



**HAL**  
open science

# Caractérisation et impact des particules incandescentes dans les réseaux de ventilation lors d'opérations de démantèlement

Pierre Marchal

► **To cite this version:**

Pierre Marchal. Caractérisation et impact des particules incandescentes dans les réseaux de ventilation lors d'opérations de démantèlement. Physique [physics]. INSA de Rouen, 2014. Français. NNT : 2014ISAM0021 . tel-01158460

**HAL Id: tel-01158460**

**<https://theses.hal.science/tel-01158460>**

Submitted on 1 Jun 2015

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



*Faire avancer la sûreté nucléaire*

# Caractérisation et impact des particules incandescentes dans les réseaux de ventilation lors d'opérations de démantèlement

Pierre MARCHAL  
Novembre 2014  
ISRN/IRSN/2014-173

Laboratoire d'expérimentations en confinement, épuration et  
ventilation





**Thèse**



Présentée à l'Institut National des Sciences & Techniques Nucléaires en vue de l'obtention du titre  
de

## Docteur de l'Institut National des Sciences Appliquées de Rouen

Discipline : Physique

Spécialité : Energétique

Par

Pierre MARCHAL

### Caractérisation et impact des particules incandescentes dans les réseaux de ventilation lors d'opérations de démantèlement

Soutenue publiquement le 26 novembre 2014 devant le jury composé de :

D. BOULAUD	Directeur adjoint du Pôle Radioprotection – Environnement à l'IRSN	Rapporteur
J. VAN BEECK	Professeur à l'institut Von Karman	Rapporteur
Y. GONTHIER	Professeur et Directeur adjoint de Polytech'Annecy-Chambéry	Président du jury / Examineur
F. GRISCH	Professeur, CNRS-CORIA, Rouen	Examineur
G. GREHAN	Directeur de recherche, CNRS-CORIA, Rouen	Directeur de thèse
E. PORCHERON	Ingénieur de Recherche, IRSN, Saclay	Encadrant
L. LAFANECHERE	Ingénieur, EDF, Lyon	Invité



# Remerciements

Je remercie Emmanuel PORCHERON qui a été un très bon encadrant, il a fait preuve de beaucoup de disponibilité, de patience et d'encouragement durant ces trois années. Il a montré également beaucoup de persévérance, ce qui a permis de faire signer mon contrat de thèse avant ma soutenance.

Je remercie mon directeur de thèse, Gérard GREHAN dont les conseils m'ont été forts utiles.

Je remercie Luc LAFANECHERE et Jonathan WALTER d'EDF CIDEN avec qui j'ai eu de bonnes relations de travail et qui a permis, je l'espère, de poser les bases d'une longue coopération entre le CIDEN et le SCA.

Je tiens à remercier les membres de mon jury de thèse. Tout d'abord mes rapporteurs, Denis BOULAUD et Jeroen VAN BEECK ainsi que mes examinateurs, Yves GONTHIER et Frédéric GRISCH.

Je remercie toute l'équipe de l'installation TOSQAN avec qui j'ai partagé les bureaux, les soucis informatique de word et la machine à café que je n'ai pas utilisée ; Emmanuel PORCHERON, Pascal LEMAITRE, Amandine NUBOER, Arnaud QUEREL, Constantin LEDIER, Anouar EN-NOUAGOU, Mamadou SOW.

Je remercie toute l'équipe de l'installation STARMANIA, Sébastien ARTOUS, Olivier NORVEZ, Anne-Laure TEPPE, Thibaut LELANDAIS, Maud GUILLEMAN, Audrey ROQUET, Mathieu BARRAULT, Nadia LIATIMI, Philippe NERISSON, Thomas CHOCHON, avec qui j'ai eu beaucoup d'interactions et d'aide.

Je remercie tout spécialement Olivier NORVEZ, dont les hautes compétences multiples ont permis le montage et la construction de l'installation CAPIMIF.

Je remercie tous les autres thésards et doctorants qui ont partagé ces trois années de labeur, les soucis de manip, la rédaction du mémoire et les journées des thèses; Simon DELCOUR, Soleiman BOURROUS, Zakaria MANA, Antony RONDEAU, Jonathan ALENGRY, et Edouard BRUGIERE. Une admiration profonde pour mon ami Soleiman dont les idées mériteraient d'être écoutées dans les plus hautes sphères de l'état. Je ne compte pas les heures que nous avons passé à refaire le monde et à nous indigner. Il m'a ouvert les yeux sur bon nombres de sujets et je lui souhaite la plus grande réussite dans ses projets.

Je remercie Monsieur Florent DANY, compagnon de football et intendant du 383 qui m'a initié à Alizé et donner de nombreux coups de mains.

Je remercie tous les membres du LECEV avec qui j'ai eu le plaisir de discuter et de partager des réunions de laboratoire passionnantes ; Laurent BOUILLOUX, Corinne PREVOST et Victor MOCHO.

Je remercie les membres du LEMAC, Laurent RICCIARDI et Thomas GELAIN, qui ont passé du temps pour me présenter les simulations de SYLVIA et d'ANSYS. Sans oublier Jérôme Richard dont l'organisation de tournoi pour la coupe du monde de football n'a plus de secret (COMORG avec Philippe NERISSON).

Je remercie les membres du LPMA, Jean-christophe SABROUX (un homme remarquable), Sylvain BONDIGUEL, Benoît MARCILLAUD, Céline MONSANGLANT-LOUVET, François SALM, Audrey ROYNETTE, Grégoire DOUGNIAUX, Nathalie MICHIELSEN dont l'état d'esprit et la joie de vivre sont légendaires.

Je remercie le chef du SCA, Jean-Claude Laborde, dont la voie puissante, accentué du sud-ouest, parlant franchement était plaisante. De plus, je garde un très bon souvenir d'une partie de pétanque mémorable lors des journées des thèses sur la presqu'île de Giens où les thésards (Zakaria, Jonathan et moi-même) ont battu largement l'équipe du SCA (Laurent R., Thomas G. et JCL).

Une pensée pour tous les stagiaires passés dans nos locaux, Isabelle FREIN, Cécilie MERCIER, Anne Sophie MOURY, Albin GASPARETTO, Guillaume BOURGEOIS, Delphine TAILLEUR, Johanna SCHEER, Nicolas Florian PREVOST, Antony RONDEAU et surtout Claire PILOT, ma stagiaire qui a travaillé sur le pyromètre et qui deviendra, je l'espère, une bonne ingénieure.

Je remercie également les femmes de l'ombre qui ont géré toutes la partie administrative, Geneviève GOMES, Catherine DRUGEAU pour l'IRSN et Rachel Maeght, Valérie Thieury pour l'INSA de Rouen, sans quoi rien n'aurait été possible.

Je remercie Emmanuel dans la proposition et le choix de conférence qui m'ont permis d'aller à Chengdu, Chine - à Prague, République Tchèque et à Karlsruhe, Allemagne.

Je remercie les membres du CE de l'IRSN qui m'ont permis de profiter de voyages magnifiques en Afrique du Sud, à Séville, en Corse et de découvrir la Thalasso thérapie à Pornichet.

Merci à mes parents et Philou d'être venu spécialement de Toulon et mon frère Pascal pour avoir assisté à ma soutenance.

Enfin merci à Charlotte d'avoir été à mes côtés pendant ces trois ans.

# Sommaire

<b>THÈSE</b> .....	<b>1</b>
<b>INTRODUCTION</b> .....	<b>19</b>
<b>CHAPITRE 1 BIBLIOGRAPHIE</b> .....	<b>23</b>
1.1.    PRODUCTION DE PARTICULES DANS LES CHANTIERS DE DEMANTELEMENT .....	23
1.1.1. <i>Confinement</i> .....	23
1.1.2. <i>Dispositifs utilisés pour la découpe des métaux</i> .....	25
1.1.3. <i>Phénoménologie de la découpe de métal par une disqueuse</i> .....	27
1.2.    EVOLUTION DES CARACTERISTIQUES DES PARTICULES PENDANT LEUR TRANSPORT .....	31
1.2.1. <i>Transport</i> .....	31
1.2.2. <i>Transfert de chaleur</i> .....	34
1.2.3. <i>Impact pariétal des particules</i> .....	40
1.3.    FILTRATION DE PARTICULES SOLIDES .....	43
1.3.1. <i>Etude du médium filtrant</i> .....	43
1.3.2. <i>Efficacité du médium filtrant</i> .....	44
1.3.3. <i>Perte de charge du médium</i> .....	46
1.3.4. <i>Risque lié à l'impact de particules portées à hautes températures</i> .....	49
1.4.    CONCLUSIONS .....	50
<b>CHAPITRE 2 DISPOSITIF EXPERIMENTAL</b> .....	<b>51</b>
2.1.    CAPIMIF .....	51
2.1.1. <i>Génération de particules incandescentes</i> .....	51
2.1.2. <i>SAS de confinement</i> .....	54
2.1.3. <i>Systèmes de ventilation de CAPIMIF</i> .....	55
2.2.    INSTRUMENTATION.....	58
2.2.1. <i>Capteurs et acquisition</i> .....	58
2.2.2. <i>Mesure du coefficient d'épuration du filtre TEST</i> .....	59
2.2.3. <i>Mesure de vitesse des particules</i> .....	61
2.2.4. <i>Mesure de la granulométrie des particules</i> .....	65
2.3.    CONCLUSIONS .....	69
<b>CHAPITRE 3 DEVELOPPEMENT ET QUALIFICATION DE LA MESURE EN VOL DE LA TEMPERATURE DE PARTICULES METALLIQUES</b> .....	<b>71</b>
3.1.    PRINCIPE DE LA MESURE DE LUMINANCE .....	71
3.2.    REVUE DES MOYENS DE DIAGNOSTICS .....	75
3.2.1. <i>Pyromètres</i> .....	75
3.2.2. <i>Caméras thermiques</i> .....	76

3.2.3.	<i>Systèmes intégrés</i> .....	76
3.3.	SPECIFICATIONS REQUISES VIS-A-VIS DES CONDITIONS EXPERIMENTALES DE NOTRE ETUDE .....	77
3.4.	ETUDE ET DEVELOPPEMENT DE LA TECHNIQUE PYROMETRIQUE POUR LA MESURE DE TEMPERATURE DE PARTICULES .....	79
3.4.1.	<i>Principe de fonctionnement du pyromètre</i> .....	80
3.4.2.	<i>Validation des spécifications du pyromètre</i> .....	80
3.4.3.	<i>Qualification du pyromètre pour la mesure de la température de particule en vol</i> .....	82
3.4.4.	<i>Etude de l'émissivité</i> .....	86
3.4.5.	<i>Nouvelle loi d'inversion</i> .....	88
3.4.6.	<i>Qualification de la loi d'inversion</i> .....	89
3.5.	CONCLUSIONS .....	92
<b>CHAPITRE 4 DEVENIR DES PARTICULES DE LA SOURCE AU DEPOT .....</b>		<b>93</b>
4.1.	SIMULATIONS NUMERIQUES PAR CFD DE L'EVOLUTION DES CARACTERISTIQUES DES PARTICULES DANS UN CONDUIT DE VENTILATION 93	
4.1.1.	<i>Conditions initiales des simulations</i> .....	93
4.1.2.	<i>Résultats et analyses des simulations</i> .....	96
4.2.	PROTOCOLE EXPERIMENTAL .....	98
4.2.1.	<i>Généralités</i> .....	98
4.2.2.	<i>Grille d'essais</i> .....	99
4.2.3.	<i>Reproductibilité</i> .....	100
4.3.	ANALYSE DE LA PRODUCTION DE PARTICULES EN LIEN AVEC LA PHENOMENOLOGIE DE LA DECOUPE .....	102
4.3.1.	<i>Caractéristique des particules près du point d'émission</i> .....	102
4.3.2.	<i>Evolution temporelle des caractéristiques des particules au cours d'une découpe</i> .....	111
4.4.	ETUDE DE L'EVOLUTION DES CARACTERISTIQUES DES PARTICULES .....	113
4.4.1.	<i>Etude du transport des particules dans le conduit de ventilation</i> .....	114
4.4.2.	<i>Energie cinétique des particules incandescentes</i> .....	114
4.4.3.	<i>Energie thermique des particules</i> .....	116
4.4.4.	<i>Conclusion</i> .....	117
4.5.	EFFET DE SENSIBILITE DES PARAMETRES INFLUENÇANT LA GENERATION DES PARTICULES .....	118
4.5.1.	<i>Métal et conditions de coupe</i> .....	118
4.5.2.	<i>Effet de la vitesse débitante</i> .....	121
4.6.	CONCLUSIONS .....	123
<b>CHAPITRE 5 EFFET DE L'IMPACT DES PARTICULES SUR UN MEDIUM FILTRANT .....</b>		<b>125</b>
5.1.	APPROCHE GLOBALE .....	125
5.2.	APPROCHE LOCALE .....	128
5.2.1.	<i>Caractérisation du médium</i> .....	128
5.2.2.	<i>Caractérisation de l'impact des particules sur le médium</i> .....	130
5.2.3.	<i>Effet mécanique</i> .....	136

5.2.4.	<i>Effet thermique</i> .....	137
5.2.5.	<i>Couplage entre effets thermique et mécanique</i> .....	138
5.3.	CORRELATION PARTICULES/DEGRADATION.....	142
5.3.1.	<i>Corrélation adimensionnelle</i> .....	143
5.3.2.	<i>Corrélation industrielle</i> .....	144
5.4.	BONNES PRATIQUES.....	147
5.5.	CONCLUSIONS.....	149
<b>CONCLUSIONS &amp; PERSPECTIVES .....</b>		<b>151</b>
<b>RÉFÉRENCES .....</b>		<b>153</b>
<b>ANNEXES .....</b>		<b>159</b>
ANNEXE 1 COMPOSITION DE L'OUTIL ET DES PIÈCES UTILISÉES .....		160
ANNEXE 2 INCERTITUDE DE LA LOI D'INVERSION DU PYROMÈTRE .....		162
ANNEXE 3 ÉTUDE DE SENSIBILITÉ DES PARAMÈTRES POUR LA SIMULATION AVEC LE CODE ANSYS CFX .....		164
ANNEXE 4 SIMULATIONS DES DÉPÔTS DE PARTICULE EN GAINÉ AVEC LE LOGICIEL SYLVIA .....		168
ANNEXE 5 SIMULATIONS CFD DE L'INFLUENCE DE LA VITESSE INITIALE D'ÉMISSION ET DE LA VITESSE DÉBITANTE SUR LES CARACTÉRISTIQUES DES PARTICULES .....		170
ANNEXE 6 RÉPARTITION SPATIALE DES PARTICULES.....		173
ANNEXE 7 ANALYSE DES FILTRES UTILISÉS POUR LA DISTRIBUTION GRANULOMÉTRIQUE.....		174
ANNEXE 8 RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX CONCERNANT L'ÉVOLUTION DE LA VITESSE DES PARTICULES INCANDESCENTES EN FONCTION DU DÉBIT D'EXTRACTION .....		176
ANNEXE 9 VISUALISATIONS AU MEB DE MÉDIAS DÉGRADÉS.....		177
ANNEXE 10 ÉTALONNAGE DU DISPOSITIF DE DÉGRADATION À EFFETS MÉCANIQUE ET THERMIQUE .....		179

