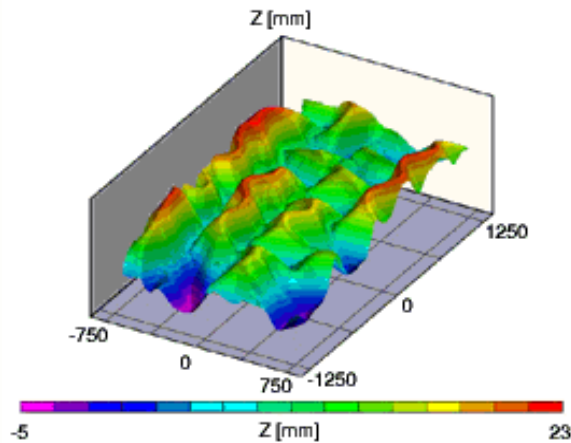


*Projet de Physique P6-3*  
*STPI/P6-3/2010 – n°18*

# Mesures optiques par Corrélation d'Images Numériques



**Etudiants:**

**Craciun Eugen**

**Xiao Shan HU**

**Mo ZHANG**

**Kejun HU**

**Enseignant-responsable du projet :**

**Nistea Ioana**



Date de remise du rapport : **17/06/2010**

Référence du projet : **STPI/P6-3/2010 – n°18**

Intitulé du projet : **Mesures optiques par la corrélation d'images numériques**

Type de projet : **expérimental, informatique**

Objectifs du projet :

**Notre objectif a été d'étudier la méthode de corrélation d'images numériques. En voici nos grandes lignes:**

**-Étude bibliographie du principe des différentes méthodes de l'application de la corrélation d'images numérique**

**-Développement d'un logiciel à partir de cette méthode**

**-Mise en œuvre expérimentale concernant la déformation des objets soumis différentes genres de sollicitations.**

Remerciements :

**Nous tenons à remercier Mademoiselle Ioana Nistea, pour son aide et sa présence sans lesquelles ce projet n'aurait jamais pu être mené à terme.**

## **TABLE DES MATIERES**

1. Introduction.....	4
2. Méthodologie / Organisation du travail.....	6
3. Travail réalisé et resultats.....	7
3.1. Principe de la technique.....	7
3.2. Travail numérique.....	8
Le logiciel.....	8
3.2.1. Réalisation de la programmation.....	8
3.3. Travail expérimental .....	12
3.3.1. Premier montage de mesure (extensomètre).....	12
3.3.2. Résultat et analyse.....	13
3.3.3. Essai thermique.....	15
3.3.4. Déformation de l'objet par chauffage direct.....	16
3.3.5. Analyse des résultats : .....	17
4. Conclusions et perspectives.....	18
4. Bibliographie.....	19
5. Annexe.....	20

## INTRODUCTION

Le développement de techniques fiables de mesures de champs de déplacement et de déformations est primordial si l'on veut caractériser en effets (hétérogènes) mécaniques à une échelle fine.

La corrélation d'images est un moyen séduisant pour le mécanicien des solides. Cette technique est rapide et sensible. La mise en œuvre est facile, permettant de choisir de moyens de mesure différents (exemple: elle est adaptable à des conditions de ambiance difficile, haut température) et les coûts sont réduits.

En pratique, on veut déterminer le champ de déplacement qui s'est produit entre deux instants pour lesquels on a acquis une image. Le déplacement d'un « point » correspond à la valeur moyenne d'un déplacement d'une image (zone d'étude centrée au point considéré). Le principe de la corrélation consiste à appairer le motif correspondant à la zone d'étude dans les deux images (une de référence, l'autre déformée) afin de pouvoir déterminer le déplacement de centre de la zone.

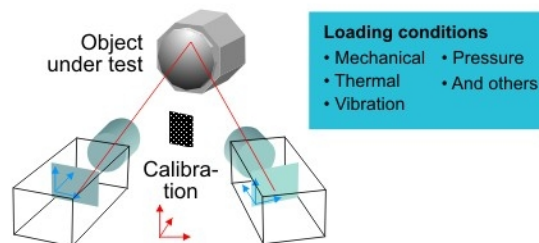


Figure 1: Montage simple du corrélation d'image

Cette méthode est beaucoup utilisée dans l'extensomètre où on a besoin d'obtenir des champs des déplacements ou des contraintes pour analyser les propriétés thermomécaniques des matériaux.

Elle remplace les méthodes traditionnelles de mesure par jauges extensomètres (capteurs). Les extensomètres à fils résistants, que l'on désigne aussi sous le nom de jauges de contraintes, furent inventés pour mesurer les déformations des structures en vue d'en évaluer l'état de contraintes. Les mesures électriques peuvent être très précises et très sensibles puisque l'on atteint facilement des déformations de l'ordre du micromètre par mètre.

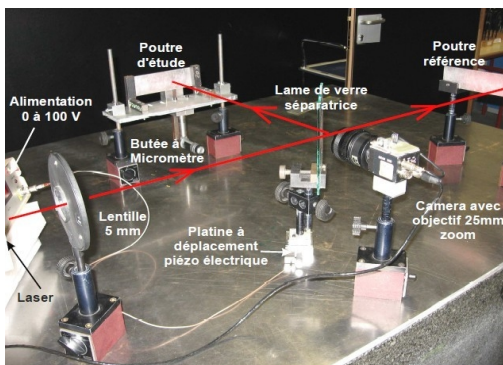


Figure 2: Montage de l'interférométrie de speckles

Il existe d'autres méthodes optiques dans la mesure des déplacements plans - notamment les méthodes interférométriques comme la corrélation de speckles ou bien l'interférométrie de speckles qui sont basées sur l'utilisation de la lumière monochrome (laser) pour détecter des déplacements à une très grande précision (à l'échelle de micro pixels).



## MÉTHODOLOGIE / ORGANISATION DU TRAVAIL

Ce sujet nous a été attribué après un sondage de préférence. Le groupe a donc été formé ne tenant pas compte des affinités. Nous avons du apprendre, tout d'abord, à nous connaître puis, à travailler ensemble.

