

# Etude de faisabilité de la caractérisation de particules incandescentes émises par une découpe d'acier lors d'opérations de démantèlement

**Pierre MARCHAL<sup>1,a</sup>, Emmanuel PORCHERON<sup>a</sup>, Luc LAFANECHERE<sup>b</sup> et Gérard GREHAN<sup>c</sup>**

a- Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (IRSN), Centre de Saclay - Bât. 450 BP 68, 91192 Gif-sur-Yvette Cedex, France

b- EDF CIDEN 154 Avenue Thiers 69458 Lyon Cedex 06, France

c- UMR 6614 CORIA, Université de Rouen, avenue de l'université BP12, 76801 Saint Etienne du Rouvray Cedex, France

## 1 Contexte général

La mise en œuvre de procédés mécaniques ou thermiques de type découpe ou abrasion dans des chantiers d'assainissement ou de démantèlement d'installations nucléaires génère une production de particules métalliques incandescentes. Ces particules peuvent être entraînées dans les réseaux de ventilation et conduire à une perforation, voire à une inflammation du premier niveau de filtration, ce qui constitue un risque de dégradation des barrières de confinement avec potentiellement un risque de départ d'incendie. Ainsi, l'Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (IRSN) a lancé en partenariat avec le Centre d'Ingénierie de Déconstruction et Environnement (CIDEN) d'EDF, un programme de recherche dont l'objectif est de déterminer les caractéristiques (température de surface, diamètre, morphologie et vitesse) des particules incandescentes produites à la source par différents dispositifs de type découpe, mais également de déterminer l'évolution de ces caractéristiques pendant le temps de vol des particules jusqu'à leur impact sur le médium filtrant.

Cet article présente une étude de faisabilité pour l'utilisation de moyens de diagnostics optiques en vue de caractériser les particules générées lors de la découpe d'acier.

Au début de l'article est présentée une étude théorique concernant le développement du concept qui sera utilisé pour mesurer la température des particules produites.

Il apparaît que cette mesure délicate nécessite aussi une bonne connaissance des caractéristiques des particules générées, telles que la distribution granulométrique, la vitesse et la nature chimique.

En ce sens, des mesures de granulométrie et de vitesse ont été entreprises respectivement à l'aide d'un compteur optique et de la technique PIV. Les résultats obtenus sont exposés dans la suite de cet article.

## 2 Etude de faisabilité théorique de la mesure de température

De par l'agitation moléculaire, tout corps dont la température est supérieure à 0 K émet un rayonnement électromagnétique. La loi de Planck donne la luminance spectrale d'un corps noir dans le vide, c'est-à-dire la puissance émise par un corps noir pour une longueur d'onde donnée par unité de surface et par unité d'angle. Un corps noir absorbe tout le rayonnement électromagnétique qu'il reçoit. A une température donnée, le corps noir émet un rayonnement électromagnétique d'intensité maximale ; c'est donc un corps idéal. En réalité, la plupart des corps émettent à une température donnée moins d'énergie par rayonnement que le corps noir, ce qui se traduit par une émissivité inférieure à 1 puisque que l'émissivité est le rapport entre l'énergie émise par un corps à une température T et l'énergie émise par un corps noir à la même température. L'émissivité dépend notamment de la longueur d'onde d'étude, de la direction de visée, de la température du corps et de l'état de surface. Elle est difficile à déterminer avec une bonne précision et influence directement la valeur de la température mesurée. Pour des métaux oxydés, elle est généralement comprise entre 0,25 et 0,68 [3][4].

La loi de Planck pour un corps quelconque est :

$$L_{\lambda} = \frac{\varepsilon_{\lambda} \cdot C_{1,\lambda}}{\lambda^5 \cdot \left[ \exp\left(\frac{C_2}{\lambda \cdot T}\right) - 1 \right]} \quad \text{en W/(m}^2 \cdot \text{m} \cdot \text{sr)} \quad (1)$$

Avec,  $L_{\lambda}$  la luminance spectrale d'un corps quelconque,  $C_{1,\lambda}$  la première constante de rayonnement spectrale avec  $C_{1,\lambda} = 2hc_0^2$  ( $h$  est la constante de Planck et  $c_0$  la vitesse de la lumière) et  $C_2$  la seconde constante de rayonnement avec  $C_2 = hc_0/k$  ( $k$  est la constante de Boltzmann) et  $\varepsilon_{\lambda}$  l'émissivité du corps à la longueur d'onde  $\lambda$ .

