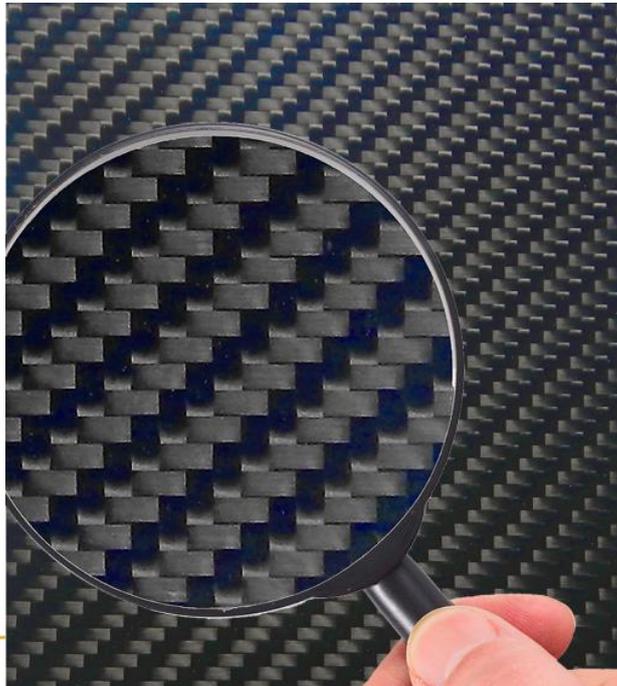


## **Suivi de propagation de fissure par corrélation d'images numériques dans un matériau composite**



Etudiants :

Tanguy PANNECOUCKE

Mathilde CAUCHY

Mathieu ORHAN

Florent QUEVALLIER

Florian AUBERT

Enseignant-responsable du projet :

Benoit VIEILLE



# Sommaire

Sommaire.....	3
Notation, Acronymes :.....	5
I Introduction.....	6
II Méthodologie et Organisation du travail.....	7
III Travail réalisé et résultats.....	8
A- Les matériaux composites: .....	8
1) Ce qu'il faut savoir sur : Les matériaux composites.....	8
2) Les différents types de matrices :.....	8
3) Les différents types de renfort :.....	8
4) Quelques chiffres concernant les composites dans le monde.....	9
5) Exemple d'utilisation :.....	11
B- Présentation de notre projet.....	12
C- Les méthodes utilisées pour notre projet.....	12
1) L'analyse numérique.....	12
2) Utilisation du logiciel VIC 2D.....	14
3) La modélisation informatique.....	17
D- Analyse des essais.....	19
1) Les résultats obtenus avec l'analyse par corrélation d'images numériques.....	19
2) Résultats obtenus par l'analyse numérique.....	23
Récapitulation sur notre étude.....	24
IV Conclusion.....	25
V Bibliographie.....	26

Date de remise du rapport : 16/06/2014

Référence du projet : STPI/P6/2014 – n°7

Intitulé du projet : *Suivi de propagation de fissure par corrélation d'images numériques dans un matériau composite.*

Type de projet : *Bibliographie, expérimental, simulation*

Objectifs du projet :

*L'objectif du projet est comme son intitulé l'indique, de suivre la propagation d'une fissure dans un matériau composite au cours d'une sollicitation en traction. Pour cela nous avons utilisé un logiciel de corrélation d'images numériques et également une méthode de simulation informatique. L'objectif est d'obtenir la carte des déformations des différents matériaux en fonction de leur matrice et de leur maillage. Nous pourrons ainsi faire une étude comparative des propriétés des matériaux et déterminer les plus adaptés en fonction des besoins requis.*

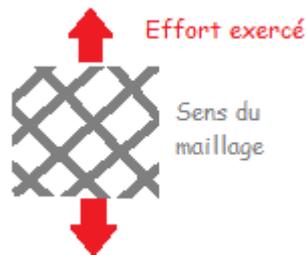
Mots-clefs du projet : *Composites, traction, corrélation, simulation.*

## Notation, Acronymes :

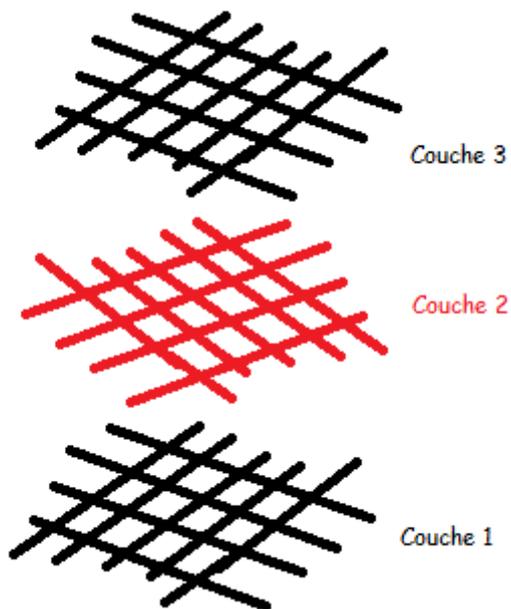
**CPPS** : Matériau composite à matrice polysulfure de propylène, thermoplastique.

**CEPO** : Matériau composite à matrice époxyde, thermoélastique.

**Maillage à 45°** : les fibres des mailles sont inclinées à 45° par rapport à l'effort exercé sur le matériau :



**QI** : Quasi isotrope, matériau qui a 7 plis de fibres alternativement à 0° et 90°.



# I Introduction

Le projet de physique P6 constitue le premier projet de notre cursus à l'INSA dans le domaine de la physique. A ce titre, ce projet doit nous permettre d'aborder la matière d'une façon plus concrète. Le sujet de notre projet recoupe ce que certains voyaient en cours de P9-1 (déformation des matériaux). Cela a donc été particulièrement intéressant d'utiliser nos connaissances acquises en cours sur un sujet vraiment concret tel que l'étude de la déformation des matériaux.

Malgré ces connaissances initiales sur le sujet, de nombreuses recherches ont été nécessaires pour appréhender celui-ci, notamment sur les matériaux composites et surtout la corrélation d'images numériques. Ces recherches nous ont également permis d'approfondir nos connaissances en matière de résistance des matériaux.

Etant principalement intéressés par les départements Génie civil, Mécanique voir Energétique et Propulsion pour la plupart, nous avons eu la chance d'étudier un sujet en rapport avec notre futur département.

L'intitulé exact du projet est : « Suivi de propagation de fissure par corrélation d'images numériques dans un matériau composite ».

L'objectif de ce projet est de déterminer le meilleur matériau pour réaliser une nacelle d'avion (support du moteur). Une série d'expérience en traction sur des éprouvettes à 120°C doit nous permettre de déterminer ce matériau.

## II Méthodologie et Organisation du travail

Dans un premier temps, il a fallu se documenter sur les différents éléments et les différentes notions du sujet que nous allions devoir utiliser. Nous avons ainsi fait des recherches sur les matériaux composites pour mieux appréhender leur comportement lors d'un essai de traction. La méthode d'analyse de corrélation d'images numériques nous étant inconnue, nous avons cherché des renseignements la concernant ainsi que sur le logiciel utilisé VIC 2D. Nous avons également utilisé les connaissances acquises pour certains en P9.

Ensuite, nous avons effectué ensemble avec M. Vieille les essais de traction au Bâtiment Magellan. Nous avons 2 tâches principales à effectuer et nous nous sommes séparés en deux groupes. Le premier a travaillé sur les résultats de l'essai de traction expérimental. Il a étudié le champ de déformation en utilisant la corrélation d'images numériques avec le logiciel VIC 2D. L'autre groupe a effectué une simulation numérique d'essai de traction. Nous avons utilisé le logiciel CastEm07. Une base de code nous a été donnée et il fallait le modifier en l'adaptant à notre « éprouvette » numérique. Les propriétés des matériaux ont pu être modifiées directement dans le code de programmation.

Enfin, nous avons mis en commun nos résultats pour comparer les analyses théoriques et pratiques.

## III Travail réalisé et résultats

### A- Les matériaux composites:

#### 1) Ce qu'il faut savoir sur : Les matériaux composites

Le principe de base des matériaux composite est le suivant : on assemble plusieurs produits élémentaires non miscibles pour fabriquer un nouveau matériau dont les propriétés sont la somme de celles de ses constituants voir meilleures que celle-ci. Ces matériaux sont utilisés pour des problèmes de performance et d'économie, surtout dans les transports où l'on recherche le plus de légèreté possible dans les matériaux.