## *Liste des tableaux*

TABLEAU 1 - CLASSE DE CONFINEMENT EN FONCTION DE LA LDCA SELON LA NORME ISO 17873 .....	24
TABLEAU 2 - DIFFERENTES CLASSES DE CONFINEMENT SELON LA NORME ISO 17873 .....	24
TABLEAU 3 - DISPOSITIFS DE FILTRATION A METTRE EN ŒUVRE SELON LE TYPE DE VENTILATION .....	24
TABLEAU 4 - COMPARAISON DES OUTILS DE DECOUPE SELON DIFFERENTS CRITERES (PILOT, G., BERNARD, J., 1995) .....	26
TABLEAU 5 - VALEUR DU COEFFICIENT DE TRAINEE ( $C_D$ ) EN FONCTION DU NOMBRE DE REYNOLDS DE LA PARTICULE ( $Re_p$ ) SELON HINDS (1999) ET BARON (2001) .....	33
TABLEAU 6 - CORRELATIONS DU NOMBRE DE NUSSELT PARTICULAIRE (RENOUX, A., BOULAUD, D., 2003A) .....	36
TABLEAU 7 - EFFET DE L'OXYDATION SUR UNE PARTICULE.....	38
TABLEAU 8 - NORMES UTILISEES DANS LE SECTEUR NUCLEAIRE FRANÇAIS POUR LA MESURE DE L'EFFICACITE DES FILTRES THE (ARTOUS, 2003) .....	44
TABLEAU 9 - INFLUENCE DE DIVERS PARAMETRES INTRINSEQUES A L'AEROSOL, AU FILTRE ET A LA FILTRATION SUR L'EFFICACITE DE COLLECTE PAR DIFFUSION, INTERCEPTION ET IMPACTION INERTIELLE (GOUGEON, 1994).....	45
TABLEAU 10 - CLASSIFICATION DES FILTRES SELON LA NORME EN-1822 .....	46
TABLEAU 11 - COMPOSITION CHIMIQUE DES FIBRES (FRACTION MASSIQUE) (INSERM, 1999).....	49
TABLEAU 12 - CARACTERISTIQUES THERMIQUE DES FIBRES DE VERRE DE TYPE E ET DE LA SILICE (TEXTILES A USAGE TECHNIQUE) .....	49
TABLEAU 13 - POINTS DE FONCTIONNEMENT DE LA DISQUEUSE .....	52
TABLEAU 14 - CARACTERISTIQUES DES FILTRES INDUSTRIELS THE (FILTRE TEST) .....	56
TABLEAU 15 - DETAILS DES CAPTEURS DE L'INSTALLATION CAPIMIF .....	58
TABLEAU 16 - GAMMES SPECTRALES DES DIFFERENTS PYROMETRES .....	75
TABLEAU 17 - CONTRAINTES TECHNIQUES DU CAPTEUR DE FLUX THERMIQUE.....	78
TABLEAU 18 - SPECIFICATIONS CONSTRUCTEUR DES PYROMETRES MONOCHROMATIQUES IP140 .....	78
TABLEAU 19 - MESURE DE LA VITESSE, TAILLE ET TEMPERATURE DES PARTICULES GRACE A LA LOI D'INVERSION INITIALE ET LA NOUVELLE LOI D'INVERSION .....	90
TABLEAU 20 - MODELES ET PARAMETRES RETENUS POUR LA SIMULATION .....	95
TABLEAU 21 - PARAMETRES PRIS EN COMPTE DANS CAPIMIF .....	99
TABLEAU 22 - CARACTERISTIQUES ET TOLERANCES DES PIECES METALLIQUES (20 EPROUVETTES) ET DES OUTILS DE DECOUPE (20 DISQUES) UTILISES POUR CETTE ETUDE .....	100
TABLEAU 23 - MOYENNES ET ECARTS TYPES DES TRAJECTOIRES PAR IMAGE ET VITESSE MOYENNE DES PARTICULES INCANDESCENTES, SUR 10 DECOUPES A 178 CM DE LA GENERATION.....	101
TABLEAU 24 - MOYENNES ET ECARTS TYPES DU NOMBRE ET DE LA TEMPERATURE DES PARTICULES SUR 15 DECOUPES A 185 CM DE L'EMISSION .....	101
TABLEAU 25 - MOYENNES ET ECARTS TYPES DES VALEURS OBTENUES AVEC LE PRELEVEMENT SUR FILTRE SUR 10 DECOUPES A 363 CM DE L'EMISSION .....	101
TABLEAU 26 - EVOLUTION DU NOMBRE DE PARTICULES INCANDESCENTES PAR SECONDES DE DECOUPE EN FONCTION DE LA FORCE D'APPUI A 258 CM DE L'EMISSION .....	119
TABLEAU 27 - EFFET DE LA FORCE D'APPUI ET DU TYPE DE METAL POUR DIFFERENTS CRITERES.....	121

TABLEAU 28 - PARAMETRES DETERMINES EXPERIMENTALEMENT DEFINISSANT LE MEDIUM VIERGE .....	133
TABLEAU 29 - ENERGIES CINETIQUES POUVANT ETRE SIMULEES A L'AIDE DU DISPOSITIF.....	139
TABLEAU 30 - CONSTANTES DE DEGRADATION DE LA CORRELATION EMPIRIQUE .....	143
TABLEAU 31 - DESCRIPTIF DES DIFFERENTS ELEMENTS PRESENTS DANS LE DISQUE .....	160
TABLEAU 32 - COMPOSITION DE L'ACIER DOUX ADX .....	161
TABLEAU 33 - COMPOSITION DE L'ACIER INOXYDABLE AISI 304L.....	161
TABLEAU 34 - VALEURS ET INCERTITUDES DE LA NOUVELLE LOI D'INVERSION.....	162
TABLEAU 35 - ENERGIE CINETIQUE POUVANT ETRE SIMULE A L'AIDE DU RESSORT .....	180

### *Liste des figures*

FIGURE 1 - INB EN COURS DE DEMANTELEMENT (RAPPORT IRSN/DSU N°248) (2011) .....	20
FIGURE 2 - SCHEMA DE PRINCIPE DU PROCESSUS D'ENLEVEMENT DE MATIERE PAR ABRASION (CETIER, 1989).....	27
FIGURE 3 - VISUALISATIONS AU MEB DE COPEAUX DE DECOUPE DE L'ACIER AISI 1065 (MALKIN, 1984) .....	28
FIGURE 4 - REPARTITION DES FLUX DE CHALEUR PENDANT UNE DECOUPE A L'AIDE D'UNE DISQUEUSE (KACZMAREK, J., 2008) .....	28
FIGURE 5 - TEMPERATURE MAXIMALE MESUREE A LA CIRCONFERENCE DES DISQUES ISSUS DE TROIS FABRICANTS (NO 1, NO 2 ET NO 3) POUR TROIS FORCES D'APPUI (62 N, 72 N, 82 N) ET POUR DES TUBES A) DE 12 MM DE DIAMETRE ET B) DE 20 MM DE DIAMETRE (KACZMAREK, 2011) .....	29
FIGURE 6 - TEMPERATURE MAXIMALE RELEVÉE PENDANT LA DECOUPE DE DEUX TUBES DE DIAMETRE 12 MM ET 20 MM POUR UNE FORCE D'APPUI DE 62, 78 ET 88 N (KACZMAREK, 2011) .....	30
FIGURE 7 - NOMBRE DE STOKES EN FONCTION DU DIAMETRE DES PARTICULES .....	32
FIGURE 8 – EVOLUTION DU NOMBRE DE REYNOLDS DE LA PARTICULE EN FONCTION DE LEURS DIAMETRES A DIFFERENTES VITESSES.....	33
FIGURE 9 - EVOLUTION DE LA VITESSE D'UNE PARTICULE POUR DIFFERENTS DIAMETRES, EMIS A UNE VITESSE DE 40 M.S <sup>-1</sup> .....	34
FIGURE 10 - TRAJECTOIRE D'UNE PARTICULE POUR DIFFERENTS DIAMETRES EMISE A UNE VITESSE DE 40 M.S <sup>-1</sup> .....	34
FIGURE 11 - MODES DE TRANSFERT DE CHALEUR D'UNE PARTICULE .....	34
FIGURE 12 - EVOLUTION DE LA TEMPERATURE « MINIMALE » D'UNE PARTICULE DE DIFFERENTS DIAMETRES EN FONCTION DU TEMPS.....	39
FIGURE 13 - EVOLUTION DE LA TEMPERATURE D'UNE PARTICULE DE DIFFERENTS DIAMETRES EMISES A UNE VITESSE DE 40 M.S <sup>-1</sup> (TRAIT PLEIN) ET DE 20 M.S <sup>-1</sup> (TRAIT POINTILLE).....	39
FIGURE 14 - VITESSE LIMITE DE REBOND DES PARTICULES EN FONCTION DE LEUR DIAMETRE POUR DIFFERENTS COEFFICIENTS DE RESTITUTION ..	41
FIGURE 15 - INTERACTIONS POSSIBLES ENTRE UNE PARTICULE LIQUIDE ET UN SUBSTRAT (FUKANUMA, H., OHMORI, A., 1994) .....	41
FIGURE 16 - CONCEPTION D'UN FILTRE PLISSE (JOUBERT, 2009) .....	43
FIGURE 17 - SCHEMA DE PLISSAGE D'UN FILTRE PLISSE A PETITS PLIS - HA REPRESENTE LA HAUTEUR ET P LE PAS DES PLIS (DEL FABBRO, 2001) .....	43
FIGURE 18 - EVOLUTION DE LA PERTE DE CHARGE D'UN FILTRE PLISSE (DEL FABBRO, 2001) .....	47
FIGURE 19 - EVOLUTION DE LA PERTE DE CHARGE ET DE LA PERMEANCE D'UN FILTRE THE PLAN DURANT SON COLMATAGE PAR UN AEROSOL SOLIDE (PENICOT-BAUGE, 1998) .....	47
FIGURE 20 - PERMEANCE D'UN AEROSOL DE CUIVRE GLOBALEMENT NEUTRE DE 6 NM AU TRAVERS D'UN FILTRE A320 EN FONCTION DE LA VITESSE DE FILTRATION (U <sub>f</sub> ) ET DU DIAMETRE DE LA PERFORATION (MOURET, G. ET AL., 2009).....	48

FIGURE 21 - COMPARAISON DE LA PERMEANCE D'UN AEROSOL DE CUIVRE GLOBALEMENT NEUTRE AU TRAVERS DE CHACUN DES TROIS FILTRES TESTES (PERFORATION DE 1,32 MM ET $U_f=15 \text{ cm.s}^{-1}$ ) (MOURET, G. <i>ET AL.</i> , 2009) .....	48
FIGURE 22 - PHOTO DE LA DISQUEUSE VUE D'ARRIERE.....	52
FIGURE 23 - PHOTO DE LA DISQUEUSE VUE DE FACE.....	52
FIGURE 24 - ANGLES DU CONE D'EMISSION ET DISTANCES PARCOURUES PAR LES PARTICULES EMISES SUR LES BORDS DU CONE A LA VERTICALE ET A L'HORIZONTALE EN DEBUT DE DECOUPE JUSQU'A L'IMPACT AVEC LA PAROI DU CONDUIT .....	53
FIGURE 25 - PLAN DU SAS DE L'INSTALLATION CAPIMIF .....	55
FIGURE 26 - VUE DU DESSUS DE L'INSTALLATION CAPIMIF .....	56
FIGURE 27 - VUE DE COTE DE L'INSTALLATION CAPIMIF .....	56
FIGURE 28 - PHOTO ILLUSTRANT UNE CONFIGURATION DE LA CONDUITE DE VENTILATION ET DU FILTRE TEST SUR L'INSTALLATION CAPIMIF ..	57
FIGURE 29 - EVOLUTION DU DEBIT FOURNI PAR LE VENTILATEUR ESSAI EN FONCTION DU REGLAGE DU VARIATEUR, MESUREE PAR LE DEBITMETRE ESSAI ET PAR LA TECHNIQUE DE TRAÇAGE GAZEUX A L'HELIUM .....	59
FIGURE 30 - INTERFACE DE L'ACQUISITION DES CAPTEURS DE L'INSTALLATION CAPIMIF SUR TESTPOINT .....	59
FIGURE 31 - SCHEMA DE L'INSTALLATION ALIZE POUR LA MESURE DU CE DES FILTRES .....	60
FIGURE 32 - EVOLUTION DU CE D'UN FILTRE VIERGE SOUMIS A ONZE TESTS D'EFFICACITE SUCCESSIFS DANS LA BOUCLE ALIZE.....	60
FIGURE 33 - PLAN DE LA VEINE DE MESURE .....	61
FIGURE 34 - CORRESPONDANCE DE LA VALEUR DU PIXEL CENTRAL REPRESENTANT LA PARTICULE SUR LA CAMERA RAPIDE EN FONCTION DE LA TEMPERATURE DE LA PARTICULE .....	62
FIGURE 35 - VISUALISATION DU PROFIL DE VITESSE DU FLUIDE DANS LA VEINE DE MESURE REALISEE PAR PIV.....	64
FIGURE 36 - FRAME 1 ET 2 D'UN COUPLE D'IMAGES PIV ACQUIS DANS LA GERBE D'ETINCELLES.....	65
FIGURE 37 - PHOTO DU DISPOSITIF DE PRELEVEMENT PAR IMPACT A L'AIDE D'UN FILTRE EN FIBRE DE VERRE DE 47 MM DE DIAMETRE PLACE AU CENTRE DE LA VEINE DE MESURE.....	66
FIGURE 38 - PHOTO DU PRELEVEMENT A DOUBLE SUBSTRAT (SCOTCH CARBONE - FILTRE) APRES 3 S DE DECOUPE .....	67
FIGURE 39 - PRINCIPE DE MESURE DU DIAMETRE EQUIVALENT EN SURFACE DU MORPHOLOGI.....	68
FIGURE 40 - REPARTITION GRANULOMETRIQUE EN NOMBRE DE PARTICULES MEASUREES PAR LE MICROSCOPE MORPHOLOGI SUR DEUX TYPES DE SUBSTRAT : SCOTCH CARBONE ET FILTRE EN FIBRE DE VERRE, DONT LA REUNION (MIXTE) PERMET DE DEFINIR LA GRANULOMETRIE DE L'AEROSOL, A 258 CM DE LA GENERATION .....	68
FIGURE 41 - LUMINANCE D'UN CORPS NOIR EN FONCTION DE LA LONGUEUR D'ONDE SELON LA LOI DE PLANCK A DIFFERENTES TEMPERATURES. 72	72
FIGURE 42 - SCHEMA DE PRINCIPE DE LA MESURE DE LUMINANCE .....	72
FIGURE 43 - COEFFICIENT DE TRANSMISSION DE L'ATMOSPHERE EN FONCTION DE LA LONGUEUR D'ONDE ET INDICATION DES ZONES D'ABSORPTION DE CERTAINES MOLECULES DE L'ATMOSPHERE (MEASURE, 1984) .....	73
FIGURE 44 - EVOLUTION DE L'EMISSIVITE D'UN ACIER EN FONCTION DE LA TEMPERATURE A DIFFERENTES LONGUEURS D'ONDES, $A=11 \mu\text{M}$ , $B=5,1 \mu\text{M}$ , $C=1,6 \mu\text{M}$ , $D=1 \mu\text{M}$ (KRUCZECK, T. <i>ET AL.</i> , 2001) .....	74
FIGURE 45 - SCHEMA DESCRIPTIF DU DPV-2000 (MARCHAND, 2010).....	77
FIGURE 46 - COMPARAISON DU CAS STANDARD ET DANS NOTRE CONFIGURATION DE MESURE DU PYROMETRE .....	79
FIGURE 47 - SCHEMA DU DISPOSITIF PERMETTANT LA MESURE DE LA DISTANCE FOCALE ET DES DIMENSIONS DU VOLUME DE MESURE DU PYROMETRE .....	81

