

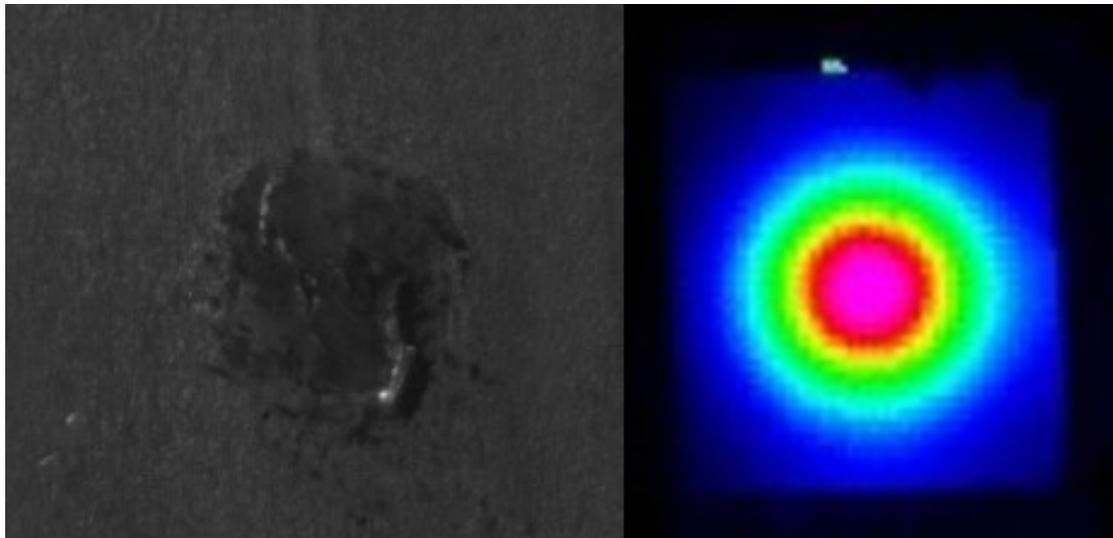
# TRAVAIL D'ÉTUDE ET DE RECHERCHE : SOUS LES PROJECTEURS

Houet Alexandre & Laurent Blanchet  
sous la direction de  
Sylvain Laverhne et Stéphane Pattofatto

7 janvier 2009

## 1

Les composites sont des matériaux de plus en plus utilisés dans l'industrie car ils allient plusieurs caractéristiques remarquables suivant le type (rigidité, légèreté, solidité,...). C'est pourquoi de nombreuses études sont menées sur ces matériaux. Dans le cadre de notre, on souhaite évaluer la pertinence de l'utilisation d'une caméra rapide et d'une caméra infrarouge pour caractériser un matériau composite.



## Table des matières

<b>1</b>	<b>Introduction</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>PROTOCOLE EXPÉRIMENTAL D'UTILISATION DE CAMÉRAS EN PERÇAGE DE COMPOSITE</b>	<b>3</b>
2.1	Usinage . . . . .	3
2.1.1	Positionnement de la caméra . . . . .	3
2.1.2	Montage de la pièce . . . . .	3
2.1.3	Programmation pour le perçage . . . . .	4
2.1.4	Protection . . . . .	5
2.1.5	Synchronisation . . . . .	5
2.2	Estimation de la durée de l'expérience . . . . .	5
<b>3</b>	<b>ANALYSE PAR CAMÉRA RAPIDE DE PERÇAGES</b>	<b>7</b>
3.1	Préparatifs . . . . .	7
3.1.1	Présentation de la caméra . . . . .	7
3.1.2	Montage d'usinage spécifique à la caméra rapide . . . . .	8
3.2	Expérimentation . . . . .	9
3.2.1	Essais sur le composite . . . . .	9
3.2.2	Essais sur d'autres matériaux . . . . .	12
3.3	Interprétation des différents essais sur le composite . . . . .	13
3.3.1	Différence due à l'outil . . . . .	13
3.3.2	Effet de l'avance . . . . .	14
3.3.3	Interprétation sur les autres matériaux . . . . .	15
3.4	Conclusion . . . . .	15
<b>4</b>	<b>ANALYSE PAR CAMÉRA IR DE PERÇAGES</b>	<b>16</b>
4.1	Spécificités de la caméra . . . . .	16
4.1.1	Principe de fonctionnement d'une caméra IR . . . . .	16
4.1.2	Contraintes liées à la caméra . . . . .	16
4.1.3	Précision . . . . .	17
4.2	Mesures . . . . .	17
4.2.1	Essais . . . . .	17
4.2.2	Expérience avec le composite . . . . .	21
4.2.3	Évaluation des incertitudes . . . . .	22
4.3	Conclusion . . . . .	23

## 2 PROTOCOLE EXPÉRIMENTAL D'UTILISATION DE CAMÉRAS EN PERÇAGE DE COMPOSITE

### 2.1 Usinage

#### 2.1.1 Positionnement de la caméra

Pour choisir la Machine à utiliser, il faut prendre en compte les contraintes liées à l'utilisation de caméras. En effet les caméras sont plutôt encombrantes (environ  $150 \times 150 \times 300$  suivant les caméras), et ajouté à leur fragilité, il est hors de question d'utiliser une machine à broche verticale ou il faudrait placer les caméras sous l'opération.

On utilisera donc une machine à broche horizontale, et on pourra placer les caméras dans l'axe de la broche (Fig. 1).



FIG. 1 – On place la caméra dans l'axe de la broche horizontale.

#### 2.1.2 Montage de la pièce

Il existe plusieurs possibilités de montage de pièce :

- soit des montages dédiés qui sont prévus pour une pièce en particulier, surtout utilisé pour des grandes séries
- soit des montages modulaires

Dans notre cas nous utiliserons un montage modulaire, car chaque pièce étant différente et même si on fait toujours la même opération d'usinage nous ne faisons pas de grande série, ni de moyenne série. Les avantages du montage modulaire sont multiples, il est

facilement adaptable pour les pièces et facile de mise en œuvre. Nous avons utilisé une équerre Norelem et deux brides (Fig. 2).

