



Éléments de base de métrologie et introduction aux différentes techniques

André Chrysochoos, Yves Surrel

► To cite this version:

André Chrysochoos, Yves Surrel. Éléments de base de métrologie et introduction aux différentes techniques. Mesures de champs et identification en mécanique des solides, Hermes, pp.27-54, 2011, 978-2-7462-3112-2. hal-00832812

HAL Id: hal-00832812

<https://hal.science/hal-00832812>

Submitted on 11 Jun 2013

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Éléments de base de métrologie et introduction aux différentes techniques

Chapitre rédigé par A. Chrysochoos¹ et Y. Surrel²

Issu de l'ouvrage « Mesures de champs et identification en
mécanique des solides » ISBN 978-2-7462-3112-2

¹ André Chrysochoos, LMGC, UMR5508, CNRS, Université Montpellier 2

² Yves Surrel, visuol technologies, Saint Etienne France

Chapitre 1

Éléments de base de métrologie et introduction aux différentes techniques

1.1. Introduction

Les méthodes optiques de mesure de champ cinématiques connaissent depuis une quinzaine d'années une véritable révolution, liée bien entendu à l'évolution technologies d'acquisition et de traitement d'images. La thermographie infrarouge a également connu un bouleversement du fait des énormes progrès réalisés dans le domaine des caméras infrarouges. Par leur aspect souvent sans contact, par la richesse des informations qu'elles procurent, par leur rapidité et leur résolution, ces méthodes sont potentiellement d'un très grand intérêt à la fois dans le laboratoire du mécanicien expérimental et pour des applications industrielles.

Comme pour tout mesurage (l'acte de mesurer), il faut *qualifier* le résultat de mesure. C'est le domaine de la métrologie. Le but est de renseigner le plus complètement possible l'utilisateur sur la *qualité* des mesures obtenues. Une réelle difficulté pour la caractérisation métrologique est issue du fait que ce sont des méthodes de champ. La communauté des métrologues est beaucoup plus familière des mesures scalaires (longueur, tension...). Aujourd'hui, la métrologie des mesures de champ n'est pas encore complètement établie. Or, la propagation de ces techniques ne se fera efficacement lorsque les utilisateurs auront une vision plus claire de la manière d'évaluer les performances des systèmes qui leur sont proposés.

Chapitre rédigé par André Chrysochoos et Yves Surrel.

Le but de ce chapitre est d'abord de présenter quelques éléments et concepts de base dans ce domaine. Il ne prétend aucunement à l'exhaustivité, et son ambition est de dédramatiser certains concepts, pour que le dialogue entre chercheurs, développeurs et utilisateurs puisse se faire sur quelques bases clairement établies. Ensuite, on présentera succinctement les différentes techniques optiques de mesure, sur la base de leurs caractéristiques principales (codage de l'information, aspect interférentiel ou non, etc.).

Notons pour finir que les systèmes de mesure optiques de champ sont cependant complexes. La Fig. 1.1 indique schématiquement la structure typique d'une chaîne de mesure utilisant une caméra. On voit qu'il y a de nombreuses étapes avant de parvenir au résultat final qui intéresse l'utilisateur, et que de nombreux paramètres de construction ou de réglage peuvent rentrer en ligne de compte. Et surtout, il peut y avoir une étape de traitement logiciel dont les caractéristiques métrologiques peuvent être difficiles voire impossibles à obtenir dans le cas de systèmes commerciaux.

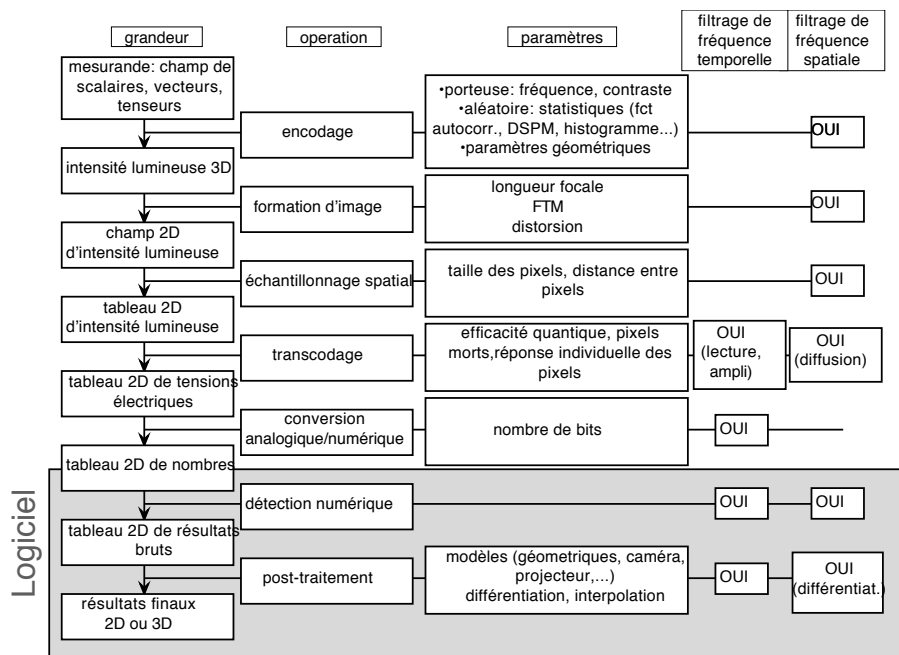


Figure 1.1. Représentation schématique des différents processus intervenant dans une chaîne de mesure par caméra optique.

1.2. Terminologie ; le VIM

1.2.1. Mesurage absolu ou différentiel

Comme dans tout domaine scientifique, la terminologie est essentielle. Plutôt que de lister d'emblée les principaux termes à employer (précision, sensibilité, résolution...), mettons nous à la place de l'utilisateur. Quelles sont les questions qu'il se pose en général, et dans quel contexte ? Ces questions, peu nombreuses en fait, amènent tout naturellement le ou les terme(s) métrologique(s) associé(s).

Pour simplifier, non nous mettons d'abord dans une perspective « scalaire » simple, c'est-à-dire que nous considérons pas l'aspect spatial. Autrement dit, nous nous intéressons à un mesurage en un point. Les questions que l'utilisateur se pose sont principalement les suivantes.¹

1) La mesure obtenue est-elle « vraie », « exacte », « proche de la réalité » ? Comment avoir confiance dans le résultat ?

2) L'appareil est-il « sensible » ? Voit-il de petites choses ?

Ces deux questions sont à la base d'une séparation de l'activité de mesurage en deux domaines bien distincts en pratique, et pour lesquels l'approche métrologique sera différente : le mesurage *absolu*, et le mesurage *différentiel*.

Mesurage absolu

On cherche ici à s'approcher de la « vraie » valeur du mesurande (la quantité à mesurer), par exemple pour garantir des spécifications fonctionnelles. La métrologie dimensionnelle en est un exemple évident. Du respect des cotes d'une pièce fabriquée va souvent dépendre sa qualité fonctionnelle (exemple trivial : respect des diamètres dans un système cylindre/piston). L'utilisateur s'intéresse donc à l'écart entre la mesure obtenue et la valeur vraie (la première des questions évoquée ci-dessus). Cet écart s'appelle l'*erreur*. Comme celle-ci est évidemment impossible à connaître (sinon il suffirait de corriger la mesure...), que faire ? L'approche qui est retenue par la métrologie est une approche *probabiliste*. Il va s'agir d'estimer la loi de distribution statistique de l'erreur commise, et de caractériser cette distribution par sa largeur, c'est-à-dire l'écart moyen, « typique », entre la mesure et la valeur vraie. On arrive tout simplement ici à la notion d'*incertitude* de mesure, qui renseigne l'utilisateur sur l'ampleur probable de l'erreur commise.

Pour mémoire, signalons qu'il y a une trentaine d'années, l'approche était plutôt de trouver une borne maximale de l'erreur commise. Les calculs associés à cette approche augmentaient indûment l'incertitude de mesure, puisque l'on considérait lors

1. Dans ce paragraphe, les termes entre guillemets sont ceux du langage courant, et n'ont pas forcément leur sens métrologique...

de ces calculs que toutes les causes d'erreurs jouaient en synergie de manière défavorable. Aujourd'hui, on prend en compte le fait que les causes d'erreurs statistiquement indépendantes se moyennent mutuellement dans une certaine mesure, autrement dit il est improbable qu'elles jouent toute défavorablement simultanément. Cela explique la différence entre certaines formules que l'on trouve dans les anciens ouvrages et celles utilisées aujourd'hui. Par exemple, si $c = a + b$ où a et b sont des mesurandes indépendants ayant les incertitudes Δa et Δb , la première approche (borne supérieure) aboutit à $\Delta c = \Delta a + \Delta b$ alors que l'approche actuelle donne $\Delta c = \sqrt{\Delta a^2 + \Delta b^2}$, dans un rapport non négligeable de 1,414 si $\Delta a = \Delta b$.