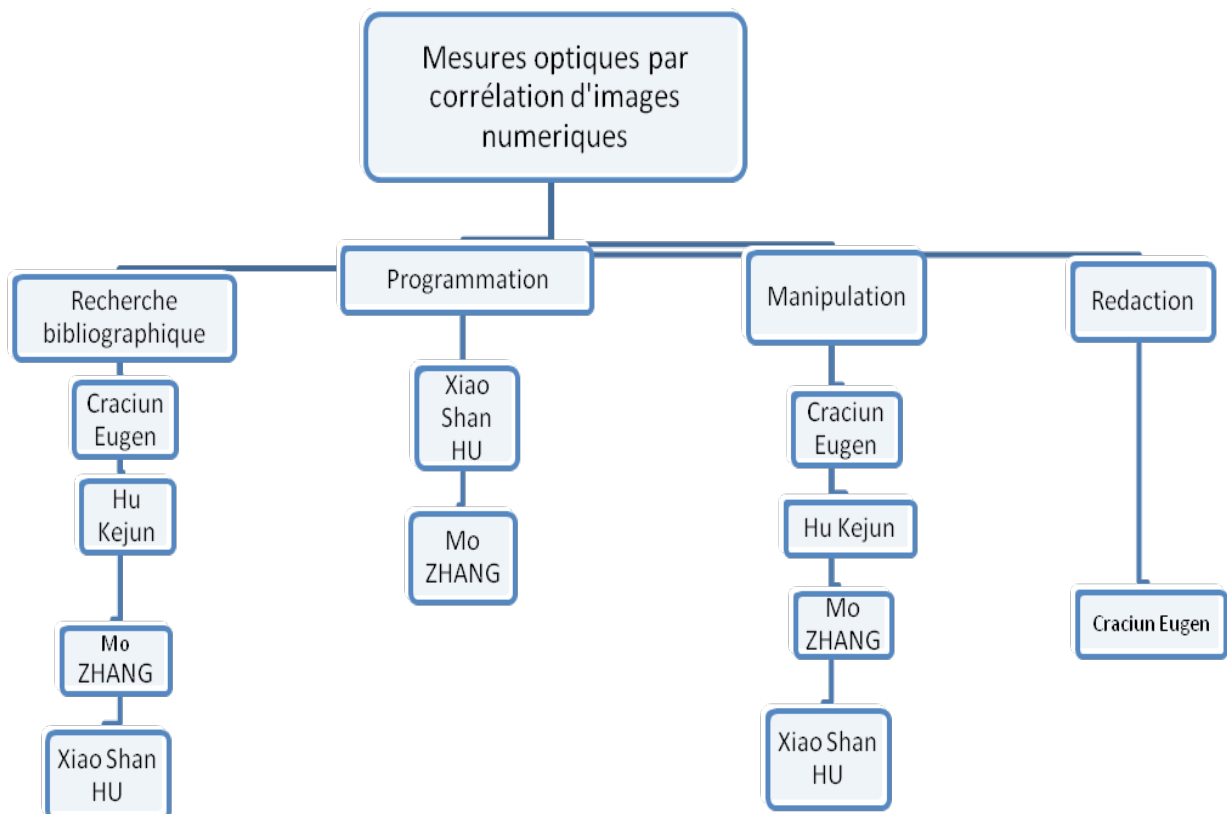
Concernant l'organisation de notre travail, nous avons mis un certain temps avant de bien comprendre le sujet qui nous était donné. En effet, ce dernier n'avait jamais été traité les années précédentes et donc aucunes pistes ne nous ont été proposées.

Nous allons donc vous expliquer la démarche que nous avons suivie. Au début, nous nous sommes rencontré pour discuter sur notre sujet et pour établir un programme exact pendant les cours de notre projet.

On a eu des problèmes parce qu'on a eu d'apprendre un langage de programmation qu'on n'a pas encore étudié à l'INSA (Matlab). Ainsi, nous avons essayé d'apprendre ce langage et de trouver le maximum d'information sur la corrélation d'images.

Les informations qu'on a trouvé à l'aide de l'internet, on a réussi de construire la base et aussi de comprendre Matlab. Ainsi on a commence de nous organiser pour avoir le meilleur rendement pendant notre projet.

Voici l'organigramme résumant notre répartition des tâches :





## TRAVAIL RÉALISÉ ET RESULTATS

### 3.1. Principe de la technique

La technique de la corrélation d'images technique est basée sur la comparaison de deux images enregistrées avant et après la déformation, à niveaux de gris aléatoires (Voir la figure 3.1.1).

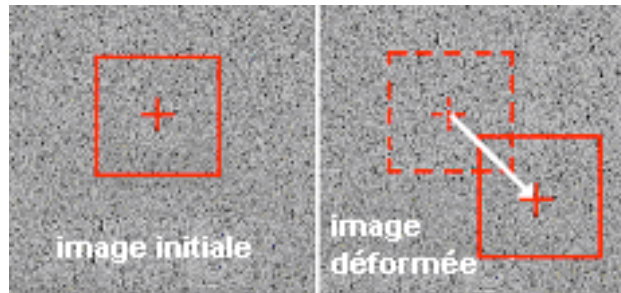


Figure 3. Zone d'étude sur une image de référence et sur une image déformée

La première image est dite de «référence» et la deuxième «déformée».

La corrélation est à rechercher le degré de ressemblance entre les deux images or il faut mesurer les champs de déplacement pour le récupérer. A partir de champs de déplacement calculés, on peut obtenir des différents paramètres de matériau. Le plus souvent, on peut obtenir les champs des contraintes, ceci est fait à partir de la loi de Hook:

$$\sigma = E \times \varepsilon$$

E est le module de Young . Il est la constante qui relie la contrainte de traction (ou de compression) et la déformation pour un matériau élastique isotrope.

Les déformations sont calculées a partir des champs de déplacement avec les équations:

$$\varepsilon = \frac{\Sigma \Delta x}{x} + \frac{\Sigma \Delta y}{y}$$

$\Delta x$  est le champs de déplacement horizontale pour chaque carré de l'image

$\Delta y$  est le champs de déplacement verticale pour chaque carré de l'image

On peut aussi obtenir le coefficient de dilatation thermique (pour les essais thermiques) Avec les équations suivantes:

$$\alpha = \frac{1}{V * (\frac{\partial V}{\partial t}) p}$$

## 3.2. Travail numérique

Dans la deuxième partie du projet on s'est proposé de réaliser de développer un logiciel pour faire la corrélation d'images. On a choisi de travailler dans l'environnement Matlab.