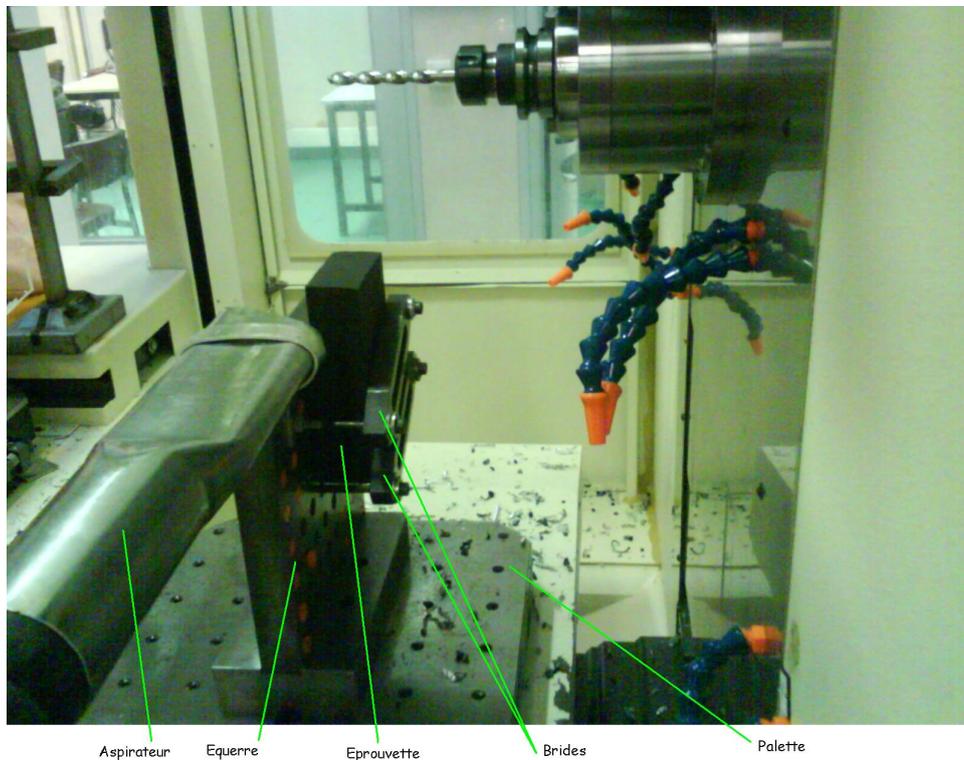


FIG. 2 – Le montage d'usinage.

Néanmoins cette solution a certes l'avantage de la facilité de la mise en place mais elle induit un porte-à-faux gênant : ça augmente les efforts de coupe, et donc la température ; de plus ça peut aussi incliner l'éprouvette et donc induire des défauts dans nos mesures par caméras (positionnées pour l'éprouvette avant usinage).

On pourra suivant les cas lui préférer une solution avec un bridage retirant le porte-à-faux, par exemple avec l'utilisation d'une seconde équerre Norelem.

### 2.1.3 Programmation pour le perçage

Les caméras étant à l'intérieur du carter de la Machine-Outil, on ne peut pas utiliser de lubrification pour les usinages, qui de toute façon aurait pu bloquer le champ des caméras.

On intègre aussi une pause dans le programme d'usinage avec reprise manuelle pour lancer la capture vidéo.

### 2.1.4 Protection

Les caméras utilisées ont des coûts prohibitifs, il faut les protéger de l'environnement agressif dans lequel on va les plonger. Il ne faut pas que ne serait-ce un copeau vienne toucher l'objectif ou même la caméra. On place donc une plaque de plexis entre la caméra et l'usinage. De plus au vu de la quantité de poussières de carbone produit par l'opération d'usinage (Fig. 3), on intègre au montage porte pièce une évacuation (aspirateur à filtre fin).



FIG. 3 – La quantité de poussières de carbone est problématique. Protection des caméras.

### 2.1.5 Synchronisation

On peut effectuer une synchronisation physique. Il suffit pour cela de demander au DCN de générer un top départ lors du contact outil pièce dont le logiciel se servirait pour lancer l'acquisition.

On peut aussi effectuer un recalage logiciel à postériori, particulièrement utilisé pour les caméras rapides que l'on peut utiliser avec un trigger de fin d'acquisition comme celle utilisé lors de ce TER. Il faut cette fois repérer l'instant du débouchage du foret et en retirer le temps d'usinage. Le résultat obtenu est l'offset à déduire de toutes les valeurs temporelles des mesures.

## 2.2 Estimation de la durée de l'expérience

On note  $T_u$  la durée de l'usinage qui ne dépend que des conditions de coupe et du matériau. Cette durée est de l'ordre de la minute.

Étape du protocole (déroulement série)	Sous-étape (déroulement en parallèle)	temps (min)
Mise en place		42-104
	Montage des éléments modulaires	10
	Réglage de la Machine (calcul des Décalages)	30
	Étalonnage des outils (mesures des jauges outils)	10
	Montage des outils	2
	Montage de la pièce et de l'aspirateur	2
	Calcul des conditions de coupe	5
	Création/Édition du programme d'usinage	5
	Installation de la caméra et des équipements informatiques	30
	Calibration et réglages de la caméra et du logiciel	10
Usinage		2
	Exécution du programme d'usinage	2
	Acquisition vidéo	2
	Aspiration des poussières et copeaux	2
Nettoyage et rangement		45-65
	Nettoyage de la machine	30
	Démontage du porte-pièce	15
	Rangement du matériel mécanique	10
	Rangement des équipements	10
Total		min : 1 h 30 min max : 3 h 00 min

### 3 ANALYSE PAR CAMÉRA RAPIDE DE PERÇAGES

#### 3.1 Préparatifs

##### 3.1.1 Présentation de la caméra

**Description de la caméra et principe de fonctionnement** Nous utilisons une caméra rapide ultima APX-RS(Fig. 4). Les caméras rapides ont le même fonctionnement que les caméras classiques, sauf qu'elles possèdent une vitesse d'obturation beaucoup plus élevée, ce qui permet de prendre beaucoup plus d'image par seconde. Pour cette caméra le temps d'ouverture de l'obturateur peut descendre jusqu'à  $2 \mu s$ . La caméra rapide que nous avons utilisé possède une mémoire interne de 2 Go, et le logiciel permettait que la mémoire tourne en boucle. Pour la lancer il faut lui donner un top départ et un top de fin. Ce modèle ne possède pas de zoom, pour ne pas introduire d'erreurs supplémentaires. Sa résolution maximale est de  $1024 \times 1024$  pour une capacité de 3000 images par seconde (fps). En diminuant la résolution, on peut augmenter la vitesse. Le nombre d'images par seconde record obtenu avec cette caméra est de 250000 fps.



FIG. 4 – La caméra rapide Ultima APX-RS.

**Contraintes dues à la caméra** L'utilisation de la caméra rapide nous donne quatre contraintes :

- La rapidité de mesure, le nombre d'image par seconde ;
- La résolution ;
- La durée d'acquisition, la mémoire maximale pour la vidéo étant de 2 Go ;
- Son emplacement, prévoir une zone protégée et suffisamment proche du perçage.

Comme vue dans la partie 3.1.1 la résolution et la rapidité de mesure sont étroitement liées. Mais la mémoire limite alors la durée de mesure. On peut faire un tableau donnant

la durée d'acquisition en fonction de la résolution et de la vitesse de capture, voir table Fig. 5

Frame Rate (fps)	Max. Resolution		Record Time (seconds)			Record Time (frames)		
	Horizontal	Vertical	2GB	8GB	16GB	2GB	8GB	16GB
60	1,024	1,024	34.1	102.4	204.8	2,048	6,144	12,288
125	1,024	1,024	16.4	49.2	98.3	2,048	6,144	12,288
250	1,024	1,024	8.2	24.6	49.2	2,048	6,144	12,288
500	1,024	1,024	4.1	12.3	24.6	2,048	6,144	12,288
1,000	1,024	1,024	2.0	6.1	12.3	2,048	6,144	12,288
2,000	1,024	1,024	1.0	3.1	6.1	2,048	6,144	12,288
3,000	1,024	1,024	0.7	2.0	4.1	2,048	6,144	12,288
5,000	768	768	0.7	2.2	4.4	3,641	10,923	21,845
9,000	640	480	0.8	2.3	4.7	6,991	20,972	41,943
10,000	512	512	0.8	2.5	4.9	8,192	24,576	49,152
10,000	512	528	0.8	2.4	4.8	7,944	23,831	47,663
15,000	384	384	1.0	2.9	5.8	14,564	43,691	87,381
30,000	256	256	1.1	3.3	6.6	32,768	98,304	196,608
50,000	256	144	1.2	3.5	7.0	58,254	174,763	349,525
70,000	128	128	1.9	5.6	11.2	131,072	393,216	786,432
100,000	384	48	1.2	3.5	7.0	116,508	349,525	699,051
150,000	128	48	2.3	7.0	14.0	349,525	1,048,576	2,097,152
210,000	256	16	2.5	7.5	15.0	524,288	1,572,864	3,145,728
250,000	128	16	4.2	12.6	25.2	1,048,576	3,145,728	6,291,456

FIG. 5 – Capacité mémorielle de la caméra.