Les matériaux composites sont constitués d'une **matrice** et de **renfort**.

La **matrice** est la partie polymère du matériau, c'est-à-dire qu'elle est en plastique. Elle assure la liaison entre les renforts et répartit les efforts dans la masse.

Le **renfort** est le « squelette » du produit, il apporte la résistance mécanique et thermique au matériau. Il est composé de fibre ou tissu.

Le matériau est également composé d'**adjuvants** qui sont des additifs au polymère facilitant la mise en œuvre de la matrice plastique, à son durcissement par exemple ou modifiant ses propriétés physiques.

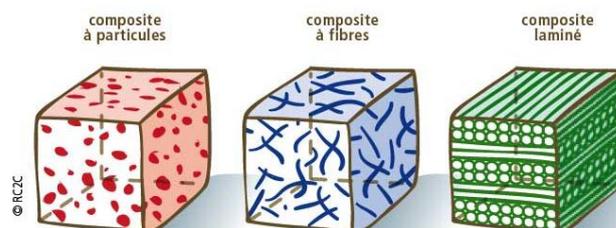
#### 2) Les différents types de matrices :

**Thermoplastique** : Les matrices thermoplastiques ont la propriété de se ramollir quand on les soumet à de fortes températures et de se solidifier quand elles refroidissent, ce qui permet de les modeler. Quelques exemples de matrices thermoplastiques : les polyamides, les polycarbonates...

**Thermodurcissables** : Les matrices thermodurcissables sont souvent liquides à température ambiante et se solidifient sous l'effet de la chaleur et d'un additif dit « durcisseur ». Une fois la géométrie adaptée, il n'est plus possible de la modifier.

Quelques exemples de matrices thermodurcissables : les polyesters, les époxydes...

#### 3) Les différents types de renfort :



source : têtes chercheuses, La course à la légèreté, par Arnaud POITOU, directeur du pôle Matériaux et procédés de fabrication, École Centrale de Nantes

**Les fibres :** Le plus utilisé (95% des applications) est la fibre de verre E, il existe également la fibre de verre R et la fibre de carbone ainsi que la fibre aramide (kevlar), etc...

**Les charges :** Ce sont de fines particules qui viennent renforcer les composites. Elles modifient les caractéristiques du produit : dureté, résistance à la contrainte, amélioration de la résistance au feu...

**Les adjuvants :** Il assure la cohésion et l'adhérence entre les différents constituants. Pour les therm durcissables il existe également des accélérateurs de durcissement. Enfin les lubrifiants et démoulant internes sont des adjuvants qui facilitent la mise en place des stabilisants thermiques, des pigments et des couleurs.

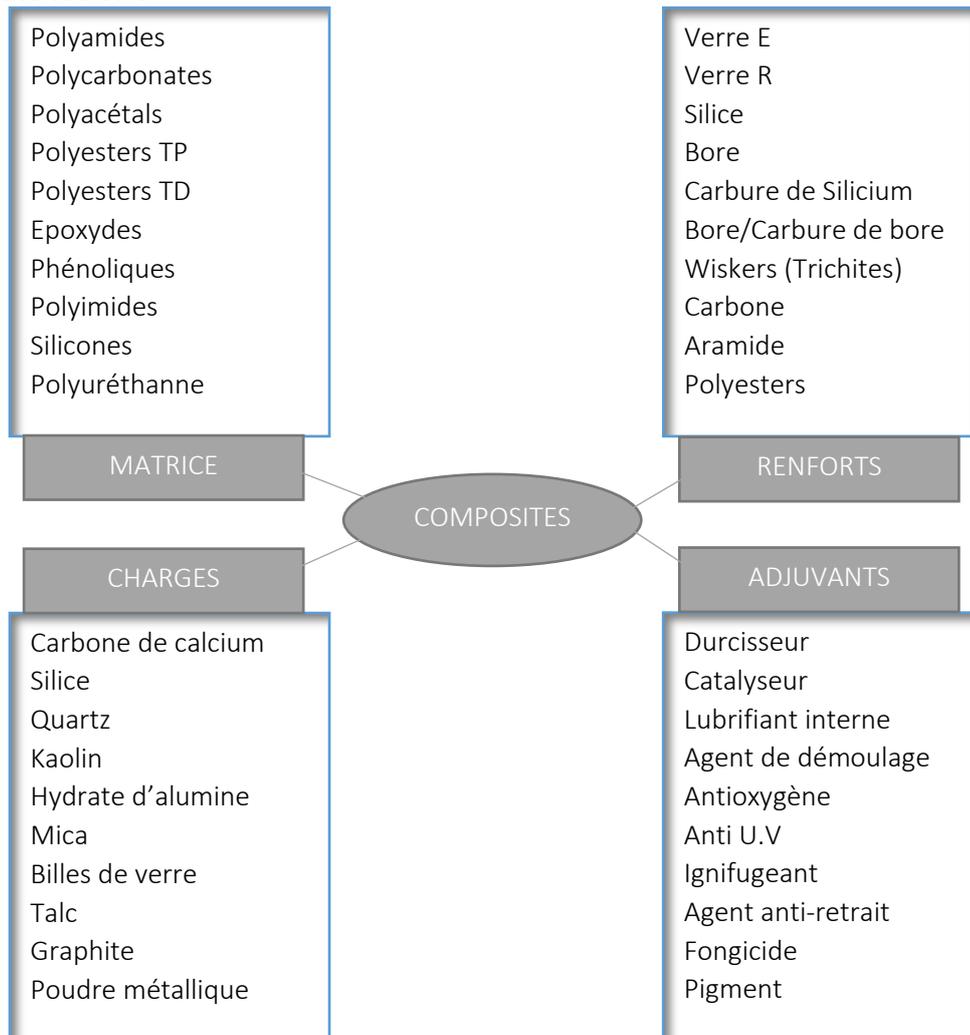


Schéma tiré de *Utilisation des matériaux composites*, ©Pierre Jacquinet, Hermes, Technologies de pointe matériaux, 1991

#### 4) Quelques chiffres concernant les composites dans le monde

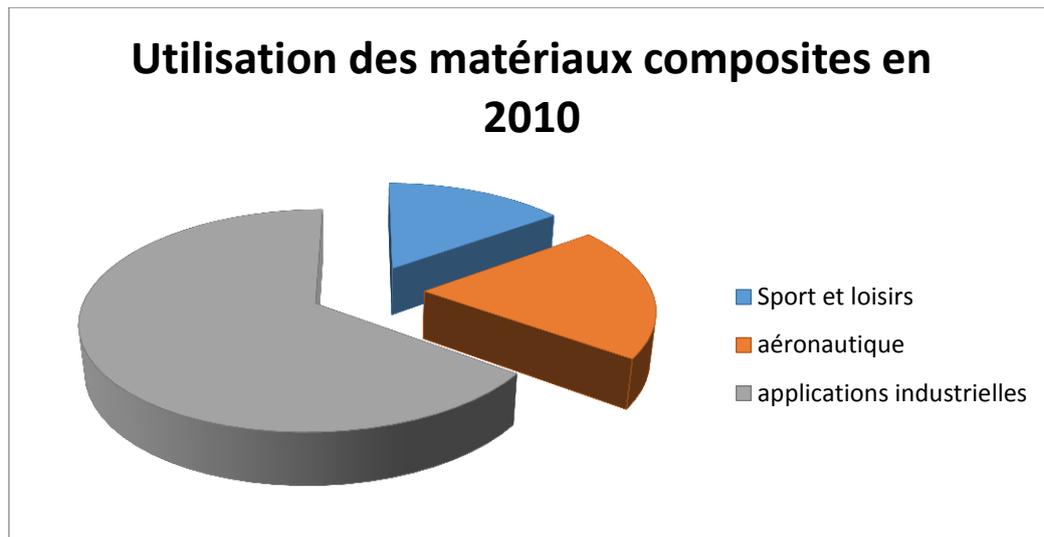
En 2010, le marché des composites, employait environ 450000 personnes dans le monde avec un chiffre d'affaire de 41 milliards d'euros et 5% de croissance par an.

La France est productrice de matériaux composites, en effet, elle réalise 15% de la production Européenne, soit 300 000 tonnes à l'année.