Mesurage différentiel

Il s'agit ici de comparer par soustraction la mesure que l'on fait à une mesure dite « de référence ». En mécanique des matériaux, ce sera le plus souvent une mesure dans l'état initial. Il est avantageux de faire des mesures différentielles, et ceci pour deux raisons :

- comme les conditions de mesures sont très proches, les possibles *erreurs systématiques* vont être éliminées (ou en grande partie éliminées) lors de la soustraction ; par exemple, des effets de distorsion² liés à l'objectif de la caméra utilisée seront pratiquement éliminés lors d'une mesure différentielle.

- l'incertitude de mesure ne joue plus que sur la *différence mesurée*, ce qui implique que l'on peut faire des mesures intéressantes même avec un système de qualité moyenne ; par exemple, imaginons un système de mesure de déplacements qui aurait une erreur systématique de 10 %. Il va de soit que des mesures absolues seraient affligées d'une erreur probablement inacceptable. Par contre, lors de mesures différentielles, ces 10 % ne se répercuteraient que sur la différence des déplacements entre la mesure de référence et la mesure finale ; donnons un exemple numérique : avec un premier déplacement de 100 μm et un deuxième de 110 μm , ce système hypothétique donnerait des valeurs mesurées de 90 et 99 μm , soit 10 μm d'erreur, inacceptable dans une application de positionnement absolu, par exemple ; par contre, le déplacement différentiel mesuré serait de 9 μm , et là l'erreur commise ne serait que de 1 μm .

Le deuxième exemple cité est l'occasion de souligner qu'il n'est pas possible d'utiliser l'incertitude relative (le « pourcentage d'erreur ») avec des mesures différentielles, puisque cette incertitude relative, rapport entre l'incertitude et la valeur mesurée, se réfère à une valeur différentielle, donc très petite, voire nominalement nulle. Le « pourcentage d'erreur » n'a donc aucun sens dans le cas d'une mesure différentielle. Il faut toujours dans ce cas se référer à l'incertitude *absolue*.

2. Déformation de l'image.

1.2.2. Principales notions

Nous considérons dans cette section les principaux termes de la métrologie. Ces termes sont *normalisés* par un document (*Vocabulaire international de métrologie*, ou familièrement, le « VIM », [VIM08]) qu'il est facile de se procurer par téléchargement gratuit sur le site du Bureau International des Poids et Mesures (www.bipm.org). Nous listons les notions dans un ordre que nous considérons comme d'importance décroissante.

1.2.2.1. Incertitude de mesure (measurement uncertainty)

Terme anglais : .

La définition du VIM est :

paramètre non négatif qui caractérise la dispersion des valeurs attribuées à un mesurande, à partir des informations utilisées

L'idée sous jacente est que le résultat d'un mesurage est une variable aléatoire caractérisée par une densité de probabilité centrée sur une certaine valeur moyenne statistique, et qui a une forme de courbe en cloche. La note 2 du VIM précise :

Le paramètre peut être, par exemple, un écart-type appelé incertitude-type (ou un de ses multiples)

Il s'agit bien de *caractériser la largeur* d'une distribution statistique. Il y a donc un caractère conventionnel dans cette caractérisation : largeur à mi-hauteur, largeur à $1/e$, écart-type...

Dans le milieu industriel, la demande pour caractériser la fiabilité d'un instrument peut être un peu différente : on souhaite le plus souvent avoir une valeur qui englobe totalement la courbe de dispersion, de manière à être « sûr » que la valeur vraie du mesurande soit à l'intérieur de l'intervalle donné. Bien entendu, on n'a jamais de certitude parfaite, mais on peut avoir des *intervalles de confiance* à x %, qui sont les intervalles dans lesquels la probabilité que la valeur vraie du mesurande soit présente est égale à x %. Par exemple, pour une distribution gaussienne de la probabilité du résultat de mesure, un intervalle de $\pm 3\sigma$, σ étant l'écart-type correspond à un intervalle de confiance de 99,5 %. C'est pourquoi on a créé la notion d'incertitude élargie, dont la définition dans le VIM est :

produit d'une incertitude-type composée et d'un facteur supérieur au nombre un

(L'incertitude « composée » est en quelque sorte l'incertitude finale que l'on obtient en ayant considéré toutes les causes d'incertitude ; on peut oublier ce terme dans

une première analyse, et considérer que l'on parle systématiquement d'incertitude-type composée quand on parle d'incertitude de mesure).

L'incertitude de mesure est la première notion à utiliser dans le cas d'un mesurage absolu.

Attention : les principales composantes de l'incertitude sont celle liée au bruit (fluctuation aléatoires de valeur moyenne nulle), et celle liée aux *erreurs systématiques*. La première peut être facile à estimer, voir ci-dessous §1.2.2.2.

1.2.2.2. *Résolution* (resolution)

La définition du VIM est :

plus petite variation de la grandeur mesurée qui produit une variation perceptible de l'indication correspondante

Voilà la notion à utiliser dans le cas d'un mesurage différentiel. Très concrètement, dans les méthodes optiques de mesure de champ, les bruits (optiques, électroniques, etc.) seront les facteurs limitant la résolution. Une définition pratique de la résolution que nous proposons dans ce cas est :

plus petite variation de la grandeur mesurée qui produit une variation qui sort du bruit de mesure.

Or, avec les techniques de champ, il est en général très facile de faire une *mesure* du bruit de mesure, puisqu'on a en général un grand nombre de pixels sur lesquels faire des statistiques significatives. Pour faire cette mesure, il suffit de faire deux mesures successives du même champ. Appelons $m_1(x, y)$ et $m_2(x, y)$ les deux mesures successives au point (x, y) . Ces mesures sont la somme du « signal » (la valeur du mesurande) s et du bruit b , soit :

$$\begin{cases} m_1(x, y) &= s(x, y) + b_1(x, y) \\ m_2(x, y) &= s(x, y) + b_2(x, y) \end{cases} \quad (1.1)$$

où le signal est le même, mais où il y a deux réalisations statistiques différentes du bruit. La différence des deux mesures est :

$$\Delta m(x, y) = m_2(x, y) - m_1(x, y) = b_2(x, y) - b_1(x, y) \quad (1.2)$$

En faisant l'hypothèse de *l'indépendance statistique* du bruit entre les deux mesures (ce qui est souvent le cas³, on peut évaluer l'écart-type du bruit b (on suppose *toujours*

3. Contre exemple : la turbulence atmosphérique peut avoir des temps de corrélation de quelques secondes, supérieurs à l'intervalle entre deux mesures si l'on n'y prend pas garde.

que les propriétés statistiques du bruit sont stationnaires...) en utilisant le théorème qui dit que la variance (carré de l'écart-type) de la somme ou de la différence de deux variables aléatoires statistiquement indépendantes est égale à la somme des variances de ces variables, soit :

$$\sigma^2(b_2 - b_1) = 2\sigma^2 \quad (1.3)$$

Un estimateur de la variance de la différence des bruits $b_2 - b_1$ est obtenu en calculant pour l'ensemble des pixels du champ $m_2 - m_1$ la variance arithmétique :

$$\tilde{\sigma}^2(\Delta m) = \frac{1}{N_{\text{pixels}}} \sum_{\text{pixels}} [\Delta m(x, y) - \overline{\Delta m}]^2 \quad (1.4)$$

où $\overline{\Delta m}$ est la valeur moyenne arithmétique de Δm dans le champ :

$$\overline{\Delta m} = \frac{1}{N_{\text{pixels}}} \sum_{\text{pixels}} \Delta m(x, y) \quad (1.5)$$

On obtient donc, pour la résolution r :

$$r = \sigma_b \approx \frac{1}{\sqrt{2}} \tilde{\sigma}(\Delta m) \quad (1.6)$$

Par rigueur mathématique, on a différencié ici avec un tilde les grandeurs statistiques pures (écart-type, variance) de leurs estimations obtenues en faisant des moyennes arithmétiques sur un grand nombre de pixels. Ce nombre de pixels étant la plupart du temps très grand (10 000 valeurs ne représentent que 100 pixels sur 100 pixels, soit une définition d'image très faible de nos jours), on pourra confondre sans risque les deux notions.

