAG, il est possible de réduire la durée des impulsions jusqu'à 0,5 ns environ, ce qui correspond à un train d'ondes de 15 cm. Une résolution voisine de 1 cm est possible avec des impulsions émises par un laser à semi-conducteur (impulsions de durée inférieure à 0,1 ns).

Pour les mesures effectuées sur les satellites, une autre cause d'incertitude vient de l'incertitude sur l'instant exact de la mesure, car le satellite parcourt environ 1 cm par μ s. Il faut donc mesurer les intervalles de temps à 10 ns près et les temps absolus à 1 μ s près [Lliboutry.92].

L'étendue de mesure dépend des paramètres suivants :

- l'ouverture du faisceau émis,
- la précision de pointage
- les conditions atmosphériques.
- l'énergie des impulsions reçues par le détecteur qui elles-mêmes dépendent de :
 - la surface apparente de la cible,
 - le pouvoir réfléchissant de la cible,
 - l'éloignement L de la cible.

4.3.2.4.5 Calcul de la fraction d'énergie émise, reçue par le détecteur :

Soient θ l'angle au sommet du cône d'émission de la source (on négligera la dépendance radiale de l'émission);



Fig. 4.3-10 : Distancemètre à ondes ém; paramètres géométriques de transmission.

 $\Omega_{\rm F}$ l'angle solide correspondant au cône d'émission ($\Omega_{\rm F} = \pi \frac{\theta^2}{4}$);

L la distance entre l'émetteur et la cible;

 r_{C} et r_{D} le rayon de la cible et celui du détecteur assimilés à des disques;

S_C et S_D les surfaces de la cible et du détecteur;

 $\alpha_{\rm C}$ le rayon angulaire de la cible ($\alpha_{\rm C} \approx \frac{r_c}{L}$);

 $\Omega_{\rm C}$ l'angle solide correspondant à $\alpha_{\rm C}$ ($\Omega_{\rm C} \approx \pi \alpha_{\rm C}^2 = S_{\rm C}/L^2$);

 $\alpha_{\rm D}$ le rayon angulaire du détecteur vu depuis l'émetteur et par réflexion sur la cible ($\alpha_{\rm D} \approx \frac{r_D}{2I}$);

R_C le coefficient de réflexion de la cible;

J₀ l'énergie émise;

T la transmission de l'espace entre l'émetteur et la cible.

 $\underline{1^{er} cas}$: Le détecteur reçoit toute l'énergie renvoyée par la cible ($\alpha_D > \alpha_C$); l'énergie reçue par le détecteur est égale à $J_d = \rho J_0$ avec :

$$\rho = \mathbf{R}_{\mathbf{C}} \mathbf{T} \ \frac{\boldsymbol{\Omega}_c}{\boldsymbol{\Omega}_F} = \mathbf{R}_{\mathbf{C}} \mathbf{T} \ \frac{4 \ S_c}{\pi \ L^2 \ \theta^2}.$$

 $\frac{2^{\acute{eme}} cas}{cas}$: Le détecteur ne reçoit que l'énergie contenue dans un angle d'espace limité par sa surface (plus exactement celle de son antenne) et centré sur l'émetteur placé à la distance de 2L ($\alpha_D < \alpha_C$); J_d est obtenu par l'expression :

$$J_d = J_0 R_C T \frac{S_D}{\pi L^2 \theta^2}$$

En pratique, l'énergie des impulsions peut être détectée si au moins 100 photons par seconde arrivent sur le détecteur, ce qui correspond à une puissance minimale à la réception de 10^{-17} watt.

4.3.2.4.6 Applications des télémètres à lasers impulsionnels :

Les télémètres à impulsions optiques sont utilisés pour :

- le relevé topographique de la surface terrestre à partir de stations aéroportées [Bufton et al, 1991];

- la mesure de grandes distances, par exemple la distance terre-lune avec une incertitude de 15 cm. Pour cette mesure, quatre cibles à prismes rétroréflecteurs ont été placés à la surface de la lune. Un faisceau laser de 3 » de divergence a été utilisé, produisant sur la lune une tache de 5,5 km de diamètre.

- le repérage de la position d'un satellite avec une incertitude de 2 cm;

- en géodésie (étude, à partir de satellites géostationnaires de la navigation, de la dérive des continents, du mouvements des marées).

- dans le domaine militaire :

- télémètre de chars (on privilégie alors la rapidité sur la précision);

- suivi d'engins mobiles, par exemple des avions en phase de décollage ou d'atterrissage ; l'avion, équipé de coins de cubes de petite taille est suivi par un télémètre monté sur une tourelle.

4.3.2.5 MESURE DE DISTANCE PAR TRIANGULATION

L'existence du laser et des mosaïques de détecteurs à haute résolution spatiale a permis la réalisation de capteurs de petites distance sur le principe de la triangulation utilisé par les géomètres pour les grandes distances.



Fig. 4.3-11 : Principe de la mesure de distance par triangulation.

D est la distance à mesurer. B est la base de la mesure. Ψ et θ sont des angles connus. La distance est donnée par la

relation
$$D = \frac{B}{\cot g \ \theta + \cot g \ \Psi}$$

Pour le cas particulier : y = π/2. D = B tg
θ. Les détecteurs linéaires (barrettes de
CCD) permettent de déterminer l'angle ψ. En
balayant un plan avec le faisceau laser, on
peut obtenir le profil de l'objet.

A partir de deux angles et d'une distance connus, on détermine une distance inconnue. La figure cidessus présente le principe général de la mesure de distance par triangulation. La source de rayonnement est un laser (HeNe ou diode); le détecteur , suivant la précision désirée, est une barrette de photodiodes de 512 ou 1024 éléments. Le dispositif peut être utilisé pour mesurer des distances allant de quelques millimètres à une vingtaine de centimètres.