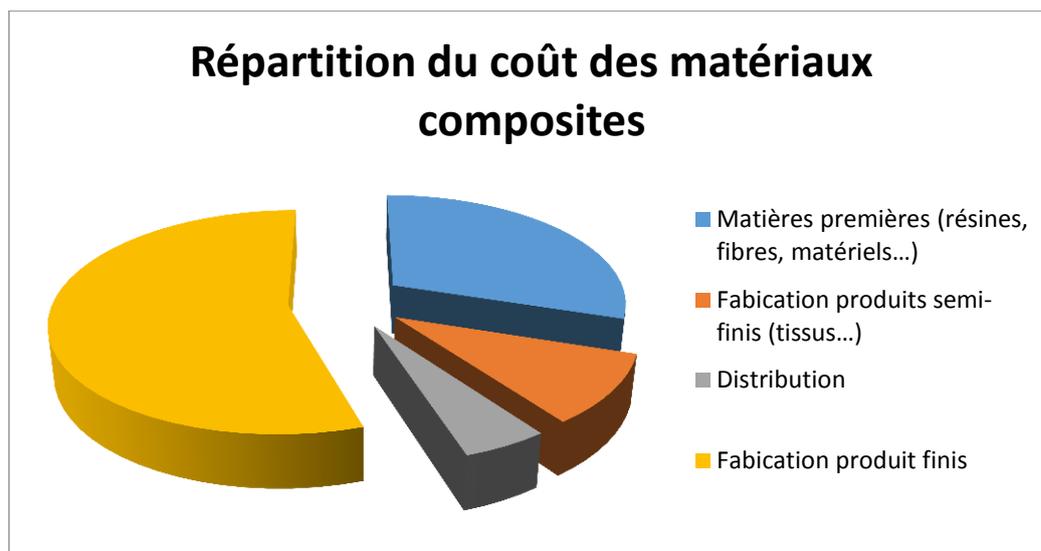
Ses utilisateurs sont des leaders de l'industrie française dans une panoplie de secteurs : Dassault, Total, Bouygues, Renault ou encore Bénéteau dans le nautisme. »

Dossier : [l'industrie des composites en France](http://www.industrie-techno.com/premiere-etude-sur-l-industrie-francaise-du-composite.22987), © Industrie et technologie, première étude sur l'industrie française du composite, Ludovic Fery. <http://www.industrie-techno.com/premiere-etude-sur-l-industrie-francaise-du-composite.22987>

« Dans les années 70, la principale utilisation était surtout dans les équipements sportifs (raquettes de tennis, cannes à pêche, clubs de golf). Les utilisations dans l'aéronautique ont débuté vers 1985 (avec les programmes des Boeing 757 et 767 et l'Airbus A320), suivies par les applications industrielles dans divers domaines : construction navale, génie civil, automobile... »



« La valeur moyenne du kilogramme de pièces en composites est de 8,2 €/kg aux USA et en Europe, elle n'est que de 5,5 €/kg en Asie. »



« Les marchés les plus porteurs sont l'aéronautique et les éoliennes, où les prix au kilogramme de pièces finies sont respectivement de 42 et de 13 €/kg ».

[Le marché des matériaux composites](http://www.planetoscope.com), © 2012 Planetoscope.com

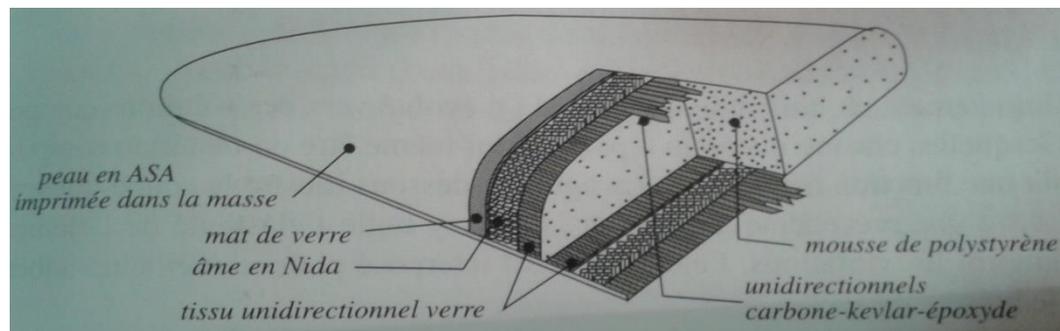
A titre d'exemple, dans le Rafale, il y a 1110 kg de matériaux composites, ce qui a permis un allègement de 25% de la masse de sa structure en comparaison avec des matériaux « basiques ».

### 5) Exemple d'utilisation :

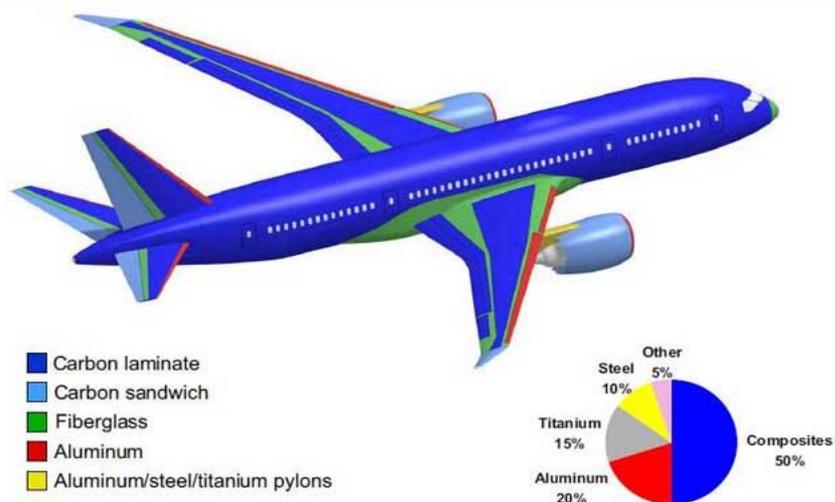
- Planches de surf



Copyright © 2005 - 2014 Waimea Surfshop Angle



- Avions (Boeing 787)



1001 Crash Copyright © | 2005-2014 | Sébastien Freissinet | <http://www.1001crash.com>

## B- Présentation de notre projet

Notre objectif était de tester la résistance de quatre matériaux composites différents et de suivre la propagation d'une fissure en traction à 120°C. Pour cela nous avons utilisé une éprouvette de chaque matériau sur laquelle une entaille (5mm) était faite. Nous avons mis les éprouvettes dans une machine de traction laquelle était placée dans un four. A l'extérieur une caméra CCD permettait l'acquisition d'une image par seconde pour la corrélation d'image numérique.

Nous avons contraint en traction à l'aide de vérins hydrauliques plusieurs éprouvettes dont voici les caractéristiques :

Lamelle de 16\*1.5\*0.3 mm, 7 couches de fibres :

- matrice thermodurcissable, maillage à 45°.
- matrice thermodurcissable, qi.
- matrice thermoplastique, maillage à 45°.
- matrice thermoplastique, qi.



Notre matériau est fendu sur une distance de 5 mm au milieu de «l'éprouvette».

En étudiant en laboratoire le comportement de ces matériaux nous pourrions prévoir leur comportement lors de sollicitations qu'ils seront amenés à subir.

## C- Les méthodes utilisées pour notre projet

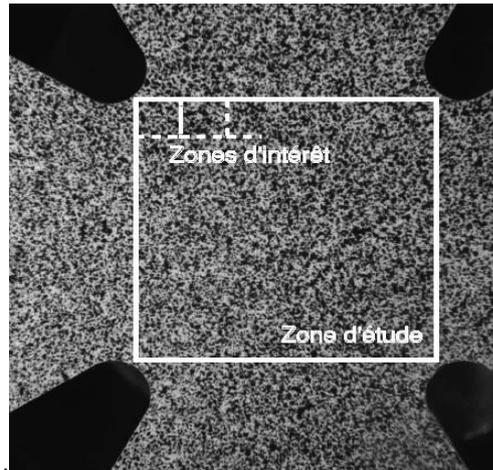
### 1) L'analyse numérique

La corrélation d'images numériques :

Pour réaliser nos analyses sur le matériau au cours de la sollicitation, nous avons utilisé la technique de corrélation d'images numériques. Celle-ci permet d'obtenir une cartographie des déformations (carte d'iso-valeurs). Cette méthode est relativement simple à mettre en œuvre et correspond

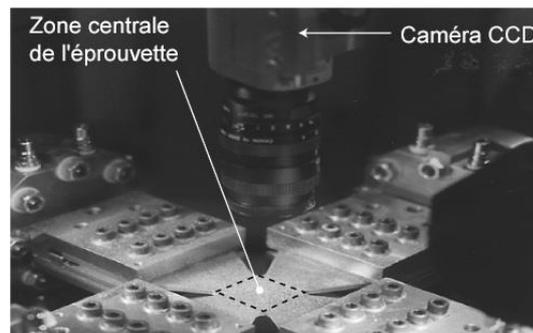
parfaitement à nos besoins. Elle permet d’avoir une description assez complète et à chaque instant des déformations du matériau. De plus, cette technique permet d’obtenir des résultats sans contact direct avec la matière et ainsi de faire des essais à très haute température sans soumettre les appareils de mesure à des contraintes qu’ils ne pourraient supporter.