La valeur de température peut être déterminée en mesurant la luminance spectrale  $L_{\lambda}$ . Le principe de la mesure de la luminance spectrale reçue par un détecteur est illustré sur la Figure 1.

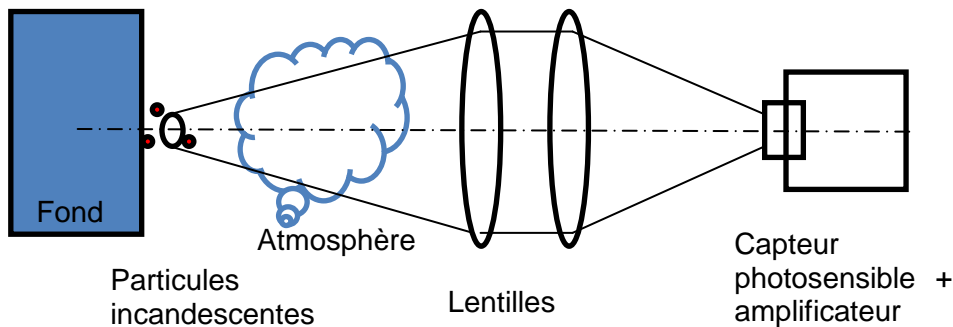


Figure 1- Schéma de principe de la mesure de température des particules

La luminance spectrale reçue par le détecteur provient de plusieurs sources ; elle peut être exprimée par la relation (2) :

$$L_{\lambda}(\lambda) = \tau_{env} \cdot (L_p(\lambda, T_p) + L_f(\lambda, T_f) + L_r(\lambda)) + L_{em}(\lambda, T_{env}) \quad (2)$$

Avec  $\tau_{env}$  le coefficient de transmission de l'atmosphère à la température  $T$  et à la longueur d'onde  $\lambda$ ,  $L_p$  la luminance des particules à la température  $T_p$ ,  $L_f$  la luminance du fond à la température  $T_f$ ,  $L_r$  la luminance de l'environnement réfléchi par le fond et les particules, et  $L_{em}$ , l'émission de l'atmosphère. Il est important de maîtriser les caractéristiques physiques de l'environnement durant les essais pour en limiter les réflexions et connaître la luminance du fond. Ainsi, en connaissant la valeur de l'émissivité, il est possible d'accéder à la mesure de température des particules incandescentes.

Afin d'évaluer la sensibilité des détecteurs qui pourraient être utilisés pour la mesure de la température des particules incandescentes, nous allons estimer l'intensité de la luminance spectrale émise par ces dernières en les considérant, en première approximation, comme sphériques. Ainsi, la luminance spectrale théorique émise par la surface de particules portées à une température de 1000 K, est estimée à l'aide de la loi de Planck (1), en assimilant la surface d'une particule à celle d'un disque de diamètre équivalent. Les résultats sont illustrés sur la Figure 2 qui présente la luminance spectrale de particules dont le diamètre est compris entre 0,2  $\mu\text{m}$  et 9,2  $\mu\text{m}$ .

Ces résultats mettent en évidence l'influence significative du diamètre de la particule sur la luminance émise (une augmentation d'un ordre de grandeur du diamètre d'une particule induit une augmentation de deux ordres de grandeur de la luminance).

Les résultats permettent également de préciser l'ordre de grandeur de la sensibilité du détecteur qui devra pouvoir détecter et mesurer la luminance émise par les plus petites particules.

Ainsi, l'application de cette mesure pour nos conditions expérimentales induit une forte contrainte technologique au niveau du capteur en termes de sensibilité, mais aussi de temps de réponse. En effet, les particules produites lors des opérations de découpe sont animées d'une vitesse pouvant

être importante (jusqu'à 80 m/s), ce qui signifie que le temps de transit de la particule dans le volume de mesure du capteur est un paramètre important qui limite la quantité d'énergie pouvant être potentiellement captée par le détecteur. De plus, il est nécessaire d'avoir un volume de mesure suffisamment petit pour améliorer la précision de la mesure de la température des particules qui par nature sont polydispersées et qui présentent donc une corrélation taille / température marquée. Les plus petites particules vont se refroidir très rapidement du fait de leur faible inertie thermique, contrairement aux plus grosses particules.