La figure ci-après montre une configuration possible de capteur de distance.



Fig. 4.3-12 : Exemple de capteur de distance basé sur la triangulation

a Premier exemple de réalisation pratique d'un capteur de distance fonctionnant sur le principe de la triangulation.

D est la distance à mesurer.

ΔD est l'étendue de mesure.

La distance B est un paramètre fixe

La distance est donnée par la relation

$$D = B \frac{tg \theta}{1 - \frac{L}{f} tg \theta}$$

B - Deuxième exemple de réalisation pratique d'un capteur de distance fonctionnant sur le principe de la triangulation.

Le miroir de renvoi du faisceau est en rotation; le faisceau balaye un plan. Le détecteur reçoit un signal lorsque le point éclairé est sur l'axe de la lentille. L'appareil détecte la positon θ du miroir pour laquelle le détecteur reçoit un signal

La distance est donnée par la relation D = B tg θ

Précision : +/- 1 mm pour D compris entre 1 et 2 m.





c - Profilomètre à une dimension (Variante du dispositif de la figure 9-10-b).

L'objet défile suivant l'axe x'x. Le point d'incidence du faisceau sur le miroir tournant coïncide avec le foyer de la lentille. Pendant une rotation du miroir, le faisceau balaye la surface de l'objet tout en restant parallèle à lui-même. A l'instant où un signal est reçu sur le détecteur simple, la position du faisceau réfléchi sur la barrette de photodétecteurs est enregistrée. Si la cadence de mesure est suffisante, le profil de l'objet est obtenu.

Exemple de caractéristiques d'un système commercial de mesure de déplacement sans contact				
Plage de mesure :	± 5 mm à ± 20 mm suivant modèle			
Distance centrale de mesures :	50 mm ±1 mm à 100 mm ±2 mm			
Résolution :	De 10 à 40 μm			
Temps de réponse	0,4 à 1 ms			
Laser :	Semi-conducteur (AsGa)			
Diamètre minimale du spot :	2,5 mm x1,2 mm			

4.3.3 MESURE DE VITESSES.

4.3.3.1 INTRODUCTION.

L'utilisation d'un faisceau laser pour mesurer des vitesses présente plusieurs avantages : (1) le faisceau ne perturbe pas le déplacement de l'objet, même dans le cas de particules fines dans un écoulement liquide ou gazeux, (2) le volume de mesure est très petit, de l'ordre de millimètre cube, (3) la mesure est peu sensible aux variations de température. La vitesse est obtenue en mesurant le changement observé sur la fréquence du rayonnement réfléchi par une cible en mouvement effet Doppler).

L'emploi d'un faisceau laser est particulièrement intéressant pour la mesure d'écoulements liquides ou gazeux, facilement perturbés par tout capteur matériel. Dans ce cas particulier, deux techniques sont couramment utilisées. Dans la première, une modulation d'intensité de la lumière est réalisée par interférométrie dans le volume de mesure; les particules qui traversent le volume éclairé, diffusent un signal modulé. Dans la deuxième technique, c'est le décalage Doppler de la fréquence de la lumière diffusée qui est mesuré.

4.3.3.2 VÉLOCIMÉTRIE LASER À EFFET DOPPLER.

Lorsqu'un rayonnement est émis (ou reçu) par une source (ou récepteur) en mouvement, sa fréquence varie avec ce mouvement. Cet effet a d'abord été énoncé en 1842 pour les signaux acoustiques par le Physicien J. Doppler, puis vérifié plus tard pour les signaux optiques. Considérons une source fixe émettant un rayonnement à la fréquence v. Le décalage Δv entre la fréquence v' du signal réfléchi et la fréquence v est donné par la relation :

$$(4.3-18) \qquad \frac{\Delta v}{v} = \frac{2V}{c}$$

Pour obtenir la vitesse V de la cible en mouvement, il suffit de mesurer la fréquence Δv .

Le dispositif le plus simple permettant d'illustrer le principe du vélocimètre à effet Doppler est montré ci-après. Il se compose d'un interféromètre de Michelson dont l'un des miroirs est porté par la cible en mouvement. A la place d'un miroir, on peut d'ailleurs utiliser un coin de cube pour faciliter l'alignement. Il est possible, à l'aide de ce dispositif, de mesurer des différences de fréquences de l'ordre de 1 Hz, soient des vitesses aussi faibles que 1 micron par seconde.

L'utilisation d'un miroir ou d'un coin de cube pour renvoyer le signal, n'est pas indispensable. Il est possible d'effectuer la mesure de vitesse en utilisant le rayonnement diffusé par une surface quelconque. C'est ainsi qu'il existe des radars optiques (encore appelés LIDAR) pour l'étude de l'atmosphère ou encore des radars optiques miniature pour repérer les conducteurs un peu trop pressés sur les autoroutes.





Pour chaque déplacement du coin de cube (CC) d'une distance de λ, la différence de marche entre les 2 faisceaux reçus par le photodétecteur varie de λ/2. Les franges d'interférence varient donc à une cadence égale à 2 fois la vitesse du miroir, exprimée en nombre de longueurs d'onde par seconde. Le signal de défilement peut être détecté et transformé en ondes acoustiques par un haut parleur (HP).

4.3.3.2.1 Le radar optique ou LIDAR

Le radar à ondes centimétrique présente des inconvénients qui peuvent être éliminés avec l'utilisation d'un faisceau laser. Il est possible en particulier, aux longueurs d'onde voisines du micron, d'obtenir un faisceau peu divergent (de l'ordre de λ /D, D étant le diamètre de l'optique d'émission), ce qui permet de scruter une direction très bien définie. Le radar optique ou LIDAR (Light Detection and Ranging) est utilisé pour déterminer les paramètres de l'atmosphère : localisation et densité des nuages de polluants, absorptivité des différences couches de l'atmosphère avec une résolution spatiale voisine du mètre, mesure de la vitesse du vent.