Nous allons maintenant voir le principe général de cette technique. Tout d’abord, l’éprouvette à tester doit être recouverte d’un « mouchetis » de peinture, le plus aléatoire possible, c’est à dire avec très peu de répétition de motif. En effet, plus le motif est aléatoire, plus la corrélation sera bonne comme nous le verrons par la suite.



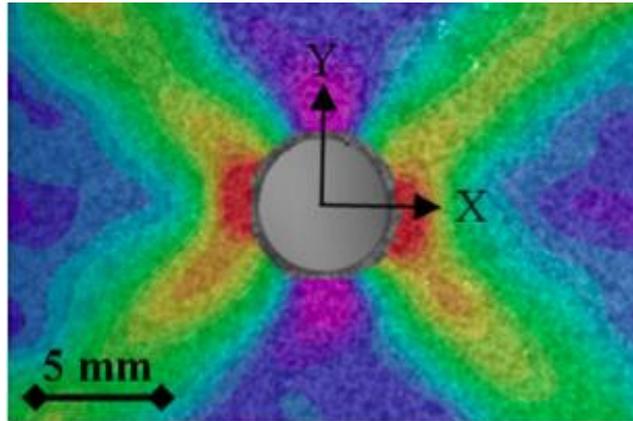
*Exemple d’éprouvette avec mouchetis (neige)*

Deuxièmement, le dispositif expérimental doit être équipé d’une caméra d’acquisition permettant la capture d’une trentaine d’images par seconde. Elle doit être centrée sur la zone d’intérêt, donc dans notre cas, l’entaille. On va obtenir des photos de l’éprouvette au cours du chargement et pouvoir suivre l’évolution des déformations.



*Exemple de dispositif expérimental*

Ensuite, une fois l’acquisition faite, ces images vont être « rentrées » dans un logiciel de corrélation. Pour notre projet, nous avons utilisé le logiciel VIC 2D, qui nous permet d’obtenir des cartes en deux dimensions. A savoir également qu’il existe des logiciels 3D tel que VIC 3D qui permettent l’obtention de cartes des déformations dans tout l’espace. Cette technique requière deux caméras prenant des images suivant différents angles. Dans le cadre de notre étude, deux dimensions suffisent puisque nous sollicitons notre éprouvette uniquement en traction et que les déformations sont planes. Suite à quelques réglages, nous obtiendrons une carte des déformations du même type que celle-ci :



Carte des déformations autour d'un trou obtenu grâce à VIC 2D

Intéressons-nous désormais au travail effectué par le logiciel. Il va donc utiliser les images prises par la caméra et l'utilisateur va devoir définir une image de référence correspondant à l'éprouvette avant le chargement (aucune déformation). Le logiciel va ensuite définir un motif élémentaire sur cette image, et c'est celui-ci qui va lui permettre de suivre la déformation. Il va ensuite sur chacune des images suivantes, retrouver ce motif et pouvoir ainsi évaluer le champ de déplacement. D'où, comme il est dit plus haut, l'importance d'avoir un mouchetis le plus aléatoire possible afin que VIC ne confonde pas deux motifs entre eux, auquel cas les résultats s'en trouveraient faussés.

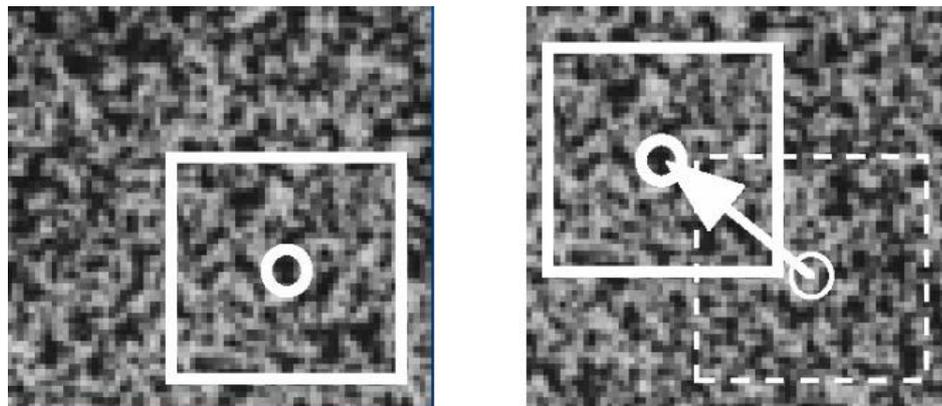


Image de référence à gauche et image déformée à droite

Une fois ces champs de déplacements calculés pour de multiples points de la zone d'étude (définie au préalable), le logiciel va utiliser une équation de corrélation pour obtenir la carte des déformations.

Dans le cadre de notre projet, nous souhaitons plus particulièrement étudier la propagation d'une fissure. Nous aurons donc recours à une fonctionnalité supplémentaire de VIC 2D, nous étudierons les déformations le long d'une ligne, que nous définirons nous même. Suivant les différentes discontinuités de la ligne et par un travail de « tâtonnement », nous pourrions déterminer sur chaque image la position du front de fissure et donc suivre sa propagation.

## 2) Utilisation du logiciel VIC 2D

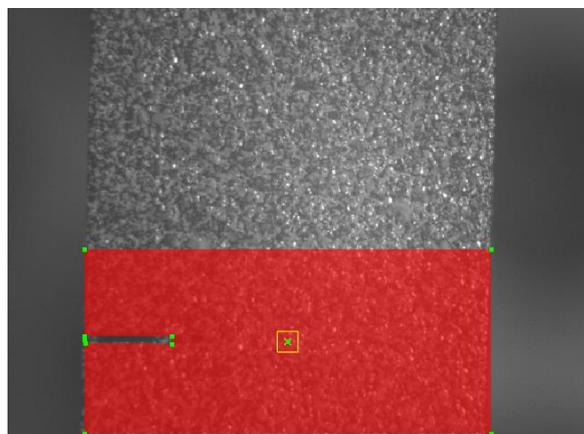
Après les différentes expériences réalisées, nous avons utilisé le logiciel VIC-2D pour interpréter ces expériences. Ce logiciel nous a permis de mesurer les déformations des différents matériaux testés, et

notamment de pouvoir mesurer la propagation de la fissure pour chaque image prise pendant les différentes expériences.

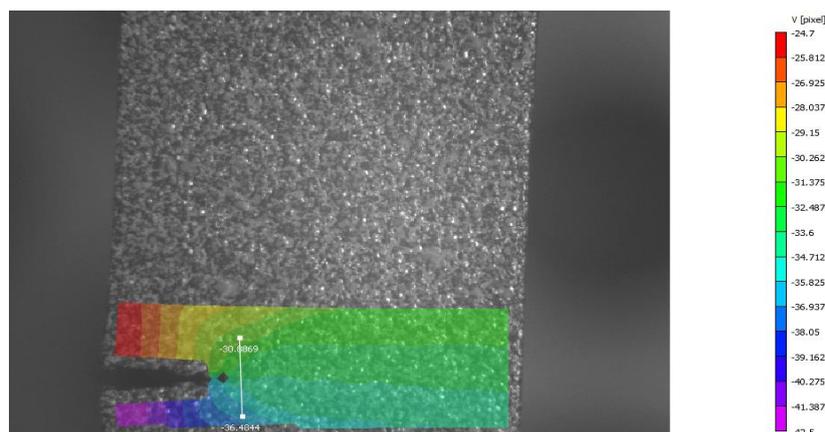
Le but de l'analyse des résultats est de déterminer quel est le matériel qui conviendrait le mieux à la fabrication d'une nacelle de moteur d'avion. C'est pourquoi nous avons analysé en priorité les résultats des expériences à 120° C.