On remarque que pour une vitesse de 1000 fps , pour une résolution  $1024 \times 1024$  on remplit la mémoire en 2 secondes. Il faut donc prévoir très précisément la durée de l'opération, le nombre de fps nécessaire et la résolution.

### 3.1.2 Montage d'usinage spécifique à la caméra rapide

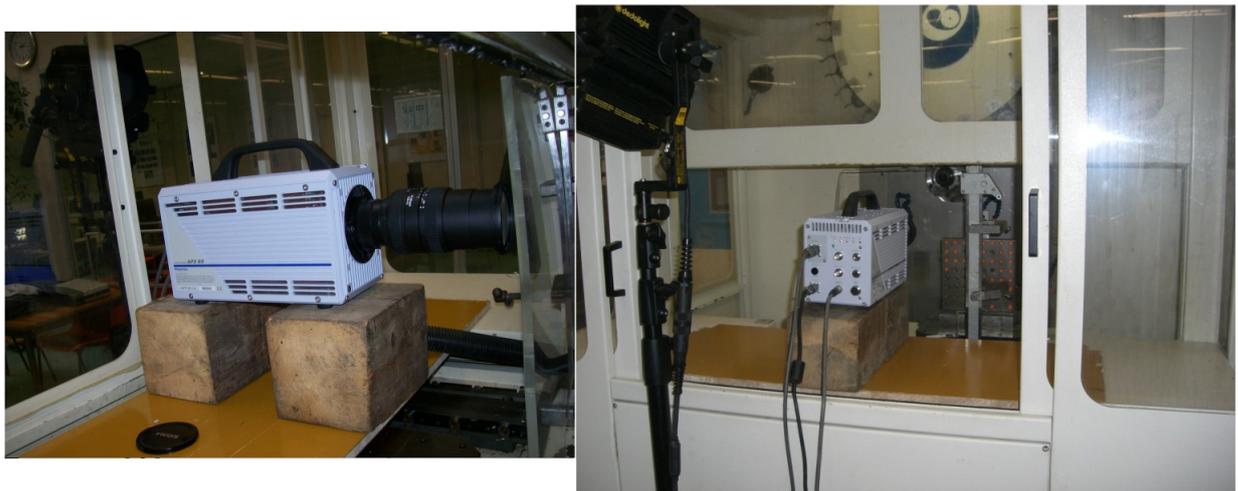


FIG. 6 – Installation de la caméra rapide.

**Protection de la caméra et emplacement** Nous avons placé la caméra rapide face à la broche. En guise de protection nous avons utilisé une plaque de plexiglas pour protéger les optiques (Fig. 6). Nous avons aussi dû surélever la caméra car elle n'était pas dans l'axe du perçage.

Sur ces photos, on voit notre solution pour surélever la caméra et la plaque de plexiglas protégeant l'optique.

**Mise au point de la caméra** Une fois la caméra positionnée et protégée, il faut faire la mise au point pour avoir la meilleure netteté. Manuellement on pilote la MOCN pour la mettre en position de débouchage du perçage avec l'outil qui sera utilisé dans l'essai. Durant l'essai, et aussi lors de la mise au point, nous devons utiliser un spot lumineux pour éclairer le sujet. En effet la vitesse d'obturation étant très importante, le flux de photons captés sera très faible et l'on risque d'avoir une image inexploitable. En ajoutant un spot on augmente fortement la luminosité ce qui permettra ainsi d'avoir une image très claire (Fig. 7).



FIG. 7 – Projecteur.

## 3.2 Expérimentation

### 3.2.1 Essais sur le composite

**Essais avec différents outils** Le composite est un matériau hors norme, en effet avec quels outils peut-on l'usiner ? Nous avons donc décidé d'utiliser plusieurs sortes de forets pour voir leurs influences sur le perçage. Pour voir vraiment la différence nous gardons la même avance  $f = 0.04 \text{ mm/tr}$ , une vitesse de coupe  $V_c = 90 \text{ m/min}$ . Grâce à ces valeurs on peut calculer une fréquence (images/s). En fait la fréquence optimale  $F = N \times \frac{100}{60}$  dépend de la rotation de la broche. Nous avons pris une valeur fixe  $F = 3500 \text{ images/s}$  ce qui équivaut à  $110 \text{ images/tr}$  qui est proche des fréquences optimales des quatre essais.

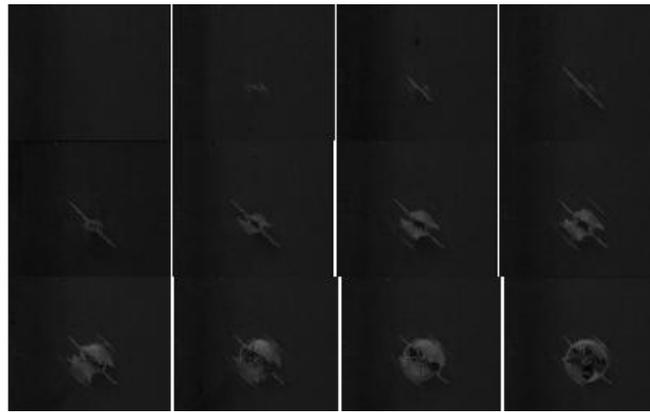


FIG. 8 – Le premier essai a été fait avec un foret alu de diamètre 10 mm, ce qui nous donne  $N = 2864$  tr/min

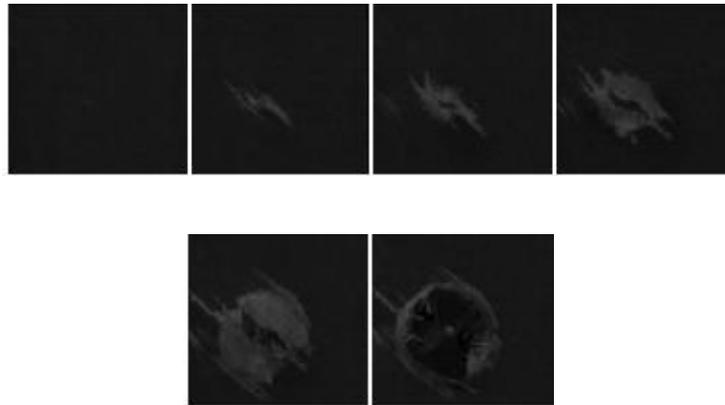


FIG. 9 – Essai avec un foret acier de diamètre 10 ce qui nous donne  $N = 2864$  tr/min