FIGURE 48 - VALEUR DU RAPPORT DE LA TEMPERATURE MESUREE PAR LE PYROMETRE SUR LA TEMPERATURE DE LA SOURCE EN FONCTION DE LA DISTANCE PYROMETRE - SOURCE POUR 3 DISTANCES FOCALES .....	81
FIGURE 49 - REPONSE DU PYROMETRE EN DU DEPLACEMENT SUIVANT L'AXE Y .....	82
FIGURE 50 - REPONSE DU PYROMETRE EN FONCTION DES DEPLACEMENTS SUIVANT LES AXES X ET Z.....	82
FIGURE 51 - POSITION DU VOLUME DE MESURE DANS LA CONDUITE DE CAPIMIF .....	82
FIGURE 52 - EVOLUTION DU RAPPORT DE LA TEMPERATURE MESUREE SUR LA TEMPERATURE REELLE DE LA SOURCE EN FONCTION DU COEFFICIENT DE SURFACE .....	83
FIGURE 53 - EVOLUTION DU RAPPORT DE LA TEMPERATURE MESUREE PAR LE PYROMETRE SUR LA TEMPERATURE REELLE DE LA SOURCE EN FONCTION DU TEMPS D'EXPOSITION .....	84
FIGURE 54 - EVOLUTION DE L'EMISSIVITE DES ECHANTILLONS DE DIFFERENTS METAUX EN FONCTION DE LEUR TEMPERATURE SUR UNE BANDE SPECTRALE DE MESURE DE 2 A 2,8 $\mu$ M.....	86
FIGURE 55 - VALEURS DES TEMPERATURES DONNEES PAR LE PYROMETRE EN FONCTION DU REGLAGE DE L'EMISSIVITE DU PYROMETRE POUR TROIS SOURCES T1, T2, T3 DONT LA TEMPERATURE EST MAINTENUE CONSTANTE .....	87
FIGURE 56 - SCHEMA DU DISPOSITIF DE MESURE DE LA VITESSE, TEMPERATURE ET TAILLE DES PARTICULES.....	90
FIGURE 57 - DISTRIBUTION DE LA VITESSE DES PARTICULES INCANDESCENTES AU CENTRE DE LA CONDUITE.....	91
FIGURE 58 - EVOLUTION DES DIAMETRES MOYENS ET VITESSES MOYENNES DES PARTICULES AU CENTRE DE LA CONDUITE AVEC LEURS INCERTITUDES UTILISEES DANS LA LOI D'INVERSION MODIFIEE DU PYROMETRE .....	91
FIGURE 59 - ERREUR RELATIVE DE LA NOUVELLE LOI D'INVERSION EN FONCTION DE LA DISTANCE A L'EMISSION POUR DIFFERENTES TEMPERATURES .....	92
FIGURE 60 - REPRESENTATION DE LA GEOMETRIE UTILISEE POUR LE CALCUL CFD.....	94
FIGURE 61 - MAILLAGE RETENU POUR LE CALCUL DANS LE CODE ANSYS CFX.....	94
FIGURE 62 - VISUALISATION DU CONE D'EMISSION DES PARTICULES ET DU CONE DE CAPTAGE UTILISE DANS LA SIMULATION.....	94
FIGURE 63 - DISTRIBUTION EN TEMPERATURE DES PARTICULES EN FONCTION DE LEUR DIAMETRE A 1, 3 ET 5 M DE L'EMISSION .....	96
FIGURE 64 - EVOLUTION DE LA REPARTITION DE LA VITESSE DES PARTICULES EN FONCTION DE LEUR DIAMETRE A 1, 3 ET 5 M DE LA GENERATION .....	97
FIGURE 65 - DISTANCES DE MESURES EFFECTUEES POUR LES MESURES DE VITESSE, TAILLE ET TEMPERATURE DES PARTICULES, AINSI QUE LES EMPLACEMENTS DES FILTRES POUR LA MESURE DE CE.....	99
FIGURE 66 - REPARTITION EN POURCENTAGE MASSIQUE DES PARTICULES PROVENANT DE LA PIECE ET DE L'OUTIL ET LA PROPORTION DE PARTICULES DEPOSEE ET NON DEPOSEE A PROXIMITE DE LA DISQUEUSE, POUR UNE DECOUPE.....	102
FIGURE 67 - DISTRIBUTION GRANULOMETRIQUE EN POURCENTAGE DES PARTICULES RAMASSEES A PROXIMITE DE LA DISQUEUSE .....	103
FIGURE 68 - DISTRIBUTION GRANULOMETRIQUE DETERMINEE PAR LE MICROSCOPE MORPHOLOGI SUR DES FILTRES PLANS A 46 CM DE L'EMISSION EN AIR LIBRE.....	104
FIGURE 69 - DISTRIBUTION GRANULOMETRIQUE EN NOMBRE DE PARTICULES MESUREE A 1 M EN AVAL DE LA DISQUEUSE.....	105
FIGURE 70 - CHAMP MOYEN DE VITESSES DES PARTICULES NON INCANDESCENTES ACQUIS EN DESSOUS DE LA GERBE D'ETINCELLES.....	106
FIGURE 71 - EVOLUTION DE LA VITESSE PERIPHERIQUE DU DISQUE EN FONCTION DU TEMPS PENDANT UNE DECOUPE.....	107
FIGURE 72 - IMAGE DES PARTICULES INCANDESCENTES EMISES PAR LA DISQUEUSE .....	108
FIGURE 73 - REPARTITION DE LA VITESSE DES PARTICULES INCANDESCENTES EN FONCTION DE LA DISTANCE DU POINT D'EMISSION, PENDANT 1 S DE DECOUPE.....	108

FIGURE 74 - VISUALISATION AU MEB AVEC ANALYSE EDS DE LA COMPOSITION CHIMIQUE DES PARTICULES (BLEU = FER, ROUGE = SILICE ET VERT = ALUMINIUM) .....	109
FIGURE 75 – VISUALISATIONS DES PRELEVEMENTS REALISES A PROXIMITE DE LA DISQUEUSE ; IMAGES A, B, VISUALISATIONS AU MEB, IMAGES C, D, ANALYSES EDS (BLEU = FER, ROSE = CHROME, CYAN = NICKEL, ROUGE = SILICE ET VERT = ALUMINIUM) .....	110
FIGURE 76 - VITESSE MOYENNE DES PARTICULES INCANDESCENTES PAR IMAGE MESUREE A 258 CM DE LA GENERATION .....	112
FIGURE 77 - REPARTITION DU NOMBRE DE PARTICULES EN POURCENTAGE EN FONCTION DE LEUR DIAMETRE A 258 CM DE LA GENERATION A DIFFERENTS TEMPS, ET LE NOMBRE TOTALE DE PARTICULES RELEVÉ SUR CHAQUE PRELEVEMENT .....	112
FIGURE 78 - TEMPERATURE DES PARTICULES MESUREE A 150 ET A 255 CM DE L'ÉMISSION .....	113
FIGURE 79 - DISTRIBUTIONS GRANULOMETRIQUES DES PARTICULES EN NOMBRE MESUREES A DIFFERENTES DISTANCES DE L'ÉMISSION.....	114
FIGURE 80 - DISTRIBUTIONS DE LA VITESSE DES PARTICULES INCANDESCENTES MESUREES A DIFFERENTES DISTANCES DE L'ÉMISSION .....	115
FIGURE 81 - ENERGIE CINÉTIQUE MOYENNE ET MAXIMALE DES PARTICULES ÉVALUÉES A DIFFERENTES DISTANCES DE L'ÉMISSION.....	115
FIGURE 82 - DISTRIBUTIONS DE LA TEMPERATURE DES PARTICULES A DIFFERENTES DISTANCES DE L'ÉMISSION .....	116
FIGURE 83 - ÉNERGIE THERMIQUE MOYENNE ET MAXIMALE A DIFFERENTES DISTANCES DE L'ÉMISSION.....	116
FIGURE 84 - ÉVOLUTION DE LA VITESSE ET DE LA TEMPERATURE MOYENNE DES PARTICULES.....	117
FIGURE 85 - REPARTITION DES PERTES DE MASSE EN POURCENTAGE POUR L'OUTIL ET LA PIÈCE, EN ACIER INOXYDABLE (INOX) ET ACIER DOUX (ADX), AINSI QUE LA FRACTION NON DÉPOSÉE A PROXIMITÉ DE LA DISQUEUSE, POUR DIFFÉRENTES FORCES D'APPUI (62, 78 ET 88 N) .	118
FIGURE 86 - DISTRIBUTIONS DE LA VITESSE DES PARTICULES INCANDESCENTES POUR DE L'ACIER INOXYDABLE (INOX) ET DE L'ACIER DOUX (ADX) A 258 CM DE L'ÉMISSION POUR DIFFÉRENTES FORCES D'APPUI (62, 78 ET 88 N).....	119
FIGURE 87 - DISTRIBUTIONS GRANULOMETRIQUES DES PARTICULES POUR UNE DÉCOUPE D'ACIER INOXYDABLE (INOX) ET D'ACIER DOUX (ADX) A 258 CM DE L'ÉMISSION POUR DIFFÉRENTES FORCES D'APPUI (62, 78, ET 88 N).....	120
FIGURE 88 - DISTRIBUTIONS DE LA TEMPERATURE DES PARTICULES POUR DE L'ACIER INOXYDABLE ET DE L'ACIER DOUX A 185 CM DE L'ÉMISSION POUR DIFFÉRENTES FORCES D'APPUI (62, 78 ET 88 N).....	120
FIGURE 89 - NOMBRE DE PARTICULES INCANDESCENTES EN FONCTION DE LA DISTANCE A L'ÉMISSION CALCULÉ POUR DIFFÉRENTS DÉBITS D'EXTRACTION .....	122
FIGURE 90 - DISTRIBUTIONS DE LA TEMPERATURE DE PARTICULES POUR DIFFÉRENTS DÉBITS D'EXTRACTION A 185 CM DE L'ÉMISSION .....	122
FIGURE 91 - ÉVOLUTION DU CE POUR UNE ET 10 DÉCOUPES EN FONCTION DE LA DISTANCE A L'ÉMISSION.....	125
FIGURE 92 - ÉVOLUTION DE LA PERTE DE CHARGE D'UN FILTRE SOUMIS A 10 DÉCOUPES DE 20 S A L'AIDE D'UNE DISQUEUSE.....	126
FIGURE 93 - ÉVOLUTION DE LA PERTE D'EFFICACITÉ DU FILTRE EN FONCTION DU NOMBRE DE DÉCOUPE POUR DIFFÉRENTES FORCES D'APPUI, POUR DE L'ACIER INOXYDABLE (INOX) ET DE L'ACIER DOUX (ADX), A 298 CM DE L'ÉMISSION .....	127
FIGURE 94 - VISUALISATION AU MEB DES FIBRES D'UN MEDIUM VIERGE .....	129
FIGURE 95 - DISTRIBUTION DE LA TAILLE DES FIBRES D'UN MEDIUM VIERGE .....	129
FIGURE 96 - VUE EN COUPE D'UN FILTRE VIERGE AU MEB PRIS DANS DE LA RESINE PERMETTANT DE DÉTERMINER SON ÉPAISSEUR ET SA COMPACTITÉ.....	130
FIGURE 97 - VISUALISATION AU MEB D'UN MEDIUM IMPACTÉ PAR DES PARTICULES A 60 CM DE L'ÉMISSION .....	131
FIGURE 98 - VISUALISATION AU MEB D'UN FILTRE IMPACTÉ PAR UNE PARTICULE SOLIDE A 60 CM DE L'ÉMISSION (FAMILLE 1) .....	132
FIGURE 99 - VISUALISATION AU MEB D'UN MEDIUM IMPACTÉ PAR UNE PARTICULE LIQUIDE A 60 CM DE L'ÉMISSION (FAMILLE 2).....	132
FIGURE 100 - VUE EN COUPE AU MEB D'UN FILTRE IMPACTÉ PAR UNE PARTICULE.....	133
FIGURE 101 - ÉVOLUTION DU CE, SELON BROWN (1992) EN FONCTION DE L'ÉPAISSEUR DU MEDIUM A COMPACTITÉ CONSTANTE .....	134