Le logiciel analyse les images fournies lors des expériences, et permet d'afficher le champ de déformation de l'éprouvette, grâce à l'étude des mouchetis. Le reste des manipulations est manuelle et se déroule selon les étapes suivantes :

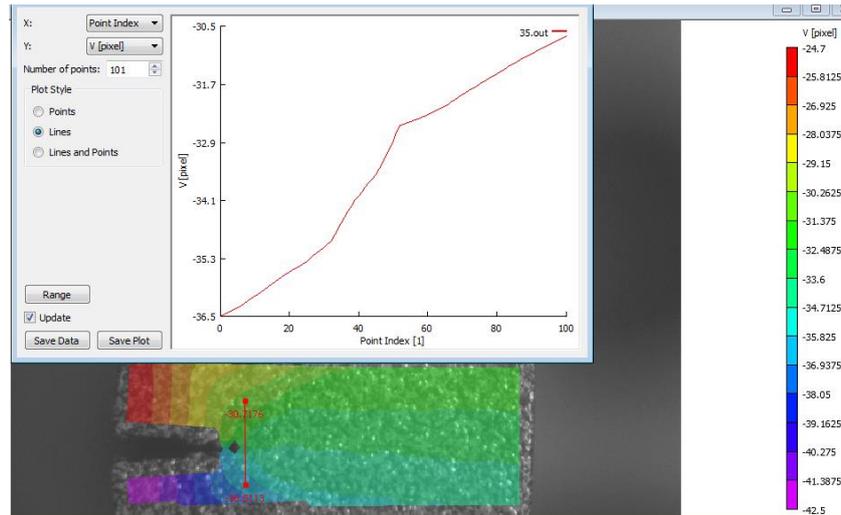
- sélection de l'image à analyser par le logiciel
- sélection de la surface à analyser par le logiciel



-obtention du graphique de la taille de la fissure en fonction de la force imposée : cela nécessite d'observer les déformations suivant des lignes.



-analyse du graphe : si la courbe des déformations suivant une ligne obtenue est linéaire, la fissure ne s'est pas encore propagée au niveau de cette ligne, si au contraire on observe une discontinuité cela signifie que la fissure s'est propagée à ce point.



Difficultés rencontrées : Premièrement la notion de discontinuité reste objective, il est donc parfois délicat de la repérer.

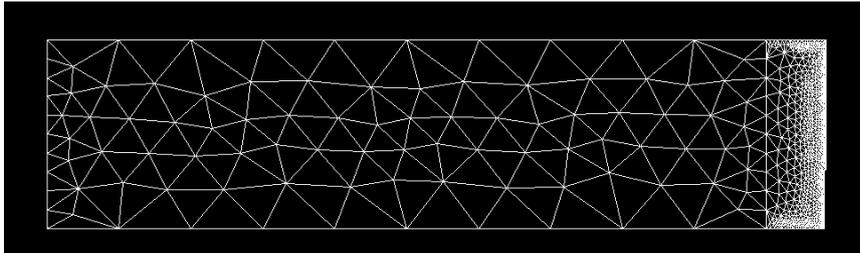
Deuxièmement le logiciel n'a pas toujours fonctionné comme prévu, nous donnant parfois des résultats complètement incohérents, ce qui nous a ralenti dans notre travail. Ces résultats sont en réalité dus à des matériaux ayant un comportement très peu élastique et qui vont, en d'autres termes, se « casser » d'un coup. Comme nous ne faisons une photo par seconde, la rupture se produit entre deux images, ceci rendant l'exploitation des images difficiles.

### 3) La modélisation informatique

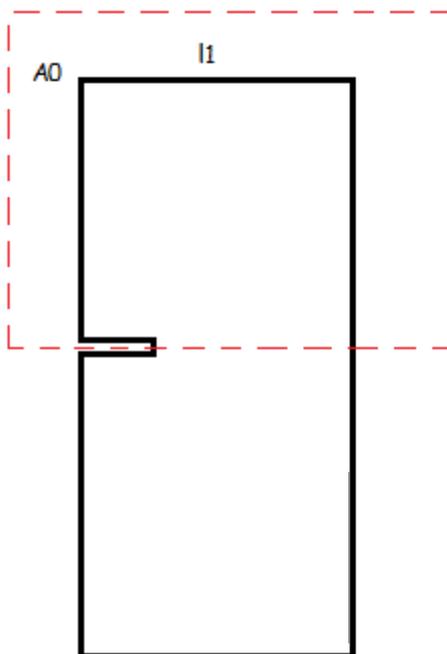
#### a- Représentation de l'éprouvette

Pour prévoir le comportement de nos matériaux en traction, nous avons modélisé nos éprouvettes en version numérique. Puis nous les avons étudiées avec le logiciel de traitement Castem 2007. Seules les éprouvettes à matrice thermoplastique sont modélisées par ce logiciel.

Voici l'éprouvette que nous avons modélisée :



On ne représente ici que la moitié de notre éprouvette, puis on lui applique des contraintes de blocage de direction, ce qui permet de modéliser le matériau en entier. Notre matériau est une fine lamelle rectangulaire qui est découpée au centre sur environ 5mm, la fente fait 0.3 mm de large. Chaque point particulier de notre éprouvette est côté pour la représentation.



Partie représentée  
par la modélisation

```
a0=0. 0. 0.;
a1=0. 16. 0.;
a4=65. 4.85 0.;
```

Coordonnées  
de A0 dans le  
programme.

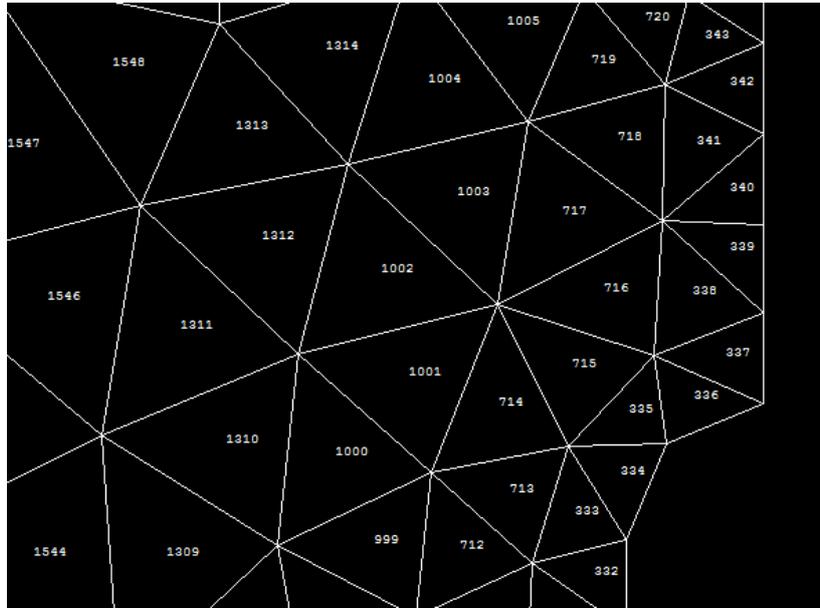
```
nb3=10;
l1=droi nb3 a0 a1;
l2=droi nb3 a1 a7;
l3=droi nb3 a7 a6;
l4=droi nb3 a6 a0;
lt1=l1 et l2 et l3 et l4;
surf1=surf plan lt1;
```

Coordonnées de l1. On voit que l1 relie a0 et a1. nb3 représente le *maillage* à cet endroit

**Maillage :** Le maillage permet de découper notre éprouvette en petites formes de géométrie simple pour étudier le comportement de chaque zone du matériau lors de l'effort.

Plus le maillage est dense, plus le calcul est précis, cependant le calcul prend beaucoup plus de temps quand il y a beaucoup de mailles. C'est pourquoi nous avons opté pour un maillage à densification. La zone qui subira le plus de déformations (au niveau de la fente) est donc maillée plus finement comme on peut le voir sur la modélisation page précédente.