Insistons ici sur le fait que cette estimation de la résolution est très facile à faire, et devrait systématiquement être réalisée lors de mesures de champ.

La caractérisation de la résolution par le bruit de mesure « en sortie » est classique en thermographie infrarouge. On caractérise une caméra infrarouge par le NETD, *Noise Equivlent Temperature Difference*, qui n'est rien d'autre que le niveau de bruit de mesure en sortie rapporté à l'entrée, c'est à dire converti en la différence de température correspondant à un écart-type de bruit. Des variations de température de cette grandeur commenceront à « sortir du bruit », donc à être mesurables. Pour convertir un niveau de bruit en sortie en un niveau de mesurande à l'entrée, on se sert de la *sensibilité*.

1.2.2.3. Sensibilité (sensitivity)

La définition du VIM est :

quotient de la variation d'une indication d'un système de mesure par la variation correspondante de la valeur de la grandeur mesurée

Il s'agit du coefficient s qui relie une petite variation du mesurande (l'entrée e) à la petite variation correspondante de la mesure (la sortie m) :

$$s = \frac{\partial m}{\partial e} \quad (1.7)$$

La notion de sensibilité n'est pas toujours pertinente pour les méthodes optiques de champ. Par exemple, les algorithmes de corrélation fournissent un résultat directement exprimé en déplacement. Leur sensibilité est donc égale à 1. La méthode de la grille délivre quant à elle une phase lors de l'étape de détection. La relation entre la phase Φ et le déplacement u est :

$$\Phi = 2\pi \frac{u}{p} \quad (1.8)$$

où p est la période de la grille. La sensibilité selon le VIM est alors :

$$s = \frac{2\pi}{p} \quad (1.9)$$

Cette notion est en pratique assez peu usitée dans le domaine des méthodes optiques de champ.

1.2.2.4. Répétabilité (repeatability)

La définition du VIM est :

fidélité de mesure selon un ensemble de conditions de répétabilité

à laquelle il faut rajouter celle de la fidélité :

étroitesse de l'accord entre les indications ou les valeurs mesurées obtenues par des mesurages répétés du même objet ou d'objets similaires dans des conditions spécifiées

et des conditions de répétabilité :

condition de mesurage dans un ensemble de conditions qui comprennent la même procédure de mesure, les mêmes opérateurs, le même système de mesure, les mêmes conditions de fonctionnement et le même lieu, ainsi que des mesurages répétés sur le même objet ou des objets similaires pendant une courte période de temps

L'idée est en fait assez simple : la répétabilité est tout simplement lié à la fluctuation des mesures délivrées par *l'instrument de mesure seul*, en ayant exclu toute autre

variation extérieure (même opérateur, même objet mesuré, temps court entre deux mesurages, etc.). On est donc en fait dans le cas d'une évaluation du bruit de mesure lié à l'appareil seul.

La notion duale, qui considère au contraire des opérateurs, des temps, des lieux, voire des systèmes de mesure différents, est la *reproductibilité*.

1.2.2.5. *Étalonnage* (calibration)

Attention, le mot anglais *calibration* ne doit pas être utilisé en français. À noter que le terme calibrage qui existait a disparu du VIM dans sa dernière édition.

La définition du VIM est :

opération qui, dans des conditions spécifiées, établit en une première étape une relation entre les valeurs et les incertitudes de mesure associées qui sont fournies par des étalons et les indications correspondantes avec les incertitudes associées, puis utilise en une seconde étape cette information pour établir une relation permettant d'obtenir un résultat de mesure à partir d'une indication

L'étalonnage permet donc, à partir d'objets réalisant des valeurs connues du mesurande, d'identifier la fonction de transfert du système de mesure. Par exemple, pour un instrument à réponse linéaire, la mesure d'un seul étalon permet d'établir la pente de la droite (qui n'est rien d'autre que la sensibilité, voir ci-dessus) reliant le mesurande à la grandeur de sortie du système, ce qui permet de transformer cette grandeur de sortie en valeur de mesure.

Un étalon est une :

réalisation de la définition d'une grandeur donnée, avec une valeur déterminée et une incertitude de mesure associée, utilisée comme référence.

1.2.2.6. *Illustration*

On rappelle simplement ici un résultat élémentaire. Si l'on fait la moyenne arithmétique de N mesures nominalement identiques (on peut dire : faites dans les conditions de répétabilité, voir ci-dessus), on obtient une valeur que l'on peut également considérer comme une variable aléatoire, c'est-à-dire que la moyenne faite sur une autre série de N mesures donnerait un résultat légèrement différent. Le résultat classique est que l'écart-type des fluctuations de la moyenne de N mesures est égale à l'écart-type des fluctuations sur une mesure, divisé par $\sqrt{N}$.

La Fig. 1.2 illustre quelques unes des notions présentées ici. On a représenté sur un axe numérique horizontal différentes valeurs liées à un ou des mesurages et à leur incertitude, à savoir :

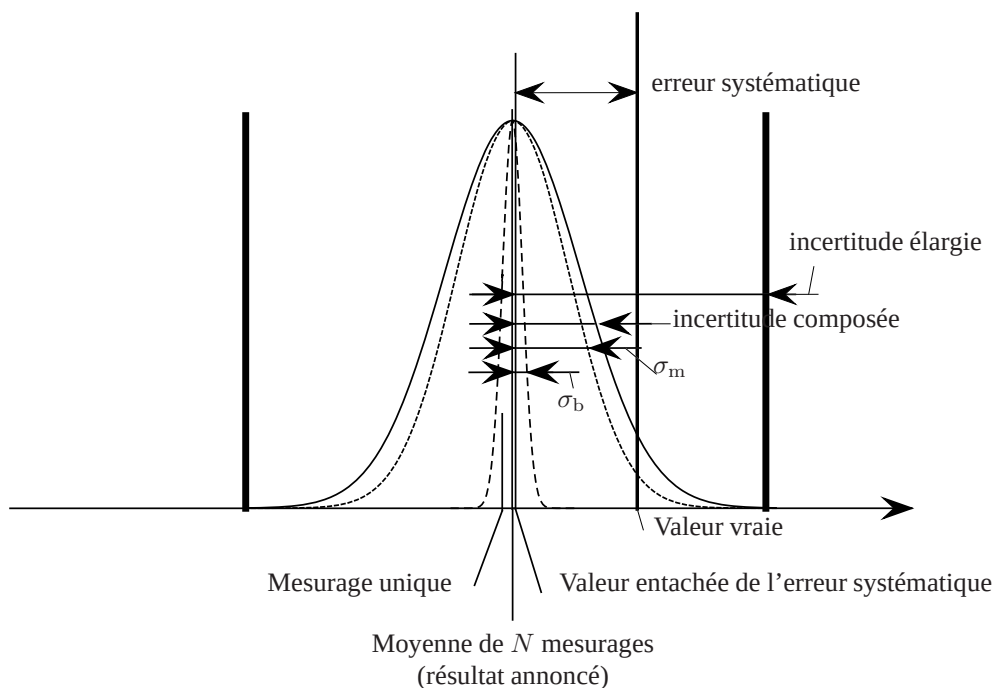


Figure 1.2. *Mesure, erreur et incertitude*

- la valeur vraie du mesurande (il est tout à fait licite d'évoquer cette « valeur vraie », évoquée dans le VIM à la Section 2.11);
- la valeur vraie entachée de l'erreur systématique de l'instrument; les valeurs issues du mesurage fluctueront autour de cette valeur;
- une valeur issue d'un mesurage unique; plusieurs mesurages fourniront des valeurs caractérisées par une certaine densité de probabilité de fluctuation, d'écart-type σ_b , où b veut dire : bruit;
- une valeur résultant du moyennage de N mesures; la dispersion de moyennages analogues correspond à une densité de probabilité dont la largeur est $\sqrt{N}$ fois plus étroite que celle d'une mesure unique;
- l'écart-type σ_m , où m veut dire : modèle, qui correspond à la densité de probabilité des erreurs systématiques, que l'on a pu déterminer en modélisant le système de mesure;
- l'incertitude composée, tenant compte de l'incertitude déterminée par la modélisation et du bruit, de valeur $\sqrt{\sigma_m^2 + \sigma_b^2}$;

– l’incertitude élargie, permettant d’obtenir un intervalle de confiance.

En pratique, c’est la composante de l’incertitude non liée au bruit qui est souvent la plus difficile à estimer.