FIGURE 102 - VISUALISATION AU MICROSCOPE MORPHOLOGI D'UN MEDIUM PLISSE DEMONTE ET APLANI MONTRANT LA REPARTITION DES IMPACTS.....	135
FIGURE 103 - VISUALISATION AU MEB - EDS DE LA TETE DE PLI D'UN MEDIUM PLISSE VIERGE ; ROUGE = SILICE.....	135
FIGURE 104 - SCHEMA DE L'EXPERIENCE DE DEGRADATION MECANIQUE D'UN MEDIUM FIBREUX.....	136
FIGURE 105 - VISUALISATION AU MEB D'UN FILTRE SOUMIS A UN FAISCEAU LASER .....	137
FIGURE 106 - SCHEMA ET PHOTO DU MONTAGE UTILISE POUR LA SIMULATION DU COUPLAGE DES EFFETS MECANIQUE ET THERMIQUE.....	138
FIGURE 107 - VISUALISATIONS AU MEB DES DEGRADATIONS DU MEDIUM ILLUSTRANT LES 5 ECHELONS DEFINIS POUR EVALUER LA DEGRADATION .....	140
FIGURE 108 - ECHELONS DE DEGRADATION DU MEDIUM EN FONCTION DE L'ENERGIE CINETIQUE D'IMPACT ET LA TEMPERATURE DE CONTACT	141
FIGURE 109 - TEMPERATURE DES PARTICULES A 378 CM DE L'EMISSION .....	142
FIGURE 110 - COMPARAISON DE LA PERTE D'EFFICACITE DU FILTRE ISSUE DES RESULTATS EXPERIMENTAUX ET DE LA CORRELATION EMPIRIQUE	144
FIGURE 111 - EVOLUTION DU $\Delta CE$ EN FONCTION DU TEMPS DE DECOUPE ET DE LA DISTANCE A L'EMISSION POUR UNE DECOUPE D'ACIER INOXYDABLE AVEC UNE FORCE D'APPUI DE 78 N.....	145
FIGURE 112 - DISPOSITIF PARE-ETINCELLES TM CHOC 2EN1 DE LA SOCIETE CAMFIL-FARR .....	146
FIGURE 113 - EVOLUTION DU $\Delta CE$ D'UN FILTRE PROTEGE PAR UN DISPOSITIF PARE-ETINCELLES (TM CHOC 2EN1) EN FONCTION DU TEMPS DE DECOUPE ET DE LA DISTANCE A L'EMISSION, POUR UNE DECOUPE D'ACIER INOXYDABLE AVEC UNE FORCE D'APPUI DE 78 N.....	146
FIGURE 114 - LIMITES D'EFFICACITE D'UN FILTRE THE EN FONCTION DU TEMPS DE DECOUPE, DE LA DISTANCE, DE LA FORCE ET DU TYPE DE METAL .....	149
FIGURE 115 - ELEMENTS CARACTERISTIQUES DU DISQUE .....	160
FIGURE 116 - DIAGRAMME DE PHASE DU COUPLE FER-CARBONE (MENDY, 2008).....	161
FIGURE 117 - POURCENTAGE D'ERREUR DE LA NOUVELLE LOI D'INVERSION EN FONCTION DE LA DISTANCE ET DE LA TEMPERATURE MESUREE PAR LE PYROMETRE.....	163
FIGURE 118 - EVOLUTION DE LA VITESSE DES PARTICULES SELON LES COEFFICIENTS DE RESTITUTION NORMAUX ET TANGENTIELS (COR_N_T) .....	165
FIGURE 119 - REPRESENTATION DE LA GEOMETRIE AVEC LA VEINE DE MESURE SUR CFD .....	166
FIGURE 120 - COMPARAISON DE LA VITESSE ET DE LA TEMPERATURE DES PARTICULES EN FONCTION DE LA PRESENCE DE LA VEINE DE MESURE	166
FIGURE 121 - EVOLUTION DE LA VITESSE DES PARTICULES POUR UN ANGLE D'EMISSION DE 0 ET 25 DEGRES PAR RAPPORT A L'AXE HORIZONTAL .....	167
FIGURE 122 - EVOLUTION DE LA TEMPERATURE DES PARTICULES POUR UN ANGLE D'EMISSION DE 0 ET 25 DEGRES PAR RAPPORT A L'AXE HORIZONTAL .....	167
FIGURE 123 - SCHEMA DU MONTAGE AERAUQUE SUR LE CODE SYLVIA .....	168
FIGURE 124 - EVOLUTION DE LA FRACTION MASSIQUE DEPOSEE SIMULEE AVEC SYLVIA DANS LES CONDUITS DE VENTILATION EN FONCTION DE LA CONFIGURATION .....	169
FIGURE 125 - EFFET DE LA VITESSE INITIALE D'EJECTION SUR LA VITESSE DES PARTICULES DANS LE CONDUIT DE VENTILATION A UNE DISTANCE DE 3 M DE LA SOURCE POUR LES DIFFERENTES CLASSES DE TAILLE .....	170
FIGURE 126 - INFLUENCE DE LA VITESSE INITIALE D'EMISSION SUR LA REPARTITION EN TEMPERATURE DES PARTICULES A 3 M DE L'EMISSION..	171
FIGURE 127 - EFFETS DE LA VITESSE DEBITANTE DANS LE CONDUIT SUR LA REPARTITION DE LA VITESSE DES PARTICULES EN FONCTION DE LEURS DIAMETRES A 3 M DE L'EMISSION .....	171

FIGURE 128 - EVOLUTION DE LA TEMPERATURE DES PARTICULES POUR DIFFERENTS DEBITS D'EXTRACTION A 3 M DE L'EMISSION.....	172
FIGURE 129 - INFLUENCE DE LA TEMPERATURE AVEC ET SANS DEBIT D'EXTRACTION A 3 M DE L'EMISSION.....	172
FIGURE 130 - DECOUPAGE ET REPARTITION SPATIALE DE LA GRANULOMETRIE D'UN FILTRE PLAN PLACE A 46 CM MESUREE PAR LE MICROSCOPE MORPHOLOGI .....	173
FIGURE 131 - VISUALISATION AU MICROSCOPE OPTIQUE MORPHOLOGI D'UN FILTRE DE PRELEVEMENT A 178 CM DE L'EMISSION .....	174
FIGURE 132 - RAPPORT DE LA SURFACE DES PARTICULES AVEC LA LONGUEUR DE LEURS TRAINES A 363 CM DE L'EMISSION.....	175
FIGURE 133 - RAPPORT DU DIAMETRE DES PARTICULES AVEC L'ANGLE DE LEURS TRAINES DANS LE FILTRE A 363 CM DE LA GENERATION .....	175
FIGURE 134 - DISTRIBUTION EN NOMBRE MOYEN PAR DECOUPE DE LA VITESSE DES PARTICULES INCANDESCENTES POUR DIFFERENTS DEBITS A 90 CM DE LA GENERATION .....	176
FIGURE 135 - EVOLUTION DE LA REPARTITION EN VITESSE DES PARTICULES INCANDESCENTES POUR DIFFERENTS DEBITS A 238 CM DE LA GENERATION .....	176
FIGURE 136 - VISUALISATION 1 AU MEB D'UN MEDIUM PLAN IMPACTE PAR DES PARTICULES A 30 CM DE L'EMISSION .....	177
FIGURE 137 - VISUALISATION 1 AU MEB D'UN FILTRE PLAN IMPACTE PAR DES PARTICULES A 30 CM DE L'EMISSION .....	178
FIGURE 138 - VISUALISATION AU MEB D'UN FILTRE IMPACTE PAR DES PARTICULES A 60 CM DE L'EMISSION .....	178
FIGURE 139 - ENERGIE THERMIQUE APPORTEE AU FILTRE PAR L'INTERMEDIAIRE DU THERMOCOUPLE EN FONCTION DE SA TEMPERATURE .....	179
FIGURE 140 - SCHEMA DU DISPOSITIF D'ETALONNAGE DU CAPTEUR PIEZO-ELECTRIQUE .....	180
FIGURE 141 - ETALONNAGE DU CAPTEUR PIEZO-ELECTRIQUE.....	180

## Nomenclature

a	Paramètre du pyromètre (-)	ha	Hauteur des plis du filtre (m)
A	Paramètre du pyromètre (-)	$k_p$	Constante de vitesse de la réaction ( $\text{g}^2 \cdot \text{cm}^{-4} \cdot \text{s}^{-1}$ )
$A_1$	Paramètre modifié du pyromètre (-)	$L_{b,\lambda}$	Luminance spectrale d'un corps noir ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{sr}^{-1}$ )
$A_h$	Constante de Hamaker ( $\text{J} \cdot \text{m}^{-2}$ )	$L_{cb}$	Longueur caractéristique du nombre de Biot (m)
B	Paramètre du pyromètre ( $^{\circ}\text{C}^{-1}$ )	$L_{cn}$	Longueur caractéristique du nombre de Nusselt (m)
Bi	Nombre de Biot (-)	$L_{em}$	Luminance de l'atmosphère ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{sr}^{-1}$ )
C	Paramètre du pyromètre ( $^{\circ}\text{C}$ )	$L_f$	Luminance du fond ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{sr}^{-1}$ )
$C_{1,\lambda}$	Constante de rayonnement ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$ )	$L_p$	Luminance des particules ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{sr}^{-1}$ )
$C_2$	Constante de rayonnement (m.K)	$L_r$	Luminance de l'environnement ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{sr}^{-1}$ )
$C_{amont}$	Concentration en amont du dispositif ( $\text{nb} \cdot \text{m}^{-3}$ )	$L_{\lambda}$	Luminance spectrale d'un corps réel ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{sr}^{-1}$ )
$C_{aval}$	Concentration en aval du dispositif ( $\text{nb} \cdot \text{m}^{-3}$ )	$m_p$	Masse de la particule (kg)
$C_D$	Coefficient de traînée (-)	$M_f$	Masse molaire du fer ( $\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$ )
CE	Coefficient d'Épuration (-)	N	Nombre de particules incandescentes (-)
$C_i$	Concentration de particules ( $\text{nb} \cdot \text{m}^{-3}$ )	Nu	Nombre de Nusselt (-)
$C_p$	Capacité thermique massique de particule ( $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ )	$\rho$	Pas du filtre plissé (m)
$C_{pf}$	Capacité thermique massique du fluide ( $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ )	P	Perméance (-)
d	Distance de mesure (m)	$P_{amont}$	Pression en amont du dispositif (Pa)
$d_{ef}$	Distance de l'émission au filtre (m)	$P_{aval}$	Pression en aval du dispositif (Pa)
$d_c$	Diamètre de la conduite (m)	Pr	Nombre de Prandtl (-)
df	Diamètre des fibres (m)	q	Coefficient d'atténuation des hublots (-)
$d_p$	Diamètre de particule (m)	$Q_m$	Rapport des quantités de mouvement (-)
$D_p$	Diamètre de pores du filtre (m)	r	Rapport des flux convection/rayonnement (-)
$d_{pm}$	Diamètre moyen des particules (m)	R	Signal brut du pyromètre (V ou A)
e	Coefficient de restitution (-)	$Re_p$	Nombre de Reynolds de la particule (-)
E	Rendement d'épuration (-)	S	Distance entre deux pics DPV-2000 (m)
$E_o$	Energie créée lors de la réaction d'oxydation (J)	St	Nombre de Stokes (-)
f	Distance focale du pyromètre (m)	t	Temps (s)
F	Force d'appui de découpe (N)	$t_{exp}$	Temps d'exposition du pyromètre (s)
$F_{VDW}$	Force de Van der Walls (N)	tps	Temps de découpe (s)
g	Constante de gravitation ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ )	T	Température (K)
h	Coefficient de convection ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ )	$T_1$	Température du pyromètre pour $\epsilon$ de 100 % (K)

T <sub>f</sub>	Température du pyromètre (K)	σ	Constante de Stefan Boltzmann (W.m <sup>-2</sup> .K <sup>-4</sup> )
TOF	Temps de vol des particules (s)	τ	Rapport du temps de transit de la particule sur le temps d'exposition du pyromètre (-)
T <sub>i</sub>	Nombre de dégradation (-)		
T <sub>p</sub>	Température de la particule (K)	τ <sub>env</sub>	Coefficient de transmission de l'environnement (-)
T <sub>s</sub>	Température seuil de dégradation (°C)		
U <sub>f</sub>	Vitesse du fluide (m.s <sup>-1</sup> )	ψ	Constante de dégradation (-)
U <sub>p</sub>	Vitesse de la particule (m.s <sup>-1</sup> )	ω	Facteur de recouvrement (-)
V <sub>f</sub>	Vitesse de filtration (m.s <sup>-1</sup> )	Ω	Rapport des surfaces (-)
Vol	Volume (m <sup>3</sup> )		
V <sub>pm</sub>	Vitesse moyenne des particules (m.s <sup>-1</sup> )		
V <sub>r</sub>	Vitesse limite de rebonds (m.s <sup>-1</sup> )		
z	Distance de contact entre solide/substrat (m)		
Z	Epaisseur du médium filtrant (m)		
α	Compacité du médium (-)		
β	Coefficient correcteur de surface (-)		
γ	Coefficient correcteur de temps (-)		
ΔfH°	Enthalpie de formation (kJ.mol <sup>-1</sup> )		
ΔP	Perte de charge du médium (Pa)		
δ	Angle d'émission du cône (°)		
ε	Emissivité (-)		
φ <sub>r</sub>	Flux de chaleur rayonnant (W)		
φ <sub>v</sub>	Flux de chaleur convectif (W)		
η	Efficacité unitaire de collecte (-)		
θ	Coefficient d'atténuation globale (-)		
χ	Constante empirique (-)		
λ	Longueur d'onde (m)		
λ <sub>f</sub>	Conductivité thermique du fluide (W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> )		
λ <sub>p</sub>	Conductivité thermique de la particule (W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> )		
μ <sub>f</sub>	Viscosité dynamique du fluide (Pa.s)		
ξ	Constante empirique (-)		
ϖ	Constante empirique (-)		
ρ <sub>f</sub>	Masse volumique du fluide (kg.m <sup>-3</sup> )		
ρ <sub>p</sub>	Masse volumique des particules (kg.m <sup>-3</sup> )		

# Introduction

Après l'arrêt définitif d'une Installation Nucléaire de Base (INB), l'exploitant est chargé de définir les étapes et le planning du démantèlement. En France, la stratégie de démantèlement adoptée recommande un démarrage des opérations d'assainissement et de déconstruction immédiatement à la suite de la mise à l'arrêt définitif de l'INB. Cette stratégie est privilégiée également en Espagne et en Belgique. Une seconde stratégie mise sur la décroissance des niveaux d'activité des divers isotopes radioactifs pendant une durée de 15 à 20 ans avant de débiter le démantèlement. Ceci permet de faire baisser les niveaux de contamination, ce qui peut faciliter la déconstruction et la gestion des déchets. Les inconvénients de cette seconde approche sont la perte de connaissance de l'historique de l'installation du fait du départ des employés ayant participé à son exploitation et le risque de la dérive des coûts du démantèlement pouvant être induit par le durcissement des réglementations en vigueur. Cette seconde stratégie est privilégiée notamment par le Royaume Uni. En ce qui concerne les Etats-Unis, qui compte 104 réacteurs en exploitation et 28 à l'arrêt, la stratégie y est triple. Le nucléaire civil s'astreint à démanteler selon des stratégies immédiates ou différées, mais les programmes doivent être mis en œuvre sur une période limitée à 60 ans. Tandis que le nucléaire militaire s'autorise dans certains cas, à mettre en œuvre le démantèlement "in situ" ou en "entombment" (mise en tombeau).