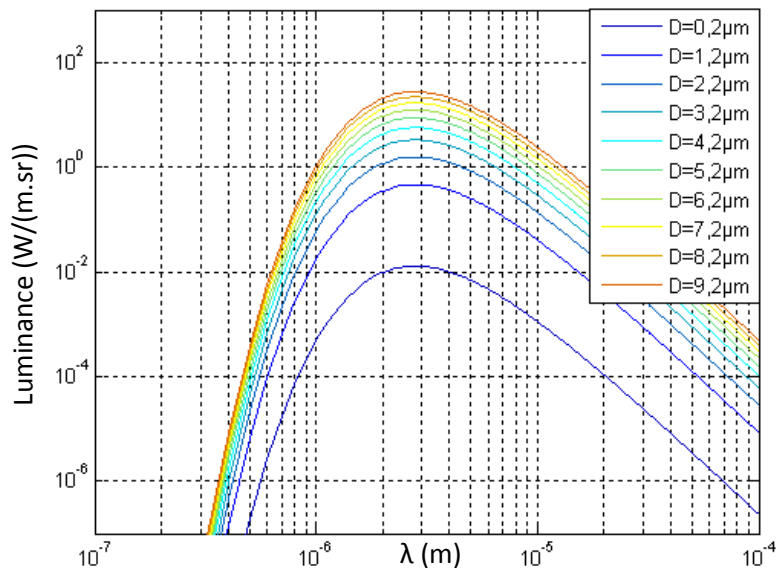


Figure 2- Luminance spectrale multipliée par la surface de disques de différents diamètres à la température de 1000 K

Une première approche a été effectuée en réalisant une mesure de température par pyrométrie sur la plaque d'acier à découper, à proximité immédiate du disque de l'outil de découpe. Le but est de mesurer la température du métal qui sera assimilée à la température d'éjection des particules. Les résultats montrent que la température de la plaque au niveau du trait de découpe pouvait dépasser les 800 °C.

Pour les particules en vol, le développement de la mesure pyrométrique nécessite de connaître la gamme de taille et de vitesse de la population de particules dont les mesures de température s'avèrent pertinentes dans le cadre de notre étude.

### 3 Caractérisation de la granulométrie des particules produites par une disqueuse

Des essais préliminaires réalisés lors de découpes d'acier à l'aide d'une disqueuse ont montré que la production massive des particules était également répartie entre la dégradation du disque utilisé pour la découpe et la plaque d'acier découpée [1].

Pendant la découpe, il y a ainsi présence dans l'air de deux types de particules : des particules issues du disque, essentiellement de l'oxyde d'aluminium et de la fibre de verre, et des particules issues de la plaque en acier inoxydable.

A l'aide d'un Aerodynamic Particle Sizer (APS-TSI3321), dont la gamme de mesure s'étend de 0,2 à 20  $\mu\text{m}$  [2], nous avons déterminé le diamètre aérodynamique des particules prélevées dans la gerbe d'étincelles.

Afin de voir l'évolution de la répartition granulométrique, des prélèvements ont été effectués en gaine, sans extraction, à deux distances différentes de la génération, selon le schéma présenté sur la Figure 3. Les prélèvements ont été effectués sur trois échantillons intégrés sur une période de 30 s ; le premier réalisé avant la découpe est dénommé « Initial », le deuxième réalisé pendant

une découpe, dénommé « Découpe » et le troisième réalisé après la découpe est dénommé « Fin ».

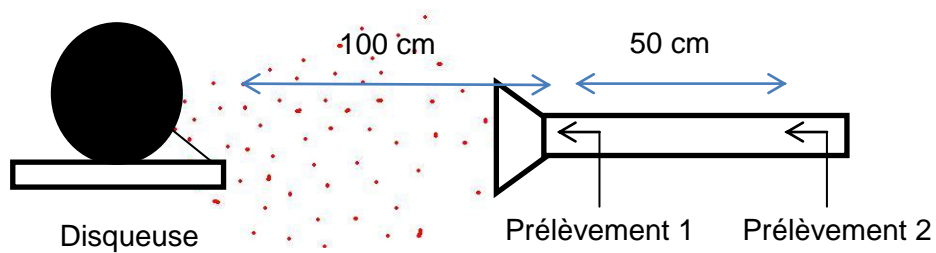


Figure 3- Emplacement des prélèvements pour la mesure de la distribution granulométrique des particules

Au point de prélèvement 1, nous obtenons une répartition en nombre représentée sur la Figure 4.