Le principe de fonctionnement du Lidar est similaire à celui du télémètre à laser impulsionnel décrit précédemment [Farcy.93]. Une impulsion laser de courte durée est envoyée vers la zone à analyser. Les particules de l'atmosphère (poussières, molécules du gaz atmosphérique ou des polluants) diffusent le rayonnement reçu. La partie rétrodiffusée est interceptée par une antenne placée près de l'émetteur. L'analyse du rayonnement détecté donne des informations sur la nature, la quantité, la position et la vitesse de déplacement des constituants atmosphériques.

La mesure de vitesse est basée sur la mesure du décalage Doppler observé sur la fréquence du rayonnement rétrodiffusé par des particules en mouvement. Dans le cas où le signal émis se présente sous la forme d'un train d'impulsions, de période ΔT , la période ΔT ' mesurée dans le signal rétrodiffusé par des particules se déplaçant à une vitesse V, suivant une direction faisant un angle α avec la direction visée, est donnée par l'expression :

...

(4.3-19)
$$\Delta T' = \Delta T \frac{1 + V \cos \alpha}{c}$$

Si le signal est émis en continu à la fréquence ν , on obtient pour le rayonnement rétrodiffusé, une fréquence ν ' donnée par :

(4.3-20)
$$v' = \frac{v}{1 - \frac{V \cos \alpha}{c}}$$

Les lasers fréquemment utilisés dans les lidars sont les lasers à CO2 et les lasers à Nd:YAG.

Une version du Lidar, utilisée en aéronautique a été développée pour la mesure de la vitesse relative de l'air par rapport à un aéronef en vol, dans le but de repérer les changements de direction du vent à une distance de quelques centaines de mètres. Le cisaillement de vent souvent rencontré au voisinage du sol est en effet à l'origine de nombreux accidents au cours de la phase d'atterrissage. Le LATAS (Laser True Airspeed System) commence à être installé sur les avions de ligne.

4.3.3.3 MESURES DE VITESSES D'ÉCOULEMENT DES FLUIDES : ANÉMOMÉTRIE LASER

4.3.3.3.1 (Mesure de vitesse dans un écoulement liquide ou gazeux par génération de franges d'interférence dans un liquide).





Fig. 4.3-14 : Vélocimétrie laser par génération de franges d'interférences.

M : Miroir ; MST : Miroir semi-transparent.

Les deux faisceaux, en se recoupant forment en leur intersection un réseau de franges d'interférence. L'écoulement à analyser se fait suivant l'axe x'x. Des particules, portées par l'écoulement; diffusent vers le photodétecteur un signal modulé par les franges.

Deux faisceaux faisant un angle θ et issus du même laser, sont introduits dans l'écoulement à étudier. Dans le volume où les deux faisceaux se superposent, apparaissent des franges d'interférence. La distance entre deux franges est égale à :

(4.3-21)
$$d = \frac{\lambda}{2\sin\frac{\theta}{2}}.$$

Lorsqu'une particule traverse le milieu à cet endroit, elle diffuse un signal modulé. Un détecteur transforme le signal modulé en signal électrique qui est envoyé sur un analyseur; celui génère un train d'impulsions dont la fréquence de répétition F est reliée à l'interfrange et à la vitesse v de la particule. La vitesse de la particule se déduit de la relation suivante :

(4.3-22)
$$v = F \frac{\lambda}{2\sin\frac{\theta}{2}}$$

Les vitesses qui peuvent être mesurées par cette technique, se situent entre une fraction de mètre par seconde et une centaine de kilomètre par seconde. La détermination de 3 composantes de vitesse nécessitent l'emploi de 3 faisceaux laser, créant 3 réseaux de franges.

4.3.3.3.2 Anémométrie laser par mesure de décalage de fréquence dû à l'effet Doppler.

La lumière diffusée par un fluide en mouvement subit un décalage de fréquence Ω dû à l'effet Doppler. Il est parfois possible de mesure ce décalage et d'en déduire la vitesse des particules diffusantes et de caractériser ainsi l'écoulement.



La mesure du décalage de fréquence peut être directe, comme indiquée sur la figure ci-après.

Fig. 4.3-15 : Vélocimétrie laser par mesure directe du décalage Doppler.

Un faisceau laser de vecteur d'onde \vec{k}_0 éclaire un fluide en mouvement. Les particules entraînées par le fluide diffusent partiellement la lumière. La fréquence de la lumière diffusée diffère de celle de la lumière incidente d'une quantité δv_D égale à :

(4.3-23)
$$\delta v_{\rm D} = \frac{1}{2\pi} \left(\vec{k}_D - \vec{k}_0 \right) \, . \, \vec{v}$$

La mesure directe de δv_D étant difficile pour les vitesses faibles, on utilise plus couramment la technique du battement. Pour cela le liquide est éclairé par deux faisceaux de vecteurs d'onde légèrement différents \vec{k}_{01} et \vec{k}_{02} (figure).

Les deux ondes diffusées subissent un décalage Doppler donné par la relation ci-dessus. Le signal reçu par le photodétecteur est alors caractérisé par un battement résultant de la superposition de deux signaux de fréquences voisines. La fréquence de battement est égale à :

(4.3-24)
$$\Omega = \frac{1}{2\pi} \left(\vec{k}_{d2} - \vec{k}_{d1} \right) \cdot \vec{v} .$$

Si α est l'angle que fait le vecteur vitesse avec la direction d'observation et θ l'angle entre le deux faisceaux incidents, la fréquence de battement est égale à :

(4.3-25)
$$\Omega = \frac{2 \, \mathrm{V} \, \mathrm{sin} \, \alpha}{\lambda} \, \mathrm{sin} \, \frac{\theta}{2}$$

Dans le cas le plus favorable (écoulement perpendiculaire à la bissectrice de l'angle entre les faisceaux d'éclairage), la précision sur la mesure de vitesses de quelques cm.s⁻¹ est inférieure au pourcent. Il est possible de mesurer avec cette technique des vitesses comprises entre 0.1 mm.s⁻¹ et 100 m.s⁻¹ [Orszag 1980].

