

## INTRODUCTION A LA CORRELATION D'IMAGE NUMERIQUE



**Etudiants :**

**Ergi DIBRA**

**Pauline MARTIN**

**Nicolas DIERS**

**Emmanuel MENIER**

---

**Enseignant-responsable du projet :**

**David BOUSCARRAT**



Date de remise du rapport : **13/06/2016**

Référence du projet : **STPI/P6/2016 – 18**

Intitulé du projet : **Introduction à la corrélation d'image**

Type de projet : **expérimental, recherche bibliographique**

Objectif du projet :

**L'objectif du projet est de comprendre ce qu'est la corrélation d'image numérique et son utilité dans de nombreux domaines mais principalement dans le cadre de l'étude des déformations sur des matériaux composites. Cela nous a amené à faire nous même réaliser une corrélation d'image à partir de l'extension d'une éprouvette de matériaux composites.**

Mots-clefs du projet : **corrélation, image, matériaux, déformation**

## TABLE DES MATIERES

1. Introduction.....	5
2. Méthodologie / Organisation du travail.....	5
3. Travail réalisé et résultats.....	6
3.1. Recherches et définitions.....	6
3.1.1. Corrélation d'image.....	6
3.1.2. Matériaux composites.....	7
3.1.3. Notion de contrainte et de déformation.....	10
3.2. Utilisation de la corrélation d'image pour mesurer une déformation.....	11
3.2.1. Matériel nécessaire.....	11
3.2.2. Protocole expérimental.....	12
3.2.3. Description du logiciels Vic2D.....	12
3.3. Traitement et analyse des données.....	13
3.3.1. Matlab.....	13
3.3.2. Mathematica.....	15
3.3.3. Vic2D.....	18
4. Conclusions et perspectives.....	19
5. Bibliographie.....	21
6. Annexes : Code Matlab.....	22
6.1. Code 1.....	22
6.2. Code 2.....	24

## 1. INTRODUCTION

Nous n'avions jusqu'à maintenant pas réalisé de projet sur le thème de la physique au cours de notre parcours en STPI. Chaque élève devait établir une liste de vœux cependant, contrairement aux projets réalisés jusqu'à maintenant les personnes avec qui le travail devait être réalisé étaient désignées et non choisies. Cela a donc été une vraie expérience de travail de groupe avec une équipe et de gestion de projet ce qui correspond à des aspects importants du travail d'ingénieur.

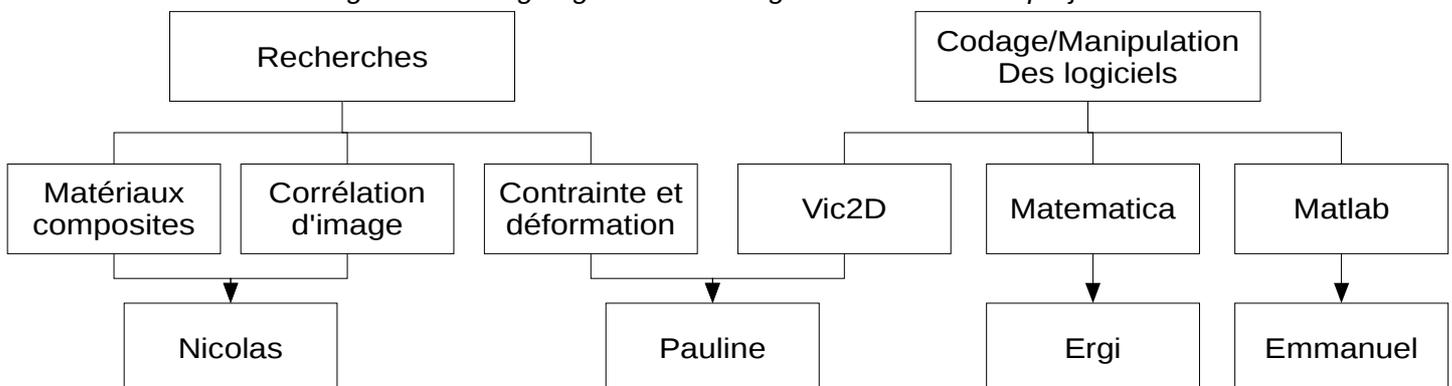
C'est une application concrète de nos connaissances acquises en cours autant en terme d'informatique que de physique des matériaux. Réaliser des recherches et des essais de corrélation d'images a donc été très intéressant.

En effet nous devons réaliser des recherches sur la résistance et la déformation des matériaux, ce qui rappelle la P9 pour ceux en département de mécanique. Les recherches sur les matériaux composites et leurs applications nous ont appris beaucoup car nous ignorions tout de ce sujet. Enfin l'utilisation et le concept de corrélation d'images nous a permis de mettre en parallèle ces recherches physiques avec l'informatique notamment grâce au logiciel vic2D et à des programmes matlab réalisés. Nous faisons principalement parti des départements génie mécanique et ASI, ce projet était donc totalement en rapport avec la suite de notre parcours.

## 2. MÉTHODOLOGIE / ORGANISATION DU TRAVAIL

Au début de notre projet nous ignorions tout de la corrélation d'image, nous avons donc commencé par faire des recherches sur le sujet. Deux d'entre nous, Emmanuel et Ergi se sont proposés pour coder une fonction qui réalise la corrélation d'image. Ensuite notre enseignant-responsable nous a informé que nous devrions appliquer cette corrélation en réalisant des tests avec un extensomètre sur des matériaux composites. Nous avons donc réalisé des recherches sur le sujet ainsi que sur ce que nous testons, c'est-à-dire la déformation. Nous avons réalisé les tests ensemble et traité les données chacun de notre côté.

figure 1 : Organigramme de l'organisation de notre projet



### 3. TRAVAIL RÉALISÉ ET RÉSULTATS

#### 3.1. Recherches et définitions

##### 3.1.1. *Corrélation d'image*

###### 3.1.1.a. *Principe général*

La corrélation d'image numérique est une méthode optique qui permet de mesurer le déplacement entre deux images. C'est-à-dire que si l'on corrèle deux images, par exemple la première serait celle d'une balle en l'air et la seconde celle de la même balle une seconde plus tard, donc en train de chuter, on sera capable de savoir le déplacement de cette balle. Il faut cependant que les deux images soient dans des conditions de luminosité identique et qu'elles soient prises par le même appareil au même endroit avec le même cadrage. Dans notre cas nous étudierons une image d'un matériau composite et un autre de ce même matériau déformé après avoir subi une extension. Il est possible par cette méthode d'analyser des déplacements en 3D mais nous utiliserons uniquement la méthode en 2D.

Pour pouvoir analyser une image 2D par ordinateur, on la considère comme une matrice de  $\mathbb{R}^2$  dont chaque élément correspond à un niveau de gris. Les éléments sont des pixels qui peuvent être codés par exemple avec 8 bits, leurs valeurs iront de 0 à 255. Plus on code sur un nombre important de bits plus on aura d'informations et de précision.

La corrélation d'image compare donc deux matrices d'image, la première non déformée qui correspond à une fonction  $f(x)$  ( $x$  étant un vecteur) et l'autre après déformation correspondant à  $g(x)$ . Ainsi  $r$  le déplacement d'une zone d'étude de l'image non-déformée est modélisée par la formule :  $h(u) = \iint g(x)f(x-u) du$  où  $u$  est le vecteur de déplacement.