### *Le logiciel*

Ce programme a pour but de calculer le déplacement vertical et horizontal étant donné 2 images numériques à corréler. Le programme s'est fait sous logiciel MATLAB 7.5

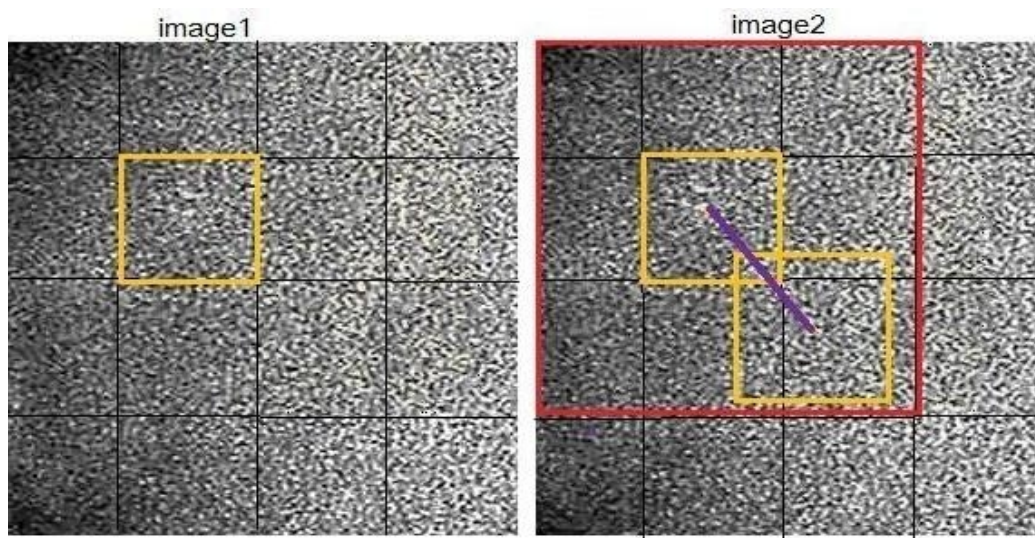
### 3.2.1. Réalisation de la programmation

#### (1) Obtenir la zone à corréler

Pour obtenir une bonne zone pour faire la corrélation, on coupe la première image dans la fenêtre d'interrogation. Ensuite on récupère la même zone dans la deuxième image.

#### (2) Corrélation d'image

On divise la première image par des petites fenêtres (voir le carré jaune dans le dessin), chacun ayant un motif unique. En suite, on cherche dans une zone particulière de la deuxième image (voir le carré rouge dans le dessin) pour trouver le même motif montré dans la première fenêtre (On a choisit une zone dont la taille est 3 fois plus grande, et aussi que cette zone et la première fenêtre sont bien centrés au même point)



**carré jaune** Une des petites fenêtres dans la première image

**carré rouge** La zone de recherche dans la deuxième image, avec la longueur 3 fois plus grand que la carré jaune. Ces 2 carré sont bien centrés.

**droite violet** le déplacement



Afin de trouver le même motif, on utilise la méthode de corrélation croisée entre 2 images réalisée par la fonction **normxcorr2**.

$C = \text{normxcorr2}(\text{rect\_im1}, \text{rect\_im2})$  calcule la corrélation croisée normalisée entre les 2 images. La matrice de résultat  $C$  contient les coefficients de corrélation, qui peut varier de -1,0 à 1,0.

On fait une boucle pour répéter la corrélation dans chaque petite fenêtre de la première image.

#### (4) Calcul du déplacement

On calcule le résultat du déplacement vertical et horizontal à partir de la matrice de corrélation obtenue dans l'étape précédente.

Dans chaque matrice de corrélation, on peut trouver le maximum de coefficient de corrélation, l'indice de cette valeur dans la matrice (xpeak, ypeak) correspond à la position où se trouve le motif qui est la plus semblable que celui dans la petite fenêtre de la première image.

Et après quelques calculs simples et des exemple concrète, on a retrouvé le déplacement au niveau de pixel, qui égale:

$$\text{deplacement} = [x_{\text{peak}} - (a + A)/2, y_{\text{peak}} - (a + A)/2]$$

ici, (xpeak, ypeak) est l'indice du maximum du coefficient de corrélation.

et a est la taille de chaque petite fenêtre dans la première image

A est la taille de la zone de recherche dans la deuxième image

#### (5) Recherche le déplacement sous-pixel par la méthode d'interpolation

Pour chaque fenêtre de la 1ere corrélation, on récupère de la matrice de corrélation (le résultat de la fonction 'normxcorr2') les valeurs autour du pic de corrélation.

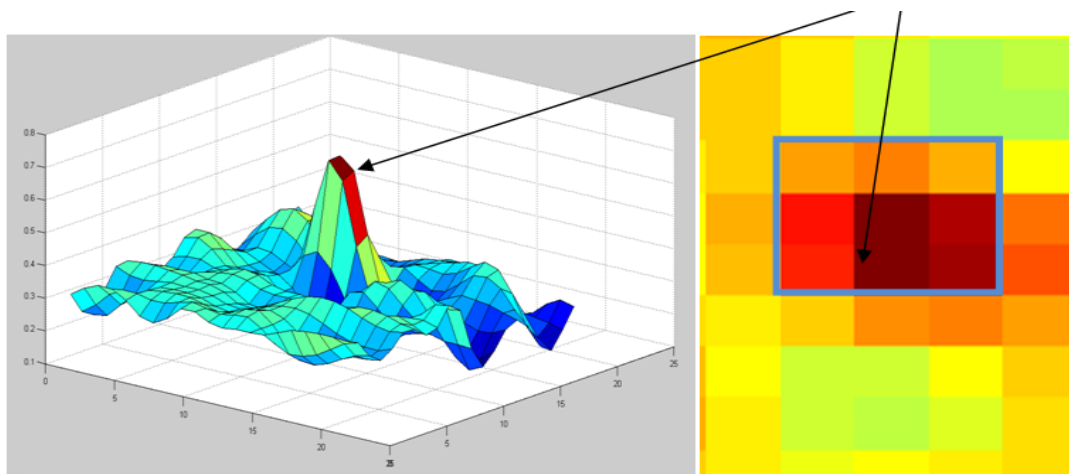
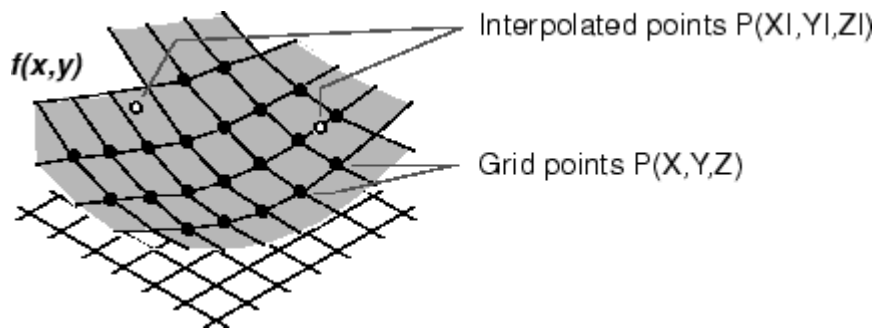