1.3. Aspect spatial

Les méthodes optiques de champ ont un caractère particulier vis-à-vis de la métrologie : leur aspect spatial (c’est-à-dire leur nature même de champ de mesure). Les notions associées ne sont pas considérées dans le VIM. La plus importante est celle de *résolution spatiale*, qui dépend de nombreux facteurs, et en particulier d’éventuels post-traitements ou filtrages que l’on peut faire sur les mesures, en particulier pour diminuer le niveau de bruit en chaque pixel. Avant d’aborder la ou les définitions possibles de la résolution spatiale, nous rappelons quelques notions de base sur l’analyse spectrale spatiale.

1.3.1. Fréquence spatiale

Ce sont les opticiens étudiant la formation des images qui utilisent couramment les notions qui se révèlent ici pertinentes. En effet, la formation d’une image à partir d’un objet par un instrument d’optique peut être considérée comme le transfert d’un signal entre une entrée (le plan objet) et une sortie (le plan image). Le transfert va modifier ou non certaines caractéristiques du signal, selon une certaine *fonction de transfert*. De manière analogue à un circuit de filtrage électronique, qui se caractérise par sa courbe de gain en fonction de la fréquence (temporelle...), un système imageur peut également être caractérisé par la manière dont il va atténuer (il n’y a jamais d’amplification !) les *fréquences spatiales*. On peut trouver dans les catalogues de fabricants de lentilles des courbes de « gain » (ou fonction de transfert optique) qui sont le pendant exact des courbes de gain des amplificateurs ou des filtres électroniques.

La complexité de la fréquence spatiale est liée à son aspect vectoriel, dans la mesure où l’on travaille sur des fonctions définies sur un champ à deux dimensions, par exemple la luminance $L(x, y)$ d’un objet dont on fait l’image. Quand on travaille avec une fonction $f(t)$ dépendant du temps, la variable ne parcourt qu’un espace unidimensionnel, et sa variable conjuguée de FOURIER, la fréquence, est une variable scalaire. Avec une fonction définie dans le plan, $f(x, y)$ ou $f(\vec{r})$, la variable de FOURIER est à deux dimensions, (f_x, f_y) ou $\vec{f}$.

Pour saisir la notion de fréquence spatiale, le plus simple est de considérer une fonction spatiale simple périodique, par exemple $z(x, y) = \cos[2\pi(f_x x + f_y y)]$ où f_x et f_y sont des constantes. Cette fonction en « tôle ondulée » est illustrée sur la Fig. 1.3. On peut réécrire son équation $z(x, y) = \cos(2\pi \vec{f} \cdot \vec{r})$, où $\vec{r}$ est le vecteur de

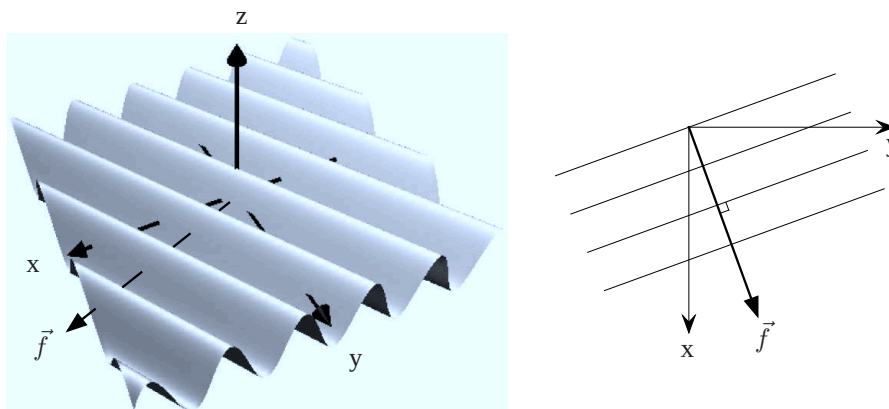


Figure 1.3. Fonction $\cos[2\pi(f_x x + f_y y)]$

composantes (x, y) et $\vec{f}$ est le *vecteur fréquence spatiale* de composantes (f_x, f_y) . On se convainc très vite que :

- la direction du vecteur $\vec{f}$ est perpendiculaire aux lignes d'isovaleur de la fonction ;
- la norme de $\vec{f}$ est égale à l'inverse de la période p de la fonction : $\|\vec{f}\| = 1/p$.

L'histoire de l'optique instrumentale a été une course pour réaliser des instruments qui transmettent le mieux possible les fréquences spatiales présentes dans un objet. Les objets tests sont souvent des mires constituées de traits parallèles équidistants qui réalisent des objets « mono-fréquentiels »⁴ au sens spatial du terme (Fig. 1.4). L'étude de l'image de ces mires (le système imageur a-t-il correctement fait l'image de — *résolu* — tel ou tel ensemble de traits ?) permet de déterminer la *fréquence de coupure* de l'instrument, celle au-delà de laquelle les traits ne sont plus vus séparément, résolus. On voit également sur la Fig. 1.4 des motifs en forme de « trompette » qui correspondent à des vecteurs fréquence spatiale de norme évolutive, ce qui représente l'analogie spatiale des signaux appelés *chirps* en traitement du signal.

On devine que le formalisme de FOURIER est parfaitement bien adapté à la manipulation de ces notions, et que la fonction de transfert optique n'est autre que la fonction de filtrage dans le « plan de FOURIER » (le plan des fréquences spatiales) du spectre des fréquences présentes dans l'objet.

4. On néglige ici le fait que des traits à bords nets génèrent de nombreux harmoniques de fréquence multiple de la fréquence spatiale fondamentale.

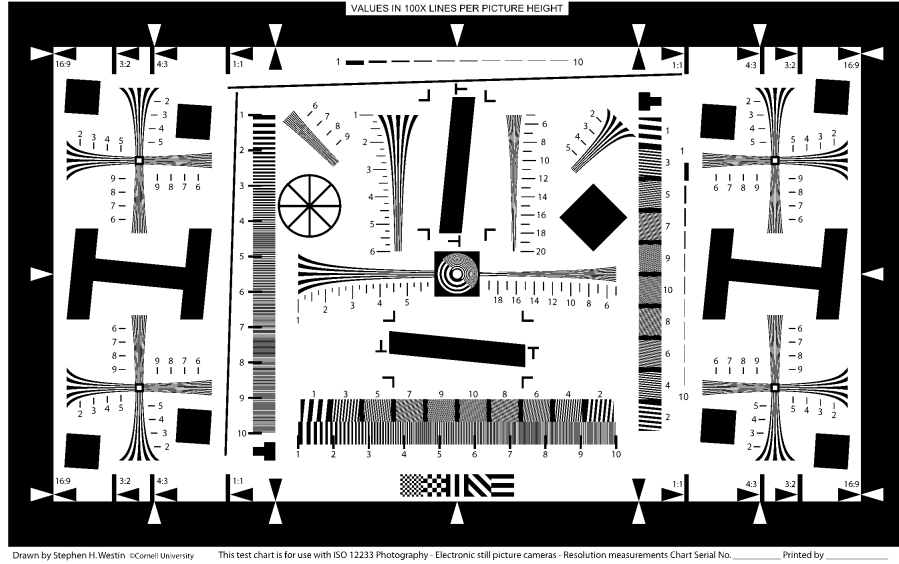


Figure 1.4. Mire ISO 12233

La Fig. 1.5 illustre le processus de transformation d'un signal spatial (par exemple la luminance d'un motif de type grille sinusoïdale) par un système imageur. Le gain (ou la *fonction de transfert*) du système est représenté dans la boîte au centre, en haut. L'intensité lumineuse est positive, c'est-à-dire qu'une valeur constante moyenne se superpose à la variation sinusoïdale, donnant la luminance :

$$I(x) = A[1 + \gamma \cos(2\pi x/p)] \quad (1.10)$$

Le *contraste* γ s'interprète comme le rapport de l'amplitude de la modulation sinusoïdale à la valeur moyenne (le contraste est égal à 1 lorsque « les noirs sont parfaitement noirs »). La transformation du signal par un système atténuant les fréquences non nulles se traduit par une perte de contraste. Pour une fréquence spatiale f_0 comme sur la Fig. 1.5, l'atténuation du contraste est :

$$\frac{\gamma'}{\gamma} = \frac{G(f_0)}{G(0)} \quad (1.11)$$

Pour certaines fréquences spatiales, le contraste peut s'annuler complètement. Si la fonction de transfert $G(f)$ oscille autour de 0, le contraste peut même changer de signe, ce qui correspond à un déphasage de π du signal sortant : les maxima et minima lumineux échangent leur place : on parle d'*inversion de contraste*. Cet effet est représenté sur la Fig. 1.6, où le contraste s'inverse de part et d'autre des zones d'annulation.