L'anémométrie laser trouve des applications en mécanique des fluides mais aussi en biologie et dans les études atmosphériques.



Fig. 4.3-16 : Vélocimétrie laser par mesure du décalage Doppler : méthode du battement entre deux fréquences voisines.

L'écoulement est éclairé par deux faisceaux issus du même laser et faisant entre eux un angle θ . Les deux ondes lumineuses diffusées sont reçues par un photodétecteur. Le signal fourni par le détecteur est caractérisé par un battement dont l'analyse permet de remonter à la vitesse de l'écoulement au point où les deux faisceaux se rencontrent. En introduisant un décalage de fréquence connu (utilisation d'une cellule acousto-optique) sur l'un des faisceaux incidents, il est possible de déterminer le sens de l'écoulement.

4.3.3.4 MESURE DE VITESSES ANGULAIRES : LE GYROMÈTRE À LASER.

Un gyromètre à laser permet de mesurer des vitesses angulaires par comptage de franges résultant de l'interférence entre deux ondes parcourant en sens inverse une ligne fermée. Considérons un anneau en rotation parcourue par deux ondes O^+ et O^- émises par un même milieu (figure) ; l'anneau peut être constitué par une fibre optique . La vitesse de la lumière étant constante, l'onde qui tourne dans le même sens que l'anneau doit parcourir une distance plus grande que l'onde parcourant l'anneau dans l'autre sens. La cavité présente donc deux longueurs distinctes L^+ et L^- pour les ondes O^+ et O^- . Pour un trajet circulaire de rayon R et de périmètre L, tournant à la vitesse ω , la différence des chemins des deux ondes est égale à :

(4.3-26)
$$L^+ - L^- = \frac{2R \omega L}{c} = \frac{4\pi R^2 \omega}{c}$$

L'écart relatif de longueurs d'onde est donné par la relation :

(4.3-27)
$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{2R\omega}{c}$$
, ce qui correspond à un écart en fréquence égal à :
(4.2.29) $2R\omega$

$$(4.3-28) \qquad \qquad \delta v = \frac{2100}{\lambda}$$

Pour une cavité quelconque de périmètre L enfermant une aire A, on a:

(4.3-29)
$$\delta v = \frac{4 A \omega}{L c}.$$

Le décalage de fréquence est connu sous le nom d'effet Sagnac.

En pratique pour mesurer une vitesse angulaire, on peut utiliser un laser à cavité en anneau (figure ci-dessous). Le miroir semi-transparent laisse passer les deux ondes se propageant en sens inverse; celles-ci sont ensuite sont superposées sur un détecteur. Lorsque la cavité est en rotation, on observe une modulation à la fréquence de battement dans le signal détecté. Une vitesse angulaire aussi petite

que 10^{-2} degré par heure peut être mesurée. De plus, contrairement aux gyromètres mécaniques, le gyromètre optique est insensible aux accélérations et le problème de l'usure ne se pose pas.

La figure ci-après montre un gyromètre à laser : l'anneau dans lequel circule les deux ondes optiques est constitué par la cavité du laser, de forme triangulaire. Il est également possible de réaliser l'anneau en fibre optique et de placer le laser à l'extérieur. En faisant un grand nombre de boucles avec la fibre, il est possible d'augmenter le chemin optique et simultanément, la sensibilité de la mesure.



Fig. 4.3-17 : Mesure de vitesse angulaire par laser.

(a) Les paramètres utilisés dans le texte montrés pour le cas d'un disque en rotation.

(b) Configuration possible pour un gyromètre optique. Un tube de laser est introduit dans l'une des branches d'une cavité de forme triangulaire. Dans ce type de cavité, deux ondes se propageant en sens contraire coexistent. Si la cavité est en rotation, les deux ondes ont des

fréquences différentes. En les faisant interférer en dehors de la cavité, il est possible de mesurer la différence entre les deux fréquences et de déterminer ainsi la vitesse de rotation.

M : Miroir à réflexion totale; MST : miroir semi-transparent.

4.3.4 HOLOGRAPHIE.

.

La métrologie optique dimensionnelle, autrefois limitée aux objets polis, a pu être étendue aux objets diffusants de formes quelconques grâce aux lasers. Toute l'information d'amplitude et de phase dans la lumière diffusée par un objet peut être enregistrée par codage interférométrique avec une onde de référence. Cette technique, appelée holographie, permet aussi de garder en mémoire la forme tridimensionnelle d'un objet quelconque et de la restituer ultérieurement.

4.3.4.1 ENREGISTREMENT D'UN HOLOGRAMME.

Le montage d'enregistrement d'un hologramme est montré ci-après. Le faisceau cohérent issu d'un laser est divisé en deux par une lame semi-transparente. Un premier faisceau est utilisé pour éclairer l'objet; le deuxième faisceau éclaire directement une plaque photosensible. Cette plaque reçoit simultanément la lumière diffusée par l'objet. Le matériau photosensible de la plaque enregistre le réseau d'interférences ainsi obtenu.



Fig. 4.3-18 : Schéma du montage d'enregistrement d'un hologramme.

LST : Lame semi-transparente; L : Lentille ; M : Miroir.