On obtiens alors dans le où il n'y a pas de déplacement  $h = \iint |f(x)|^2$ . Il faut donc trouver le cas où  $h$  est minimisé et c'est le nouvel emplacement de la zone d'étude.

###### 3.1.1.b. *Applications*

La méthode de la corrélation d'images est utilisée dans de nombreux domaines de la physique. Celle en 3D est souvent privilégiée.

- Elles sert ainsi à caractériser des matériaux, comme dans le cadre de notre projet. On applique des forces à des échantillons (compression, traction, échauffement ...) et on observe les déformations et les déplacements qui s'ensuivent. Cette méthode est particulièrement efficace pour traiter les métaux, les matériaux composites et les élastomères. On peut ainsi déterminer les propriétés mécaniques et les lois de comportement des matériaux utilisés.

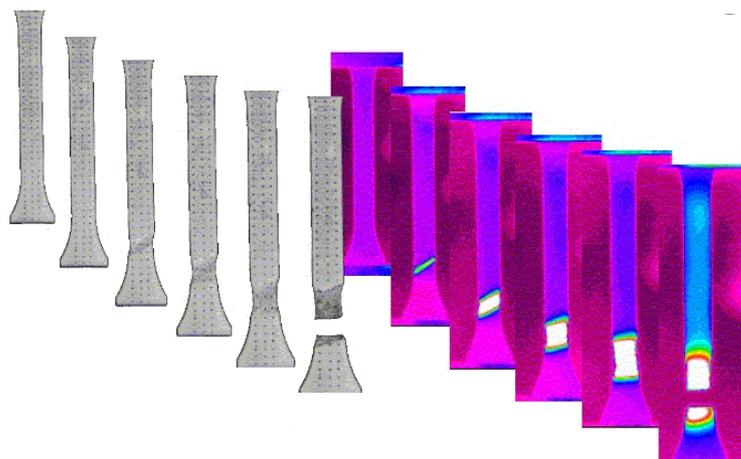


figure 2 : Déformation d'une éprouvette de matériau composite

- Elle est aussi utilisée dans la numérisation en 3D afin de modéliser des formes rapidement, sans contacts avec les objets traités et avec une bonne précision. Il faut pour cela projeter une image discontinue (mouchetis) sur l'objet et utiliser deux caméras en même temps. Ce procédé est retrouvé dans le domaine de l'archéologie, de l'étude d'objets d'art, de la chirurgie esthétique, du contrôle dimensionnel et du prototypage.

- La corrélation d'image permet de plus d'étudier des impacts à vitesse élevée. On étudie les déplacements et les déformations des pièces pendant un impact grâce au suivi continu et à la prise de plusieurs images pendant cet impact. Cette méthode est particulièrement utilisée pour les crash-tests automobiles, pour l'étude de certains armements et blindages et dans le domaine de la pyrotechnie.

- Cette technique est aussi présente dans la mécanique des sols afin de valider des modèles mathématiques quant à l'effondrement, la déformation et le comportement des sols et des fondations. Elle est donc présente pour l'étude des mouvements de terrain (glissements et affaissements), pour la construction de tunnels, sur les ancrages offshore (fixation des plate-formes pétrolières) et dans la simulation de mouvements sur des maquettes placées dans des centrifugeuses.

- On la retrouvera enfin dans le domaine de la biomécanique, c'est un outil d'étude supplémentaire dans le domaine de l'imagerie médicale afin d'étudier les propriétés des matériaux biologiques tels que la peau, les os, les muscles et les tendons. On l'utilise donc dans la réalisation de prothèses aux propriétés physiques proches de celles des matériaux naturels et dans la création de mannequins : des modèles biomécaniques de l'humain afin de simuler des chocs ou des contraintes.



figure 3 : Numérisation d'un visage

-On peut aussi noter l'utilisation de la corrélation d'images numériques dans l'étude des vibrations et dans l'étude des contraintes et des déformations subies par un bâtiment au cours d'un tremblement de terre.

On peut en conclure que cette technique s'est très rapidement propagée dans de nombreux domaines scientifiques. Elle est en effet très appréciée pour sa rapidité, sa précision et sa facilité de mise en œuvre avec seulement deux caméras et un ordinateur.

### 3.1.2. **Matériaux composites**

Il s'agit d'un matériau en phase solide, assemblage d'au moins deux constituants non-miscibles dont les propriétés se complètent. On obtient alors un matériau possédant des propriétés des différents constituants et donc des performances meilleures dans le domaine souhaité.

Ces matériaux composites sont composés d'une matrice et d'un renfort auxquels on peut ajouter des charges et des adjuvants.

#### 3.1.2.a. **Composition d'un matériau composite**

**-Le renfort :** Le renfort apporte la plupart des propriétés mécaniques du matériau composite final. C'est le squelette, il va subir les efforts mécaniques. Il est composé de fibres, résistantes à la traction mais peu à la compression. On différencie les composites homogènes constitués d'un seul renfort des composites hybrides composés d'une association de renforts.

- **La matrice** : La matrice d'un matériau composite est le liant, elle permet de protéger le renfort de l'extérieur, de le maintenir dans la forme initiale et de répartir les efforts dans toute la masse. Il existe trois grands types de matériaux composites définis par leur matrices :

- Les matériaux composites à matrice organique (C.M.O)
- Les matériaux composites à matrice céramique (C.M.C)
- Les matériaux composites à matrice métallique (C.M.M)

- **Les adjuvants** : Il s'agit d'additifs souvent liquides ou poudreux, ajoutés en très faible quantité pendant la formation du matériau afin d'améliorer une propriété physique. On peut ainsi rendre le matériau composite plus souple, plus élastique, ou plus résistant à la chaleur.

- **Les charges** : les charges sont des solides dispersés dans la matrice afin de modifier la densité ou certaines propriétés du matériau. Elles sont présentes à raison de quelques pourcents lorsqu'elles sont utilisées. Elles se trouvent sous la forme de poudre minérale ou organique, de fibres, ou de petites sphères de verre creuses.



figure 4 : Différents panneaux en matériaux composites

### 3.1.2.b Différents types de matrices et de renforts

On peut donc différencier les matériaux composites en trois grands types selon la nature de la matrice utilisée. Les plus courants sont les **matériaux composites à matrice organique (C.M.O)**. Les renforts utilisés sont le plus souvent la fibre de verre (courante), la fibre de carbone (performante) et la fibre d'aramide ou de polypropylène (résistante). Ces fibres peuvent être soit disposées de manière aléatoire au sein du matériau, soit toutes parallèles les unes aux autres afin de les renforcer dans une direction particulière, soit tressées avec un angle choisi entre les fibres afin de renforcer le matériau final dans toutes les directions. Leurs matrices sont des résines polymères parmi lesquelles on distingue deux familles :

- **Les thermoplastiques** : Des molécules longues et linéaires dont les liaisons se cassent en cas d'augmentation de température et se reforment lors d'un refroidissement. C'est une transformation réversible qui permet de remodeler la matière à haute température et de la solidifier à basse température. (ex : polyamides, les polycarbonates, les polysulfures ...)

- **Les thermodurcissables** : Il s'agit la plupart du temps d'un liquide qui va durcir et qui ne pourra être mis en place qu'une seule fois, On ne peut pas les déformer par la suite.

Cette transformation chimique se réalisera suite à un réchauffement, des radiations ou l'effet d'un durcisseur. (ex : les polyesters, les polyimides, les époxydes ...)

Les thermodurcissables sont plus résistants, plus rigides et moins ductiles et sont très souvent privilégiés de part la facilité de leur mise en forme.