Figure 4: le pic du coefficient de corrélation

On aura une matrice de 3 x 3 avec la valeur du pic au milieu. Par exemple :





Même méthode que dans la recherche du déplacement au niveau de pixel expliquée avant, on cherche la plus grande valeur dans la nouvelle matrice de corrélation engendrée par l'interpolation, et on retrouve le déplacement sous-pixel correspond à cette valeur.

### Quelques remarques:

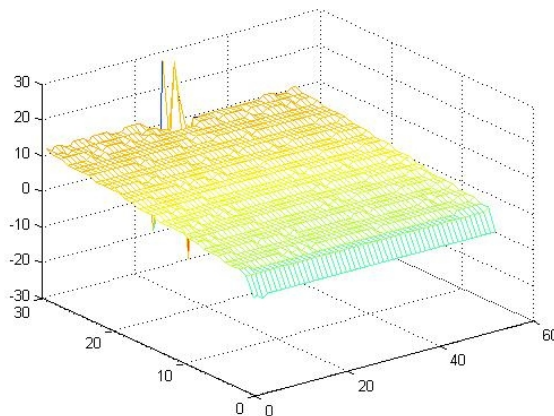
(1) En utilisant une image de référence, on a trouvé entre millimètre et pixel et ainsi, on peut transformer notre résultat au millimètre.

(2) La dimension de la petite fenêtre que l'on choisit dans le corrélation ne doit pas être inférieure que le déplacement estimé ou être trop grand pour avoir une étude de déplacement détaillé.

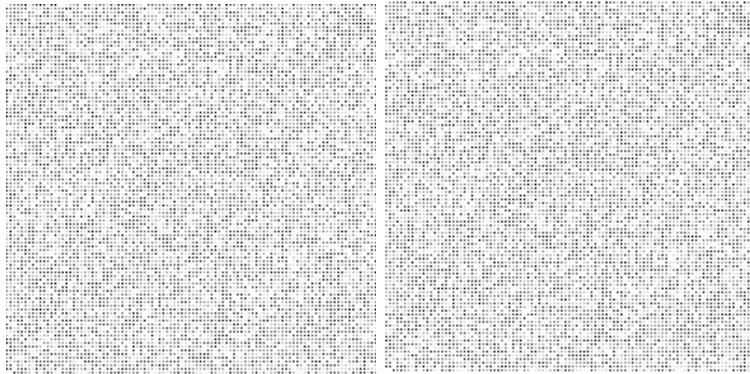
### (6) Traitement des résultats

Enfin, on peut également obtenir les graphiques qui permettent de représenter la répartition du déplacement comme ceux qui est montrés ci-dessous:

Ce genre de maillage illustre le déplacement vertical 3D.

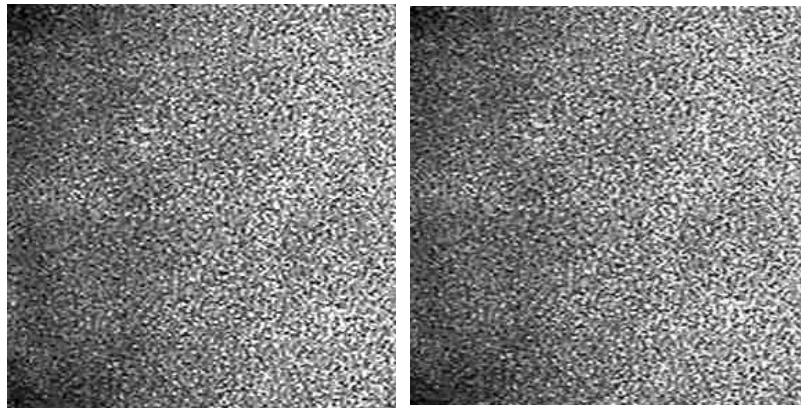


**Premier test:** 2 images avec un déplacement uniforme au niveau de pixel



On obtient comme résultat une translation uniforme  $x=10$  et  $y=5$ , ce qui correspond à ce qu'on était censés d'obtenir.

**Deuxième test :** Un déplacement uniforme sous-pixel.



En utilisant le programme, on a obtenu une translation uniforme entre les 2 images, de :  $x = 8,438$  et  $y = 3,485$ , qui est de précision 0.001 de sous-pixel.

Enfin, après avoir testé notre code en obtenant des résultats corrects, on peut passer aux essais pratiques.

### 3.3. Travail expérimental

Dans la deuxième partie du projet on s'est proposé de réaliser des mesures de corrélation d'images. On a réalisé 2 montages – le premier pour une mesure d'extensomètre et le 2ème pour la mesure de la déformation thermique.