Le démantèlement regroupe l'ensemble des opérations techniques qui conduisent une installation nucléaire à un niveau de déclassement choisi. Il se décompose en quatre grandes étapes (LALLEMENT, 2004) :

- L'assainissement : il s'agit d'évacuer le combustible présent dans l'installation et d'enlever l'essentiel de la radioactivité résiduelle contenue dans les installations.
- La déconstruction : les différents éléments vont ensuite être démontés puis découpés afin d'être entreposés dans des colis de déchet standardisés appropriés à leurs niveaux d'activité.
- L'évacuation de tous les déchets vers un site de stockage spécifique.
- La réhabilitation du site (retour à l'herbe).

De nombreux laboratoires, usines et réacteurs sont en cours de démantèlement, par différents exploitants, comme l'illustre la Figure 1.

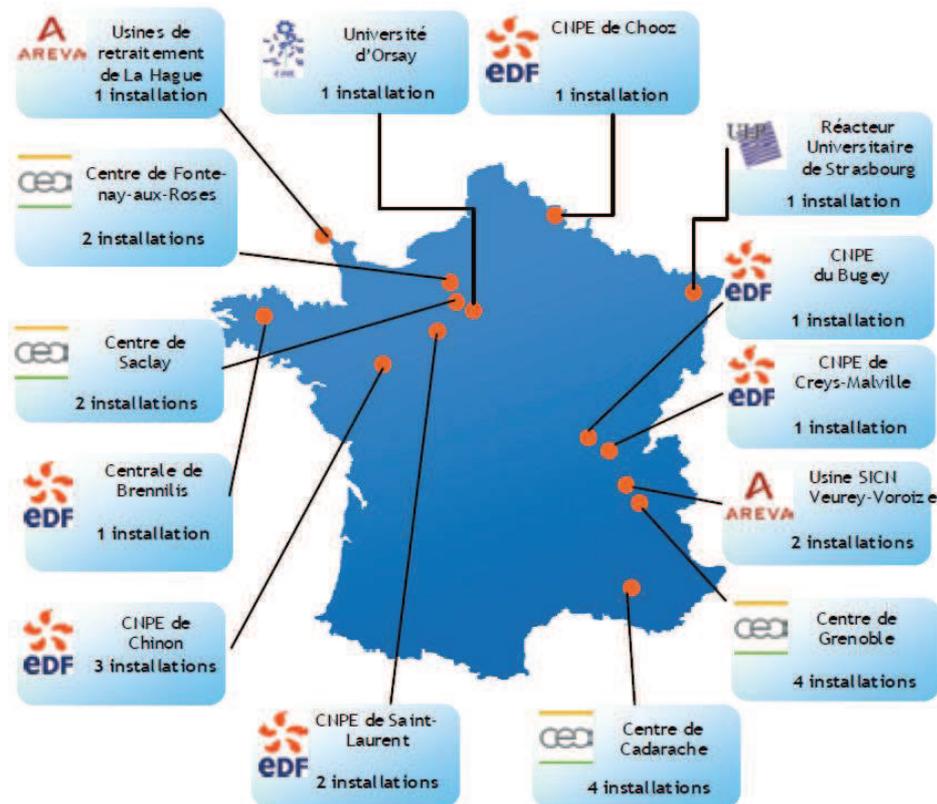


Figure 1 - INB en cours de démantèlement (Rapport IRSN/DSU n°248) (2011)

La multiplication des chantiers de démantèlement génère un accroissement des risques pouvant mettre en cause la sûreté qu'il est important de maîtriser.

Lors de la phase de déconstruction, différents moyens de découpe des structures métalliques ou tuyauterie sont utilisés. Pour les éléments les plus contaminés, des moyens de découpe pilotés à distance sont employés et les techniques limitant l'aérodispersion de particules sont alors privilégiées, telle que la découpe laser sous eau. Cette technique dont la mise en œuvre est lourde et coûteuse est réservée aux éléments les plus contaminés comme par exemple la cuve du réacteur. Pour le reste, les pièces à découper sont confinées localement grâce à la mise en place d'un sas de démantèlement.

Le sas est mis en dépression à l'aide d'un circuit de ventilation composé d'un ventilateur et d'un caisson de filtration. Afin de limiter la contamination du sas, une aspiration au plus proche de la découpe est souvent réalisée.

La découpe de métaux est réalisée au moyen de différents outils, qui sont généralement dits à chaud lorsqu'il y a production de particules portées à haute température que l'on peut qualifier dans certaines conditions de particules incandescentes. En effet, lorsque la température des particules est suffisamment élevée pour émettre spontanément un rayonnement continu dans le spectre visible, on parle d'étincelles ou de particules incandescentes. La température à laquelle débute l'incandescence dépend des propriétés physico-chimiques du matériau constituant la particule.

L'interaction entre les particules portées à hautes températures et les systèmes de filtration peut conduire à un risque incendie. En effet, selon la base de données Sapide LUDD de l'Institut de Radioprotection et de Sécurité Nucléaire (IRSN), qui recense tous les incidents déclarés dans les INB, des cas de départ de feu ont été signalés dans des chantiers de démantèlement suite à l'utilisation de moyens de découpe à chaud. Citons à titre d'exemple l'incident du 23 novembre 2009 sur le site de la Hague, où le détecteur d'incendie d'une gaine contenant des câbles électriques a signalé un dégagement de fumée dans le local contigu. Le filtre présent dans ce local a été identifié comme étant le foyer probable. L'analyse de cet incident met en lumière que l'aspiration de particules incandescentes par le système d'extraction du sas, où sont réalisées des opérations de tronçonnage de métal, est responsable du départ de feu dans le caisson de filtration, et ce, malgré la présence d'un dispositif pare-étincelles mis en place pour protéger le filtre.

A la suite de ces incidents, l'Autorité de Sécurité Nucléaire (ASN) a rédigé une note, demandant aux exploitants de mettre en place des systèmes de protection vis-à-vis des particules incandescentes dont l'efficacité est avérée. Pour investiguer cette problématique, l'IRSN a lancé un programme de recherche afin de pouvoir statuer sur l'efficacité des dispositifs de protection des filtres vis-à-vis des particules incandescentes, et d'investiguer les autres risques potentiels résultant de l'agression des systèmes de filtration. En effet, si le phénomène de combustion qui a été observé entraîne la perte totale d'intégrité du confinement, un risque lié à la perte d'efficacité des filtres pouvant entraîner un rejet de particules contaminées est aussi à considérer. Ainsi, les particules portées à haute température peuvent endommager le filtre et dégrader son efficacité sans que cela ne puisse être mis en évidence par les mesures de pertes de charge réalisées sur les installations. La phénoménologie de l'interaction de particules générées lors d'opérations de découpe de métaux avec un système de filtration représente donc un enjeu important pour comprendre et mieux évaluer le risque de perte de confinement d'une installation en cours de démantèlement.

Les objectifs de cette étude sont tout d'abord d'identifier et de caractériser la production particulaire émise à la source lors d'opérations de découpe de différents métaux. Puis, l'étude porte sur le devenir de ces particules au cours de leur transport dans un conduit de ventilation jusqu'au système de filtration. Enfin, l'interaction entre les particules et le filtre est analysée afin de déterminer les phénomènes mis en jeu dans la dégradation du médium filtrant, et d'identifier les caractéristiques des particules responsables de cette dégradation tout en quantifiant la perte d'efficacité du filtre.

Ce manuscrit est divisé en 5 chapitres. Le premier rassemble l'état des connaissances actuelles concernant les opérations de démantèlement et les particules émises par différents outils de découpe. Le devenir de ces particules dans les réseaux de ventilation est également étudié à partir des mécanismes de transport et d'échanges d'énergie. Les propriétés du médium filtrant, première barrière de confinement,

sont également présentées. Le second chapitre présente l'installation expérimentale CAPIMIF (« Caractérisation des Particules Incandescentes et Mesure de l'Impact sur Filtre ») développée dans le cadre de cette étude. CAPIMIF reproduit des conditions représentatives de situations réelles de démantèlement et intègre une instrumentation permettant de caractériser les particules en vol. Le troisième chapitre présente les développements spécifiques entrepris pour mesurer en vol la température des particules par une technique pyrométrique qui a été améliorée afin d'étendre son domaine d'application à nos conditions expérimentales. Le quatrième chapitre présente l'analyse des résultats obtenus sur la caractérisation des particules. Dans un premier temps, les particules sont caractérisées proche de la source. Dans un second temps, les résultats concernant les particules en vol sont présentés en fonction de la distance à leur émission. Le cinquième et dernier chapitre s'intéresse plus particulièrement aux conséquences de l'impact de particules sur le médium filtrant. Deux approches sont présentées : L'une globale permettant de quantifier l'endommagement du filtre par la mesure de son coefficient d'épuration, et une seconde locale, s'intéressant à comprendre les mécanismes mis en jeu dans l'endommagement du filtre.

# Chapitre 1

## Bibliographie

Ce chapitre présente tout d'abord les configurations mises en œuvre durant les opérations de démantèlement en termes de confinement et de ventilation. Ensuite, les différents outils de découpe sont abordés et une attention particulière est portée aux caractéristiques des particules produites lors d'une opération de découpe de métaux par une disceuse. Le devenir de ces particules dans les réseaux de ventilation est également étudié en considérant les mécanismes de transport et d'échanges d'énergie. Enfin, les propriétés des systèmes de filtration sont présentées.

### 1.1. Production de particules dans les chantiers de démantèlement

#### 1.1.1. Confinement

Bien que les opérations de démantèlement soient encadrées par un contexte réglementaire qui est celui de la loi TSN du 13/06/2006 (loi relative à la transparence et à la sécurité en matière nucléaire) et de l'arrêté INB du 08/02/12, aucun texte à caractère normatif n'encadre la mise en œuvre du confinement des chantiers de déconstruction. Les différents exploitants s'appuient donc sur des guides de ventilation, telle que la norme ventilation nucléaire ISO 17873 mais qui a été écrite pour des installations neuves et n'est pas adaptée aux confinements de chantiers, les guides CETREVE (INSTN, 1987), et leurs propres retours d'expérience.

Avant tout début de chantier de déconstruction, l'exploitant fait une déclaration préalable auprès de l'ASN en déterminant le niveau de contamination attendu, en respectant la Limite Dérivée de Concentration dans l'Air (LDCA), concernant les particules de 1 et 5  $\mu\text{m}$  et en considérant différents radionucléides. Il s'agit d'une démarche prédictive à la conception et qui doit être faite dans le cas d'un fonctionnement normal et d'un fonctionnement accidentel potentiel. Suivant le niveau de contamination, une classe spécifique de confinement doit-être appliquée (Tableau 1).

**Tableau 1 - Classe de confinement en fonction de la LDCA selon la norme ISO 17873**

Contamination permanente normale (Nb LDCA équivalente)	Contamination accidentelle potentielle (Nb LDCA équivalente)	Classe de confinement	Type de ventilation
0 - < 0,1	< 1	C1	I
< 1	< 80	C2	II A
< 1	< 4000	C3	II B
< 80	< 4000	C4	III A
< 4000	> 4000	C4	III B
> 4000	>> 4000	C4	IV

Les 4 classes de confinement explicitées selon la norme ISO 17873 sont explicitées dans le Tableau 2 et les différents types de système de filtration des réseaux de ventilation sont présentés dans le Tableau 3.

**Tableau 2 - Différentes classes de confinement selon la norme ISO 17873**

Classe	Contamination normale et/ou occasionnelle attendue
C1	<u>Zone propre</u> exempte, en condition normale de fonctionnement, de toute contamination radioactive, surfacique ou atmosphérique. Seul un faible niveau de contamination est accepté dans des circonstances exceptionnelles.
C2	<u>Zone habituellement propre en fonctionnement normal</u> . Dans des circonstances exceptionnelles uniquement, résultant d'un incident ou d'un accident, un niveau modéré de contamination surfacique ou atmosphérique est acceptable ; des dispositions appropriées doivent être prises pour en assurer la surveillance.
C3	Zone où une certaine contamination surfacique peut être présente mais normalement exempte de toute contamination atmosphérique. Dans des situations particulières, consécutives à des incidents ou accidents, des risques potentiels de contamination à des niveaux supérieurs à ceux des zones C2 peuvent survenir ; des dispositions adaptées doivent être prises pour en assurer la surveillance.
C4	Zone où les niveaux de contamination permanente et occasionnelle sont tels que <u>l'accès est normalement interdit au personnel</u> , sauf avec des équipements de protection appropriés.

**Tableau 3 - Dispositifs de filtration à mettre en œuvre selon le type de ventilation**

Type de ventilation	Nombre d'étages de filtration sur l'extraction
I	Pas de filtration
II A	Un étage de filtration avant rejet cheminée
II B	Deux étages de filtration avant cheminée
III A	Un filtre au près du local + un filtre avant rejet cheminée
III B	Un filtre blindé au plus près du local + un filtre avant rejet cheminée
IV	Un filtre blindé + un filtre non blindé au plus près du local + un filtre avant rejet cheminée

Il existe deux types de confinement, le confinement statique et le confinement dynamique. Le confinement statique est réalisé par la création de paroi (un sas) et le confinement dynamique par la mise en place de la ventilation. Suivant l'état radiologique des équipements à démanteler, la tenue mécanique à la dépression, la durée du chantier, l'exploitant définit le type de parois du sas de démantèlement. Celles-ci peuvent être souples (en vinyle) ou rigides. Dans le cas du confinement dynamique, il est nécessaire de respecter les critères de dépression et de vitesse d'air à l'aspiration qui conditionne le taux de

renouvellement. Il est recommandé de créer, dans l'enceinte, une dépression comprise entre 20 et 40 Pa avec un taux de renouvellement fixé entre 2 et 10 h<sup>-1</sup> pour des chantiers avec de gros enjeux radiologique. Pour des chantiers plus communs, un sens d'air est généralement suffisant pour un chantier de démantèlement. Pour fixer les ordres de grandeur, la vitesse d'aspiration au niveau d'une ouverture calibrée (conduite de 100 mm de diamètre) doit être au minimum de 1 m.s<sup>-1</sup> (1,5 m.s<sup>-1</sup> en cas de forte contamination).