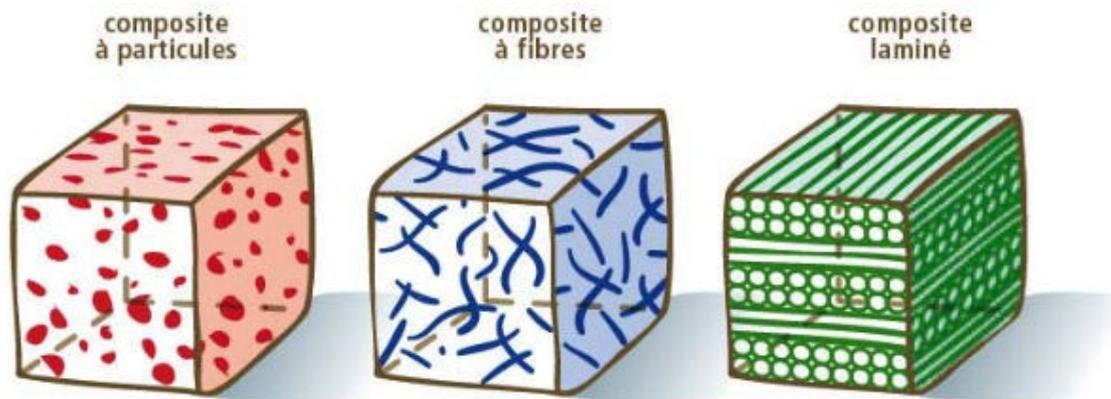


figure 5 : Les trois types de renforts les plus communs

Les **matériaux composites à matrice céramique (C.M.C)** sont plus rares du fait de leur coût plus élevé. On les retrouve principalement dans l'industrie spatiale et aéronautique militaire. La céramique permet un matériau résistant à la température et léger permettant des meilleures performance que les métaux dans ces domaines.

Cependant la fragilité de la céramique se retrouve en partie dans le matériau composite final. On l'ajoute à la structure sous la forme de plusieurs couches. Les C.M.C ont souvent des renforts aux propriétés proches de celles de la céramique afin de gagner en ténacité et en ductilité.

Les **matériaux composites à matrice métallique (C.M.M)** sont utilisés pour ajouter les avantages des matériaux composites comme la légèreté et les propriétés mécaniques aux avantages du métal comme la résistance aux flammes et la ductilité. Cela leur procure de très grandes performance cependant ils ont un coût très élevé.

La matrice est constituée d'un métal léger tel que l'aluminium, le magnésium ou le titane. Elle est utilisée avec deux familles de renforts :

Des renforts constitués de fibres ou de particules courtes de céramique qui conservent les propriétés mécaniques du métal et permettent une formation simple du composite final.

Des renforts composés de fibres longues de céramique qui améliorent grandement les propriétés mécaniques des métaux mais sont très coûteux et difficiles à mettre en forme.

Les C.M.M ont donc d'excellents propriétés mécaniques mais souffrent de leur sensibilité aux réactions chimiques.

### 3.1.2.c. Les principales applications

On peut distinguer les matériaux composites selon leur qualité, on différencie alors les matériaux à grande diffusion de ceux à haute performance. Les matériaux à grande diffusion, qui représentent 95 % des C.M.O Leurs propriétés mécaniques sont moins bonnes mais ils bénéficient d'un coût relativement faible favorisant la production en série. A l'inverse, les matériaux à haute performances ont des propriétés mécaniques très élevées et

spécifiques à l'application souhaitée. Ils sont par conséquent beaucoup plus chers et sont utilisés principalement dans l'aéronautique et le spatial.

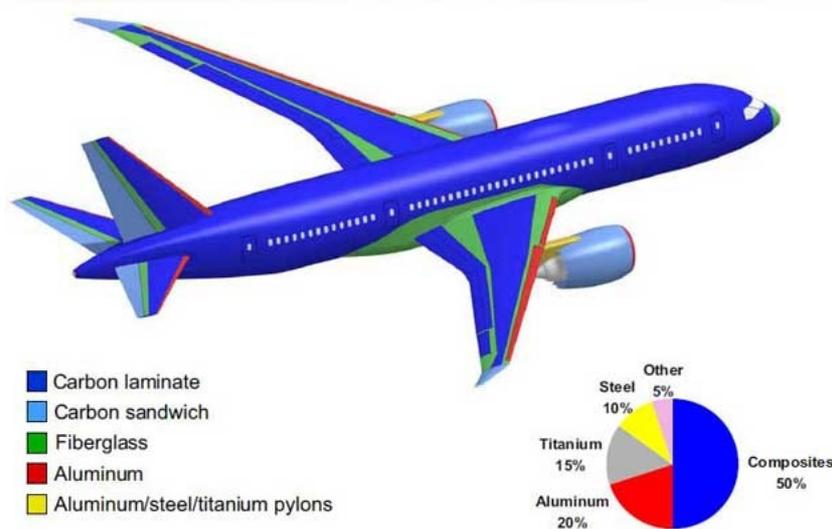


figure 6 : Proportion et emplacement des différents types de matériaux composites dans un Boeing 787

Les matériaux composites sont utilisés dans de nombreux domaines, tel que la médecine afin de réaliser des prothèses, des implants ou le matériel et les outils chirurgicaux. On les retrouve dans le domaine énergétique où ils composent les éoliennes et les panneaux solaires. Ils sont aussi présent dans le bâtiment puisque le béton armé est un matériau composite.

La légèreté et la résistance de ces matières est recherchée dans l'aéronautique et le spatial afin de réaliser le fuselage des avions et des bateaux. De même on les retrouve dans le domaine de l'automobile pour la réalisation de la carrosserie. Enfin ils sont utilisés pour la fabrication de biens de consommation surtout pour du matériel sportif (ski, vélo, ...).

### 3.1.3. Notion de contrainte et de déformation

#### 3.1.3.a. La contrainte

La contrainte est la force qui est exercée sur une unité d'aire d'un solide. C'est à dire que l'on prend une surface carré de côté unitaire infinitésimal à l'intérieur du solide et on cherche les forces qu'elle subit. Il s'agit donc d'une force sur une surface exprimée en Pascal, ce qui donne la formule :  $\sigma = F/S$ .

#### 3.1.3.b. La déformation

La déformation dans une direction donnée est définie macroscopiquement par  $\epsilon = \Delta l/l_0$ , c'est-à-dire l'extension de la partie étudiée sur sa longueur initiale, elle n'a pas d'unité. Il existe 2 types de déformation :

-La déformation élastique, celle-ci à lieu quand on applique une force à un solide comprise entre 0 N et une force limite dépendant du matériau et de la forme du solide, on observe alors que le solide reprend sa forme d'origine au bout d'un certain temps une fois que l'on arrête d'exercer la force. On peut appliquer la loi de Hooke :  $\sigma = E \times \epsilon_l$  avec  $\sigma$  la contrainte,  $\epsilon_l$  la déformation longitudinale et  $E$  le module d'Young qui dépend du matériau et des conditions de pression et de température.

-La déformation plastique, observable entre la force limite de la déformation élastique et la limite de rupture où le solide se casse, on observe alors que les déformations sont définitives. Dans cette phase on peut appliquer les différentes lois suivantes. La loi d'Hollomon  $\sigma = k\epsilon^n$  et sa version plus générale la loi de Ludwig  $\sigma = \sigma_0 + k\epsilon^n$  avec avec k et n (compris entre 0,1 et 0,5) des coefficients établis expérimentalement et  $\sigma_0$  la contrainte initiale ainsi que la loi de Voce  $(\sigma - \sigma_s) / (\sigma_0 - \sigma_s) = \exp(-A\epsilon)$  avec  $\sigma_s$  la contrainte seuil de rupture.