#### 3.3.1. Premier montage de mesure (extensomètre)

Les éléments du montage sont :

- une caméra digitale Canon (pour l'acquisition d'images)
- banc de traction
- objet testé : éprouvette en élastomère
- ordinateur avec le logiciel d'acquisition dédié (RemoteCaptureDC)

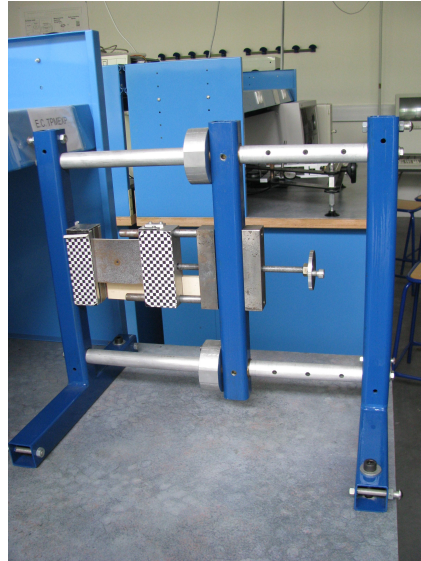


Figure 5: Banc d'essai

La démarche de la mesure est la suivante :

On a commencé par faire les réglages initiaux de la caméra (clarté, position, éclairage, etc.) pour obtenir des images de bonne qualité. Ensuite, quelques images ont été prises, au cours de l'essai de traction (la première correspond à l'état initial de l'objet (repos) et les autres à des sollicitations de plus en plus grandes). Finalement une dernière image à été prise, avec une mire d'étalonnage, qui va nous servir pour faire l'étalonnage spatial.

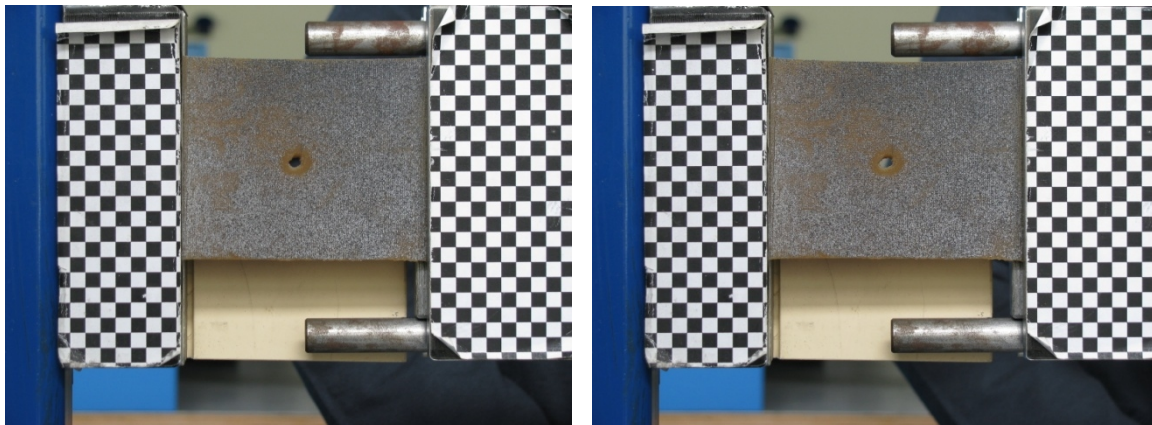


Figure 6: Images acquises

### 3.3.2. **Résultat et analyse**

Les champs de déplacements obtenus selon la direction horizontale et verticale sont présentes dans la figure x. Dans chacune figure, rouge représente déplacement de 20-25 pixels, orange représente déplacement de 10-15 pixels, jaune représente 5-10 pixels, vert 0-5 pixels, bleu claire -5-0 pixels, et bleu foncé -10- (-25) pixels. Pour la direction horizontale, la valeur positive représente que la gomme se déplace à gauche, négative à droite. Pour la

direction verticale, la valeur positive représente que la gomme se déplace vers dessous, et négative vers dessus.

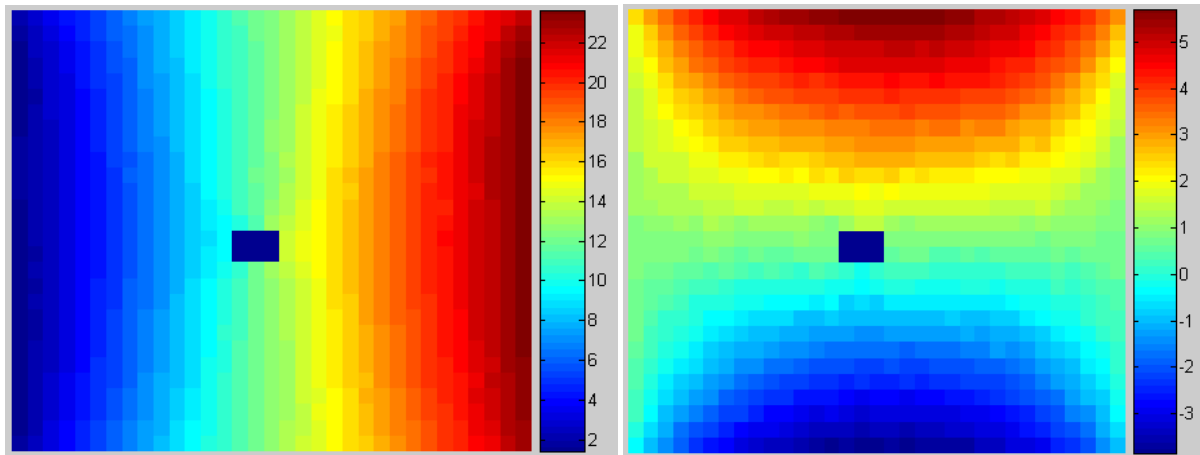


Figure 7 : Champs de déplacement

Après avoir obtenu les champs de déplacement (dont les unités de mesure sont les pixels), on peut faire une conversion dans l'espace métrique, en utilisant une mire d'étalonnage.

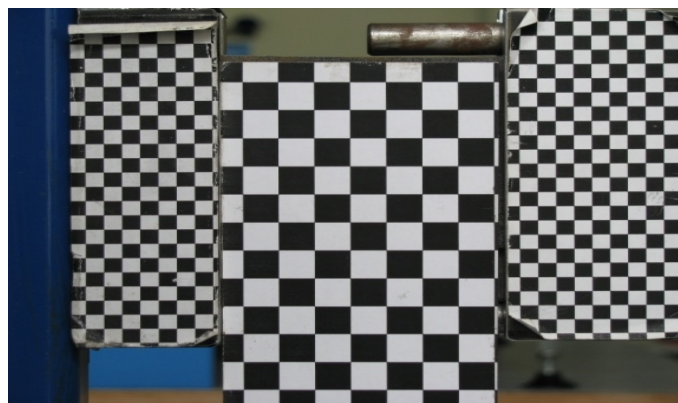


Figure 8 : Mire d'étalonnage.