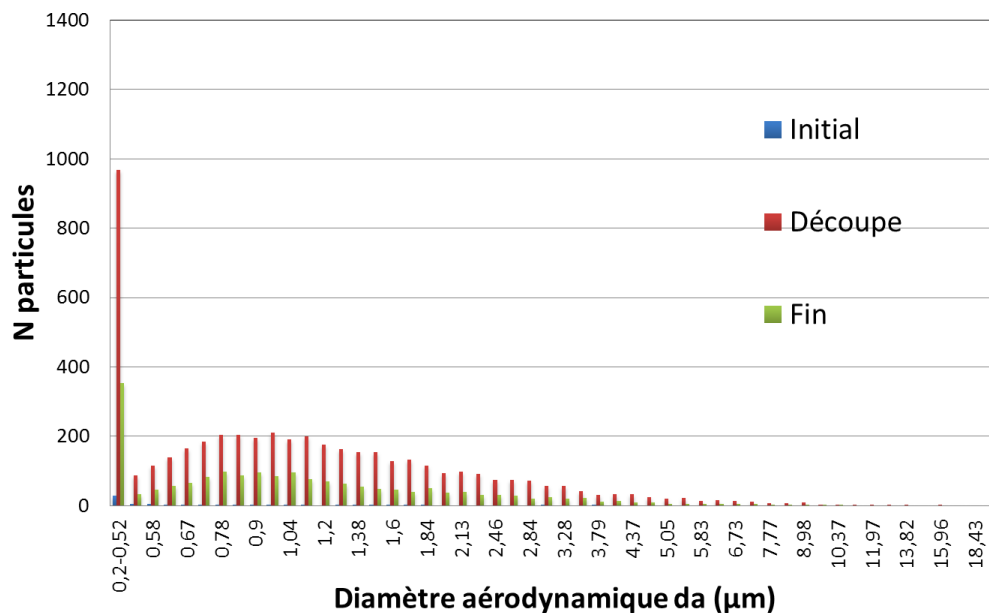


Figure 4- Répartition granulométrique en nombre pendant une phase de découpe au prélèvement 1

Il apparaît une quantité importante de particules dont le diamètre aérodynamique est de l'ordre du micromètre et inférieur.

Au point de prélèvement 2, nous obtenons une répartition en nombre représentée sur la Figure 5.

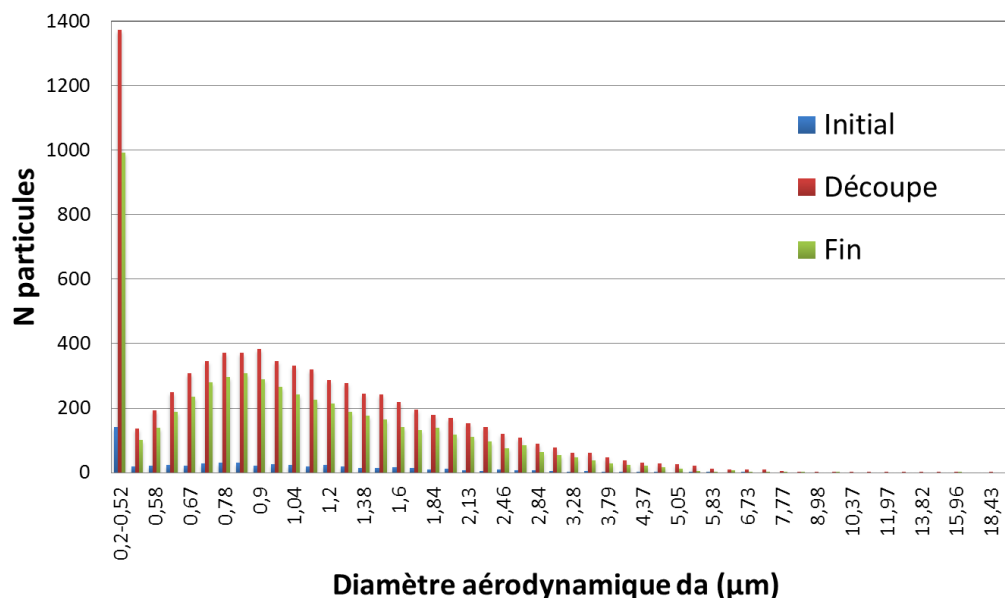


Figure 5- Répartition granulométrique en nombre pendant une phase de découpe au prélèvement 2