Au final si on trace la contrainte en fonction de la déformation, on obtient alors une courbe que l'on peut séparer en trois parties comme ceci, la première lors de la déformation élastique jusque  $R_e$ , la seconde lors de la déformation plastique jusque  $R_m$  et la dernière après cette valeur correspondant au seuil de rupture.

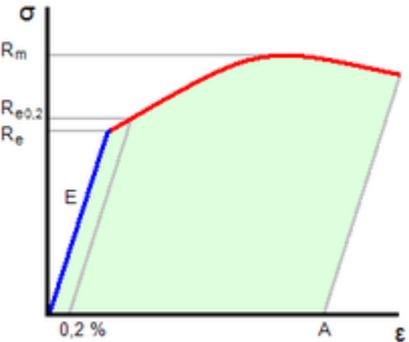


figure 7 : Exemple de courbe contrainte en fonction de la déformation

### 3.2. Utilisation de la corrélation d'image pour mesurer une déformation

#### 3.2.1. Matériel nécessaire

Pour réaliser l'expérience nous avons besoins de :

- Une camera ccd *charge coupled device* qui va capter les photons et les transmettre à travers des pixels à un ordinateur qui apporte un certain nombre d'informations en fonction du nombre de bits sur lequel ils sont codés.
- Une éprouvette de matériau composite mouchetée.
- Un extensomètre avec une vitre.

Ensuite pour traiter les données nous allons utiliser :

- Le logiciel Matlab qui va permettre d'analyser les données obtenues via des fonctions que nous avons codées
- Le logiciel Matematica qui fait de même
- Le logiciel Vic2D spécialement créé pour la corrélation d'image qui va nous permettre de visualiser directement les données à travers des gradients de déformation.

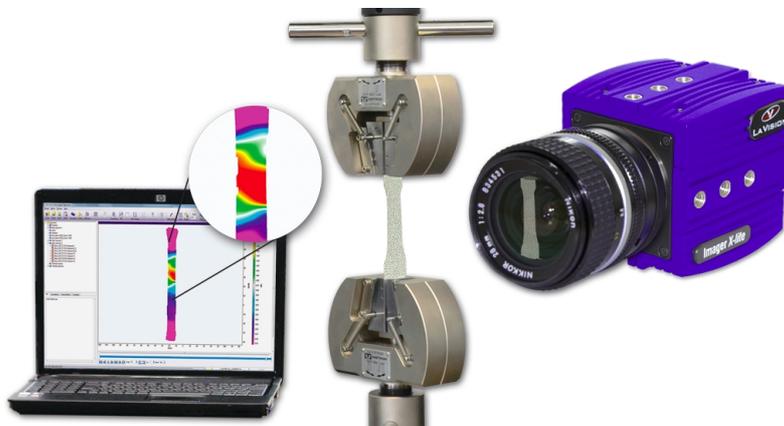


figure 8 : (De gauche à droite) Ordinateur avec le logiciel Vic2D / Une éprouvette mouchetée pincée par un extensomètre / Une caméra ccd

### 3.2.2. Protocole expérimental

Pour obtenir les données à traiter nous suivons le protocole experimental suivant, celui-ci permet de faire une corrélation d'image 2D qui fonctionne pour n'importe quelle éprouvette et n'importe quelle machine qui permet de tester un materiau.

-l'éprouvette est placée dans un extensomètre de manière à ce que la face mouchetée regarde la vitre de l'appareil. Une lumière constante doit être projetée sur l'éprouvette pour éviter tous changements de luminosité sur la surface et donc changer le niveau de gris en cas de déplacement.

-la caméra est placée devant la vitre pour filmer l'éprouvette de face, elle doit rester immobile tout le long de l'expérience.

-lancer l'extensomètre et son logiciel en même temps que la caméra.

-attendre jusqu'à ce que l'éprouvette se rompt.

-récupérer les données de l'extensomètre (contrainte exercée) et les images de la caméra.

-traiter les données grâce aux différents logiciels pour les analyser.

### 3.2.3. Description du logiciels Vic2D

Le logiciel Vic2D est spécialisé dans la corrélation d'image. Il permet de visualiser un déplacement dans un plan en fixant une image de référence et une zone d'étude. Il utilise un algorithme optimisé pour corrélér l'image de référence (à  $t=0$ ) avec les images suivantes ( $t>0$ ).

Pour l'utiliser on lui donne une série d'images issue de la caméra ccd puis on désigne une partie de l'image comme référence. Ensuite, on règle la taille du subset, c'est-à-dire la taille en pixel d'une partie de l'image. Le logiciel calcule le déplacement de chaque subset, donc plus le subset est petit plus la corrélation est précise. Par la suite un règle le step, qui correspond au déplacement du subset entre chaque image. Plus le step est petit, plus le déplacement du subset sera petit, plus l'information obtenue sera locale. Ces paramètres sont à régler pour chaque tests pour avoir la meilleure corrélation en prenant en compte que plus la taille de subset et le step est grands et plus le temps de calcul sera long.

Ensuite le logiciel calcule lui même les déformations et ressort les même images avec le pourcentage de déformations au niveau de chaque pixel sous forme de couleur. Nous avons réglé les paramètres d'échelle comme ceci :

nous visualisons les déplacements selon l'axe x (l'axe où l'extensomètre tire) en pourcentage de manière à que d'une image à l'autre l'echelle soit constante. Cela permet de comparer et de voir l'évolution d'une déformation.

L'avantage de cette technique est que l'on peut voir l'évolution des déformations sur plusieurs images concécutives et grâce à cela il est facile de déduire où l'éprouvette va se fendre.

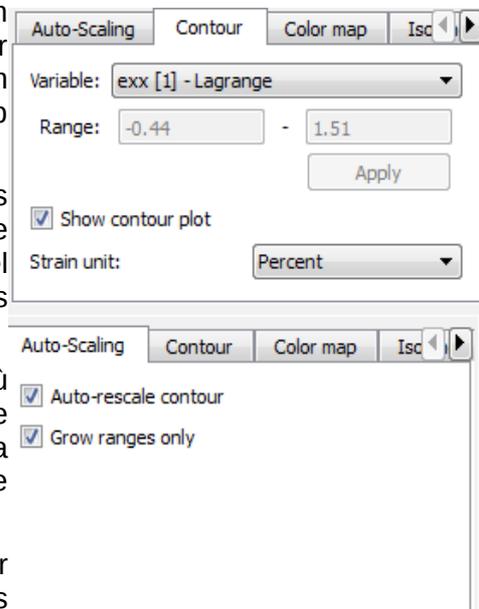


figure 9 : Paramètres de Vic2D

### 3.3. Traitement et analyse des données

#### 3.3.1. Matlab

Après avoir fait des recherches sur les techniques de corrélation informatiques, nous avons décidé d'implémenter cette fonction grâce à différents logiciels, notamment matlab.