A partir des champs de déplacements, on obtient les déformations spécifiques, basées sur les dérivées spatiales des champs :

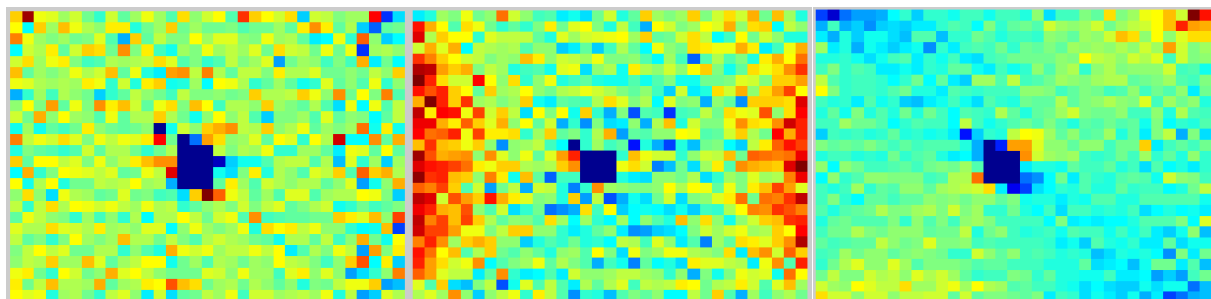


Figure 9 Les déformations spécifiques

Les champs des contraintes sont obtenus, en connaissant la valeur du Module du Young (qui pour le matériel de l'éprouvette est de 1,5 MPa et en considérant que la déformation est purement élastique.

### 3.3.3. Essai thermique

L'objectif de cette expérience est de mesurer la déformation par suite du changement de la température.

- **Préparation**

Pour la réussite des mesures de déformation avec le programme de corrélation, la prudence est alors de mise sur ces 2 aspects.

(1) il est indispensable d'obtenir un bon mouchetis. La figure des taches peut être naturelle ou appliqué avec de la peinture blanche et noire. Dans cette expérience, nous avons utilisé une échantillon en plastique noir, avec la peinture blanche (peinture en aérosol (voir la photo ci-dessous) pour créer des taches blanches.



Figure 10: l'aérosol pour créer le mouchetis

(2) L'éclairage doit être approprié ( il peut changer avec le temps, ce qui va affecter les images que l'on obtient par l'appareil photo). L'échantillon doit être éclairée par une source naturelle.

- **Matériels nécessaires:**

Un objet (couvercle en plastique), les outils pour fixer son position (nous avons marqué trois points sur la table, afin de déterminer l'emplacement de l'échantillon), un appareil photo numérique (canonSX110).

- **Manipulation**

Nous avons réalisé le montage de mesure par déposer l'appareil de photo devant l'objet que nous allons étudier et puis nous avons le connecté sur l'ordinateur. L'avantage pour utiliser l'ordinateur, c'est qu'il nous permet de prendre la photo sans toucher l'appareil photo. Et puis, nous avons ajusté la focale (maintenant l'appareil photo est en mode "macro") pour pouvoir rapprocher la caméra au maximum.

Ensuite, nous avons pris les images de cet objet vide avec la température ambiante (Voir la figure11).

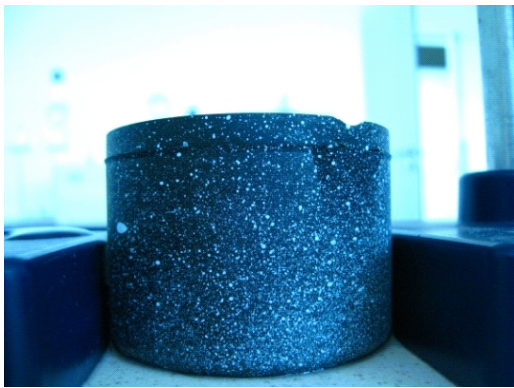


Figure 11: échantillon vide

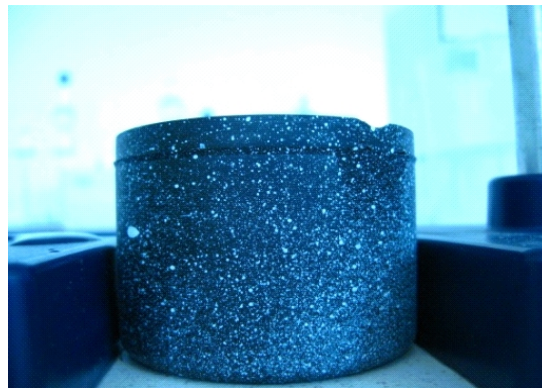


Figure 12: échantillon avec l'eau chaude

Nous avons ajouté de l'eau directement dans cet échantillon , ceci est afin de mesurer sa

déformation avec l'eau sous température ambiante (on prend la photo figure 12).

Après, on verse l'eau au 100°C dans l'objet, et on prend la dernière photo.

Les résultats obtenus ne sont pas concluants, la raison principale étant le fait que dans ce processus, bien que nous essayions d'encadrer l'objet et marquer son position, l'erreur causée par le changement de position de cet objet est inévitable.

Donc, on a changé les conditions de l'essai comme décrit dans le paragraphe suivant.

### **3.3.4. Déformation de l'objet par chauffage direct**

Cette fois on essaye d'étudier la déformation de l'objet en plastique soumis à un chauffage direct (par exemple une plaque électronique)

- **Montage:**

Tous les matériels comme l'expérience antérieure (même objet et même montage de photographique) sauf que l'objet sera chauffé par une plaque électronique.

Avantage: On minimise l'erreur de mesure car l'objet ne se déplace plus pendant la manipulation.

Inconvénient: Quand on surchauffe l'objet, il pourrait avoir les déformations irréversibles.