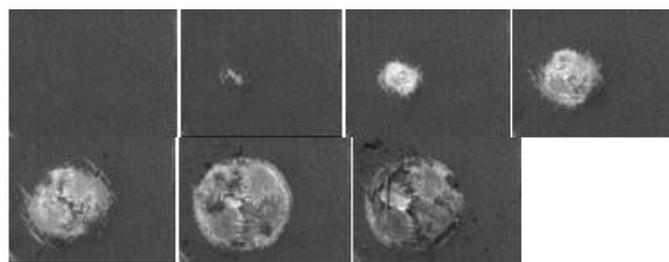


FIG. 10 – Essai avec un foret brasé de diamètre 12 mm, ce qui nous donne  $N = 2388$  tr/min

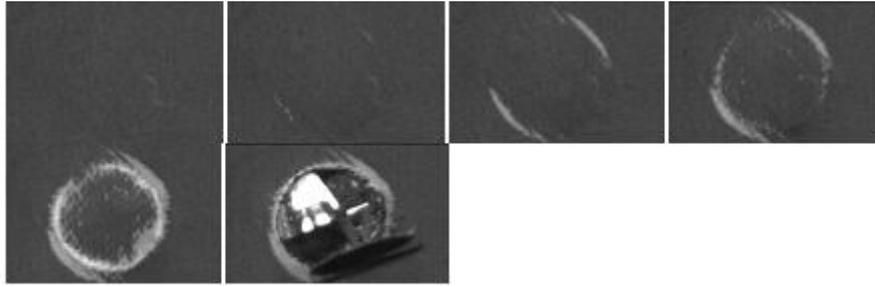


FIG. 11 – Essai avec un foret à plaquettes de diamètre 14 mm soit  $N = 2047$  tr/min

**Essais en faisant varier l'avance** Nous avons décidé de faire varier l'avance, tout en gardant le même outil et les mêmes autres conditions de coupe. L'outil choisit étant un foret Alu de diamètre 10 mm pour une vitesse de coupe  $V_c = 90$  m/min, soit  $N = 2864$  tr/min.

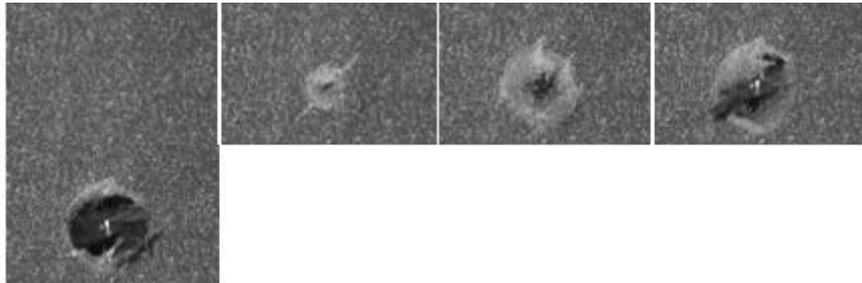


FIG. 12 – Essai avec une avance  $f = 0.04$  mm/tr

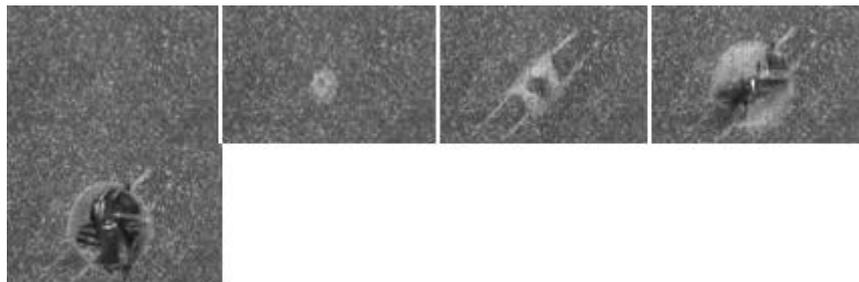
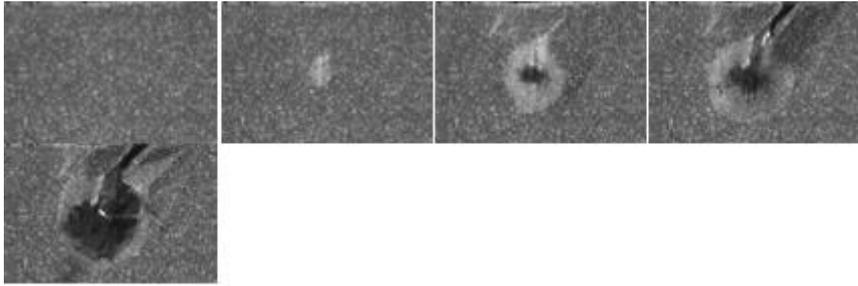
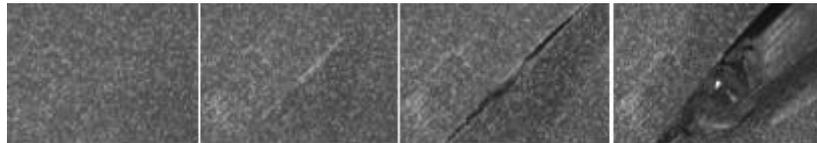


FIG. 13 – Essai avec une avance  $f = 0.03$  mm/tr

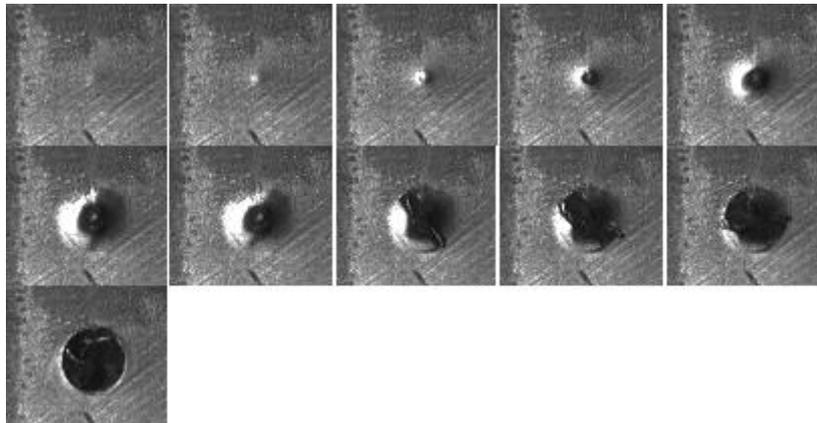
Les deux derniers essais sont faussés car notre foret alu n'était plus dans une condition optimale.

FIG. 14 – Essai avec une avance  $f = 0.02$  mm/trFIG. 15 – Essai avec une avance  $f = 0.05$  mm/tr

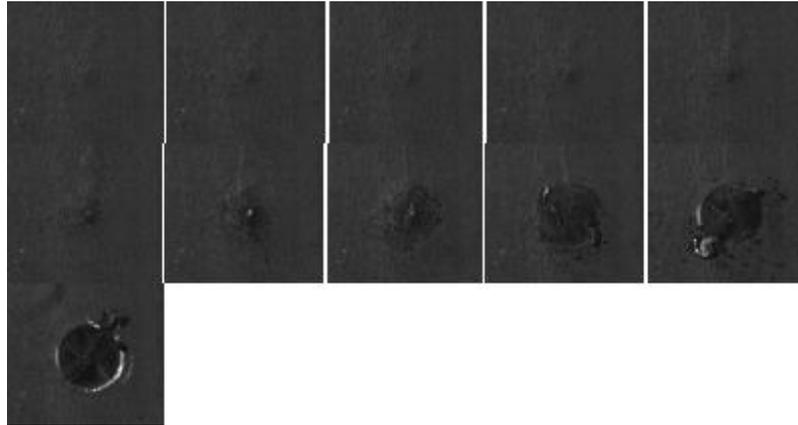
### 3.2.2 Essais sur d'autres matériaux

Nous avons profité de notre installation pour faire des essais sur d'autres matériaux