Il nous semblait important de repartir des fonctions les plus basiques possibles afin de saisir la nature de la corrélation d'image numérique, nous avons donc commencé par créer un algorithme permettant d'obtenir le coefficient de corrélation de deux images. Il fallait donc calculer le coefficient de corrélation égal à la Covariance des valeurs de niveaux de gris des deux images divisée par le produit de leurs écarts types. L'algorithme calcule donc la moyenne de chacune des images ainsi que leur Variance (carré des écarts types) et enfin le coefficient de corrélation. (*code disponible en Annexe 1*)

Nous avons ensuite utilisé cet algorithme pour corréler un bout d'image (subset) sur l'intégralité de son image d'origine afin de déterminer si il fonctionnait correctement. Ainsi l'algorithme de test parcourt l'image d'origine pixel par pixel, découpant à chaque fois un subset dont le coin gauche correspond au pixel étudié. Il calcule ensuite le coefficient de corrélation du subset initial et du subset découpé et stocke les coordonnées du subset qui a donné le coefficient de corrélation le plus important (*Code disponible en Annexe 1*).

Nous avons testé cet algorithme sur des images de tailles normales (approx 1000x1000) et, bien que les valeurs de sorties aient été correctes, le temps d'exécution était beaucoup trop important. Ce résultat était prévisible, en effet la manière de calculer le coefficient de corrélation que nous utilisons dans cet algorithme n'est pas optimisée pour différentes raisons :

- Les calculs de moyenne, variance et covariance en passant par des boucles for est forcément moins optimisée que les fonctions déjà intégrées à matlab.
- L'algorithme n'utilise pas de pas, c'est à dire qu'il calcul un coefficient de corrélation autant de fois qu'il y a de pixels dans l'image.
- Nous ne passons pas par la méthode qui semble être la plus rapide, la transformée de Fourier, car nous ne maîtrisons pas cette notion.

Nous avons donc décidé d'utiliser la fonction de matlab `normxcorr2()` qui fonctionne de la même façon que l'algorithme, elle prend en argument une image et un subset et renvoie les coordonnées du maximum de corrélation du subset sur l'image.

Il fallait ensuite obtenir le champ de déplacement :

*Le code de ce deuxième algorithme est disponible en Annexe 2*

Ce deuxième algorithme doit calculer le champ de déplacement entre une image et sa déformée. Il commence par la définition de 3 'constantes' qui définissent la taille des subsets et le pas entre chaque subset découpé dans l'image déformée.

Ensuite l'algorithme charge les images, les convertit en matrice de niveaux de gris, le type des valeurs de niveau de gris est changé de uint8 à double pour pouvoir les utiliser dans la fonction `sqrt()`.

Deux boucles imbriquées *a* et *b* parcourent l'image déformée avec le pas défini au début de l'algorithme, à chaque itération, un subset dont le coin gauche a pour coordonnées *a* et *b* est découpé dans cette image.

L'algorithme teste ensuite si le coin gauche du subset se trouve dans un partie rectangulaire de l'image définie en diagonale par les points (Hauteur du subset, largeur du subset) et (Hauteur de l'image moins deux fois la hauteur du subset, Largeur de l'image

moins deux fois la largeur du subset), si c'est le cas l'image initiale est découpée en un carré de trois subsets par trois subsets (appelé zone d'intérêt), le subset central ayant les mes coordonnées que celui provenant de l'image déformée . Une fois ces deux découpages terminés , on utilise la fonction `normxcorr2()` pour trouver les coordonnées du maximum de corrélation du subset déformé dans la zone de l'image initiale que l'on a découpé. Ces coordonnées sont stockées dans la matrice 3D `MaxCorr` aux indices  $(k,j,1/2)$ . Les indices  $k$  et  $j$  sont là pour éviter les lignes et colonnes de 0 qui apparaissent entre les valeurs significatives à cause du pas si l'on stocke les valeurs aux indices `MaxCorr(a,b,1/2)`.

Si les coordonnées du subset sont hors de la zone, celui ci est corrélé sur toute l'image initiale mais le reste fonctionne de la même façon.

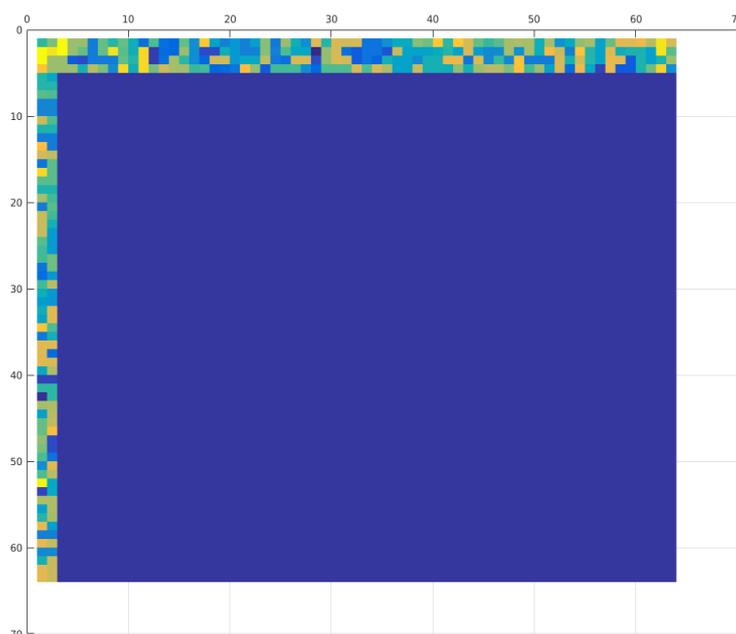
Enfin la dernière boucle calcule la matrice de déplacement à l'aide de deux boucles  $a$  et  $b$  , c'est à dire la distance entre le point de l'image déformée (coordonnées  $(a,b)$ ) et le point de corrélation maximale trouvé dans l'image initiale dont les coordonnées sont stockées aux indices  $(k,j,1/2)$  dans la matrice `MaxCorr` , le calcul est un simple théorème de Pythagore .

Une fois la matrice calculée, elle est affichée avec la fonction `surf()` .

Nous avons testé cet algorithme avec deux images dont le déplacement était connues ( $x=5$  et  $y=10$ ) tests fournies dans un ancien rapport sur le même sujet :



*figure 10 : Images de test*



*figure 11 : carte de déplacement*

### 3.3.2. Mathematica

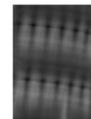
Les codes qui seront affichés dans ces deux exemples d'utilisation de la corrélation d'image sont executables en Mathematica, avec Shift+Enter. Les resultats seront obtenus dans un court delai qui montre bien le pouvoir calculatrice de ce programme.

Trouver Wally/Charlie

Ici on s'intresse a une méthode/un algorithme que l'on peut utiliser pour trouver "Charlie/Wally". Celle que j'aurais utilisé pour trouver "Wally" serait une simple procédure qui corrèle une image de "Wally" en miniature avec la grande image pour trouver toutes les positions possibles de la figure en miniature dans la grande image. Normalement cette procédure marche comme dans les cas montrés en dessous mais dans notre cas comme l'image est large cela nous porterait vers des faux résultats.