Chaque maille a un numéro pour pouvoir être repérée :



b- L'analyse post traitement

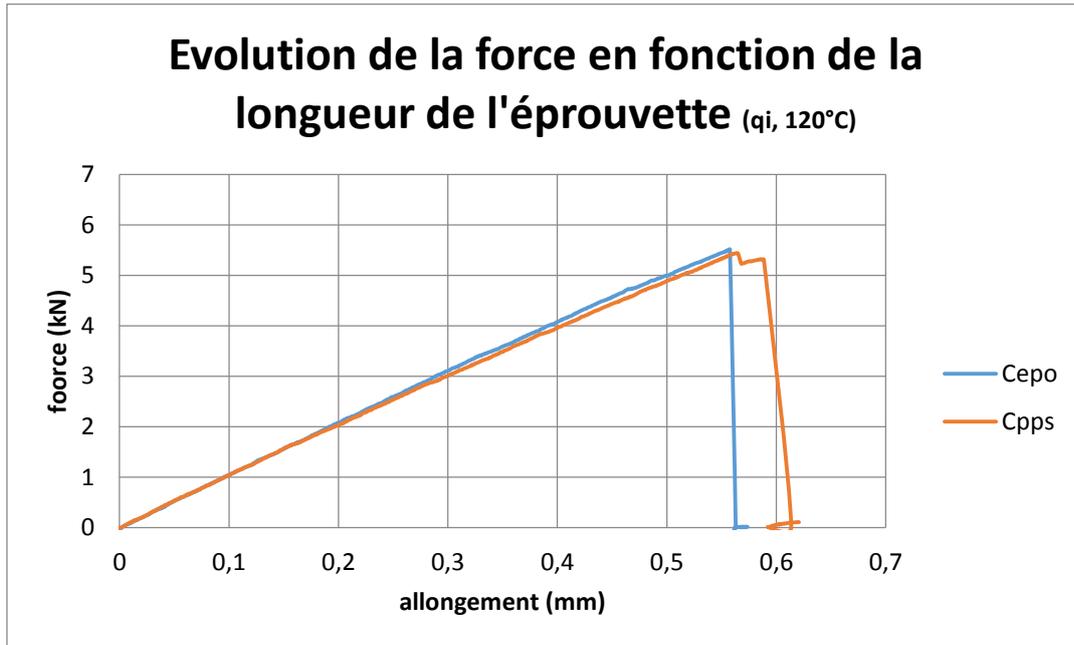
Avec l'éprouvette que l'on a modélisée on lance le calcul des déformations subies, puis on l'analyse en post traitement. On obtient grâce au logiciel des cartes de déformations que nous pourrions comparer par la suite avec les résultats obtenus par corrélation d'image numérique.

## D-Analyse des essais

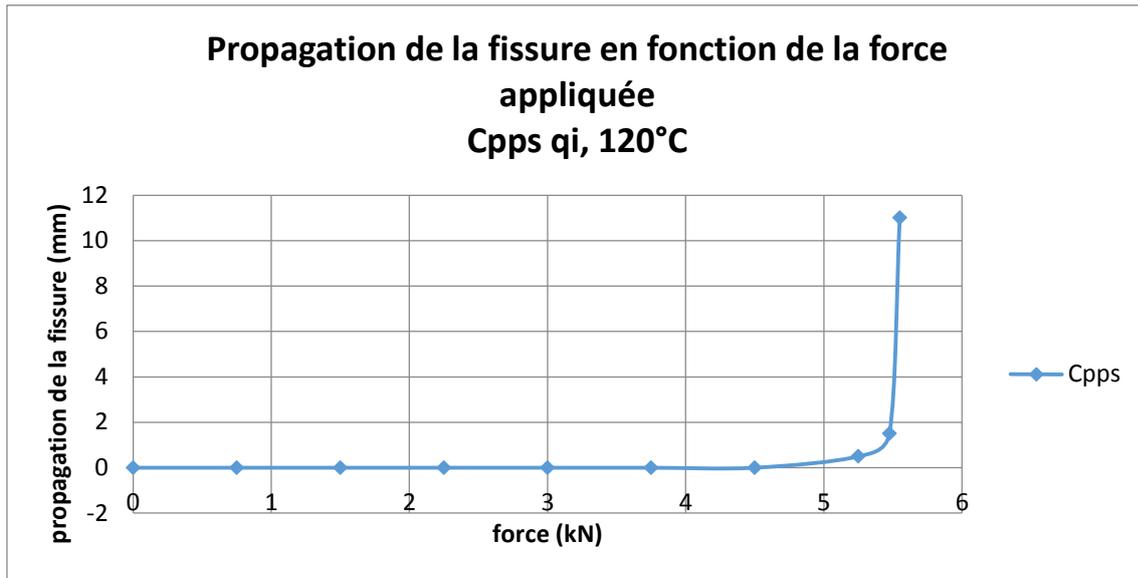
### 1) Les résultats obtenus avec l'analyse par corrélation d'images numériques

En appliquant une traction à 4 types de matériaux à 120°C on obtient les courbes suivantes grâce aux données recueillies sur la machine de traction et par analyse numérique.

Pour les matériaux  $q_i$  :



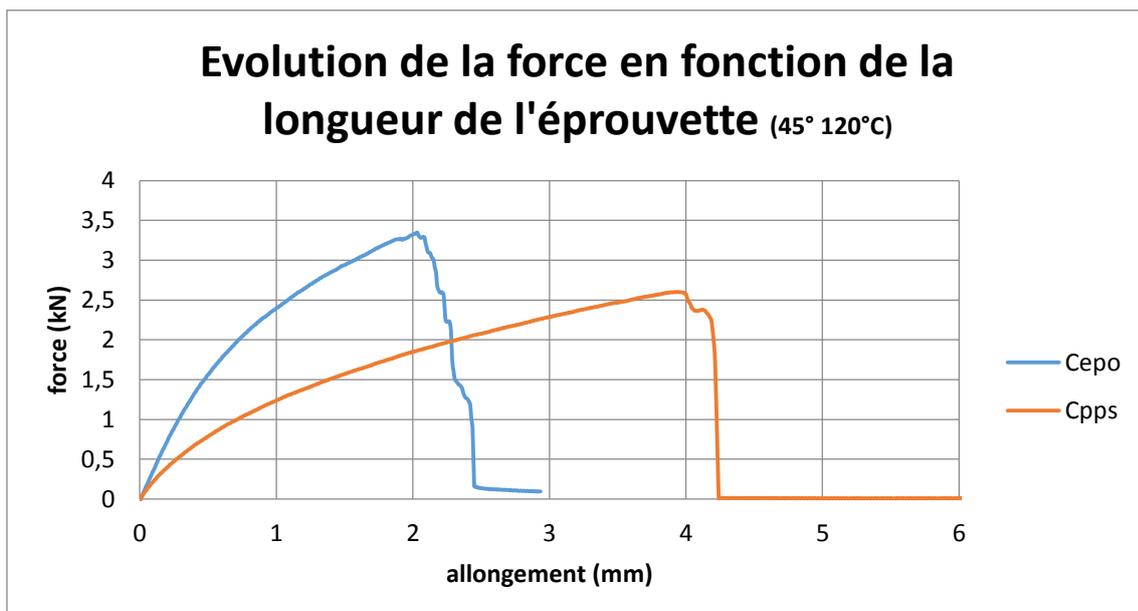
On remarque que pour la matrice époxyde ou pps l'évolution est identique (une courbe affine  $F=100\Delta x$ ) et que le point de rupture se situe entre 5,3 et 5,5 kN. L'écart entre les deux contraintes de ruptures est de moins de 4%. Cette rupture est brutale, ce qui traduit le comportement plastique des matériaux quasi isotropes. C'est un résultat tout à fait cohérent puisque les fibres étant à 90° la traction s'est faite dans le sens de celles-ci. La matrice n'a pas dû transmettre l'effort entre les différentes fibres. C'est donc uniquement la résistance des fibres qui est intervenue. En conséquence, les propriétés des différentes matrices ne sont pas à prendre en compte dans l'analyse.



Si l'on regarde la propagation de la fissure on remarque une propagation nulle puis une rupture brusque de l'éprouvette. En effet tant que la contrainte n'est pas assez élevée pour rompre une fibre la fissure ne se propage pas. Dès que la contrainte atteint la limite de résistance d'une fibre celle-ci va se rompre et la contrainte qui s'exerçait sur cette fibre va être répartie sur les autres fibres. Mais ces fibres étaient elles aussi à leur limite de résistance et cette contrainte supplémentaire va entraîner leur rupture les uns après les autres très rapidement et donc la rupture de l'éprouvette.

Les éprouvettes qi résistent très bien à l'effort de traction quelle que soit la matrice. Elles ne subissent que très peu de déformations et la fissure ne se propage pas. L'éprouvette cède brutalement. C'est un caractère plastique.