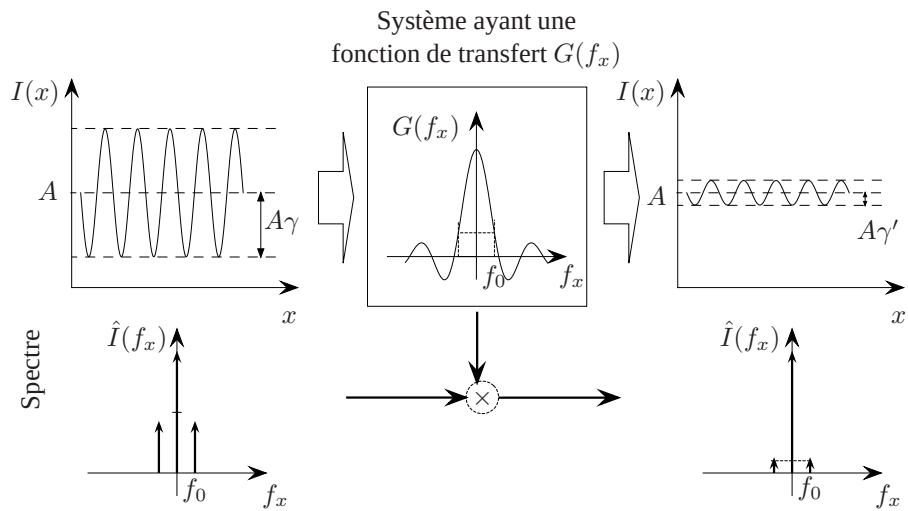


Figure 1.5. Transformation de la luminance d'une mire sinusoïdale par un système imageur

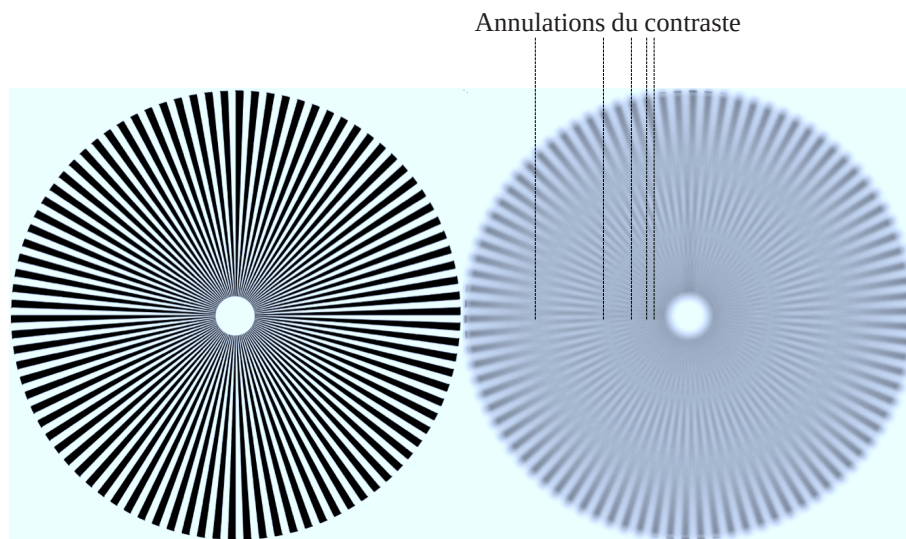


Figure 1.6. Inversions de contraste

Historiquement, bien entendu, ce formalisme mathématique n'existait pas. La résolution spatiale d'un système imageur a été définie en considérant l'image de deux

points voisins, et à partir de quelle distance les séparant ces deux points pouvaient être vus convenablement séparés (résolus...) dans l'image. On retrouve donc l'analogie spatiale de la résolution d'un instrument de mesure, sous la forme de « plus petite distance séparant deux points dont les images sont séparées ». On peut exprimer cela sous la forme : plus petite variation de position qui produit une variation perceptible de l'image correspondante, copie *mutatis mutandis* de la définition du VIM. Cette définition se rattache à ce qu'on appelle en optique le *critère de RAYLEIGH*.

Étudier l'image des grilles de diverses fréquences dans une mire au lieu de regarder l'image de deux points voisins revient à aborder le concept de résolution spatiale de manière duale (au sens de FOURIER), en considérant la plus grande fréquence qui est transmise par l'instrument sans dégradation notable (par exemple sans perte supérieure à 50 %), et en considérant l'inverse de cette fréquence, homogène à une longueur, comme la résolution spatiale. C'est ce qui explique les définitions que l'on trouve dans la référence [AST08] :

– « Optical data bandwidth : Spatial frequency range of the optical pattern (e.g. fringes, speckle pattern, etc.) that can be recorded in the images without aliasing or loss of information ». On retrouve la notion de performance du système imageur, caractérisé par une certaine fréquence spatiale de coupure f_c . La bande passante évoquée est l'intervalle $[0, f_c]$.

– « Spatial resolution for optical data : One-half of the period of the highest frequency component contained in the frequency band of the encoded data ». Il s'agit de la quantité $1/2f_c$. Le facteur 2 est ici un peu conventionnel et n'a pas de justification bien assise. Il y a d'ailleurs toujours un aspect conventionnel dans ces définitions puisque les propriétés considérées varient de manière continue. Le critère de RAYLEIGH évoqué plus haut a également un aspect conventionnel. Un facteur 2 ou 1,5 ou autre aurait très bien pu être introduit sans qu'on puisse le justifier mieux ou moins bien que le critère initial.

Pour une technique comme la corrélation d'images, la résolution spatiale est au minimum égale à la taille de l'imagette utilisée pour faire les calculs de corrélation (on n'a qu'une valeur de déplacement mesuré par imagette). Ceci dit, on peut lors des calculs ne déplacer l'imagette que pixel par pixel pour obtenir un champ de déplacement peuplé avec le même nombre de pixels que l'image initiale, mais cela ne change rien à la résolution spatiale.

Pour finir, soulignons qu'il ne faut pas parler de résolution lorsque l'on parle du nombre de pixels d'un capteur de caméra, mais de *définition*. On parle d'ailleurs de TVHD (télévision haute définition) et pas de TVHR (télévision haute résolution) pour indiquer qu'il y a un grand nombre de pixels dans l'image. La haute résolution dans l'imagerie d'un objet s'obtient en choisissant un objectif de focale très courte. On peut très bien avoir une image de haute résolution mais de faible définition (image

n'ayant pas un grand nombre de pixels, mais correspondant à un très petit champ sur l'objet).

1.3.2. Lissages spatiaux

Une opération faite très communément consiste à réduire le bruit présent dans l'image en effectuant un lissage spatial, qui consiste à remplacer chaque pixel dans l'image initiale par une moyenne pondérée ou non faite sur les pixels voisins. Cette opération se décrit très bien dans le formalisme de la transformée de FOURIER, et il est aisé de calculer les conséquences que cela peut avoir sur la résolution spatiale.

Un lissage est à la base une opération de convolution. Nous prenons pour simplifier une description unidimensionnelle avec des variables continues, l'échantillonnage rajoutant un peu de complexité mathématique sans changer les concepts de base. Le lissage le plus simple est la *moyenne glissante*, où chaque point d'un signal $g(x)$ est remplacé par la moyenne sur une étendue d'une largeur L autour de ce point :

$$\bar{g}(x) = \int_{x-\frac{L}{2}}^{x+\frac{L}{2}} g(u) du \quad (1.12)$$

Cette expression peut se mettre sous la forme d'un produit de convolution avec la fonction « porte » $\Pi(x)$ définie par :

$$\Pi(x) = \begin{cases} 0 & \text{si } x < -1/2 \text{ ou } x > 1/2 \\ 1 & \text{sinon} \end{cases} \quad (1.13)$$

On peut mettre en effet l'équation 1.12 sous la forme :

$$\bar{g}(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} g(u) \Pi\left(\frac{x-u}{L}\right) du = (g * \Pi_L)(x) \quad (1.14)$$

où $*$ désigne le produit de convolution, et $\Pi_L(x) = \Pi(x/L)$. L'effet d'un tel filtrage dans le domaine des fréquences s'obtient en prenant la transformée de FOURIER de l'équation précédente :

$$\hat{\bar{g}}(f_x) = \hat{g}(f_x) \times \hat{\Pi}_L(f_x) \quad (1.15)$$

soit :

$$\hat{\bar{g}}(f_x) = \hat{g}(f_x) \times \text{sinc}(Lf_x) \quad (1.16)$$

où sinc désigne la fonction « sinus cardinal » : $\text{sinc}(u) = \sin(\pi u)/\pi u$. Le spectre fréquentiel initial (la transformée de FOURIER de g) est donc atténué par la fonction de transfert qui est dans ce cas $\text{sinc}(Lf_x)$, qui s'annule pour $Lf_x = 1$, soit $f_x = 1/L$ (Fig. 1.7).