### **1.1.2. Dispositifs utilisés pour la découpe des métaux**

Les différents outils de découpe sont rangés en deux familles, les découpes thermiques et mécaniques. Une découpe est dite à chaud dès lors qu'il y a production de particules incandescentes.

La méthode thermique est caractérisée par un échauffement localisé du métal jusqu'à sa fusion, vaporisation ou sublimation, suivi par l'éjection du métal liquéfié à l'aide d'un jet de gaz. Il s'agit de la découpe par torche à plasma, par oxycoupage et par laser. La méthode mécanique est caractérisée par un enlèvement de copeaux par arrachement à l'aide d'un outil. Il s'agit essentiellement de la scie alternative et de la tronçonneuse à disque, appelée communément disqueuse.

Pilot (1995) a mené pour l'IRSN une étude comparative des différents outils de découpe afin de déterminer l'outil le plus approprié à utiliser selon différents critères. Les différents outils sont automatisés et placés dans un sas avec une extraction placée en hauteur, perpendiculairement à la direction de la découpe. L'extraction est équipée d'un granulomètre Spectromètre Diffusionnel et Inertiel (SDI) pour mesurer la granulométrie des aérosols entraînés. Un bac de récupération des scories est prévu sous la plaque de découpe et des plaques d'aluminium sont disposées sur les parois et au sol afin de mesurer la fraction massique de particules déposée. Ces essais ont été réalisés sur des plaques d'acier inoxydable 304L et d'acier doux A42 de différentes épaisseurs (5, 10, 20, 30 et 50 mm).

La synthèse des résultats est présentée dans le Tableau 4, pour chacun des outils de découpe à chaud.

**Tableau 4 - Comparaison des outils de découpe selon différents critères (PILOT, G., BERNARD, J., 1995)**

Paramètres	Outils de découpe											
	Scie alternative		Tronçonneuse à disque		Torche plasma 50A		Torche plasma 200 A		Arc-air		Scie à arc	
	inox	acier	inox	acier	inox	acier	inox	acier	inox	acier	inox	acier
Puissance utilisé (kW)	0,75	0,75	2	2	6	6	20/24	19/29	18	18	12/24	15/30
Poids (kg)	15	15	6	6	100	100	700	700	460	460	400	400
Vitesse surfacique de découpe (cm <sup>2</sup> /min)	15/0,05	1,9/0,5	2,3/8,7	3,3	20	36	60	70	25	25	8	11/5
Largeur du trait de coupe (cm)	0,2/0,5	0,23	0,4	0,4	0,18	0,1	0,3/0,5	0,2/0,3	0,4/1	0,4/1	0,9	0,5/1
Emissions secondaires (kg.m <sup>-2</sup> )*	17/33	17	40	35	17	10	27/40	15/28	36/91	43/86	70	35/140
Dépôts sur les parois (kg.m <sup>-2</sup> )*	0,01/0,1	0,02	1	0,9	0,12	0,15	0,4/0,1	0,1	0,6/0,1	1,5/0,4	0,2/0,6	0,25
Aérosols entraînés (kg.m <sup>-2</sup> )*	0,002/0,02	0,002	1,8/06	1,3/0,4	0,6/0,2	0,8/0,5	0,5/1	0,5	1,2/0,5	3,4/1,9	1/1,8	1/1,6
Usure de l'outil (kg.m <sup>-2</sup> )*	0,02	0,01/0,08	5/17	1,7/14	0	0	0	0	2,2/3,4	2,7/4,2	3,8/54	1,2/76
Gaz produits hors limite INRS	NM	NM	Néant	Néant	NO et NO2	NO et NO2	NO et NO2	NO et NO2	NO et CO?	NO et CO	NO	NO

\* le paramètre est rapporté à la surface découpée en m<sup>2</sup> -- NM : Non Mesurée - NC : Non Calculé

Pour chaque critère, les résultats sont identifiés en vert ou en rouge suivant qu'ils sont jugés favorables ou défavorables. Les émissions secondaires représentent l'ensemble des déchets solides issus de la découpe (les scories, les dépôts sur les parois et les aérosols entraînés). De cette étude, il ressort que la scie alternative est l'outil de découpe le moins émissif en particules mais aussi l'outil le plus lent. Par opposition, l'arc air et la scie à arc sont les outils qui émettent le plus de particules entraînées. La torche à plasma 200 A est l'outil ayant la vitesse surfacique de coupe la plus importante. De plus, la torche à plasma a une production de particules provenant uniquement de la pièce (pas d'outil) ce qui facilite l'analyse des aérosols émis. A contrario, son principal défaut est l'émission de gaz nocifs.

Le laser est absent de cette étude, étant généralement utilisé sous eau pour les éléments à forte activité radiologique (FAUVEL, S. et al., 2005 et PEILLON, S. et al., 2014).

D'autres études ont porté sur les particules microniques émises par des outils de découpe afin de déterminer les contaminations radiologiques des réseaux de ventilation (ONODERA, J., et al., 1991) ou leurs effets toxiques sur l'Homme (NEWTON, G.J. et al. 1981-1982 et NEWTON, G.J. et al., 1984 et HOOVER, M.D. et al., 1982). Un rapport de la commission européenne de 1989 s'intéresse également à la ventilation et aux dispositifs de filtration nécessaires pour stopper les aérosols microniques émis par des découpes thermiques (BISHOP, A., 1989). Mais aucune étude ne porte sur les particules incandescentes.

L'utilisation de la disceuse dans les chantiers de démantèlement est très répandue et par conséquent nous allons décrire plus en détail les mécanismes impliqués dans l'arrachage du métal et les particules produites par ce procédé.

### 1.1.3. Phénoménologie de la découpe de métal par une disqueuse

La disqueuse est un outil de découpe mécanique équipé d'un disque composé de matières abrasives mis en rotation rapide pour enlever de la matière à la pièce. Le schéma de principe du processus est présenté sur la Figure 2.

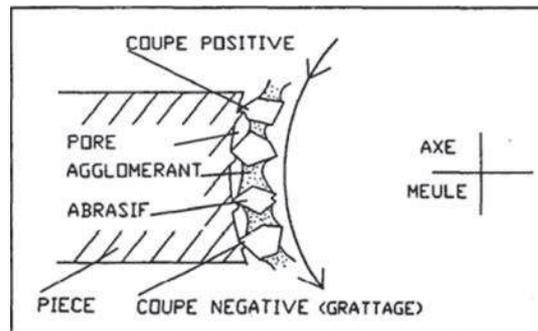


Figure 2 - Schéma de principe du processus d'enlèvement de matière par abrasion (CETIER, 1989)

Le disque est un outil à tranches multiples dont chaque grain est un outil élémentaire. L'agglomérant joue le rôle du porte outil. Pendant la découpe, les grains émoussés sont libérés et mettent à nu de nouveaux grains. Un disque est défini par son type de liant et ses caractéristiques en termes de taille et de dureté des grains. Il existe des disques de différentes compositions adaptés aux matériaux.

Dans la configuration de Pilot (1995), plus de 90 % de la masse soustraite de la pièce se retrouve dans les scories sédimentées alors que seulement 3 % de la masse est entraînée dans le circuit de ventilation. Les particules entraînées ont une distribution granulométrique bimodale (modes à 0,1 et 7  $\mu\text{m}$ ) tandis que la granulométrie des scories est comprise entre 20  $\mu\text{m}$  et 10 mm. Pilot (1995) montre également que la concentration en aérosol diminue lorsque la vitesse de coupe augmente.

Des coupes à l'aide d'une disqueuse manuelle réalisées par l'IRSN sur l'installation STARMANIA (ARTOUS, S. *et al.*, 2011) ont permis de mettre en évidence une perte de masse du même ordre de grandeur pour la pièce et l'outil. Les mesures réalisées à l'aide d'un impacteur d'Andersen lors des essais ont montré que la distribution granulométrique des particules était centrée autour de 10  $\mu\text{m}$ , en accord avec les résultats de Pilot (1995). Ces résultats ne font cependant pas la distinction dans la composition des particules produites, issues de la pièce métallique et du disque.

Malkin (1984) a visualisé des copeaux, émis lors d'une découpe avec une disqueuse à l'aide d'un Microscopie Electronique à Balayage (MEB) (Figure 3).

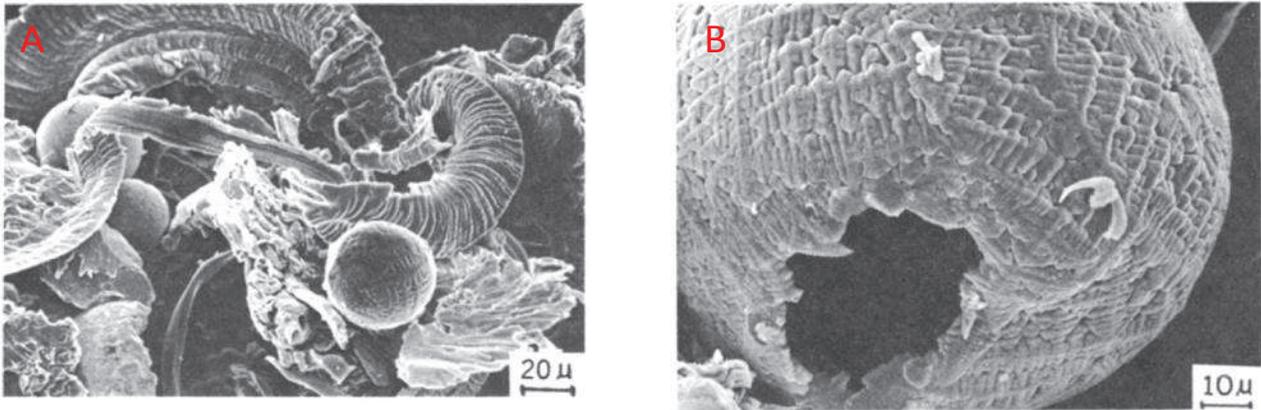


Figure 3 - Visualisations au MEB de copeaux de découpe de l'acier AISI 1065 (MALKIN, 1984)

L'image A, révèle des copeaux ayant une structure lamellaire provenant d'une instabilité thermique qui entraîne une modification de la résistance au cisaillement avec une température localisée importante provenant d'une déformation plastique intense (BLACK, 1979). Il y a également des copeaux de morphologie « patatoïdes », dont l'origine dépend de l'angle d'attaque des faces des grains (ROWE, G.W., WETTON, A.G., 1969). Enfin, des particules sphériques (Image B) témoignent de l'atteinte de la température de fusion du métal puis du refroidissement et de sa solidification en vol (TARASOV, 1950).

La morphologie des copeaux est différente selon les conditions de coupe et la nature physico-chimique de la pièce. La taille du copeau est déterminée par l'enfoncement de l'outil dans la plaque, qui dépend de la force d'appui exercée sur le disque. La force d'appui est également un des paramètres déterminant influençant le dégagement d'énergie par effet Joule. Cette énergie provient des déformations plastiques des zones de cisaillement et de la dissipation par frottement à l'interface entre l'outil et le copeau (MALKIN, 1984). Cette énergie va se dissiper dans l'outil, la pièce, l'atmosphère et le copeau. La Figure 4 représente selon Kaczmarek (2008) la répartition des flux de chaleur lors de la découpe.

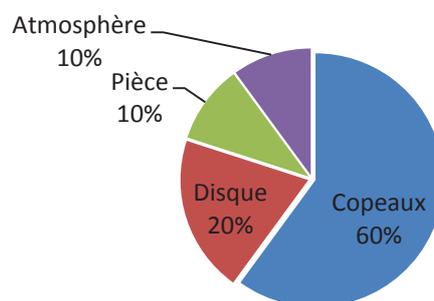
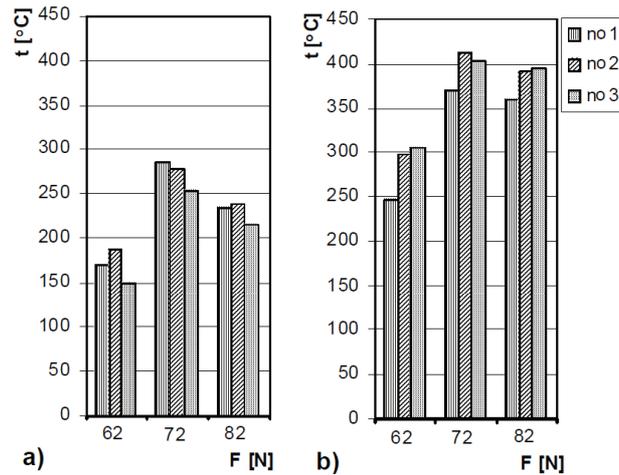


Figure 4 - Répartition des flux de chaleur pendant une découpe à l'aide d'une disceuse (KACZMAREK, J., 2008)

La majorité de l'énergie de coupe se concentre dans les copeaux. Les différentes conditions de coupe, comme le rapport entre la force d'appui et la surface de contact, ou la nature de la pièce, modifient

les répartitions. Au niveau de la découpe se crée localement une zone de compression, ce qui limite la dissipation de la chaleur dans l'air environnant et tend à augmenter la température de la pièce.

Kaczmarek (2011) s'est intéressé à l'évolution de la température maximale de disques de même composition (dénomination A24 R6 BF) mais issus de différents fabricants, en fonction de la force d'appui et de la surface de contact entre l'outil et les pièces constituées de tube métalliques creux de différents diamètres. Les résultats présentés sur la Figure 5 montrent une légère dispersion des valeurs de température pour les disques issus des différents constructeurs.



**Figure 5 - Température maximale mesurée à la circonférence des disques issus de trois fabricants (no 1, no 2 et no 3) pour trois forces d'appui (62 N, 72 N, 82 N) et pour des tubes a) de 12 mm de diamètre et b) de 20 mm de diamètre (KACZMAREK, 2011)**

L'étude ne précise pas la répétabilité des résultats pour des disques d'un même fabricant. Pour expliquer l'augmentation non monotone de la température maximale avec la force d'appui (augmentation jusqu'à 72 N puis diminution au-delà), Kaczmarek (2011) émet l'hypothèse qu'à partir d'un seuil, l'écrasement du disque sur la plaque facilite le détachement et l'apparition de nouveaux grains, augmentant ainsi la dissipation de la chaleur.