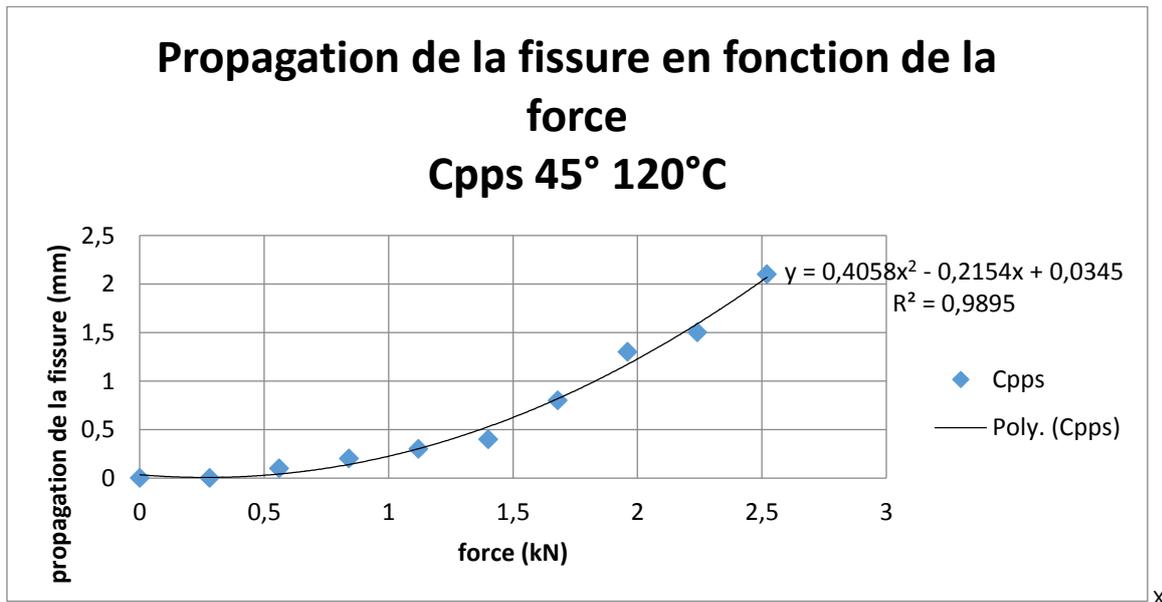
Pour les matériaux avec des plis à 45° :



Le Cepo se rompt à 3,29 kN tandis que le Cpps à 2,36 kN soit un écart de 39,4% entre les deux valeurs.

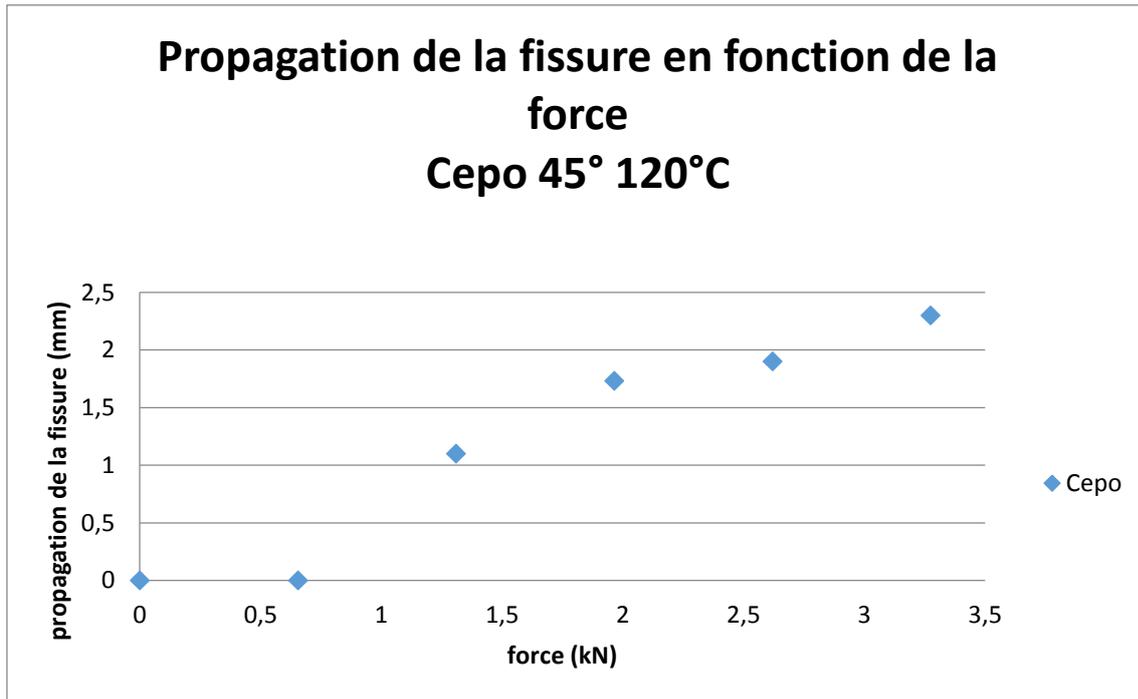
Pour les deux matrices, l'éprouvette s'allonge d'abord de façon parabolique avant de se rompre. L'éprouvette de Cepo s'allonge de 2mm avant rupture et celle de Cpps de 4mm, soit deux fois plus. Le maillage à 45° induit un comportement élastique. L'allongement s'explique par la disposition des fibres. En effet, les fibres étant à 45° et la traction s'effectuant à 90°, les fibres peuvent se redresser légèrement. De plus, les matrices plus ou moins rigides influent sur l'allongement avant rupture. C'est pourquoi le Cpps s'est plus allongé que le Cepo. En effet le Cpps est thermoplastique, il ne réagit pas de la même manière selon la température, plus la température est élevée plus il est souple. Alors que l'époxyde est thermodurcissable, il ne réagit donc pas à la température.

Cpps :



La fissure s'est propagée selon une parabole puis elle s'est brutalement répendue à travers toute l'éprouvette qui a rompu. La fissure est allée jusqu'à 7.1 mm (pour 2,5 kN) soit une propagation de 2.1 mm ce qui correspond à 43% de la largeur de l'éprouvette.

Cepo :



Les résultats sont moins précis. La fissure se propageant très rapidement et l'éprouvette se rompant brusquement, les images de la caméra ne sont pas prises assez rapidement pour suivre la propagation à la fin.

La propagation semble différente que pour le Cpps. Mais la rupture brusque se fait également quand la fissure est entre 7 et 7.5 mm soit une propagation de 2 à 2.5 mm.

**Conclusion :**

Comme on pouvait s'y attendre, les matériaux quasi isotropes résistent à des efforts de traction plus élevés et la fissure ne s'y propage presque pas. Cependant, la rupture du matériau est brutale. Au contraire les matériaux avec des plis à 45° acceptent des contraintes plus faibles et des déformations plus importantes avant de rompre. Ceci s'explique par le fait que la force se répartisse mieux sur toutes les fibres.

Dans le cas des matériaux quasi isotropes la matrice utilisée importe peu.

Pour les plis à 45° le Cepo résiste mieux à l'effort que le Cpps, il est plus rigide. Le Cpps se déforme beaucoup mais résiste moins bien à l'effort de traction. Le Cpps a donc une limite élastique plus élevée. Le Cepo quant à lui a une limite à la rupture plus importante.

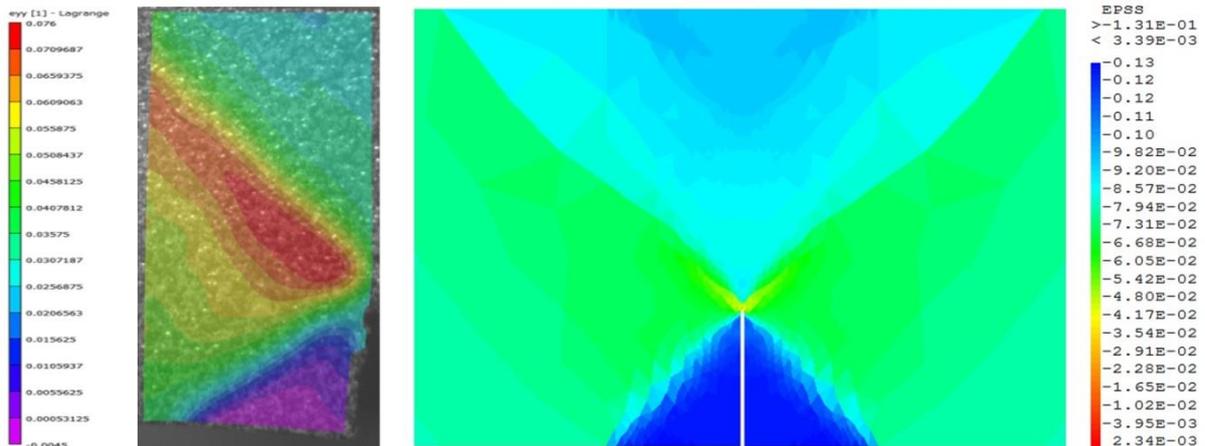
Dans le cas d'un effort de traction les matrices quasi isotropes résistent mieux. On peut supposer que si on soumettait les matériaux à d'autres efforts alors les plis à 45° auraient une résistance bien meilleure.