- **Manipulation**

(1) On fait le montage de photographie comme l'expérience 2 et on place une plaque électronique dessous l'objet étudié.

On prend une première image (de référence) (Voir la figure 13,14) à température ambiante comme la référence.



*Figure 13,14 : Champs de déplacement*

(2) On chauffe la plaque électronique et au fur et à mesure, on prend des images 2 fois par minute .



### 3.3.5. Analyse des résultats :

- eq 1. Les images acquises sont traitées dans notre logiciel de corrélation : après avoir sélectionné notre région d'intérêt, on fait des tests préliminaires (corrélations des quelques pixels) pour trouver la bonne taille pour la fenêtre d'interrogation. Finalement, on choisit une fenêtre de 30 pixels, ce qui nous permet d'obtenir un nombre de 46 x 35 des points de mesure.
- eq 2. Les champs de déplacement selon la direction horizontale et verticale sont présentés dans la figure x.

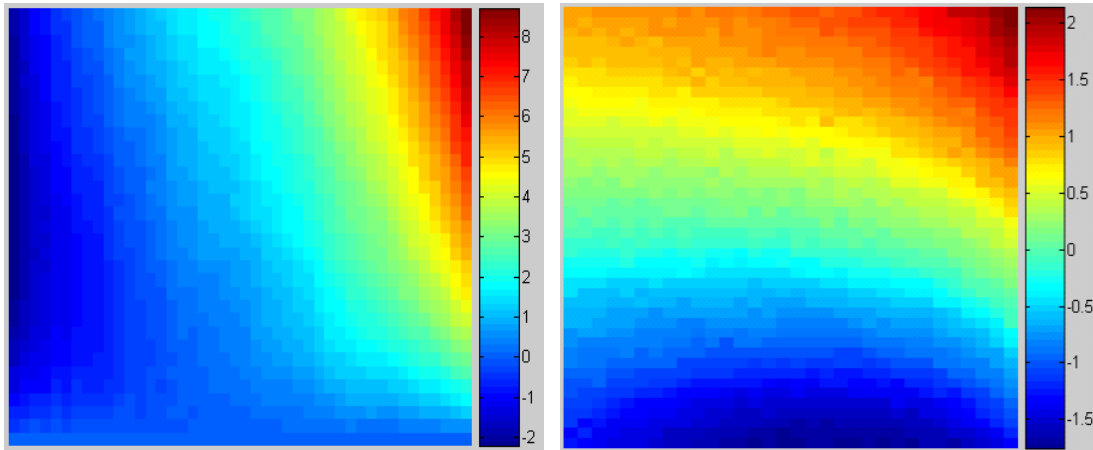


Figure15 : Champs de déplacement

Comme attendu, on obtient une dilatation de la surface (dans les 2 directions) ; ces résultats peuvent donc servir pour déterminer le coefficient de dilatation thermique, selon les équations décrites dans paragraphe.

## **4. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES**

La réalisation de ce projet nous a permis de découvrir la technique de corrélation d'images numériques, de comprendre les principes de base.

De plus, nous avons réussi à réaliser des mesures expérimentales conçues par nous-même. Une partie importante du projet a été le développement du logiciel de corrélation sous Matlab, qui nous a approfondi notre connaissance de traitement des données liées aux images numériques.

Le sujet nous a intéressé et nous a fait découvrir la technique de la corrélation d'image, aussi bien des méthodes pour concevoir, réaliser et améliorer une expérience en laboratoire, et les moyens informatiques pour analyser les résultats expérimentaux.

Les difficultés principales que nous avons rencontrées sont dues à la programmation et à la mise en œuvre des détails des expériences que l'on a conçues soi-même. Nous avons rendu compte que bien que les principes soient simples à comprendre, il y a encore une différence importante entre une idée et comment on la transforme en une solution concrète et détaillée pratique.

Ainsi, nous avons mis plusieurs séances pour discuter des problèmes et notre professeur a nous aidé beaucoup pour améliorer nos expériences et les problèmes concernant la programmation.

En conclusion, nous pouvons dire que ce projet a été très enrichissant pour tous les membres du groupe, chacun a pu trouver son domaine de compétences et apporter ses connaissances à l'ensemble du groupe.

### **Perspectives pour la poursuite de ce projet**

Concernant la poursuite du projet, il faut voir que de nombreuses améliorations sont possibles.

On a dépensé assez de temps dans la programmation, ce qui nous n'a laissé pas suffisamment de temps pour l'amélioration de notre travail expérimental.

En premier lieu, il aurait fallu réaliser plusieurs expériences et essayer avec les matières différentes pour obtenir les résultats statistiques. Et il aurait été intéressant de comparer les comportements des plusieurs matières soumises dans des conditions diverses, ce qui aurait poussé notre projet dans des études plus approfondies.

Dernièrement, le manque de temps a fait que l'on n'a pas réussi à améliorer les expériences que nous avons conçues nous-mêmes. Ici, nous proposons des perspectives comme suite:

- avoir un éclairage constant pendant l'expérience
- changer la surface des objets observés à la forme plate.
- changer la manière pour fixer la position de l'objet observé, et du appareil photos.
- changer la manière pour chauffer l'objet sans le toucher. Ici, on propose un montage avec un bâton de chauffage qui peut être mis directement dans l'eau.

Ensuite, on pourrait faire la corrélation d'image en 3D, ceci sera réalisé en utilisant un montage à 2 caméras (stereocorrélation).