Le prélèvement 2 étant réalisé après une série d'essais en l'absence de ventilation, des résidus particulaires sont en suspension dans l'air et apparaissent dans les prélèvements, résidus qui sont plus importants en nombre de particules. Pendant la découpe, la forme de la répartition est similaire à celle du prélèvement 1.

Les mesures réalisées à l'aide de l'APS ne permettent pas de discriminer la nature physico-chimique des particules et ainsi de différencier les particules métalliques issues de l'acier découpé et les particules d'alumine ou de fibres de verre, issues de l'usure du disque. Pour ce faire, des recherches complémentaires sont en cours, avec notamment l'utilisation d'un champ magnétique permettant de sélectionner les particules métalliques.

#### 4 Caractérisation de la vitesse des particules par PIV

La mesure de vitesse par PIV effectuée dans le cadre de cette étude diffère des cas classiques de PIV. Il ne s'agit pas de mesurer la vitesse d'un fluideensemencé avec des particules ayant une distribution granulométrique bien centrée, mais de caractériser la vitesse des particules polydispersées pour lesquelles la corrélation taille / vitesse est marquée. De plus, la densité de particules reste relativement faible comparativement à un ensemencement adapté à la PIV et les particules ont des indices de réfraction différents.

Un laser YAG double pulse, doublé en fréquence (532 nm) de 50 mJ, éclaire les particules dont les images sont enregistrées à l'aide d'une caméra HiSense (DANTEC), dont la matrice est constituée de 1280x1024 pixels mesurant 3,4 µm de côté. La configuration de travail est décrite Figure 6.

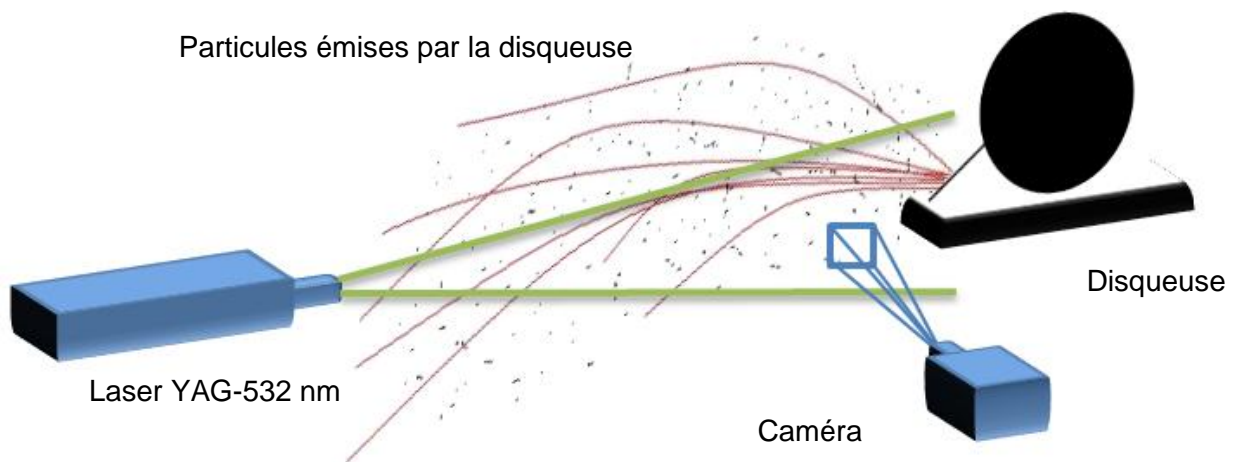


Figure 6- Schéma du montage pour la mesure PIV

Nous avons mis en évidence dans le paragraphe 2 que le terme source était composé de particules incandescentes qui sont des particules dont la température est suffisamment élevée, de l'ordre de 800 °C, pour que leur rayonnement soit émis dans le visible. En effet, des mesures dans nos conditions expérimentales, à l'aide d'un pyromètre monochromatique (CellaTemp-KELLERMSR), ont montré que la température de la plaque à proximité immédiate de la découpe, pouvait dépasser 800°C. Mais le terme source est aussi composé de particules, moins chaudes qui ne seront visibles que si elles sont éclairées par le plan laser.