Les résultats relatifs à l'évolution de la température de la pièce en fonction de la force d'appui et de la surface de contact entre la pièce et l'outil, issus de l'étude de Kaczmarek (2011) sont présentés sur la Figure 6.

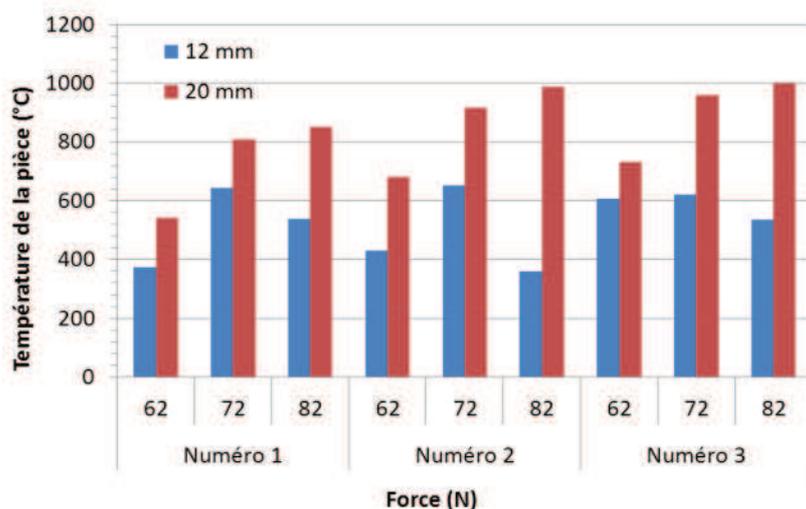


Figure 6 - Température maximale relevée pendant la découpe de deux tubes de diamètre 12 mm et 20 mm pour une force d'appui de 62, 78 et 88 N (KACZMAREK, 2011)

Il apparaît que la température maximale de la pièce mesurée augmente avec la surface de contact, ceci s'expliquant par l'augmentation du temps de découpe. En effet, pour le tube de plus grand diamètre (20 mm), la température croît avec la force d'appui alors que l'évolution est différente pour le tube de plus petit diamètre (diminution de la température pour la force de 82 N). Cette tendance est justifiée par l'auteur par l'atteinte d'un seuil pour lequel l'augmentation de la pression liée à la diminution de la surface de contact entre l'outil et la pièce entraîne une dissipation plus efficace de la chaleur du fait de l'usure plus rapide du disque.

Alenius (1996) s'est intéressé à caractériser l'émission de particules émises par une ponceuse. Il est possible de faire l'analogie entre une disqueuse et une ponceuse, étant donné qu'il s'agit d'un disque mis en rotation rapide (vitesse périphérique de 5 à 80  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ). La vitesse des particules incandescentes est obtenue à l'aide d'une caméra rapide en mesurant la traînée des particules. La vitesse initiale des particules est comprise entre 45 et 90 % de la vitesse périphérique du disque. Alenius (1996) fait l'hypothèse qu'il s'agit de particules sphériques de composition homogène de fer.

Il a mesuré également les mouvements d'air et la répartition des particules dans les premiers centimètres autour du disque. Il indique que la vitesse radiale est négligeable devant la vitesse tangentielle de l'écoulement autour du disque. Ainsi, des particules vont rester en périphérie du disque durant une révolution de celui-ci et ne seront éjectées que par la suite. D'autres particules peuvent également pénétrer dans les pores du disque, entre les grains abrasifs, on parle alors de chargement du disque. Ce phénomène conduit à augmenter la température du disque et à diminuer la qualité de la surface de coupe selon Zhang (2006).

Les particules produites lors de la découpe peuvent être entraînées dans le conduit de ventilation où leurs caractéristiques vont évoluer pendant leur transport.

## 1.2. Evolution des caractéristiques des particules pendant leur transport

Cette partie porte sur le devenir des particules pendant leur transport. Tout d'abord, nous estimerons les diamètres des particules entraînées ainsi que leurs distances d'arrêt dans les conduits de ventilation, puis l'évolution de leur température en fonction de la distance par rapport au point d'émission.

### 1.2.1. Transport

Le nombre de Stokes (St), traduit la possibilité qu'une particule à de suivre l'écoulement du fluide porteur, et caractérise son inertie. Il représente le rapport du temps de relaxation de la particule à une échelle caractéristique de l'écoulement. En considérant une particule lisse, sphérique, soumise à sa seule force de portance, le nombre de Stokes peut être explicité selon l'Équation 1.

$$St = \frac{\rho_p \cdot d_p^2 \cdot U_f}{18 \cdot \mu_f \cdot d_c} \quad \text{Équation 1}$$

Avec :

- $\rho_p$ , la masse volumique de la particule ( $\text{kg.m}^{-3}$ ),
- $d_p$ , le diamètre de la particule (m),
- $U_f$ , la vitesse du fluide ( $\text{m.s}^{-1}$ ),
- $\mu_f$ , la viscosité dynamique du fluide (Pa.s),
- $d_c$ , le diamètre de la conduite (m).

En considérant un conduit cylindrique de 0,125 m de diamètre avec une vitesse de fluide (considérée comme de l'air) de  $10 \text{ m.s}^{-1}$ , l'évolution du nombre de Stokes est tracée pour des particules de fer ( $\rho_p = 8000 \text{ kg.m}^{-3}$ ) dont le diamètre de particule est compris entre 0,1 et  $100 \mu\text{m}$  (Figure 7). Par la suite, nous parlerons de diamètre de particule mais le rapport est de 2,8 avec le diamètre aérodynamique équivalent. Par exemple, la Figure 7 possède une gamme de diamètre aérodynamique équivalent qui s'étend de 0,28 à  $280 \mu\text{m}$ .

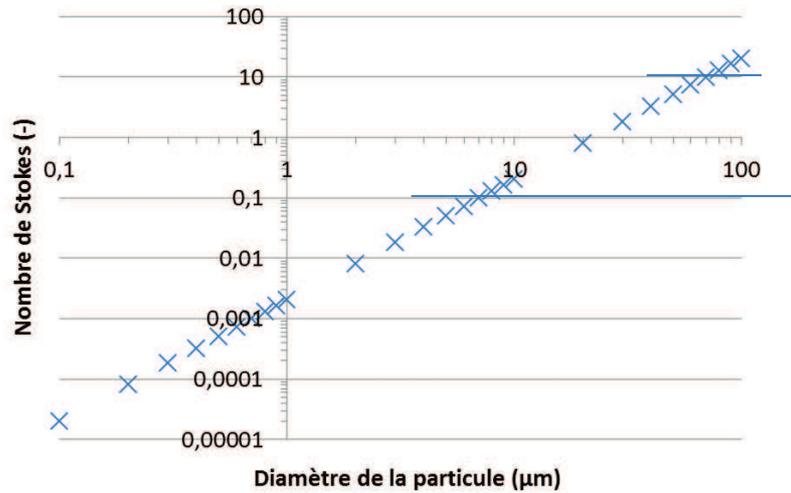


Figure 7 - Nombre de Stokes en fonction du diamètre des particules

Lorsque le nombre de Stokes est inférieur à 0,1 (particule de diamètre inférieur à 6 µm), les particules sont considérées comme étant portées par le fluide et suivent les lignes de courant de celui-ci. A contrario, lorsque le nombre de Stokes est supérieur à 10, les particules étant considérées dépendantes de leur inertie, nous obtenons une gamme de taille de particules de diamètre supérieur à 70 µm. Entre les deux, il s'agit d'un régime intermédiaire où les particules suivent globalement le fluide mais pas forcément les lignes de courant.

Basset (1888), Boussinesq (1885) et Oseen (1933) ont étudié le mouvement d'une particule sphérique soumise au champ de gravité, dans un fluide au repos. Witscheger (1996) décrit cette loi qui peut se simplifier selon l'expression de l'Équation 2 en considérant que la densité des particules est très supérieure à la densité du fluide et où l'accélération relative de la particule par rapport à l'air est négligeable. Les particules sont considérées lisses, solides, indéformables et sphériques. La thermophorèse, photophorèse et les effets électrostatiques sont négligés.

$$m_p \cdot \frac{dU_p}{dt} = m_p \cdot g + \frac{1}{2} \cdot C_D \cdot \rho_p \cdot S_p \cdot |U_p - U_f| \cdot (U_p - U_f) \quad (\text{kg.m.s}^{-2}) \quad \text{Équation 2}$$

Avec :

- $m_p$ , la masse de la particule (kg),
- $U_p$ , la vitesse de la particule ( $\text{m.s}^{-1}$ ),
- $U_f$ , la vitesse du fluide ( $\text{m.s}^{-1}$ ),
- $S_p$ , la surface de la particule ( $\text{m}^2$ ),
- $\rho_p$ , la masse volumique de la particule ( $\text{kg.m}^{-3}$ ),
- $C_D$ , le coefficient de traînée des particules (-).

Le coefficient de traînée dépend du régime d'écoulement défini par le nombre de Reynolds de la particule ( $Re_p$ ) défini par l'Équation 3.

$$Re_p = \frac{\rho_f \cdot d_p \cdot |U_p - U_f|}{\mu_f} \quad \text{Équation 3}$$

Avec  $\rho_f$ , la masse volumique du fluide ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ).

La granulométrie des particules émises durant la découpe par une disqueuse varient entre  $0,1 \mu\text{m}$  et  $10 \text{ mm}$  (PILOT, G., BERNARD, J., 1995). La Figure 8 représente l'évolution du nombre de Reynolds de la particule en fonction de son diamètre et de sa vitesse pour une vitesse de fluide égale à  $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ .

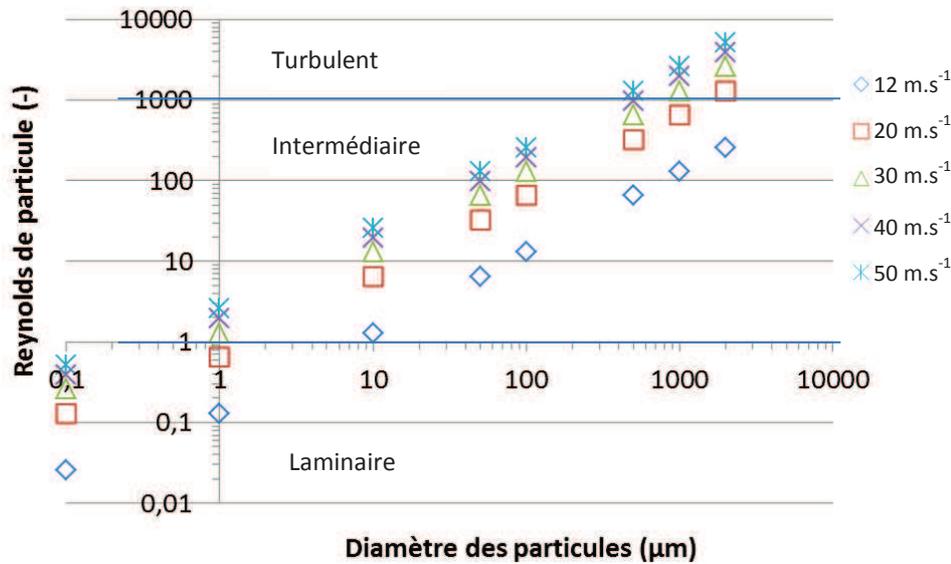


Figure 8 – Evolution du nombre de Reynolds de la particule en fonction de leurs diamètres à différentes vitesses

Pour  $Re_p < 1$ , le régime est considéré comme laminaire, pour  $Re_p < 1000$  le régime est intermédiaire et pour  $Re_p > 1000$ , le régime est turbulent. D'après les résultats de la Figure 8, la nature polydispersée des particules fait qu'il est possible de rencontrer les trois régimes d'écoulement cités précédemment. Le Tableau 5 récapitule les expressions analytiques du coefficient de traînée de la particule en fonction de son nombre de Reynolds.

Tableau 5 - Valeur du coefficient de traînée ( $C_D$ ) en fonction du nombre de Reynolds de la particule ( $Re_p$ ) selon Hinds (1999) et Baron (2001)

$Re_p$	$<0,1$	$0,1 << 5$	$5 << 10^3$	$10^3 << 2 \cdot 10^5$
$C_D$	$\frac{24}{Re_p}$	$\frac{24(1 + 0,0196 Re_p)}{Re_p}$	$\frac{24(1 + 0,15 Re_p^{0,687})}{Re_p}$	0,44

Ainsi, il est possible de calculer la vitesse des particules et leur position en tout point depuis leur émission en faisant certaines approximations. Les particules sont donc supposées sphériques, composées uniquement de fer et émises avec une composante de vitesse initiale horizontale dont la norme est égale à  $40 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . La vitesse du fluide est de  $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , sa composante de vitesse principale est colinéaire à celle de la particule initialement émise.

L'évolution de la vitesse axiale des particules est reproduite sur la Figure 9 pour trois tailles de particules (50, 100 et 500  $\mu\text{m}$ ). Les trajectoires des particules 50, 100, 300, 1000  $\mu\text{m}$  de diamètres sont représentées sur la Figure 10 avec comme position initiale, l'origine dans le plan vertical (x, y).