On fait importer notre image en Mathematica avec en executant ce code (avec SHIFT+ENTER) :

```
waldo
Import["https://dl.dropboxusercontent.com/u/70499579/wally%3F.jpg"]
```



On extrait la partie "rouge" du RGB et en le colore en blanc et le reste en noir avec :

```
red = Fold[ImageSubtract, #[[1]], Rest[#]] & @ColorSeparate[waldo]
```



On fait la corrélation de l'image noir du dessus avec un motif blanc et noir qu'on dessine avec Image@Join[ConstantArray[1,{2,4}],ConstantArray[0,{2,4}]]

```
corr = ImageCorrelate[red, Image @Join[ConstantArray[1, {2, 4}], ConstantArray[0, {2, 4}]], NormalizedSquaredEuclideanDistance]
```

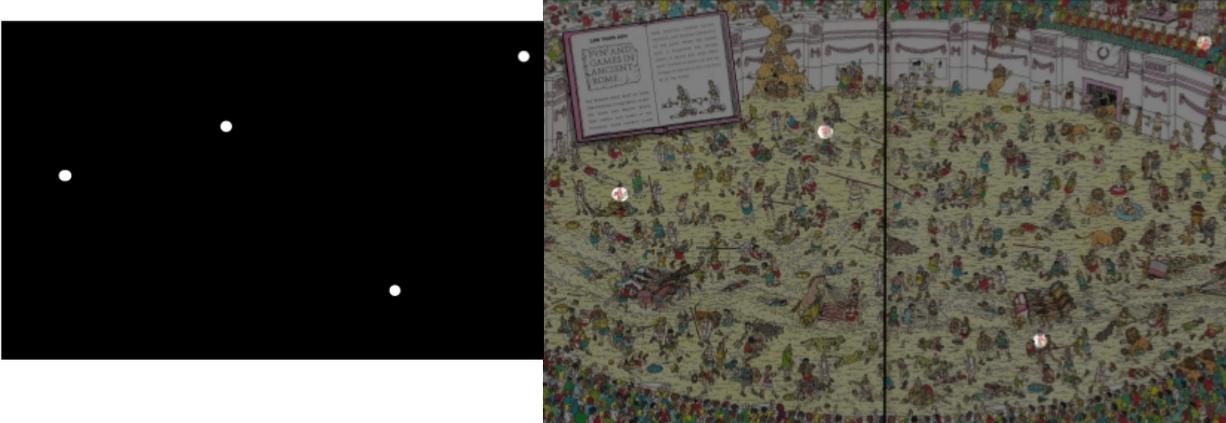
Ensuite on "binarise" l'image de corrélation en choisissant un facteur de corrélation qui est ni très petit ni très grand, en autres mots on met des "0" (la couleur blanche car j'ai pris le negatif) partout où on n'as pas une bonne corrélation (qui correspond a notre facteur de corrélation) et des "1" (la couleur noire car j'ai pris le negatif) là où on est à proximité du bon

facteur de corrélation. Après on dessine une matrice d'un certain rayon en couleur blanche la où on a trouve une bonne corrélation.

```
pos = Dilation[ColorNegate[Binarize[corr, .11], DiskMatrix[30]]
```

Ensuite on la superpose avec celle du debut et voilà, on a trouvé les Wally's.

```
pos = Dilation[ColorNegate[Binarize[corr, .11], DiskMatrix[30]]
```



```
found = ImageMultiply[waldo, ImageAdd[ColorConvert[pos, "GrayLevel"], .5]]
```

### 1 *Experiance avec un facteur fixe*

Ce code a pour but d'observer le décalage entre deux images differentes décalés avec un décalage fixé. D'abord on importe les deux images, la seconde correspondant à la première décalée de 1/4 de son épaisseur.

```
{i1, i2} =  
{Import["https://dl.dropboxusercontent.com/u/70499579/img1.jpg"],  
ImagePerspectiveTransformation[Import["https://dl.dropboxusercontent.com/u/70499579/img1.jpg"], TranslationTransform[{0.25, 0}]]}
```

Ensuite on effectue une binarisation qui trouve une segmentation à deux niveaux de l'image en calculant les contours optimaux autour des régions d'intensité constante.

```
ch = ChanVeseBinarize /@ {i1, i2};
```

Après avoir fait la binarisation on veut donner une version de l'image avec tous les minima étendus remplis.

```
dsc = FillingTransform /@ (DeleteSmallComponents[#, 5000] & /@ ch);
```

Ensuite on trouve un ensemble des points qui correspondent dans les deux images et on retourne leurs coordonnées en pixels

```
pts = ImageCorrespondingPoints[dsc[[1]], dsc[[2]]];
```

Enfin on veut trouver la transformation géométrique entre les points correspondantes des deux images et aussi donner l'erreur d'alignement et la fonction de transformation

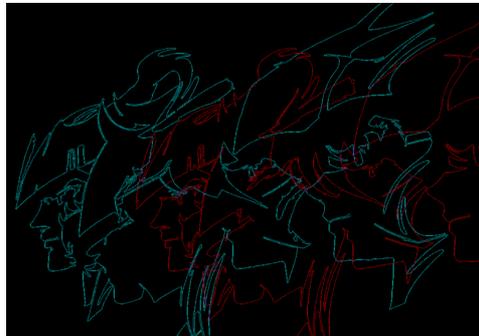
```
f = FindGeometricTransform[pts[[1]], pts[[2]], "Transformation" →  
"Translation", Method → "RANSAC"] GraphicsGrid @{{i1,  
ImagePerspectiveTransformation[i2, f[[2]], DataRange → Full]}}
```



$$\{0.258666, \text{TransformationFunction}\left[\left(\begin{array}{cc|c} 1 & 0 & -256.02 \\ 0 & 1 & 0.0300611 \\ 0 & 0 & 1 \end{array}\right)\right]\}$$

Comme vous pouvez le voir on a bien trouvé la valeur de 0.258666 qui est bien proche du décalage qu'on avait fait (de 1/4) et on obtient aussi la fonction de cette transformation. Ci-dessous on trouve présentés des différentes méthodes afin d'apercevoir ce décalage

```
ColorCombine[{EdgeDetect[dsc[[1]]], EdgeDetect[dsc[[2]]]}
```

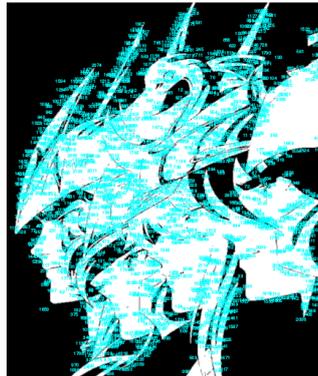


```
images = {DeleteSmallComponents @Binarize[FillingTransform @i1, .2],
DeleteSmallComponents @Binarize[FillingTransform @i2, .2]};
matches = ImageCorrespondingPoints[images[[1]], images[[2]],
"Transformation" -> "Similarity"]
Show[ImageAssemble[images], Graphics[{Red, PointSize[.02],
MapThread[If[#2 == Missing[], {Cyan, Point[#1]}, Arrow[{#1, #2 +
{ImageDimensions[i1][[1]], 0}}]}]&, matches]]]
```



```
images = {DeleteSmallComponents @Binarize[i1, .2],
DeleteSmallComponents @Binarize[i2, .2]};
matches = ImageCorrespondingPoints[images[[1]],
images[[2]], "Transformation" -> "Translation"]; -- > (code qui
permet de trouver les points correspondants)
```

```
MapThread[Show[#1, Graphics[{Cyan, MapIndexed[Inset[#2[[1]], #1] &, #2]]]] &, {images, matches}] --> (code qui montre ces points dans l'image en bleu clair)
```



Après on réalise la fonction ImageCorrelate. Intuitivement, ImageCorrelate décale i2 par chaque décalage possible, calcule la différence avec i1 avec ce décalage, et stocke la différence dans l'image de sortie. Donc la coordonnée de pixel avec la valeur la plus faible dans cette image correspond au décalage qui minimise la différence:

```
corr = ImageAdjust[ImageCorrelate[i1, i2, EuclideanDistance]]
```