La conséquence sur la mise en œuvre de la PIV est que le temps d'intégration de l'image des particules incandescentes sera celui imposé par la caméra (images 1 et 2, respectivement 130 µs et 100 ms). En revanche, pour les autres particules issues du disque (et les particules métalliques qui se sont refroidies), le principe de l'exposition imposée par le flash laser est conservé.

Les particules incandescentes qui sont générées avec une faible densité, ont une composante de vitesse axiale importante, leur vitesse initiale étant celle d'éjection en périphérie du disque, soit environ 80 m/s pour un disque neuf. De plus, ces particules ont une inertie importante de par leur masse volumique et leurs dimensions caractéristiques.

Les autres particules, issues du disque, sont générées avec une forte concentration numérique ; elles ont une faible inertie et une plus faible vitesse axiale étant donné qu'elles sont émises sous la forme d'un panache dont la source est diffusée tout autour de la zone de découpe. De plus, sachant que le disque ne rougit pas durant l'opération de découpe, nous pouvons considérer que les particules incandescentes ne sont émises que par les pièces métalliques découpées.

Notre approche consiste donc à réaliser des mesures PIV en configuration standard sur les particules fines en utilisant un filtre passe bande centré sur la longueur d'onde d'émission du laser, soit 532 nm.

Lors des essais, nous obtenons des images, présentées sur les Figures 7 et 8, qui font apparaître une forte densité de particules animées en moyenne de faibles vitesses par rapport à la vitesse d'éjection des particules métalliques. Ces particules ont été identifiées et caractérisées lors de l'analyse granulométrique. Mais sur certaines images, malgré la présence du filtre passe bande, nous observons des traînées blanches liées aux passages des particules incandescentes pendant le temps de pause de la caméra. La première hypothèse est que l'atténuation de notre filtre est insuffisante. Par ailleurs, nous avons vérifié que les particules ne pouvaient avoir une température correspondant une émission significative d'énergie pour la longueur d'onde de 532 nm, étant donné que cette longueur d'onde correspond à une température supérieure à 5000 K.



Figure 7- Image 1 d'une visualisation avec laser et filtre 532 nm      Figure 8- Image 2 d'une visualisation avec laser et filtre 532 nm

Sur la Figure 9 est présenté un champ de vitesses instantané obtenu après une inter-corrélation (fenêtre 32x32) sur d'autres essais réalisés à proximité de la gerbe d'étincelles, à 1 m de la disceuse, avec la caméra équipée d'un filtre à 532 nm.

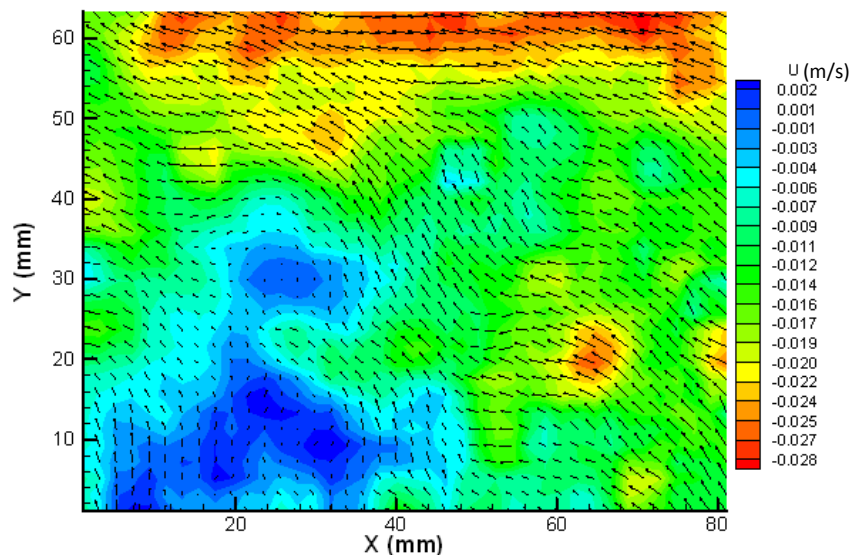


Figure 9- Champ de vitesses avec un contour de la vitesse axiale sous la gerbe d'étincelles

Les premiers résultats mettent en évidence la décélération des particules fines non incandescentes entre 1 m et 1,5 m de la source, résultat attendu compte tenu de l'absence de ventilation.