La restitution de l'onde en provenance de l'objet peut se faire, après développement de la plaque photosensible suivant le montage ci-après. L'hologramme est replacé sur son support; le faisceau objet est coupé et l'objet est enlevé. Le faisceau de référence en passant à travers la plaque est diffracté par le réseau de franges figé lors de l'enregistrement. Le premier ordre de diffraction a les propriétés de l'onde qui était issu de l'objet dans le montage précédent. Un observateur placé derrière la plaque aura l'impression de voir à travers celle-ci, l'objet tel qu'il est apparu, éclairé par le faisceau dit 'objet'.



Fig. 4.3-19 : Schéma du montage de restitution d'un hologramme.

4.3.5 MÉTROLOGIE DE SPECKLE.

On appelle 'speckle' (du mot anglais pouvant être traduit en français par 'petite tache') l'aspect granuleux que présente une surface diffusante éclairée par une lumière cohérente. Ce phénomène est dû aux interférences sur la surface de détection (y compris l'œil) entre les ondes issues des divers points de la surface éclairée. La distribution d'intensité semble alors aléatoire mais est en réalité intimement liée à la microstructure de la surface éclairée. Il est possible d'utiliser cette propriété pour caractériser la rugosité d'une surface ou d'en observer ses déformations lorsque celle-ci se trouve soumise à des contraintes.

4.3.6 APPLICATIONS DIVERSES DES LASERS AU CONTRÔLE.

4.3.6.1 ALIGNEMENT PAR FAISCEAU LASER.

Le faisceau laser est un moyen idéal pour positionner avec précision des éléments le long d'une ligne droite ou par rapport à un plan. Le laser apporte des possibilités nouvelles par rapport à des instruments comme la lunette ou le théodolite. Le faisceau d'un laser à HeNe de très faible puissance constitue une ligne droite bien définie qui peut être orientée suivant une direction quelconque à l'aide d'un miroir.

Un laser d'alignement doit avoir une faible divergence et une très bonne stabilité de centrage. La divergence du faisceau laser, bien que faible, n'est pas nulle (voisine du milliradian). Dans certains cas il est souhaitable que le faisceau garde le plus petit diamètre possible sur une grande distance de propagation. Pour arriver à ce résultat, on utilise des composants optiques pour diminuer la divergence naturelle du rayonnement. La divergence est diminuée par augmentation du diamètre à l'aide d'un système afocal (figure 9-18). Les relations suivantes sont vérifiées:



Fig. 4.3-20 : Diminution de la divergence d'un faisceau laser à l'aide d'un objectif afocal.

L1 et L2 : Lentilles divergentes de distances focales f1 et f2 ; d1.2: diamètres du faisceau;

 θ_1 ; divergences du faisceau à l'entrée ; θ_2 ; divergences du faisceau en sortie.

Afin d'obtenir un faisceau de grand diamètre, on utilise un système à miroirs du type cassegrain ou un système axiconique (figure).



Fig. 4.3-21 : Expanseur de faisceau

(a) Expanseur de faisceau de type Cassegrain - (b) Expanseur axiconique de faisceau.

Stabilité du faisceau de laser d'alignement :

1 - au niveau de la source de rayonnement. Il est nécessaire d'utiliser un laser stabilisé en direction muni d'un système de pointage très précis en sortie. Le faisceau d'un laser courant présente des fluctuations de direction d'environ 10 secondes d'arc pour une variation de 1°C de la température. Avec une stabilisation, les fluctuations peuvent être réduites à 1 seconde d'arc. Le faisceau doit être également bien centré sur le boîtier. Les lasers d'alignement présentent une précision de centrage de 0,02 mm et une stabilité de 0,01 mm par heure.

Un système optique de correction de direction peut être ajouté à la sortie du laser.

2 - au cours de la propagation. Les variations d'indice du milieu de propagation, en particulier dues aux variations de température, dévient le faisceau de la trajectoire rectiligne. Un gradient de température $\frac{dT}{dx}$ dans un milieu d'indice n provoque à la distance z de la source un décalage Δx de la trajectoire tel que :

$$(4.3-31) \qquad \Delta x = \frac{-z^2(n-1)}{nT} \frac{dT}{dx}.$$

Précision de centrage du faisceau à la réception.

Afin d'obtenir un repérage précis de la position du faisceau au niveau du détecteur, on peut transformer le faisceau par une <u>lame de phase</u> qui transforme le profil gaussien en une figure de diffraction ayant la forme d'une croix Pour obtenir une précision de centrage meilleure que 0,1 mm, on utilise un <u>détecteur à plusieurs secteurs</u> indépendants et un système électronique pour comparer les flux reçus par les différents éléments du détecteur. L'appareil peut alors être couplé à un système de positionnement automatique d'un l'objet par rapport au centre du faisceau. Si le faisceau a un profil gaussien et si l'atmosphère est parfaitement stable, il est possible à l'aide d'un détecteur à quadrants, d'effectuer un positionnement avec une incertitude de 0,07 mm à 100 m. Un ensemble de quatre détecteurs indépendants disposés en croix permet un alignement avec une incertitude de 0,05 mm à 10 m et 0,2 mm à 100 m.

Matérialisation de plans par faisceau laser.

Un plan de référence peut être obtenu par les deux techniques suivantes:

- étalement du faisceau à l'aide d'une lentille cylindrique,
- balayage du faisceau à l'aide de miroirs ou prismes tournants.

Un plan perpendiculaire à un direction peut être obtenu à l'aide d'un penta-prisme porté par une monture en rotation (figure ci-après).



Fig. 4.3-22 : Matérialisation d'un plan perpendiculaire à une direction donnée à l'aide d'un penta-prisme en rotation.

Le faisceau en sortie du prisme balaye un plan perpendiculaire à la direction du faisceau incident.

Capteur de position de faisceau :

L'alignement et le positionnement par faisceau laser est facilité par l'emploi de détecteurs bidimensionnels. Il en existe de deux types :

- les détecteurs à quadrants et
- les détecteurs à effet latéral (figure ci-après).