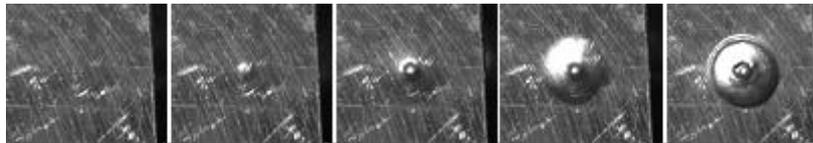
**Essais sur l'acier** L'essai à été réalisé avec un foret acier de diamètre 10 mm, une vitesse de coupe  $V_c = 28$  m/min et une avance de  $f = 0.02$  mm/tr. Ici on voit l'évolution



du perçage. On ne voit pas la sortie du foret car celui-ci est caché par la calotte. Deuxième essai avec les mêmes conditions de coupe mais une avance  $f = 0.026$  mm/tr. On voit ici la couche d'oxydation qui se désagrège. Cet essai nous donne donc pas une bonne idée.

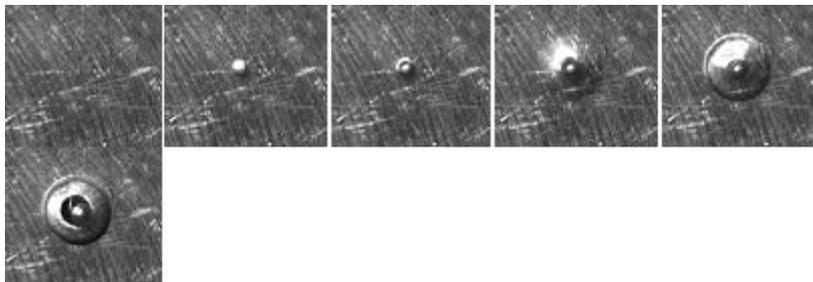


**Essais sur l'aluminium** On a fait de nouveaux essais sur l'aluminium avec un foret alu diamètre 10 mm et une avance  $f = 0.025$ ,  $N = 2500$  tr/min. Ici on voit l'apparition



d'une calotte, et pas la sortie du foret.

Un autre essai avec une avance  $f = 0.01$  et  $N = 3200$  tr/min avec le même foret : Sur



cet essai, bien que l'on ait changé les valeurs on observe le même phénomène.

### 3.3 Interprétation des différents essais sur le composite

#### 3.3.1 Différence due à l'outil

Pour le foret alu, et le foret acier on a le même phénomène, une fissure apparaît au centre et se propage, puis il y a arrachement du matériau, la dernière couche se détériore. On observe bien sur la figure ci-dessous que les bavures sont assez importantes pour ces forets (Fig. 16).

Dans le cas du foret brasé, on n'a pas l'apparition de cette fissure. On voit bien qu'il n'y a pas de coupure mais plutôt un arrachement de matière, par contre les bavures sont moindres (Fig. 16).

Pour le foret à plaquettes, on a l'apparition de deux fissures périphérique, et un découpage propre. Les bavures sont très petites et le perçage est net (Fig. 16).

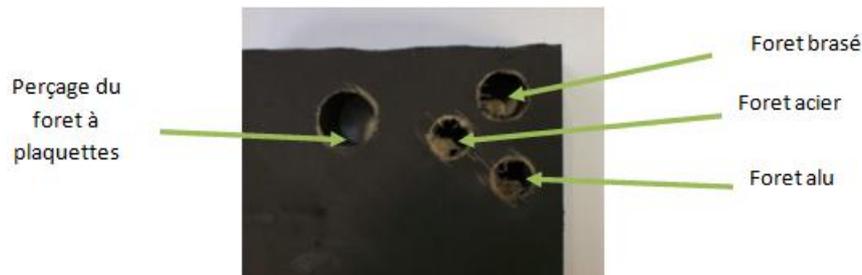


FIG. 16 – Composite après opération

Il semble donc au vu de ces expériences, que les forets à plaquettes sont les mieux adaptés au perçage d'un matériau composite.

### 3.3.2 Effet de l'avance

L'effet de l'avance sur la coupe du composite est vraiment faible, en effet on remarque que quelque soit cette avance, on obtenait le même phénomène de perçage, l'apparition de fissures et des bavures quasi identiques.

Nos derniers essais sont faussés du fait que notre foret ait perdu ses caractéristiques de coupe (Fig. 17).

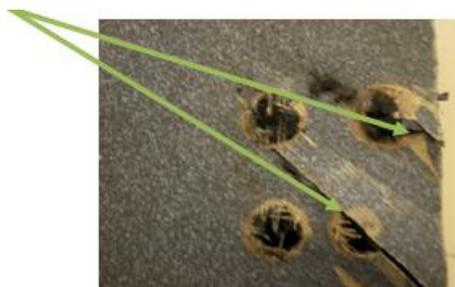


FIG. 17 – Composite après opération

On observe aussi que la couche supérieur du composite a craqué et s'est distendue. L'effet de l'avance sur le perçage du composite semble donc très faible, que ça soit au niveau bavure, qu'au niveau fissuration.

### 3.3.3 Interprétation sur les autres matériaux

On remarque que pour l'acier, il n'y a pas vraiment de coupe, il y a surtout repousse-ment de la matière. Pour nos essais sur les aluminiums, on a le même phénomène. Un des problèmes que l'on a rencontré est le fait que l'on ne connaissait pas exactement quel type d'aluminium il s'agissait. Celui que l'on a utilisé était très mou, d'où ce repoussement de matière, plutôt que coupe.

### 3.4 Conclusion

L'utilisation de la caméra rapide durant une opération de perçage ne nous permet pas de caractériser le composite. L'étude de l'influence de l'avance ne nous donne pas suffisamment de réponse pour pouvoir le caractériser, l'utilisation de différentes technologies de foret nous a juste permis de dire que le foret à plaquettes est le plus performant. Mais nous n'avons pas étudié l'influence de la vitesse de coupe, et de beaucoup d'autres paramètres. De plus certaines erreurs peuvent être dues à notre montage de pièce qui n'était pas totalement rigide. D'où peut être des défauts dans les bavures.

## 4 ANALYSE PAR CAMÉRA IR DE PERÇAGES

### 4.1 Spécificités de la caméra

#### 4.1.1 Principe de fonctionnement d'une caméra IR

Une caméra IR permet de mesurer des températures en enregistrant un flux d'onde appartenant au domaine des infra-rouge. En effet, l'infrarouge est associé à la chaleur car, à température ambiante ordinaire, les objets émettent spontanément des radiations dans le domaine infrarouge ; la relation est modélisée par la loi du rayonnement du corps noir dite aussi loi de Planck. La longueur d'onde du maximum d'émission d'un corps noir porté à une température absolue  $T$  (en kelvin) est donnée par la loi du déplacement de Wien (eq 1).

$$\lambda = \frac{2898}{T} \quad (1)$$

Cette association entre l'infrarouge et la chaleur n'est cependant due qu'à la gamme de température observée sur la terre. Il est parfaitement possible de générer un rayonnement infrarouge qui ne soit pas thermique, c'est-à-dire dont le spectre ne soit pas celui du corps noir ; par exemple, les diodes électroluminescentes utilisées dans les télécommandes « n'émettent pas de chaleur ».