Pour les particules incandescentes, nous utiliserons une méthode basée sur le suivi de particules. En effet, sur les images, les particules laissent des traînées blanches qui nous permettent, connaissant le temps d'intégration de l'image, de remonter à leurs vitesses. Une prise de vue effectuée à l'aide d'une caméra NeoSense (DANTEC) est présentée sur la Figure 10.

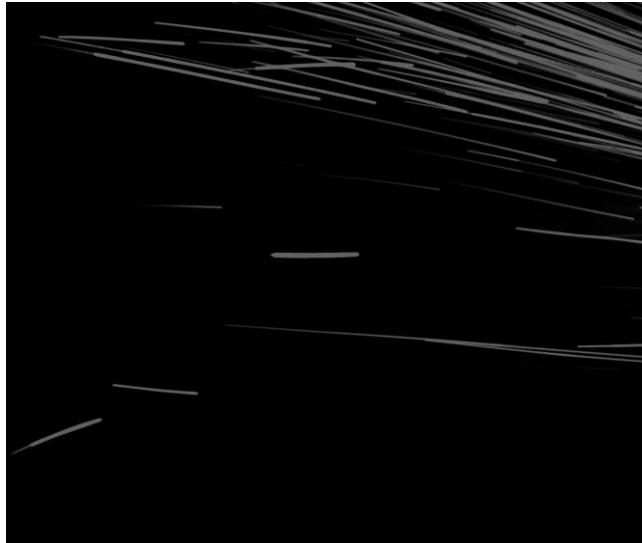


Figure 10- Image obtenue à l'aide d'une caméra NeoSense sur des particules incandescentes

## 5 Conclusion

Les résultats issus de cette étude de faisabilité ont permis de définir une stratégie pour caractériser l'ensemble des populations de particules générées lors de la découpe. La diversité des particules rend leur caractérisation délicate :

- la vitesse des fines particules issues de la dégradation du disque est déterminée à l'aide de la technique PIV, en appliquant un traitement des images par inter-corrélation. Pour atténuer le signal émis par les particules incandescentes, un filtre centré sur la longueur d'onde du laser (532 nm) est utilisé ;
- la vitesse des particules incandescentes est déterminée par une technique de suivi de particules ;
- la granulométrie des particules est obtenue via un APS, granulomètre mesurant le diamètre aérodynamique des particules indistinctement de leur nature (masse volumique, indice de réfraction, morphologie).

Les données relatives à la granulométrie et à la vitesse des particules vont notamment permettre de dimensionner et d'optimiser le système optique utilisé pour mesurer la température des particules, grandeur qui reste compliquée à déterminer précisément en raison de la variation d'émissivité des particules.

Les essais préliminaires présentés dans cet article ont été réalisés sur un dispositif expérimental provisoire dont la configuration reste éloignée de celle du dispositif final en cours de développement. Toutefois, cette étude représente une étape indispensable pour identifier les difficultés expérimentales afin d'adapter et d'implanter les moyens métrologiques sur un banc d'essais qui permettra conjointement de caractériser les particules incandescentes émises et d'évaluer la dégradation induite par ces dernières du système de filtration.

## Références

- [1] S. ARTOUS, O. NORVEZ, AL. TEPPE, Etude de l'impact d'étincelles produites par une disquette sur l'efficacité de filtres THE, Rapport d'étude IRSN/DSU/SERAC/LECEV/11-32, 2011.
- [2] P.A. BARON, K. WILLEKE, Aerosol measurement, principles, techniques and applications, Second Editions (2005).
- [3] Z.M. ZAHANG, B.K. TSAI, G. MACHIN, "Radiometric temperature measurements-I. Fundamentals", Vol 42, Experimental methods in the physical sciences.
- [4] Z.M. ZAHANG, B.K. TSAI, G. MACHIN, "Radiometric temperature measurements-II. Applications", Vol 43, Experimental methods in the physical sciences.