Fig. 4.3-23 : Photodétecteurs bidimensionnels.

Le détecteur à quadrants (a) est constitué de 4 détecteurs distincts juxtaposés. Le détecteur à effet latéral (b) est constitué d'une surface photosensible continue avec 4 sorties. Le signal reçu par une borne est d'autant plus grand que la distance entre le point éclairé et la borne est faible. En combinant les quatre signaux de sortie il est possible de trouver la position du point d'impact du faisceau lumineux sur le détecteur.

4.3.6.2 ANALYSE D'ÉTAT DE SURFACE. RUGOSIMÉTRIE.

L'analyse de la lumière diffusée par une surface rugueuse permet de caractériser l'état de cette surface. La figure ci-après montre un exemple de montage d'observation. La surface est éclairée par un faisceau laser. Une lentille perpendiculaire à la direction de réflexion spéculaire forme une image de la surface. La distribution d'intensité dans le plan focal de la lentille permet, après comparaison avec des modèles théoriques de décrire la rugosité de la surface. Cette analyse n'est possible que pour certaines surfaces.



Fig. 4.3-24 : Analyse de la rugosité d'une surface.

(a) Montage expérimental ; (b) Distribution d'intensité dans le plan focal de la lentille. α est la distribution angulaire autour de la direction de réflexion spéculaire (cas du miroir parfait).

4.3.6.3 MESURES OPTIQUES SANS CONTACT : CAPTEURS DE PROXIMITÉ ET CONTRÔLE DIMENSIONNEL.

Il existe un grand nombre de capteurs et de techniques utilisant la lumière comme moyen de mesure, de repérage dans l'espace ou de contrôle de dimensions [Opto.91. Suivant le cas, on utilise, :

- un système de vision avec caméra CCD, carte d'acquisition d'images et logiciel de traitement des images, ou

- un capteur simple intégrant un laser, des optiques de mise en forme (focalisation et/ou balayage du faisceau), un photodétecteur et un boîtier électronique de traitement. Il est possible de s'affranchir des rayonnements parasites en modulant le faisceau et en utilisant une détection synchrone.

Nous passons en revue ci-après quelques dispositifs correspondant au deuxième groupe.

<u>Système confocal utilisé comme capteur de proximité</u>. L'emploi de faisceaux laser permet la réalisation de palpeurs sans contact mécanique. Un exemple est présenté ci-après.



Fig. 4.3-25 : Exemple de capteur de proximité : le système confocal.

La dimension du faisceau au niveau de la petite ouverture (O) placée devant le détecteur D dépend de la distance D. Lorsque l'objet est au foyer de la lentille (position 1 sur le dessin), le signal détecté est maximum; lorsque l'objet s'éloigne, le signal diminue. Il est ainsi possible, par une boucle de contrôle, de positionner l'objet au foyer de la lentille. <u>Mesure de petits diamètres</u>. Le montage présenté sur la figure ci-après indique une technique de mesure de diamètres de fils fins à partir de la tache de diffraction du faisceau intercepté par le fil. Le diamètre est donné par la relation : $D \approx L \frac{\lambda}{\Delta x}$.



Fig. 4.3-26 : Mesure de petits diamètres

 (a) Principe de mesure.
 (b) Distribution d'intensité dans la tache de diffraction observée sur l'écran. La dimension transversale de l'objet est obtenue à partir de la largeur du lobe central de la figure de diffraction.

<u>Mesure de profil</u>. La figure ci-après présente un montage qui peut être utilisé pour faire un contrôle dimensionnel avec un faisceau laser. Le faisceau laser balaie l'espace où se trouve l'objet, par réflexion sur un miroir polygonal (MP) en rotation. L'électronique qui suit le détecteur enregistre le signal en fonction de la position du miroir. La dimension transverse de l'objet peut être calculée à partir de la forme du signal reçu. Pour un objet de forme cylindrique, le diamètre est proportionnel au temps d'obturation du détecteur par l'objet. Une précision de quelques microns peut être obtenue pour une étendue de mesure d'une dizaine de centimètres.



Fig. 4.3-27 : Contrôle dimensionnel par balayage de faisceau laser.

(a) Schéma de l'appareil ; (b) Forme du signal détecté.

La dimension transversale de l'objet est obtenue à partir de la durée d'obturation du faisceau par l'objet.

4.3.7 VISION ROBOTIQUE.

4.3.7.1 INTRODUCTION

Les manipulateurs mécaniques et le contrôle par ordinateur largement répandus dans les ateliers de production ([Robot.82], [Besançon.88]). Le contrôle automatique de fabrication nécessite cependant une connaissance aussi complète que possible de l'environnement. Les progrès continuent dans les deux domaines suivants :

- variété et performances des capteurs,

- rapidité de traitement des informations par les ordinateurs, en particulier des images.

On peut distinguer deux types de capteurs qui permettent au robot, et à l'ordinateur qui le contrôle, de connaître son environnement et de suivre son évolution [JR.88] :

- les capteurs internes qui renseignent sur l'état interne de la machine, les paramètres mesurés étant :

. les positions des éléments mobiles du robot,

- . les vitesses linéaires,
- . les vitesses rotationnelles,
- . les forces appliquées;
 - les capteurs externes qui renseignent sur l'environnement, par exemple :
- . les capteurs de forces et de moments (jauges de contraintes),
- . les capteurs de contact,
- . les capteurs de proximité (par induction, à effet Hall, capacitifs, à ultrasons, ...)
- . les capteurs de distances,

. les capteurs de vision. C'est évidemment dans cette dernière catégorie de capteurs qu'on attend beaucoup de capteurs d'image et des systèmes de traitement associés. Le capteur n'est que le premier élément d'une chaîne aboutissant au système d'analyse et de prise de décision.