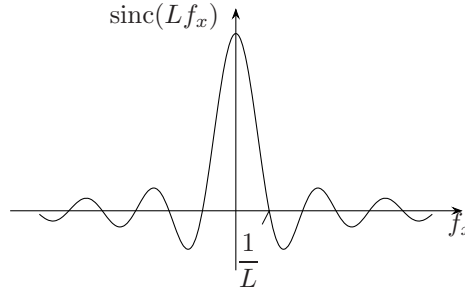


Figure 1.7. Fonction sinus cardinal $\text{sinc}(Lf_x)$, fonction de transfert pour un lissage glissant de largeur L

Le filtrage *gaussien* est également très souvent utilisé :

$$\bar{g}(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} g(u) G_{\sigma}(x - u) du \quad (1.17)$$

où :

$$G_{\sigma}(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right) \quad (1.18)$$

est une fonction gaussienne normalisée d'écart-type σ . La transformée de FOURIER de $G_{\sigma}(x)$ est :

$$\hat{G}_{\sigma}(f_x) = \exp(-2\pi^2\sigma^2 f_x^2) = \sigma' \sqrt{2\pi} G_{\sigma'}(f_x) \quad (1.19)$$

avec $\sigma' = 1/2\pi\sigma$, c'est donc également une fonction gaussienne, qui a la particularité de décroître très rapidement quand la fréquence augmente. Cela lui donne des propriétés intéressantes de filtrage du bruit, celui-ci correspondant aux hautes fréquences. Plus généralement, tout filtrage (linéaire) peut s'exprimer comme un produit de convolution avec une fonction que l'on appelle le *noyau* de filtrage.

Numériquement, un filtrage linéaire s'implémente de manière efficace en passant par les algorithmes de transformée de FOURIER discrète rapides, puisque le filtrage se résume à une multiplication par la fonction de transfert dans le plan des fréquences spatiales. Cependant, ces algorithmes ne peuvent être mis en œuvre que si les données ont une topologie rectangulaire, c'est-à-dire s'il n'y a pas de trous dans l'image (un trou est une zone vide de données numériques, pas une zone remplie avec des zéros...). Dans le cas contraire, soit il faut interpoler les données manquantes, ce qui n'est pas un problème trivial, soit on implémente le produit de convolution, au détriment de la vitesse d'exécution.

Des lissages successifs correspondent à des produits de convolutions successifs. Par associativité, cela revient à faire un seul filtrage par un filtre dont le noyau est le produit de convolution des noyaux de filtrages des différents filtres ; par exemple, pour

trois filtrages successifs de noyaux $K_1(x)$, $K_2(x)$ et $K_3(x)$:

$$\overline{g}(x) = \{[(g * K_1) * K_2] * K_3\}(x) = [g * (K_1 * K_2 * K_3)](x) \quad (1.20)$$

tout se passe comme si l'on avait un seul filtrage de noyau $(K_1 * K_2 * K_3)(x)$. On peut montrer [ROD 78] que si l'on fait un grand nombre de filtrages successifs avec le même filtre, on s'approche d'un filtrage gaussien (une des conséquences du théorème de la limite centrale).

Au niveau de la résolution spatiale, chaque lissage « élargit » un point objet, puisque « l'image » par le filtrage d'un point en x_0 modélisé par une fonction de DIRAC $\delta(x - x_0)$ n'est autre que le noyau de filtrage lui-même déplacé en ce point, dans la mesure où :

$$\delta(x - x_0) * K(x) = K(x - x_0) \quad (1.21)$$

On peut montrer [ROD 78] que la « largeur » Δ_{f*g} du produit de convolution de deux fonctions f et g est la somme quadratique des largeurs de chacune des fonction :

$$\Delta_{f*g} = \sqrt{\Delta_f^2 + \Delta_g^2} \quad (1.22)$$

Cette équation permet de calculer comment la résolution spatiale évolue en fonction des filtrages spatiaux successifs.

Signalons pour finir que cette approche de la résolution spatiale par l'étude de la fonction de transfert des fréquences spatiales est à la base d'une partie des travaux du GDR 2519 *Mesures de champs et identification en mécanique des solides*, résumés par la publication [BOR 09] concernant la corrélation d'images.

1.4. Classement des techniques de mesures optiques

Nous proposons dans cette section un essai de classement systématique de différentes méthodes de mesure de champs cinématiques. Ce classement est fondé sur les aspects essentiels qui les fondent, en se basant sur un nombre limités de clés.

La thermographie infrarouge, quant à elle, a une place un peu particulière. Elle permet fondamentalement de mesurer un champ de température de surface, et non pas une grandeur cinématique (déplacement, déformation, pente courbure). Le mesurande est scalaire, et les grandeurs mécaniques (contraintes, déformations) nécessitent une modélisation physique. C'est pourquoi cette technique ne rentre pas dans le schéma présenté ci-dessous.

1.4.1. Méthodes de mesure en lumière blanche

Dans cette famille de techniques, le mesurande est codé dans la variation spatiale d'une intensité lumineuse, variation obtenue d'une manière non interférométrique ; autrement dit, il ne s'agit pas de franges d'interférences. Les aspects optiques sont quelquefois réduits à la prise d'image : une mesure de déplacement par corrélation d'image ou par la méthode de la grille n'a rien de spécifiquement optique dans son concept : c'est le phénomène géométrique qui permet la mesure. Pour cette raison, on se référera souvent aux méthodes en lumière blanche par les termes : méthodes géométriques.

1.4.1.1. Encodages

L'encodage du mesurande évoqué dans le Tab. 1.1 est principalement de deux sortes :

- encodage par un signal aléatoire : le signal est caractérisé par sa variation aléatoire locale, qui joue le rôle d'une signature ; le système de détection devra identifier cette signature pour réaliser une mesure ; on retrouve ici toutes les méthodes de corrélation : corrélation d'images, stéréocorrélation, corrélation de speckle ;
- encodage par un signal périodique, plus précisément modulation de la phase d'une porteuse spatiale ; ex : déplacements des traits d'une grille solidaire d'un substrat, causés par les déplacements de celui-ci, ou déplacements de l'image des traits d'une grille vue en réflexion, causés par les variations de pente de la surface étudiée.

Il faut réaliser que *chaque technique existe sous les deux formes* (codage aléatoire ou modulation de phase), même si la terminologie ne permet pas forcément de s'en rendre compte. Il y a bien sûr des différences essentielles entre ces codages, qui se répercutent au niveau des performances.

– La réalisation d'un codage aléatoire, qui est fondamentalement un bruit, est *non maîtrisé*, et se *caractérise difficilement*, avec des outils complexes comme les moments statistiques (jusqu'à quel ordre ?) ou bien la densité spectrale de puissance moyenne (d.s.p.m.) ; on ne sait pas aujourd'hui projeter un mouchetis qui réalise une d.s.p.m. donnée ; même au niveau de la simulation, cela pose des problèmes : comment simuler des images de mouchetis ayant les mêmes caractéristiques ?

– Au contraire, le codage par une porteuse périodique se caractérise complètement par une fréquence (temporelle ou vecteur fréquence spatiale), une phase locale, un niveau moyen et un contraste.

– Le codage aléatoire *n'est pas en lui-même quantitatif*. L'information est dans une morphologie locale, ou signature, que le système de détection doit identifier.

– Au contraire, un codage par modulation de phase de porteuse est *quantitatif* : l'information est représentée par un nombre (la phase) introduit dès le départ de la

chaîne de transmission de l'information. La détection fait appel à des techniques extrêmement efficaces et maîtrisées (analyse de FOURIER). La phase d'un signal périodique est en effet une grandeur qui se détecte très efficacement.