#### 4.1.2 Contraintes liées à la caméra

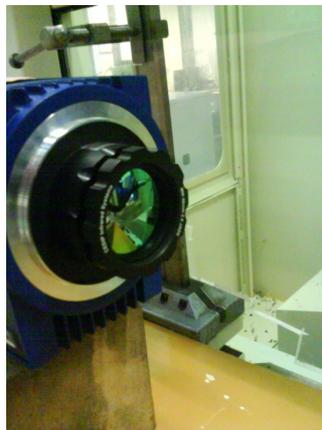


FIG. 18 – La caméra IR équipée de l'objectif en situation.

Les contraintes d'installation de la caméra IR sont plus exigeantes que celles de la caméra rapide. En effet, les contraintes de positionnement sont les mêmes mais il y a en plus la fragilité de la connectique de la caméra IR, source de nombreux problèmes et réparations, ainsi que la fragilité des objectifs IR (Fig. 18), plus fragiles que des optiques classiques (les lentilles ne sont pas en verre, les deux objectifs sont en Si et ZnSe pour

assurer l'achromatisme). De plus les lentilles étant opaques en lumière visible, les rayures ne se voient pas et le bris d'une lentille est source de gaz cancérigènes. Prix de la lentille : 2000 euros (6 lentilles par objectif).

Il faut de plus placer la caméra à 3 ou 30 cm du sujet suivant l'objectif utilisé, or il faut aussi protéger l'objectif. Il est hors de question de placer le plexiglas entre l'objectif et l'éprouvette car le plexiglas est un corps noir et bloquerait les rayons IR qu'on désire acquérir ou ajouterait un bruit trop important. On a donc utilisé un miroir spécial et placé la caméra perpendiculairement à la broche, derrière le plexiglas (Fig. 19), avec l'objectif pour 30 cm de distance.

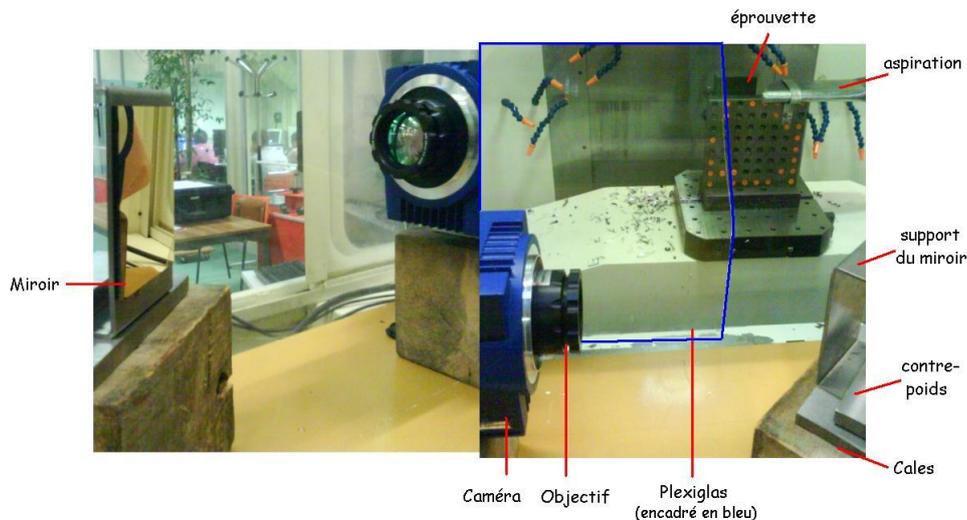


FIG. 19 – Disposition de la caméra et du miroir par rapport à la broche.

Pour le composite, nous avons pris les mêmes précautions que précédemment.

### 4.1.3 Précision

Il y a tout d'abord une moyenne temporelle qui est effectuée par la caméra due à la vitesse d'obturation finie et de valeur standard pour garder une image exploitable. De plus la caméra a des limitations matérielles : MRTD (Minimum Resolvable Temperature Difference)  $\approx 20 mK$ . Le miroir doit avoir un indice de réflexion supérieur à 0,98 mais strictement inférieur à 1, et son émissivité ne peut être nulle. Ces deux limitations se traduiront par l'ajout d'un bruit thermique.

## 4.2 Mesures

### 4.2.1 Essais

On a commencé par s'essayer sur des matériaux connus avant d'aborder le composite. On a donc pour cela utilisé de l'aluminium, de forte diffusivité, et de l'acier, de faible

diffusivité. Les images montrent que les champs sont concentriques (Fig. 20), ce qui

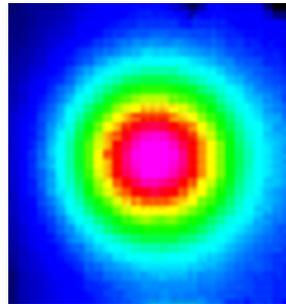


FIG. 20 – Type d'images obtenues par la caméra IR.

est logique pour notre opération de perçage. La méthode d'analyse a été d'utiliser des cercles concentriques centrés sur le centre du perçage et de déterminer la moyenne de température sur ce cercle ce qui permet de filtrer les bruits.

Malheureusement la calibration incorrecte de la caméra conduit à une saturation à quelques  $118^{\circ}\text{C}$ .

Sur les figures 21 et 22 sont représentées les températures du premier essai sur acier (avec un foret acier) en fonction de la distance entre le centre du perçage et le point courant. Ces courbes sont obtenues par interpolations linéaires entre les valeurs moyennées des cercles pour une image donnée. Le débouchage intervenant aux alentours de l'image 150, les courbes liées à un moment ultérieur correspondent à la phase de refroidissement.

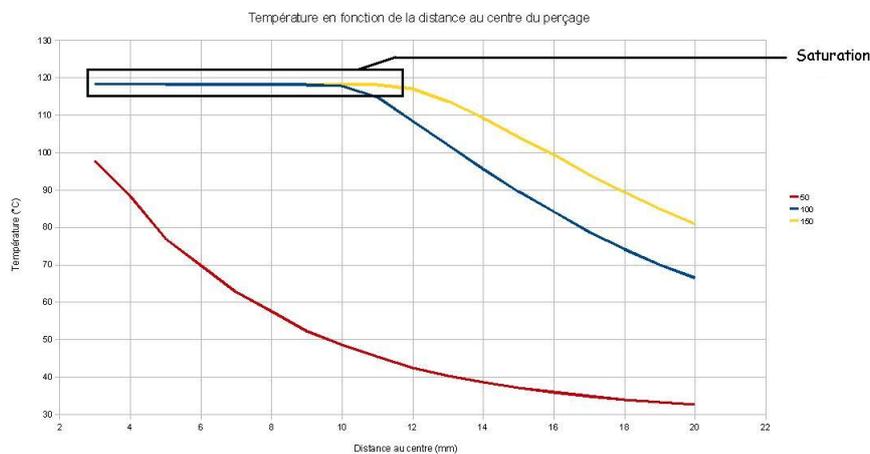


FIG. 21 – Courbes de la température en fonction de la distance par rapport au centre du perçage, jusqu'au débouchage.