4.3.7.2 Les composants d'un système de vision robotique.

Il s'agit d'obtenir des informations sur une pièce sous forme d'images et les envoyer à un ordinateur dans un format que celui-ci peut comprendre et analyser. Les points suivants doivent être considérés pour l'acquisition d'images: l'éclairage, la caméra, les optiques, l'électronique servant à transformer les images en suite de nombres pour l'ordinateur.

Un système de vision robotique comprend :

- une caméra vidéo,
- un système d'éclairage et

- un ordinateur pour permettre à la machine de 'connaître' son environnement et prendre des décisions en fonction des informations qu'elle reçoit sur l'évolution de cet environnement.

Un processus de vision robotique se décompose suivant les phases ci-après :

- acquisition d'images,
- analyse d'images,
- prise de décision,
- envoi d'ordres vers des organes extérieurs.

La vision robotique fait appel aux techniques développées dans plusieurs disciplines: photonique, électronique, informatique.



Fig. 4.3-28 : Système de vision robotique dans son environnement

1 : éclairage ambiant; 2 : éclairage structuré; 3 : caméra.

4.3.7.2.1 Quelques problèmes rencontrés en vision robotique [Page.85]

Un capteur d'image unique ne permet pas toujours d'obtenir les informations dans les meilleures conditions. Les problèmes suivants se posent [Page.85] :

- parallaxe : pour une caméra fixe, le contour vrai est obtenu uniquement si la caméra est audessus de l'objet.

- système de coordonnées : Il est difficile de conserver la calibration du robot et de la caméra pendant une longue période.

- résolution : Un système de faible résolution porté par le bras du robot est préférable à un système de haute résolution indépendant.

En général il vaut mieux distribuer les capteurs autour de la zone de travail

4.3.7.3 ÉCLAIRAGE.

Parmi les critères devant mener au choix d'un système d'éclairage, on peut citer :

- la nature des informations recherchées,

- les caractéristiques spatiales de réflexion et d'absorption de rayonnement du sujet à observer et de l'environnement,

- les caractéristiques spectrales de réflexion du sujet,
- la taille et la géométrie de l'objet.
- Ces critères étant bien maîtrisés, il devient plus facile de choisir
- un type d'éclairage,
- la disposition des sources d'éclairage et des capteurs de flux ou d'images.



Fig. 4.3-29 : Capteur photonique. Éléments associés et leurs paramètres.

4.3.7.3.1 Caractéristiques spatiales de la lumière renvoyée

Les caractéristiques spatiale de la lumière renvoyée par l'objet dépendent de l'état de surface des objets. Les trois cas suivants peuvent se présenter (voir figure) :

- la surface est diffusante, la lumière est redistribuée dans toutes les directions et il est alors facile d'éviter les zones d'ombre; cette situation se prête bien à une prise d'image;

- la surface présente un poli spéculaire; la surface réfléchit la lumière suivant les lois de l'optique géométrique sans détruire sa cohérence spatiale.

- l'objet éclairé réfléchit dans la direction incidente.



4.3.7.3.2 le type d'éclairage,

- soit dirigé,

- soit <u>structuré</u> : une ligne lumineuse est projetée sur l'objet. Un laser est en général utilisé pour ce type d'éclairage. Lorsque les angles entre la direction d'éclairage et la direction d'observation sont connus, les hauteurs des différents points de l'objet peuvent être déterminées par triangulation.



Fig. 4.3-31 : Éclairage structuré

(a) Montage expérimental.

1 : laser; 2 : lentille d'élargissement de faisceau ou système de balayage; 3 capteur d'image

(b) Image vue par le capteur en l'absence d'objet

(c) Image vue par le capteur en présence de l'objet.





Le faisceau laser passe à travers un modulateur acousto-optique, puis est réfléchi par un miroir polygonal (1), avant d'être réfléchi par un miroir en rotation (2). Pour une position donnée des 3 éléments, il existe une seule position de la surface de l'objet (3) pour laquelle le détecteur reçoit un signal. Il est ainsi possible de comparer la surface d'un objet à une surface de référence [Page.85].

4.3.7.3.3 la disposition des sources d'éclairage par rapport aux capteurs de flux ou d'images.

1- la source d'éclairage et la caméra sont situés de part et d'autre de l'objet. Cette configuration est utilisée quand la silhouette doit être reconnue.

2- l'objet est éclairé de face, du même côté que la caméra.



Fig. 4.3-33 : Eclairage

a) Éclairage par plusieurs sources du même coté que le capteur d'image



- Le capteur et la source à éclairage dirigé sont disposés de façon à faciliter la visualisation d'un défaut.
 - 1 : direction de réflexion d'une surface quasi-plane sans défauts
- 2 : lumière partiellement diffusée par un défaut de surface



C - Éclairage à travers une lame séparatrice

4.3.7.3.4 Autres paramètres du dispositif d'éclairage.

Les paramètres suivants du dispositif d'éclairage doivent être également pris en compte :

- propriétés spectrales de la source,
- le rendement énergétique,
- durée de vie et problèmes de maintenance,
- coût.

4.3.7.4 SYSTÈME OPTIQUE.

La distance focale de l'objectif servant à former une image sur une mosaïque de photodétecteurs ou une photocathode, doit être choisie en fonction de la dimension de la surface à observer et de la distance entre objet et caméra. Un objectif à grandissement important introduira plus facilement des distorsions dans l'image formée. Dans la plupart des applications, la taille de l'objet est supérieure à 8 mm. La taille de l'image est en général de 6,6 mm sur 8,8 mm. Le problème de la distorsion et de la profondeur de champ limitée ne se pose que pour les objets de très petite taille.