Si vous regardez le résultat de ImageCorrelate vous pouvez voir qu'il y a un minimum global. La forme de la fonction de corrélation autour du minimum global et les valeurs de corrélation relatives à des minima locaux donnent une impression qualitative de la précision et la fiabilité de l'alignement. EuclideanDistance compare les valeurs de luminosité. Donc, la différence de luminosité globale dans les deux images peut "déplacer" le minimum. vous exécutez le code ci- dessous vous obtiendrez une animation du "offset"/décalage :

```
FlipView[{ImageTransformation[i1, TranslationTransform[minOffset], PlotRange -> Full], i2}, ImageSize -> Large, ImageMargins -> 15, FrameMargins -> Large, AutoAction -> True]
```

### 3.3.3. Vic2D

Après avoir récupéré des images d'un test réalisé à l'aide d'un extensomètre, nous avons utilisé Vic2D pour les corrélés. Nous avons entré les paramètres une taille de 51 pixels pour chaque subset et un step de 5. Notre éprouvette possède une forme particulière, elle possède deux parties arrondies. On cherche donc à comprendre les déformations possibles et comment l'éprouvette se casse avec cette forme. On pourra alors comprendre les risques si l'on plaçait une pièce de cette forme dans un système et si elle serait soumise à une forte traction. Les résultats de cet essai se trouve à la fin de cette partie

Vic2D nous donne l'ensemble des images corrélées, en voici une partie :

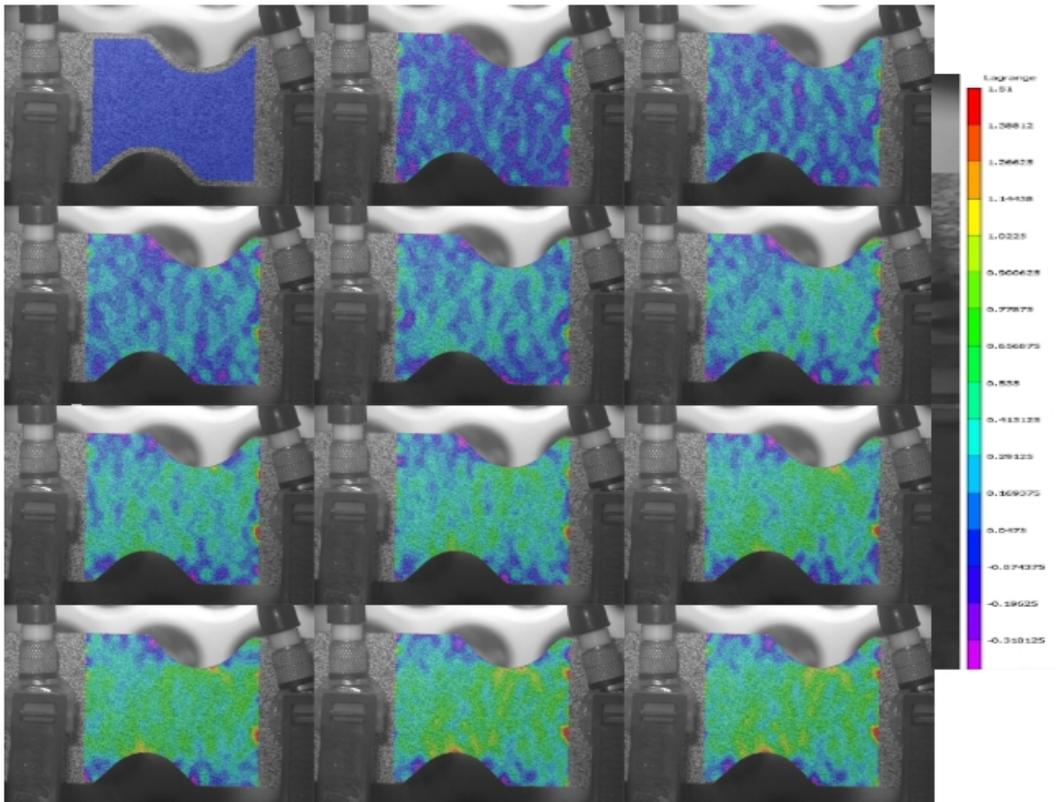


figure 12 : Une partie des images corrélées grâce à Vic2D et leur échelle

Nous observons une forte déformation au niveau de l'intérieur des arrondis, elle est représentée par du rouge puis autour du jaune et du vert. Ce qui montre que cette forme implique un risque plus élevé de se déformer et de fissurer qu'une éprouvette uniquement rectangulaire (sans prendre en compte la partie plus épaisse qui correspond à l'endroit où l'on pince l'éprouvette avec une machine de test mécanique). On observe que l'éprouvette aurait pu se casser à deux endroits, aux deux arrondis, mais comme l'arrondi de droite (sur les images) a subi une contrainte plus rapidement et s'est déformé plus rapidement que celui de gauche, l'éprouvette s'est cassée à cet endroit. La différence de moment où la contrainte est plus forte peut-être expliquée par le fait que l'extensomètre possède une pince immobile (celle de gauche) et une autre mouvante qui tire (celle de droite), cela a créé une différence de contrainte.

#### 4. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Il est clair que la corrélation d'image est un outil extrêmement intéressant pour le calcul de déformation d'un matériau. Cette méthode est rapide, facile d'application car il suffit juste de la caméra adaptée et les résultats sont faciles à analyser. Ce fut évidemment qu'une introduction et nous pensons que cet outil, une fois parfaitement maîtrisé que cela soit en 2D ou en 3D, peut aider énormément d'autres domaines que la mécanique.

Il faut savoir que nous avons réalisé une expérience sur l'extensomètre mais les résultats étaient inutilisables, de plus l'extensomètre fut en panne plusieurs semaines après. Nous avons donc dû utiliser des images que notre professeur nous avait fournies.

**Nicolas**

Le projet P6 a été une très bonne expérience, pour la première fois j'ai travaillé dans un groupe de personnes que je ne connaissait pas. Malgré un début un peu lent, le projet a finalement avancé rapidement une fois les tâches réparties. Cela m'a permis de me renseigner sur des domaines dont j'ignorais tout comme les matériaux composites ou la corrélation d'image. Il a aussi été une de mes premières applications concrètes de l'informatique, ici dans le domaine de la physique, ce qui me concerne car je vise le département d'ASI.

### **Pauline**

Ce projet m'a permis de découvrir un sujet que je ne connaissais absolument pas. Que ça soit au niveau de la corrélation d'image, des matériaux et des déformations, j'ai appris énormément par moi-même. J'ai aussi découvert les locaux du département MÉCA, ce département ne m'intéresse pas particulièrement mais cela m'a fait voir une partie de l'INSA que je ne connaissais pas. J'ai eu l'occasion de travailler en équipe avec des personnes que je ne connaissais pas avant et ce fut très constructif.

### **Emmanuel**

Ce projet m'a permis de découvrir comment fonctionnait la corrélation d'image numérique. C'est une application directe de ce que j'ai étudié ce semestre, la résistance des matériaux d'un côté et le traitement de données numériques de l'autre. La CIN est un approche très intéressante de l'étude des matériaux et c'est un procédé dont je n'avais jamais entendu parler. Finalement j'ai travaillé avec des étudiants que je n'avais jamais rencontré en cours et cela s'est très bien passé.