– Un inconvénient du codage par phase est sa *périodicité* : le même code se retrouve plusieurs fois, ce qui mène à des ambiguïtés. La levée de cet ambiguïté correspond au *dépliage de phase* qui supprime les sauts de 2π qui apparaissent lors de la détection, celle-ci ne délivrant qu'une phase modulo 2π . Le dépliement de phase revient en d'autres termes à *numéroter les franges*.

1.4.1.2. Exemples

Pratiquement toutes les techniques de mesure en lumière blanche se ramènent à la mesure d'une position ou d'un déplacement sur une image. Une analyse simple de la géométrie du système de mesure permet d'en comprendre son fonctionnement.

1) Mesure de déplacements plans : ici, l'objet qui se déforme est simplement observé par une caméra, et le déplacement des points marqués de l'objet se traduit par un déplacement des points dans l'image. La grandeur mesurée est le champ des déplacements plans dans l'image. Les techniques sont

- la technique de la grille (marquage « en phase » par une grille) ; son principal inconvénient est certainement la préparation de surface nécessaire (collage ou dépôt d'une grille, restreignant en outre son application aux objets plans) ;

- la déflexométrie : dans cette deuxième technique, dérivée de la précédente, on observe l'image en réflexion sur l'objet d'une grille fixe ; le déplacement plan dans l'image est converti en champ de pentes ; autrement dit, les déplacements apparents dans l'image de la grille ne sont pas causés par la déformation réelle d'une grille solidaire de l'objet, mais par le fait qu'une grille est observée par réflexion sur une surface réfléchissante qui n'est pas parfaitement plane ; technique très simple à mettre en œuvre (pas de dépôt ou de collage de grille sur l'objet) ;

- la corrélation d'images (marquage par un mouchetis) ; la version en réflexion (observation d'un mouchetis fixe en réflexion pour mesurer des pentes) est envisageable, mais n'aurait que peu d'intérêt.

Le *moiré* n'est qu'un complément de la technique de la grille (la nature et l'origine du codage ne change pas). Il consiste à diminuer la fréquence du signal codant par battement spatial. Ce n'est donc pas une technique de mesure « en soi ».

2) Mesure de forme Les techniques de mesure de forme sont dérivées des techniques de mesure de déplacements. La configuration géométrique fondamentale (Fig. 1.8) est strictement la même pour la stéréocorrélation, où deux caméras regardent l'objet sous deux angles de vue différents, et pour la profilométrie par projection de frange (ou projection de lumière structurée). Si la position dans l'espace des centres optiques C_1 et C_2 sont connues, la connaissance des points M'_1 et M'_2 permet de déterminer la position spatiale du point M . La différence entre les deux techniques se situe au niveau de la circulation et de la nature de l'information :

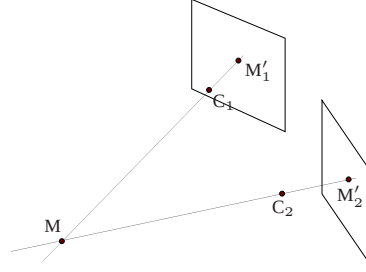


Figure 1.8. Mesure de forme par stéréo ou projection de franges

- en stéréocorrélation, l'information part du point M et se propage vers M'_1 et M'_2 , situés sur des capteurs de caméras ; le logiciel d'analyse doit reconnaître la signature locale de M dans les plans image pour appairer M'_1 et M'_2 ;
- en projection de franges, l'information (quantitative : c'est une phase de frange) part de M'_1 qui est souvent un pixel de vidéoprojecteur vers M puis M'_2 . Le logiciel d'analyse n'a qu'à mesurer la phase (dépliée) en chaque point pour s'apparier au point émetteur.

1.4.2. Méthodes interférométriques

La phase $\psi(t) = \omega t + \phi$ d'une onde électromagnétique monochromatique dans le domaine visible, telle celle émise par un laser hélium-néon ($\lambda = 633 \text{ nm}$) ou néodyme-YAG ($\lambda = 532 \text{ nm}$) oscille à une fréquence de l'ordre du térahertz (10^{14} Hz). Aucun récepteur n'est capable d'enregistrer les variations temporelles de cette phase à des fréquences aussi élevées. C'est pourquoi on a recours au phénomène des interférences, dont le but principal est d'éliminer par un phénomène de battement⁵ le terme en ωt présent dans ψ . La formule donnant l'intensité des interférences à deux ondes est :

$$I = I_0(1 + \gamma \cos \Phi) \quad (1.23)$$

où γ est le contraste et où la phase Φ des franges d'interférences est :

$$\Phi = \psi_2 - \psi_1 = \phi_2 - \phi_1 = 2\pi \frac{\delta}{\lambda} \quad (1.24)$$

où δ est la différence de marche entre les deux faisceaux et λ la longueur d'onde dans le milieu de propagation, très souvent l'air. En fait, une mesure interférométrique se fait toujours entre un état initial qui sert de référence (on n'a en effet jamais d'état de référence correspondant à une absence totale de franges) et un état final. On exploite donc toujours une *variation de phase des franges d'interférence* $\Delta\Phi = (\phi_{2,\text{final}} - \phi_{1,\text{final}}) - (\phi_{2,\text{initial}} - \phi_{1,\text{initial}})$ (double différence).

⁵. comme dans le moiré...

1.4.2.1. Interactions lumière-surface

Selon le mode d'interaction entre la lumière incidente (surfaces d'onde « lisses », planes ou sphériques) et la surface, l'interférométrie peut se mettre en œuvre de différentes manières, mises en évidence sur la Fig. 1.9.

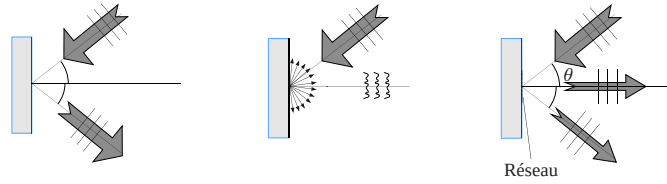


Figure 1.9. Différents modes d'interaction de la lumière sur une surface : réflexion spéculaire, diffusion, diffraction

- Dans le premier cas, la surface est un miroir. L'énergie repart dans la direction de réflexion, les surfaces d'onde restent lisses.
- Dans le deuxième cas, la lumière est diffusée dans tout un demi-espace. L'énergie est répartie dans un demi-espace, les surfaces d'ondes diffusées sont élastiques, ce qui se traduira par du bruit spatial dans l'image.
- Dans le troisième cas, un réseau de diffraction est déposé par moulage sur la surface, de manière à ce que le premier ordre diffracté soit normal à la surface. Dans ce cas, l'énergie part dans la direction de diffraction, les surfaces d'ondes restent lisses.

1.4.3. Vecteur sensibilité

Lorsqu'un point d'une surface éclairée par de la lumière monochromatique est soumis à un petit déplacement caractérisé par un vecteur $\vec{u}$, la variation de phase du faisceau provenant de la source et renvoyé vers l'observateur est calculée par la variation du chemin optique entre la source S et l'observateur T. On montre facilement que cette variation de phase $\Delta\phi$ est :

$$\Delta\phi = \vec{g} \cdot \vec{u} \quad (1.25)$$

où la différence entre les vecteurs d'onde d'éclairage et d'observation $\vec{g} = \vec{k}_e - \vec{k}_o$ est appelée *vecteur sensibilité*. Celui-ci indique la *composante du déplacement à laquelle la méthode de mesure sera sensible*. Dans le cas d'une réflexion miroir, le vecteur sensibilité est normal à la surface ; on ne peut alors mesurer que les déplacements hors-plan (interférométrie type MICHELSON).

1.4.4. Vecteurs sensibilité synthétiques

Chaque champ de variation de phase est donc proportionnel au vecteur sensibilité $\vec{g}$. On peut faire la mesure de phase dans les états initial et final avec différentes directions d'éclairage. On a alors une série d'équations $\Delta\phi_k = \vec{g}_k \cdot \vec{u}$. Par de simples

combinaisons linéaires de ces équations (donc des cartes de phase obtenues), on peut faire apparaître des combinaisons linéaires de vecteurs sensibilité, qu'on peut appeler *vecteurs sensibilité synthétiques*. Ces combinaisons linéaires peuvent également apparaître analogiquement par un montage qui utilise *simultanément* différentes directions d'éclairage, comme le moiré interférométrique (Fig. 1.11).