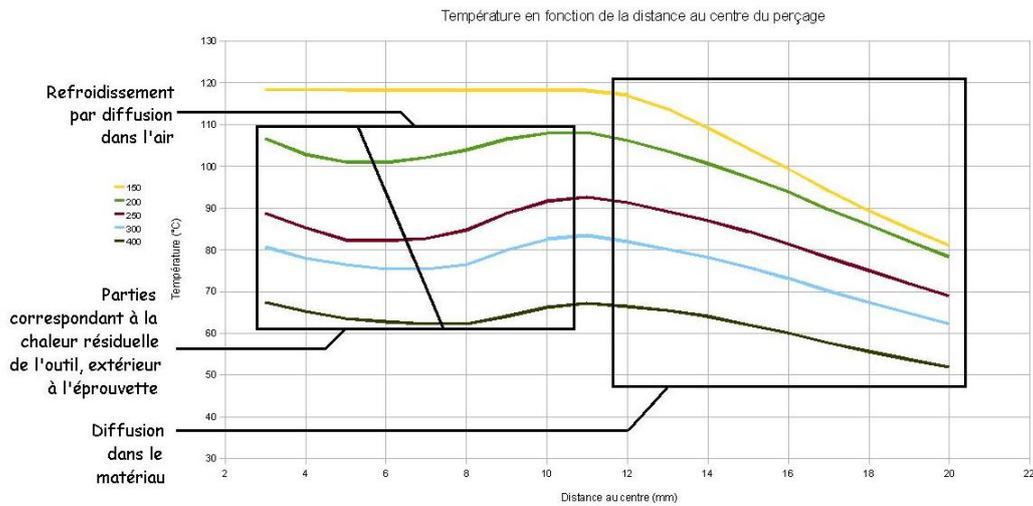


FIG. 22 – Courbes de la température en fonction de la distance par rapport au centre du perçage, à partir du débouchage.

Sur la figure 23 sont représentées les températures du second essai sur acier (avec un foret acier) et du troisième (foret brasé) en fonction de la distance entre le centre du perçage et le point courant. Ces courbes sont obtenues pour une image donnée, à partir d’une ligne coupant les cercles. Il n’y a donc pas de moyennage et les mesures sont donc sensibles aux bruits. Cette courbe est obtenue peu après le débouchage. La température élevée au centre est celle du foret (de diamètre 10 mm, donc la zone du graphe pour  $r \leq 5\text{ mm}$ ).

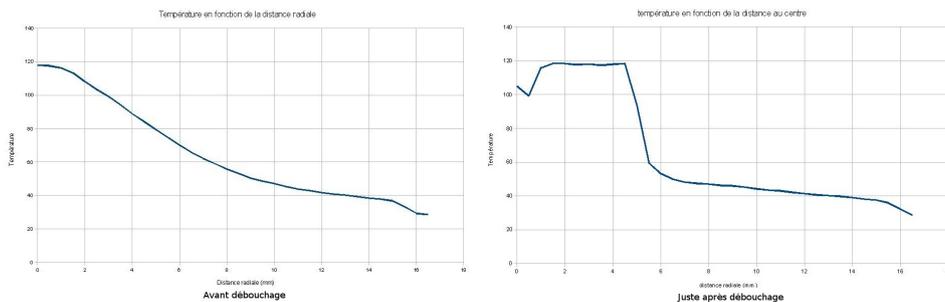


FIG. 23 – Courbe non moyennée de la température en fonction de la distance par rapport au centre du perçage.

Sur la figure 24 sont représentées les températures du premier essai sur acier (avec un foret acier) en fonction du numéro d’image. La fréquence d’enregistrement étant fixée,

il suffit de diviser le numéro d'image par la fréquence de la caméra. Ces courbes sont obtenues pour une distance à partir du centre fixée. Il y a moyennage sur les cercles, le diamètre du foret est 10 mm.

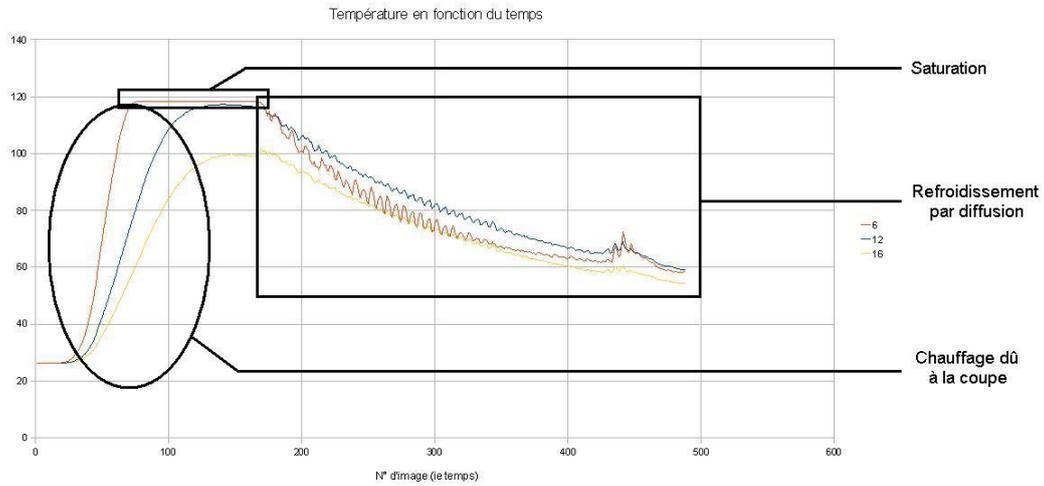


FIG. 24 – Courbe de la température en fonction du temps.

On peut aussi obtenir la température en fonction du temps et de la distance radiale, fig. 25. On voit clairement la plage de saturation.

Evolution de la température en fonction du temps pour  $3 \leq R \leq 20$  (mm)

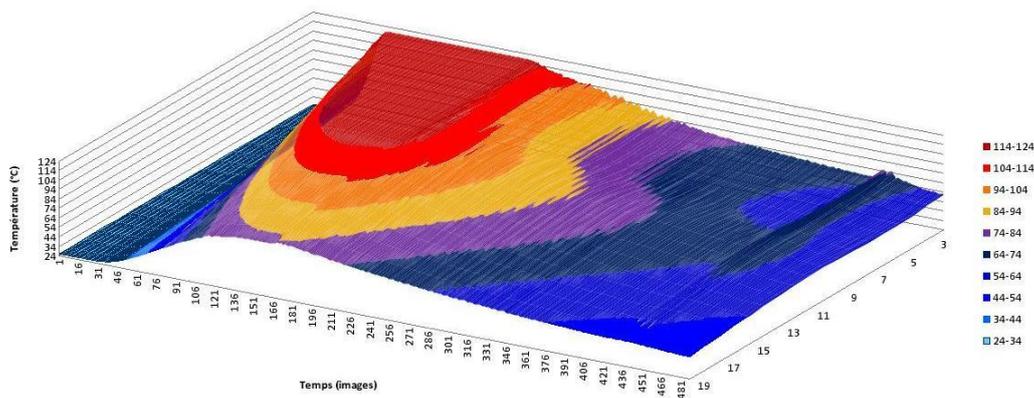


FIG. 25 – Courbe de la température en fonction du temps et du rayon.