## 2) Résultats obtenus par l'analyse numérique

Dans le cas de la modélisation numérique, on ne s'intéressera qu'aux matériaux CPPS, seule modélisation possible sur Castem07. Dans les photos suivantes on représente les champs de déformation de notre éprouvette.

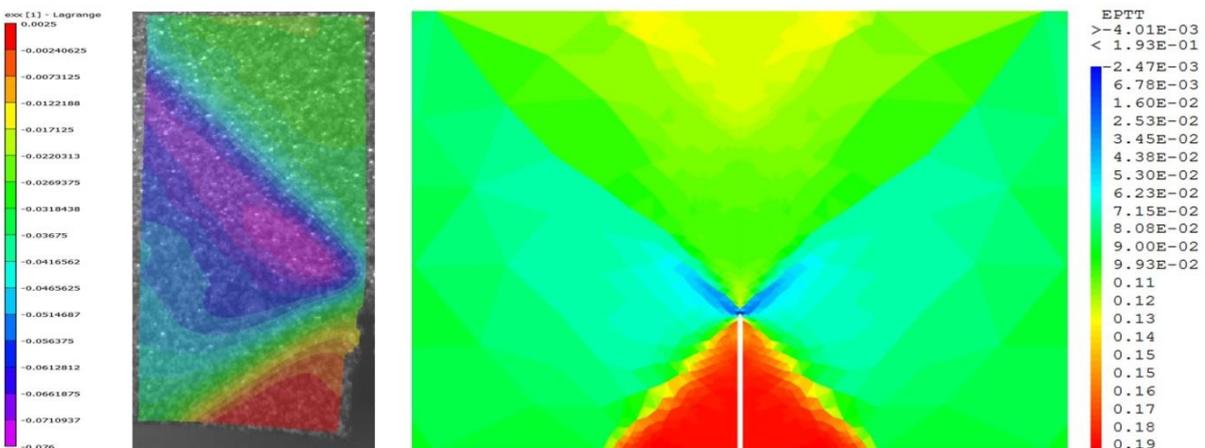
A gauche ce sont donc les déformations réelles et à droite l'image de la modélisation.

Comparaison des champs des déformations obtenus dans le cas 7 plis à 45, étude longitudinale :



On remarque que les déformations se répartissent surtout sur les fibres qui passent par la pointe de la fissure. C'est sur ces fibres que la déformation est la plus importante. Grâce à notre modélisation nous avons pu voir que les contraintes se concentraient le long des fibres qui sont à 45° par rapport au bord de notre éprouvette. La modélisation est fidèle à la réalité.

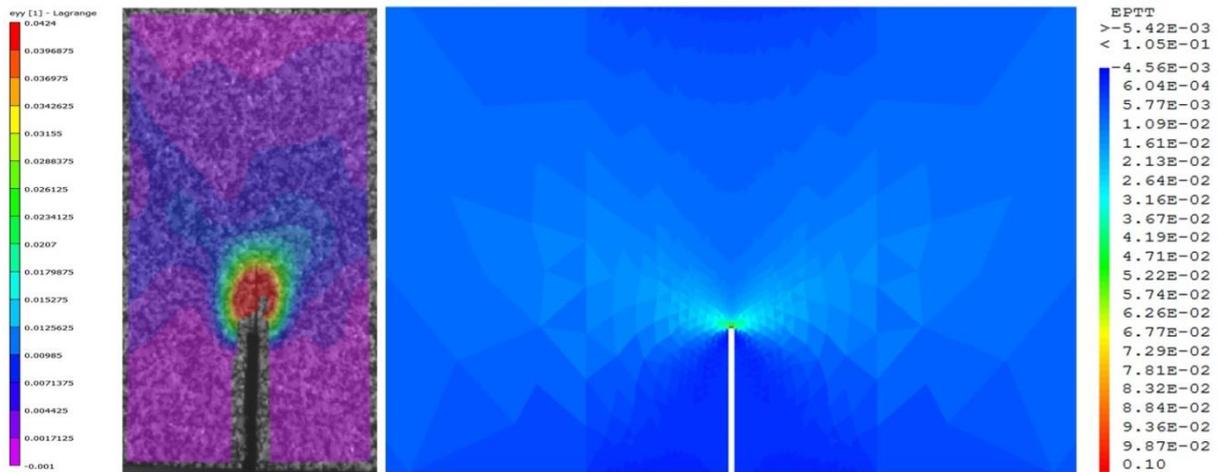
Comparaison des champs des déformations obtenus dans le cas 7 plis à 45, étude transversale:



Là encore, la modélisation est très fidèle à la réalité. On remarque que dans ce cas, la déformation la plus forte se trouve au niveau de la pré-fissure. Les contraintes les plus fortes sont absorbées par les fibres ce qui se voit par la forme triangulaire des déformations les plus importantes.

Dans les deux cas des études du matériau 7 plis à 45, nous pouvons constater encore une fois le caractère élastique du matériau.

Comparaison des champs des déformations obtenus dans le cas qi :



Encore une fois la modélisation est très fidèle à la réalité. Les déformations se concentrent en bout de fissure et ne se répartissent que très peu dans le matériau, nous pouvons donc en conclure le caractère non élastique et surtout plastique du matériau. Ceci s’explique par le fait que les plis soient alternativement à 0° puis 45°, l’effort est donc mieux réparti dans la totalité du matériau.

Récapitulation sur notre étude

Nous pouvons donc décrire les matériaux expérimentés comme suit :

CEPO, 7 plis à 45 : élastique, facilement déformable (moins que CPPS), plus faible résistance à la contrainte que CPPS 45°.

CEPO, qi : similaire à CPPS qi : résiste à des contraintes de traction plus élevées mais casse brutalement.

CPPS, 7 plis à 45 : élastique, facilement déformable, répartition des contraintes dans tout le matériau.

CPPS, qi : plastique, résiste à des contraintes de traction plus élevées mais casse brutalement, concentration des contraintes en bout de fissure.

## IV Conclusion

Ce projet nous a permis de mieux connaître les propriétés des matériaux composites étudiés. De plus il nous a permis de voir une application concrète de certains de nos cours. Ce projet a été très enrichissant puisqu'il nous a fait découvrir 2 logiciels utilisés aussi bien en entreprise que dans la recherche.

Notre groupe a bien fonctionné, puisque tout le monde s'est investi et était intéressé par le sujet. Ce projet nous a permis de mieux appréhender nos futures missions d'ingénieur concernant le travail en équipe et la réalisation de projets communs.

## V Bibliographie

### Sources documentaires :

[http://www.si.ens-cachan.fr/accueil\\_V2.php?page=affiche\\_ressource&id=6](http://www.si.ens-cachan.fr/accueil_V2.php?page=affiche_ressource&id=6)

[http://www.si.ens-cachan.fr/accueil\\_V2.php?page=affiche\\_ressource&id=131](http://www.si.ens-cachan.fr/accueil_V2.php?page=affiche_ressource&id=131)

[http://www.si.ens-cachan.fr/accueil\\_V2.php?page=affiche\\_ressource&id=6&page2=annexe&numannexe=3](http://www.si.ens-cachan.fr/accueil_V2.php?page=affiche_ressource&id=6&page2=annexe&numannexe=3)

### Images :

[http://www.si.ens-cachan.fr/accueil\\_V2.php?page=affiche\\_ressource&id=6](http://www.si.ens-cachan.fr/accueil_V2.php?page=affiche_ressource&id=6)

*Overstress accommodation in notched woven-ply thermoplastic laminates at high-temperature: Numerical modeling and validation by Digital Image Correlation* écrit par B.Vieille, J. Aucher et L.Taleb. Paru dans Elsevier.