1.4.5. Différents types d'interférométrie

1.4.5.1. Interférence entre le faisceau objet et un faisceau de référence invariable

On a alors $\Delta\Phi = \Delta\phi_{\text{obj}} - \Delta\phi_{\text{ref}} = \Delta\phi_{\text{obj}} = \vec{g} \cdot \vec{u}$, et on mesure la composante de déplacement le long du vecteur $\vec{g}$. Exemple : mesure de déplacement approximativement hors-plan par interférométrie de speckle (Fig. 1.10), où la composante mesurée du déplacement est la composante u_g dirigée suivant la bissectrice des directions d'observation et d'éclairage.

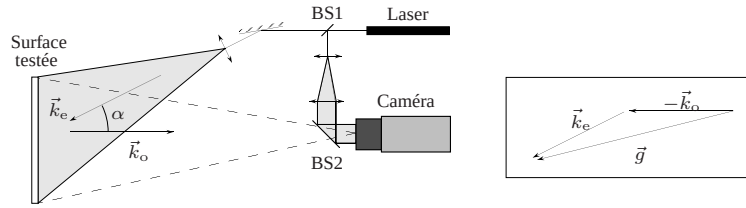


Figure 1.10. Montage d'interférométrie de speckle pour la mesure des déplacements hors plan

1.4.5.2. Interférence entre deux faisceaux objet provenant du même point

Les deux faisceaux objet proviennent du même point, mais avec des éclairages différents, donc avec des vecteurs sensibilité différents. On a alors $\Delta\Phi = \Delta\phi_2 - \Delta\phi_1 = (\vec{g}_2 - \vec{g}_1) \cdot \vec{u} = \vec{G} \cdot \vec{u}$. On réalise ainsi « analogiquement » un vecteur sensibilité synthétique. On a comme exemple le moiré interférométrique (plus correctement : l'interférométrie sur réseau) de la Fig. 1.11. La même configuration peut être mise en uvre en lumière diffuse, comme indiqué sur la figure.

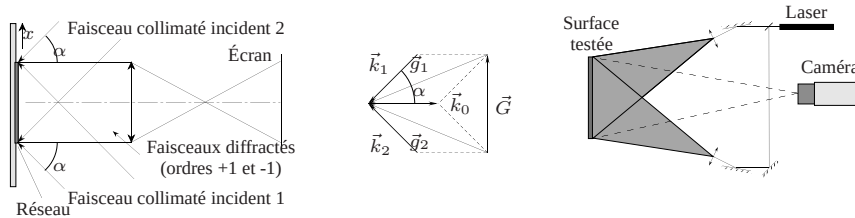


Figure 1.11. Mesure de déplacements plans : moiré interférométrique, vecteur sensibilité, speckle plan

La différence est qu'en général on ne collimate pas les faisceaux, pour pouvoir étudier des surfaces importantes. Le vecteur sensibilité n'est donc pas rigoureusement dans le plan sur l'ensemble de la surface. Il faut en tenir compte pour faire une mesure convenable.

1.4.5.3. Interférence entre deux faisceaux objet provenant de deux points voisins

Un système dédoubleur permet de superposer sur la caméra d'observation deux images décalées latéralement d'une quantité $\delta \vec{l}$ (Fig. 1.12). La variation des franges d'interférence est donc : $\Delta\Phi = \Delta\phi_2 - \Delta\phi_1 = \vec{g} \cdot (\vec{u} + \delta\vec{u}) - \vec{g} \cdot \vec{u} = \vec{g} \cdot \delta\vec{u}$. On mesure donc un *déplacement différentiel*. Avec différents éclairages, on peut mettre en uvre la technique du vecteur sensibilité synthétique et par combinaison linéaire de cartes de phase faire apparaître des vecteurs sensibilité dans le plan et hors plan. Là encore, la version avec un réseau et la version en lumière diffuse existent (shearographie).

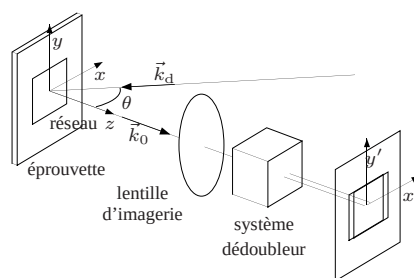


Figure 1.12. Interférométrie différentielle à réseau, ou shearographie sans celui-ci

En alignant la direction du décalage suivant les axes x et y , on obtient donc toutes les dérivées partielles de toutes les composantes du déplacement. On peut donc obtenir toutes les composantes des déformations planes, ainsi que les deux pentes.

C'est une technique insensible aux vibrations parasites qui ne modifient ni l'état de déformation ni les pentes.

1.4.6. Holographie, holographie numérique

L'holographie n'est pas une technique de mesure, c'est une technique d'enregistrement d'une onde électromagnétique en phase et en amplitude, de manière à permettre sa reconstruction. Le principe est de faire interférer l'onde à enregistrer avec une onde de référence, et à enregistrer ces interférences. L'enregistrement comme la reconstruction peut être analogique ou numérique. L'holographie offre donc la possibilité de faire interférer des ondes n'ayant pas existé au même moment, par exemple les

ondes diffusées par un objet avant et après déformation. L'holographie est donc un complément aux techniques vues ci-dessus.

Il faut réaliser *qu'il n'y a pas de différence entre l'holographie numérique et les montages d'interférométrie utilisant une onde de référence lisse* (non aléatoire) comme celui de la Fig. 1.10 puisqu'il s'agit dans les deux cas de l'enregistrement des interférences d'une onde avec une onde de référence, avec possibilité de reconstruction.

La seule différence est que dans les cas appelés « interférométrie de speckle », l'enregistrement a lieu dans un plan image, et donc la reconstruction de l'objet n'est pas nécessaire. Ce point n'est en aucun cas fondamental ou essentiel sur le plan conceptuel. Quand on retire l'objectif de la caméra sur la Fig. 1.10 et que l'on reconstruit l'objet, on dit que l'on fait de l'holographie numérique...

Nous avons présenté dans cette section une approche permettant de regrouper un grand nombre de techniques optiques différentes en fonction de leurs aspects essentiels (techniques en lumière blanche ou interférométriques, codage aléatoire ou par modulation de phase, nature du mesurande). Le Tableau 1.1 propose une synthèse, ainsi que les performances des techniques qui sont liées aux concepts fondamentaux mis en uvre. Bien entendu, un tel tableau ne peut être qu'un reflet grossier des détails de la réalité, et l'exercice consistant à tout regrouper présente évidemment des limitations. Néanmoins, il est espéré qu'il pourra aider à une première approche des techniques optiques de mesure de champ.

Tableau 1.1. Récapitulatif

Lumière blanche			
Mesurande	Codage aléatoire	Modulation de phase	Remarques
Depl. plan	corrélation d'images	Grille (avec ou sans moiré)	Couplage avec depl. hors plan
Forme	Stéréocorrélation	Projection de franges (lumière structurée)	Étalonnage transverse caméra essentiel
Depl. dans l'espace	Stéréocorrélation avec mouchetis solidaire	Impossible	idem
Pentes	Non utilisé	Défectométrie	Couplage avec la forme
Interférométrie			
Mesurande	Lum. réfléchie	Lum. diffusée	Lum. diffractée
Depl. plan	Impossible	Speckle dans le plan	Moiré interférométrique
Depl. hors plan	Interférométrie MICHELSON-TWYMAN-GREEN	Speckle hors plan	Inusité, mais un montage est concevable
Montage différentiel (pentes, déform.)	Microscopie Nomarski p. ex.	Shearographie	Interférométrie différentielle sur réseau
Performances			
	Lum. blanche, aléatoire	Lum. blanche, mod. phase	Interférométrie
Simplicité	++	+	-
Coût	--	-	+
Performances	-	-+	++

1.5. Bibliographie

- [AST08] *Standard Guide for Evaluating Non-Contacting Optical Strain Measurement Systems*, DOI : 10.1520/E2208-02, ASTM International, 2008.
- [BOR 09] BORNERT M., BRÉMAND F., DOUMALIN P., DUPRÉ J.-C., FAZZINI M., GRÉDIAC M., HILD F., MISTOU S., MOLIMARD J., ORTEU J.-J., ROBERT L., SURREL Y., VACHER P., WATTRISSE B., « Assessment of Digital Image Correlation Measurement Errors : Methodology and Results », *Experimental Mechanics*, vol. 49, n°3, p. 353-370, June 2009.
- [ROD 78] RODDIER F., *Distributions et transformation de Fourier*, McGraw-Hill, Paris, 1978.
- [VIM08] *Vocabulaire international de métrologie – Concepts fondamentaux et généraux et termes associés (VIM)*, Guide ISO/CEI 99 :2007, JCGM, 2008.