#### 4.2.2 Expérience avec le composite

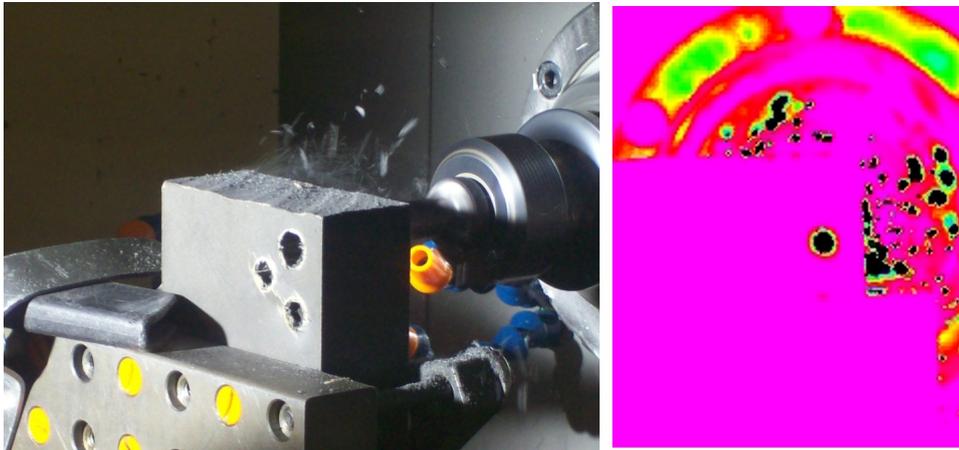


FIG. 26 – Usinage du composite. La quantité de copeaux (chauds) importante va parasiter la mesure.

Comme on le voit sur la figure 26, l'usinage de composite produit beaucoup de copeaux et de poussières à haute température (sur cette image IR le noir représente la température de saturation, 118°C, alors que le rose est la température ambiante) qui vont gêner la mesure.

Sur la figure 27 sont représentées les températures du premier essai sur composite (avec un foret pour alu) en fonction de la distance entre le centre du perçage et le point courant. Ces courbes sont obtenues par interpolations linéaires entre les valeurs moyennées des cercles pour une image donnée.

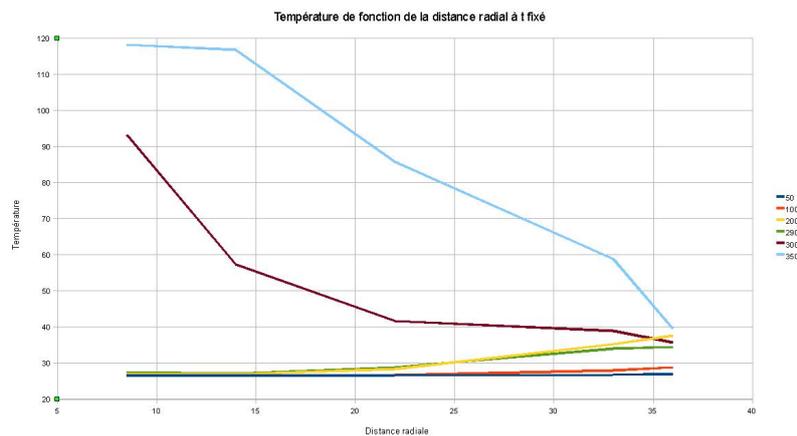


FIG. 27 – Courbe de la température en fonction de la distance radiale.

Sur la figure 28 sont représentées les températures du premier essai sur composite (avec un foret alu) en fonction du numéro d'image, donc du temps. Ces courbes sont obtenues pour une distance à partir du centre fixée. Il y a moyennage sur les cercles. Le rayon du foret est 5 mm. On voit que dans le cas du composite, avant le débouchage du foret la face extérieure de l'éprouvette reste à température ambiante.

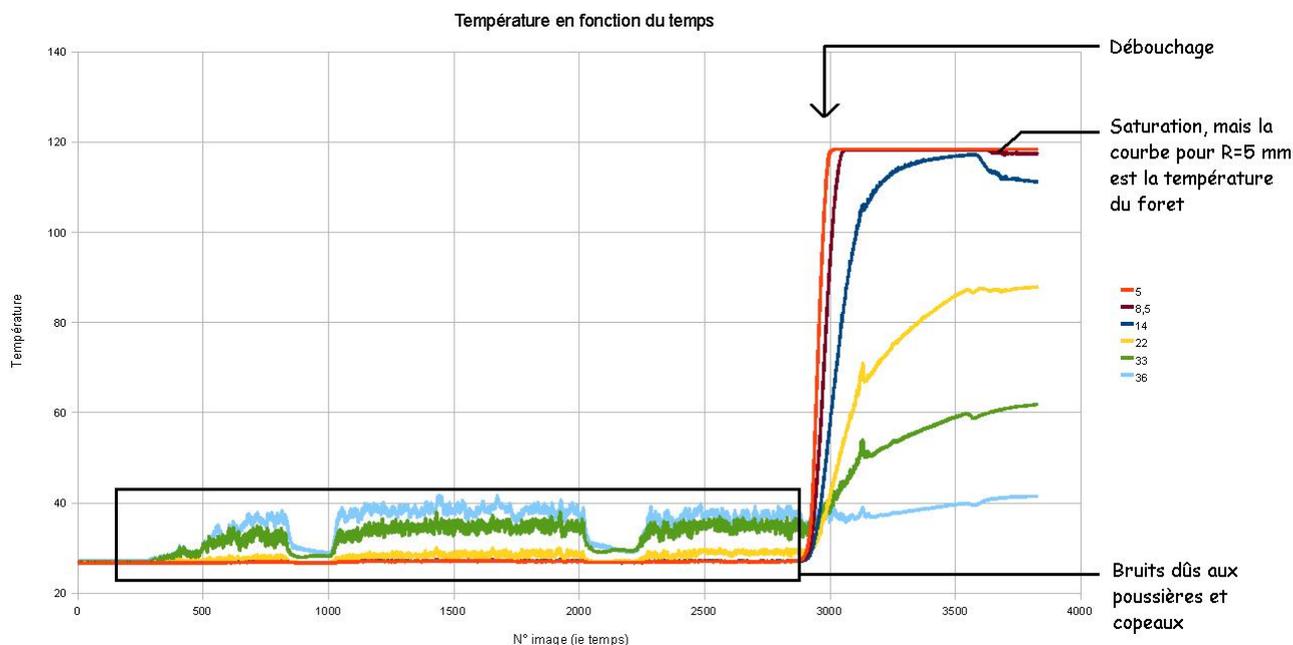


FIG. 28 – Courbe de la température en fonction du temps.

#### 4.2.3 Évaluation des incertitudes

Comme on l'a dit lors de la présentation de la caméra, celle-ci possède une limitation sur la différence de température minimale détectable. De plus, un pixel de l'image en sortie faisait 0,5 mm de côté, il y a donc là une seconde approximation, plus importante que la précédente.

À ceci il faut ajouter que les températures obtenues étaient, sauf indication contraire, les moyennes des températures sur lesquelles passaient un cercle qu'on désignait comme isotherme, mais le placement se faisant à la main et les isothermes n'étant pas toujours tout à fait circulaires il y a encore eut une approximation, plus importante que les précédentes vu que celle-ci s'établissait sur quelques pixels.

### 4.3 Conclusion

Comme on l'a vu, l'utilisation de la caméra, si on veut des mesures correctes et exploitables, n'est pas des plus simples. En revanche on obtient des résultats qui pourraient être exploitables et en y associant des lois thermiques, identifier les paramètres matériau.