## **BIBLIOGRAPHIE**

- [1] [www.mesures.com/archives/810\\_LDS\\_Correlation-image-numerique.pdf](http://www.mesures.com/archives/810_LDS_Correlation-image-numerique.pdf)
- [2] [http://fr.wikipedia.org/wiki/Module\\_de\\_Young](http://fr.wikipedia.org/wiki/Module_de_Young)
- [3] [web.univ-ubs.fr/lg2m/mecadymat08/.../10-rethore.pdf](http://web.univ-ubs.fr/lg2m/mecadymat08/.../10-rethore.pdf)
- [4] [www.fast.u-psud.fr/...de.../CoursMFCorrelationImages.pdf](http://www.fast.u-psud.fr/...de.../CoursMFCorrelationImages.pdf)
- [5] [http://www.si.enscachan.fr/accueil\\_V2.php?id=131&page=affiche\\_ressource](http://www.si.enscachan.fr/accueil_V2.php?id=131&page=affiche_ressource)
- [6] [http://fr.wikipedia.org/wiki/Corr%C3%A9lation\\_d%27images](http://fr.wikipedia.org/wiki/Corr%C3%A9lation_d%27images)
- [7] <http://www.dantecdynamics.com/Default.aspx?ID=1030>
- [8] [www.holo3.com/UserFiles/File/Publication1\\_FH.pdf](http://www.holo3.com/UserFiles/File/Publication1_FH.pdf)



## ANNEXE

### Code du logiciel sous Matlab 7.5

```
clear all
```

```
clc
```

```
%=====
```

```
%on ouvre les 2 images a corréler
```

```
[FileName,PathName,FilterIndex] = uigetfile()
```

```
file1 =[PathName FileName];
```

```
[FileName,PathName,FilterIndex] = uigetfile()
```

```
file2 =[PathName FileName];
```

```
i1=imread(file1);
```

```
%i1=imread('ima0.bmp');
```

```
i2=imread(file2);
```

```
%i2=imread('ima1.bmp');
```

```
im1 = im2double(i1);
```

```
im2 = im2double(i2);
```

```
[l1,c1]=size(im1);
```

```
[l2,c2]=size(im2);
```

```
%=====
```

```
%on divise la premiere image dans des blocs de dimension a*c
```

```
a=20;% longueur de chaque unite
```

```
b=floor(l1/a);% nombre des unités sur le colonne
```

```
c=20;% largeur de chaque unite
```

```
d=floor(c1/c);% nb des unités sur le ligne
```

```
%=====
```

```
%on balaye chaque unite dans l'image 2
```

```
for i=1:d
```

```
    % on defini la fenetre d'interrogation
```

```
    for j=1:b
```

```
        left1 = 1+(i-1)*c;
```

```
        right1 = i*c;
```

```
        top1 = 1+(j-1)*a;
```

```
        bottom1 = j*a;
```

```

    rect_im1 = im1(top1:bottom1,left1:right1);
% ceux-ci montre l'ordonee d'unite 1 dans
    centre1=floor((left1+right1)/2);
    centre2=floor((top1+bottom1)/2);
% le coordonee de centre de fenetre1

left2=centre1-c+1;
if(left2<1)
left2=1; %pour que le fenetre 2 ne passe pas la borne de l'image2
end

right2=centre1+c;
if(right2>c2)
right2=c2;
end

top2=centre2-a+1;
if(top2<1)
top2=1;
end

bottom2=centre2+a;
if(bottom2>c1)
bottom2=c1;
end

%ceux-ci montrent la dimension de fenetre 2
rect_im2 = im2(top2:bottom2,left2:right2);
[llm2,clm2]=size(rect_im2);
%=====
%calcul de la matrice de correlation

if std(rect_im1(:))~= 0
corr = normxcorr2(rect_im1,rect_im2);
end

%=====
%on trouve le deplacement a partir de la correlation

```

```

%on trouve la valeur maximum dans le resultat de la matrice de correlation
%cette valeur max doit etre proche de 1
[max_c, imax] = max(abs(corr(:)));

% on change le soutitre au indice
[ypeak, xpeak] = ind2sub(size(corr),imax);

% on retrouve le deplacement de fenetre 1 par la calcul suivante:
deplacement = [xpeak-(c+clm2)/2, ypeak-(a+llm2)/2];
deplacementDeX(i,j)=deplacement(1);
deplacementDeY(i,j)=deplacement(2);
%=====
%on trouve le deplacement de sous-pixel par la methode d'interpolation

mat=corr(ypeak-1:ypeak+1,xpeak-1:xpeak+1);
precision=100;
[X,Y] = meshgrid(1:3);
step=1/precision;
xups=1:step:3;
% centre=floor(length(xups)/2);
% xups(centre)
[XI,YI] = meshgrid(1:step:3);
subp = interp2(X,Y,mat,XI,YI, 'spline');
%figure(666),mesh(XI,YI,subp)
[max_subp, simax] = max(abs(subp(:)));
[syind, sxind] = ind2sub(size(subp),simax(1));
deplacementSouspixelDeY = xups(syind)-2
deplacementSouspixelDeX = xups(sxind)-2

%corr_offset = corr_offset + [sypeak sxpeak];

% on defini la matrice a interpoler
ypmin = max(ypeak-1,1);
xpmin = max(xpeak-1,1);
ypmax = min(ypeak+1,size(corr,1));
xpmax = min(xpeak+1,size(corr,2));
%
mat = corr(ypmin:ypmax,xpmin:xpmax);

```

```

%
precision=100;
[X,Y] = meshgrid(1:size(mat,2),1:size(mat,1));
step=1/precision;

xups=1:step:size(mat,2);
yups = 1:step:size(mat,1);
[XI,YI] = meshgrid(xups,yups);
subp = interp2(X,Y,mat,XI,YI, 'spline');
%mesh(XI,YI,subp)
[max_subp, simax] = max(abs(subp(:)));
[syind, sxind] = ind2sub(size(subp),simax(1));

deplacementSouspixelDeX(i,j)=xups(sxind)-(1+(size(mat,2)))/2
deplacementSouspixelDeY(i,j)=yups(syind)-(1+(size(mat,1)))/2
end
end

%=====

% le champs de déplacement total
resultatDeX=deplacementDeX+deplacementSouspixelDeX
resultatDeY=deplacementDeY+deplacementSouspixelDeY

%=====

% etalonnage
% on selectionne une zone de 4 carrés sur la mire
im=imread('mire_etal.jpg');
imshow(im)
[x,y]=ginput(2);

unMillimetre=(y(2)-y(1))/10/4
%on a obtenu unMillimetre =17.2000
resultatDeXEnMillimetre=resultatDeX./unMillimetre;
resultatDeYEnMillimetre=resultatDeY./unMillimetre;

```

**INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUEES DE ROUEN**  
**Département Sciences et Techniques Pour l'Ingénieur**

BP 8 – place Emile Blondel - 76131 Mont-Saint-Aignan - tél : 33 2 35 52 83 00 - fax : 33 2 35 52 83 69