4.3.7.5 CAMÉRA.

La caméra se compose du capteur d'images et de l'électronique de lecture du signal. Le capteur d'image est constitué par

- un tube à vide du type vidicon, mais de plus en plus fréquemment

- une mosaïque de détecteurs CCD [Martins.88]. Les mosaïques sont linéaires(512 ou 1024 éléments) ou bidimensionelles (320x240, 512x512 ou 1024x1024 éléments). Les capteurs CCD ont remplacé les tubes vidicon pour la plupart des applications industrielles. L'observation simultanée par plusieurs caméras permet la stéréovision; les performances des systèmes de vision stéréoscopique sont limitées par la rapidité du traitement électronique des images.

Les points suivants doivent être vérifiés au niveau de la caméra :

- l'intensité du signal reçu,
- la réponse spectrale,
- le contraste dans l'image obtenu,
- le temps de réponse en présence d'un objet en mouvement.

4.3.7.6 ÉLECTRONIQUE.

L'image acquise par le capteur est transformée en un signal électronique qui doit être traité. L'électronique qui suit le capteur sert, dans le cas d'un dispositif à transfert de charges, à transférer les charges dans une mémoire où elles sont lues par un ordinateur. Dans le cas des caméras CCD, l'image est numérisée au niveau des détecteurs alors que dans une caméra du type vidicon le signal existe d'abord sous forme analogique avant d'être numérisée.

4.3.7.7 TRAITEMENT DES IMAGES.

L'ordinateur doit prendre des décisions en fonction des informations extraites des images. L'extraction des informations utiles se fait par le biais d'un ensemble d'opérations destinées éliminer le bruit, à augmenter le contraste, à reconnaître et à classer les différents éléments de l'image. L'analyse d'une image peut s'avérer extrêmement complexe. Une image acquise par un détecteur 512x512 est représentée par 262 144 nombres. L'analyse en temps réel d'un tel nombre d'informations n'est pas toujours possible. Afin d'augmenter la vitesse de traitement, des algorithmes de simplification sont parfois utilisés. Dans certains cas, on peut par exemple réduire le nombre de niveau de gris à deux.

Les informations peuvent être classées en informations spatiales (les relations dans la répartition des pixels dans l'image) et en informations spectrales (couleur et intensité des pixels).

On fait appel à des langages évolués pour réaliser ces traitements, le langage 'C' étant le plus couramment utilisé.

4.3.7.8 APPLICATIONS DE LA VISION ROBOTIQUE

- inspection: l'inspection par un opérateur humain n'est pas très fiable (85 % d'efficacité en moyenne dans la recherche de composants défectueux). Avec la machine on atteint 99% d'efficacité. Le robot ne connaît ni l'ennui, ni la fatigue.

- contrôle de processus, tri; en électronique on réalise un maximum de contrôles en début de fabrication afin de corriger ou d'éliminer les pièces défectueuses.

- guidage de robots (10% des applications de vision robotique). Des robots de soudage équipés de système de vision existent sur le marché.

4.3.7.9 BIBLIOGRAPHIE.

- [Bender] 'Correction of distance measurements for the fluctuation atmospheric index of refraction'; P. L. Bender, J. C. Owens; J. Geophys. Res., 70, 2461, 1965.
- [Bufton] Bufton J., Garvin J. B., Cavanaugh J., Ramos-Izquierdo; « Airborne lidar for profiling of surface tropography », Optical Engineering, Vol. 30, N°1 (Jan. 1991)
- [CSO] Documentation commerciale de CSO (Compagnie des senseurs optiques), 38041 Grenoble Cedex.
- [Disa.81] 'L'anémométrie thermique et l'anémométrie Doppler à laser' ; Document de Disa Electronics, fabriquant d'anémomètre à laser, Publ. N°1207 F, 1981.

[Froome, 1961] 'Distance measurement by means of a light ray modulated at a microwave frequency'; K. D. Froome, R. H. Bradsell; J. Of Sci. Instr., 38, 458, 1961

[Farcy.93] « Applications des lasers », Ch IV, R. Farcy, Masson, 1993

[Froome, 1966] 'A new method for measurement of distances up to 5000 ft by means of a modulated light beam'; K. D. Froome, R. H. Bradsell; J. Sci. Instr., 43, 129, 1966.

[Lliboutry.92] Sciences géométriques et télédétection », L. Lliboutry, Masson, 1992

[Maillet, 1984] - H. Maillet; « Le laser « - Ed. Lavoisier - 1984

[Meier] 'The ME 5000 Mekometer - a new precision distance meter'; D. Meier, R. Loser, Internal publ. of Kern Co Ltd.

[Opto.91] « Systèmes de mesures optiques sans contact »; Document Spectec paru dans Opto N°62, (Mai-Juin 1991), pp20-24

[Orszag, 1980] - Orszag et Hepner - Les lasers et leurs applications. Masson. 1980

[Sc.vie.93] - « Attention, les mini radars sont arrivés » - H.-P. Penel, Science et Vie, N° 912, Sept. 1993, pp 128-131

[Sopra] - Documentation commerciale de SOPRA, 68, rue Pierre Joigneaux - 92270 Bois-Colombes.

[JR.88] Le Journal de la Robotique, N° 43 - Mai 88.

[Page.85] «Computer vision for robots »; SPIE proceeding Vol 595 - Cannes, (1985); «The orientation of difficult components for automatic assembly »; C. Page et H. Hassan in «Robot sensors »; Vol. 1 : vision; Ed A. Pugh - IFS Publications, Bedfort MK , UK;

[Robot.82] - Proceedings of conferences on robot visions and sensory control »; 3d (1982), 4th (1984), IFS Publications.

[Besançon.88] - « Vision par ordinateur en deux et trois dimensions »; J. E. Besançon, Eyrolles, Paris, (1988)

[Martins.88] 'Choosing CCDs for machine vision applications'; Ed Martins, Lasers Optronics, (juin 1988)