### **Ergi**

Même si je n'avais pas choisi ce projet en premier choix, je l'avais mis dans mes choix car j'avais vu le mot « numérique » et j'ai pensé que bien sûr il y aurait quelque chose à faire avec la programmation et l'algorithmique, des domaines par lesquelles je suis bien passionné. Et enfin je peux dire que je suis largement loin d'être déçu par ce projet.

On y trouve tout, les mathématiques, le codage, la partie matériaux et mécanique. Le projet a aussi une nature très application et il nous offre un type de satisfaction instantanée en ce qui concerne la relation « théorie-pratique » car on peut être témoin des résultats même dans les premiers pas du projet en trouvant des différentes applications dans tous les domaines (et même pour le plaisir). En plus les expériences qu'on a réalisés sont bien très proches des applications qui personnellement je trouve proches du quotidien et aussi très proche de ce qu'on peut définir comme applications très importantes (en ce qui concerne le découvrent des nouveaux matériaux (comme des matériaux composites ou même des polymères) et le test de leurs propriétés physiques).

Un autre point important et non des moindres c'est le fait qu'on a utilisé des différents programmes pour effectuer la corrélation, ce qui m'a bien sûr permis de voir des différentes méthodes de codage sur des autres logiciels (à part Mathematica). Bien sûr j'ai eu aussi des difficultés de communication des fois en ce qui concerne les termes scientifiques mais le professeur m'a toujours aidé et mon groupe a toujours été patient avec moi.

Pour conclure je dirais que ce projet m'a vraiment inspiré à rechercher en profondeur la corrélation d'image et non seulement pour le temps qui était attribué au projet mais aussi pour le futur, une expérience que j'ai rarement senti avant.

## 5. BIBLIOGRAPHIE

[https://fr.wikipedia.org/wiki/Corr%C3%A9lation\\_d%27images](https://fr.wikipedia.org/wiki/Corr%C3%A9lation_d%27images) (valide à la date du 25/05/2016)

<http://documents.irevues.inist.fr/bitstream/handle/2042/37267/420.pdf?...1> (valide à la date du 25/05/2016)

<https://cel.archives-ouvertes.fr/cel-00125868v4/document> (valide à la date du 25/05/2016)

<http://www.mechanics-industry.org/articles/meca/pdf/2006/04/mi0011-2004.pdf> (valide à la date du 25/05/2016)

<http://www.futura-sciences.com/magazines/matiere/infos/dico/d/physique-materiau-composite-2876/> (valide à la date du 25/05/2016)

[https://fr.wikipedia.org/wiki/Mat%C3%A9riau\\_composite#Renforts](https://fr.wikipedia.org/wiki/Mat%C3%A9riau_composite#Renforts) (valide à la date du 25/05/2016)

<http://www.mscsoftware.com/fr/application/materiaux-composites?language=en-uk> (valide à la date du 25/05/2016)

## 6. ANNEXES : CODE MATLAB

### 6.1. Code 1

```
clear all
close all
Himg = 5
Limg = 5

%initialisation des images , img est l'image à rechercher dans image
load im_gray;
image = im_gray;
%tronque l'image (temps d'exécution)
image = image (1:20,1:20)
imshow(image)

[Himage Limage] =size(image);
image = double(image);
deplacement = ones(Himage,Limage)

for a=1:(Himage-Himg)
    for b=1:(Limage-Limg)

        %initialisation img
        img = im_gray(a:a+Himg,b:b+Limg);
        img = double(img);

        %Initialisation des variables
        Rmax = -1;
        moyenneimg = 0;
        Varimg = 0;

        %calcul de la moyenne de img
        for i=1:Himg
```

---

```

    for j=1:Limg
        moyenneimg=moyenneimg+img(i,j);
    end;
end;
moyenneimg = moyenneimg/(Himg*Limg)

%Calcul de la Variance de img
for i=1:Himg
    for j=1:Limg
        Varimg = Varimg + (img(i,j)-moyenneimg)^2;
    end;
end;

%Debut de l'algo de calcul de la corrélation

%Boucles pour parcourir image
for i=0:(Himage-Himg)
    for j=0:(Limage-Limg)
        Cov = 0;
        moyenneimage = 0;
        Varimage = 0;
        R = 0;

        %calcul de la moyenne de la "sous-image" que l'on
        corrèle à cette itération

        for m=1:Himg
            for n=1:Limg
                moyenneimage = moyenneimage + image(i+m,j+n);
            end
        end
        moyenneimage = moyenneimage / (Himg*Limg);

        %Calcul de la Variance de la sous image

        for m =1:Himg

```

```

        for n=1:Limg
            Varimage = Varimage + (image(i+m,j+n)-moyenneimage)^2;
        end
    end

    %calcul de la covariance de img et la sous image
    for m=1:Himg
        for n=1:Limg
            Cov = Cov + ((img(m,n)-moyenneimg)*(image(i+m,j+n)-
moyenneimage));
        end
    end

    R = Cov/sqrt(Varimage*Varimg);

    if R > Rmax
        indiceHmax = i;
        indiceLmax = j;
        Rmax = R;
    end;
end
end
deplacement(a,b,1)=indiceHmax+1
deplacement(a,b,2)=indiceLmax+1
indiceHmax
indiceLmax
a
b
end
end

```

## 6.2. Code 2

```

clear all
close all

Hsubset = 20
Lsubset = 20
pas = 3
%initialisation des images , img est l'image à rechercher dans image

```

```

image1 = imread('image1.png');
image2 = imread('image2.png');
imageinitiale = rgb2gray(image1);
deuxiemeImage = rgb2gray(image2);

%imageinitiale = imageinitiale (220:475,425:850)
%deuxiemeImage = deuxiemeImage(220:475,425:850)
%tronque l'image (temps d'exécution)
%imageinitiale = imageinitiale(225:425,650:850)
%deuxiemeImage = deuxiemeImage(225:425,650:850)
[Himage Limage] =size(imageinitiale);
imageinitiale = double(imageinitiale);
MaxCor = zeros(Himage,Limage);

j = 1;
k=1;
for a=1:pas:(Himage-Hsubset)
    for b=1:pas:(Limage-Lsubset)

        %initialisation img
        img = deuxiemeImage(a:a+Hsubset,b:b+Lsubset);
        img = double(img);

        if (a>Hsubset) & (a<Himage-(2*Hsubset)) & (b>Lsubset) & (b<Limage-
(2*Lsubset))
            hauteurzone=2*Hsubset
            largeurzone = 2*Lsubset
            DecoupeImage = imageinitiale(a-Hsubset:a+hauteurzone,b-
Lsubset:b+largeurzone);
            c=normxcorr2(img,DecoupeImage);
            [ypeak, xpeak] = find(c==max(c(:)));

            MaxCor(k,j,1)=a+ypeak - (2*Hsubset)-1;
            MaxCor(k,j,2)=b+xpeak - (2*Lsubset)-1;

            j=j+1;
        else

            c=normxcorr2(img,imageinitiale);

```

```

[ypeak, xpeak] = find(c==max(c(:)));

MaxCor(k,j,1)=ypeak - Hsubset;
MaxCor(k,j,2)=xpeak - Lsubset;

    j=j+1;
end
end
k=k+1
j=1;
end

j=1
k=1
for a=1:pas:(Himage-Hsubset)
    for b=1:pas:(Limage-Lsubset)

        Matricedepacement(k,j)=sqrt((a-MaxCor(k,j,1))^2+(b-
MaxCor(k,j,2))^2);
        j=j+1
    end
    k=k+1
    j=1;
end

Matricedepacement
figure, surf(Matricedepacement,'EdgeColor','None');view(2); shading flat

```