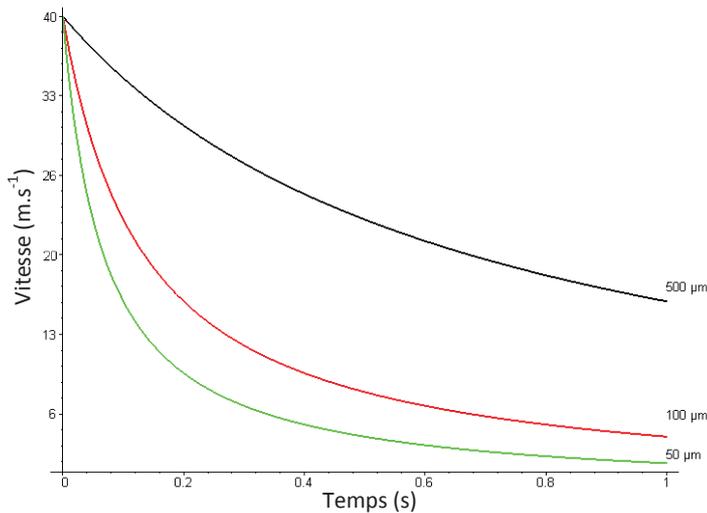


Figure 9 - Evolution de la vitesse d'une particule pour différents diamètres, émis à une vitesse de  $40 \text{ m.s}^{-1}$

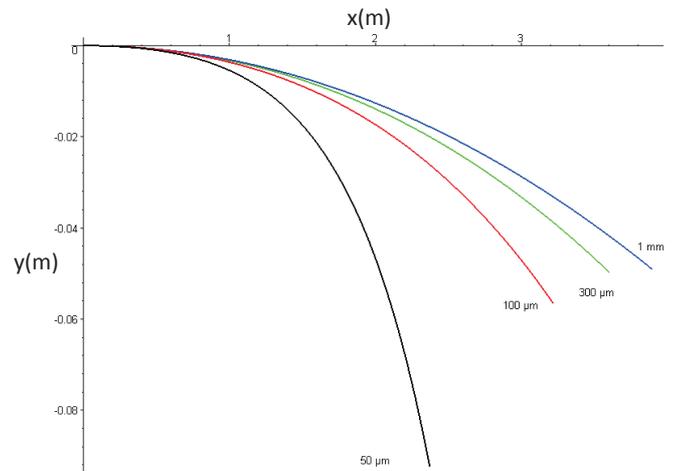


Figure 10 - Trajectoire d'une particule pour différents diamètres émise à une vitesse de  $40 \text{ m.s}^{-1}$

D'après la Figure 10, en considérant une conduite de 0,125 m de diamètre, les particules de 50  $\mu\text{m}$  rentreraient en contact avec la paroi à 2 m, tandis qu'il faudrait attendre 3 m pour les particules de 100  $\mu\text{m}$  et plus de 4 m pour les particules de 1 mm de diamètre.

Les calculs précédents considèrent des particules sphériques avec une masse volumique égale à celle du fer. Un copeau avec une forme éloignée de la sphère possèdera un coefficient de traînée plus important et se déposera plus vite dans la conduite. La vitesse de la particule conditionne la durée de son transfert de chaleur avec le milieu environnant, ainsi que la valeur du coefficient d'échange convectif.

### 1.2.2. Transfert de chaleur

Les particules sont émises à haute température (cf. paragraphe 1.1.3) et se refroidissent suivant trois modes de transfert de chaleur (Figure 11); conduction interne, convection et rayonnement. Les particules étant composées majoritairement de fer, elles sont également le siège d'une réaction d'oxydation exothermique.

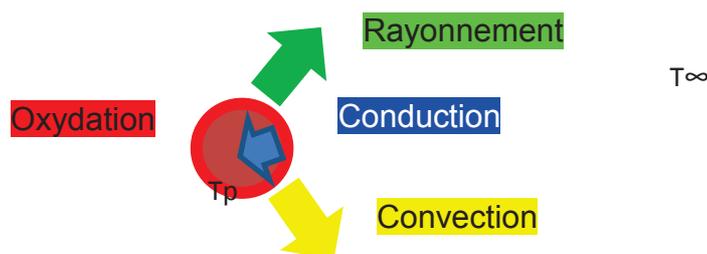


Figure 11 - Modes de transfert de chaleur d'une particule

La conduction représente le transfert thermique au sein de la particule dû au mouvement aléatoire de ses atomes, molécules et électrons. L'intensité du phénomène de conduction dépend du nombre de Biot. Il permet de définir l'uniformité du champ de température au sein de la particule et est défini selon l'Équation 4. Lorsque la conduction est beaucoup plus importante que les échanges convectifs, i.e.  $Bi < 0,1$ , il est possible de faire l'hypothèse que la température est uniforme en son sein et de négliger le phénomène de conduction.

$$Bi = \frac{h \cdot L_{cb}}{\lambda_p} \quad \text{Équation 4}$$

Avec :

- $L_{cb}$ , une longueur caractéristique du transfert de chaleur (en général le rapport entre le volume de la particule et sa surface) (m),
- $\lambda_p$ , conductivité thermique de la particule ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ),
- $h$ , le coefficient de convection ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ ).

Le coefficient de convection dépend de l'état de surface, de la nature et de la température du fluide et du régime de l'écoulement (turbulence, vitesse). La détermination du coefficient de convection s'effectue grâce au nombre de Nusselt, explicité par l'Équation 5.

$$Nu = \frac{h \cdot L_{cn}}{\lambda_f} \quad \text{Équation 5}$$

Avec :

- $L_{cn}$ , une longueur caractéristique (différente de la longueur caractéristique du nombre de Biot, en général le diamètre de la particule) (m),
- $\lambda_f$ , la conductivité thermique du fluide ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ).

Le nombre de Nusselt est calculé d'après des corrélations empiriques listées dans le Tableau 6 en fonction du nombre de Reynolds de la particule et du nombre de Prandtl (défini Équation 6).

$$Pr = \frac{\mu_f \cdot C_{p_f}}{\lambda_f} \quad \text{Équation 6}$$

Avec  $C_{p_f}$ , la capacité thermique massique du fluide ( $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ).

Tableau 6 - Corrélations du nombre de Nusselt particulaire (RENOUX, A., BOULAUD, D., 2003a)

Auteurs	Domaine de validité		Corrélation
	$Re_p$	Pr	
Ranz Marshall (1952)	$1 \leq Re_p \leq 7.10^4$	$0,6 \leq Pr \leq 400$	$Nu_p = 2 + 0,6 Re_p^{1/2} Pr^{1/3}$
Mac Adams (1954)	$17 \leq Re_p \leq 7.10^4$		$Nu_p = 0,37(Re_p)^{0,6}$
Clift <i>et al.</i> (1978)	$0 \leq Re_p \leq 1$		$Nu_p = 1 + (1 + Re_p Pr)^{1/3}$
	$1 \leq Re_p \leq 100$		$Nu_p = 1 + Re_p^{0,41} \left(1 + \frac{1}{Re_p Pr}\right)^{1/3} Pr^{1/3}$
	$100 \leq Re_p \leq 2000$		$Nu_p = 1 + 0,752 Re_p^{0,472} \left(1 + \frac{1}{Re_p Pr}\right)^{1/3} Pr^{1/3}$
Li et Mason (2000)	$0 \leq Re_p \leq 200$		$Nu_p = 2 + 0,6 Re_p^{1/2} Pr^{1/3}$
	$200 \leq Re_p \leq 1500$		$Nu_p = 2 + 0,5 Re_p^{1/2} Pr^{1/3} + 0,02 Re_p^{0,8} Pr^{1/3}$
	$Re_p \geq 1500$		$Nu_p = 2 + 0,000045 Re_p^{1,8}$

Le nombre de Prandtl compare deux phénomènes dissipatifs normaux à la paroi, la diffusion de la chaleur par conduction et la diffusion par viscosité. Il ne dépend que des propriétés du fluide. En utilisant le nombre de Nusselt déterminé par la relation de Ranz Marshall (1952), il est possible d'obtenir le coefficient d'échange de convection (h) afin de déterminer le nombre de Biot. Dans notre gamme d'étude, le nombre de Biot apparait être toujours inférieur à 0,1 et la conduction peut donc être négligée.

La convection représente l'échange d'énergie à la surface du solide avec un fluide explicitée par l'Équation 7.

$$\varphi_v = h \cdot S_p \cdot (T_p - T_{env}) \quad (W) \quad \text{Équation 7}$$

$T_{env}$  représente la température de l'atmosphère à proximité des particules. Afin de simplifier le problème, nous considérons le coefficient de convection (h, défini précédemment) indépendant du temps.

Le rayonnement représente la quantité d'énergie émise sous forme d'onde électromagnétique par l'agitation des molécules au sein du solide. Le rayonnement représente le flux d'énergie émit par une particule sur tout le spectre électromagnétique et est explicité Equation 8.

$$\varphi_r = \sigma \cdot \varepsilon \cdot S_p \cdot (T_p^4 - T_\infty^4) \quad (\text{W}) \quad \text{Équation 8}$$

Avec :

- $\sigma$ , la constante de Stefan-Boltzmann ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$ ),
- $\varepsilon$ , l'émissivité de la particule (-),
- $S_p$ , la surface d'échange ( $\text{m}^2$ ),
- $T_p$ , la température de la particule (K),
- $T_\infty$ , la température des surfaces ambiantes (K).

Pour des particules de tailles microniques, il est usuellement fait comme hypothèse que le transfert de chaleur par rayonnement est négligeable devant celui par convection. Cependant, étant donné les larges gammes de température et de diamètre de particules considérés dans cette étude, le rayonnement ne peut pas être négligé.

Le fer et le chrome présent dans l'acier peuvent réagir avec l'oxygène de l'air et s'oxyder. La vitesse de croissance de la couche d'oxyde de fer et de chrome est de forme parabolique (Paidassi (1958) et Lillerud (1980)) induite par la diffusion de l'oxygène dans la couche d'oxyde. A 1000 °C, la vitesse de croissance de la couche d'oxyde de fer va être prépondérante et l'oxyde majoritairement formé est la wustite (FeO) qui pour des températures supérieures à 570 °C représente 95 % de l'épaisseur de la couche d'oxyde.

L'énergie émise pendant la réaction d'oxydation est définie selon l'Équation 9, avec  $M_f$  la masse molaire du fer. La cinétique d'oxydation est gouvernée par la constante de vitesse,  $k_p$ , explicitée par l'Équation 10 (STANLEY, J.K. *et al.*, 1951) et dépend de l'enthalpie libre de formation de la wustite définie selon l'Équation 11.

$$E_o = \frac{\pi \cdot d_p^2 \cdot \sqrt{k_p \cdot t}}{M_f} \cdot \Delta H_f^\circ \quad (\text{J}) \quad \text{Équation 9}$$

$$k_p = 0,37 \cdot \exp\left(\frac{-33000}{RT}\right) \quad (\text{g}^2 \cdot \text{cm}^{-4} \cdot \text{s}^{-1}) \quad \text{Équation 10}$$

$$\Delta H_f^\circ = -267,94 \quad (\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}) \quad \text{Équation 11}$$

L'énergie spécifique créée par la réaction d'oxydation est supérieure à l'énergie volumique de fusion du fer qui est de  $13,8 \text{ J} \cdot \text{mm}^{-3}$  (MALKIN, 1984). Cela confirme l'importance de l'apport de chaleur lié à la réaction d'oxydation qui participe à la fusion des particules. Ce résultat est confirmé par des expériences menées par Tarasov (1950) qui a observé, en l'absence d'oxygène, un léger rougisement de la plaque et des particules mais l'absence de particules incandescentes. Pitois (1924), dans son livre intitulé «L'essai aux étincelles », a remarqué le manque d'éclats des particules en l'absence d'oxygène et une augmentation de

l'éclat des particules dans une atmosphère plus riche en oxygène. De même, l'étude de différents aciers lui a permis d'identifier que les aciers riches en fer produisent des particules incandescentes plus éclatantes que des aciers composés d'éléments antioxydants (chrome, nickel) et met en avant l'effet de la réaction d'oxydation.

La réaction d'oxydation est très rapide, cependant étant donné les vitesses importantes des particules (*cf.* paragraphe 1.2.1), cette réaction est toujours active lors du transport des particules. L'énergie et les temps caractéristiques de la réaction sont calculés pour différents diamètres de particules dans le Tableau 7.

**Tableau 7 - Effet de l'oxydation sur une particule**

Taille (µm)	Energie de réaction (J)	Energie volumique (J.mm <sup>-3</sup> )	Temps de réaction (s)	Puissance (W)	Distance axiale parcourue en air libre (m)
1	1,61E-08	30,73	1,11E-05	1,44E-03	3,7.10 <sup>-4</sup>
10	2,01E-05	38,41	1,74E-03	1,16E-02	0,05
50	2,51E-03	38,41	4,35E-02	5,78E-02	1,36
100	2,01E-02	38,41	0,17	0,12	4,85
250	0,25	30,73	0,70	0,36	17
500	2,01	30,73	2,78	0,72	49
1000	16,09	30,73	11,14	1,44	201,7

Les résultats du Tableau 7 sont obtenus en considérant la température de la particule constante (pas d'échange de chaleur), ce qui minimise le temps de réaction.

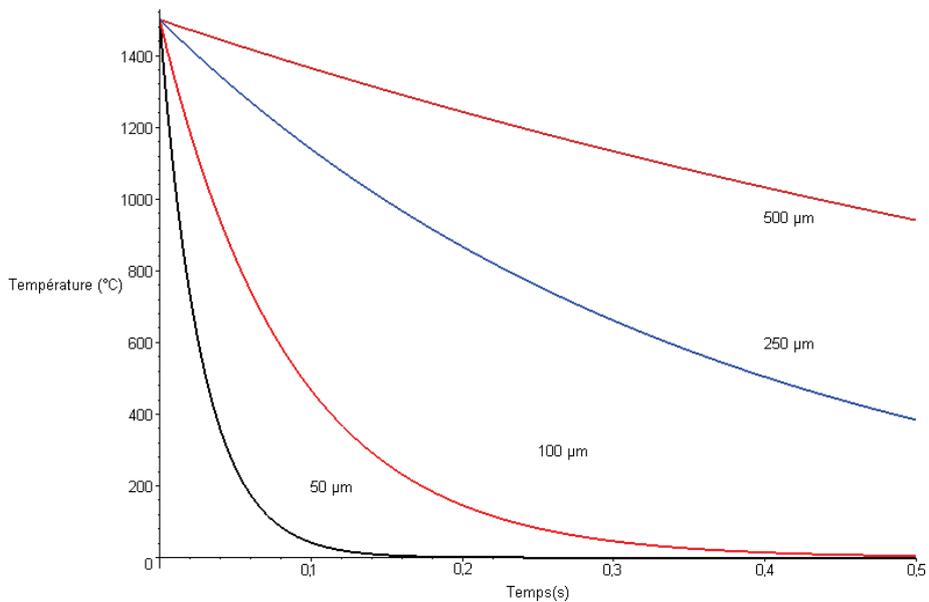
Lors d'une découpe durant un laps de temps court (< 30 s) et du fait du renouvellement d'air dans la conduite de ventilation, nous pouvons considérer que la température de l'atmosphère environnante est supposée constante.

La variation de température d'une particule peut donc s'écrire sous la forme de l'Équation 12.

$$\rho_p \cdot V_p \cdot C_p \cdot \frac{\partial T_p}{\partial t} = P_{oxy}(S_p, T_p, t) - \sigma \cdot \varepsilon \cdot S_p \cdot (T_p^4 - T_\infty^4) - h \cdot S_p \cdot (T_p - T_{env})$$

Équation 12

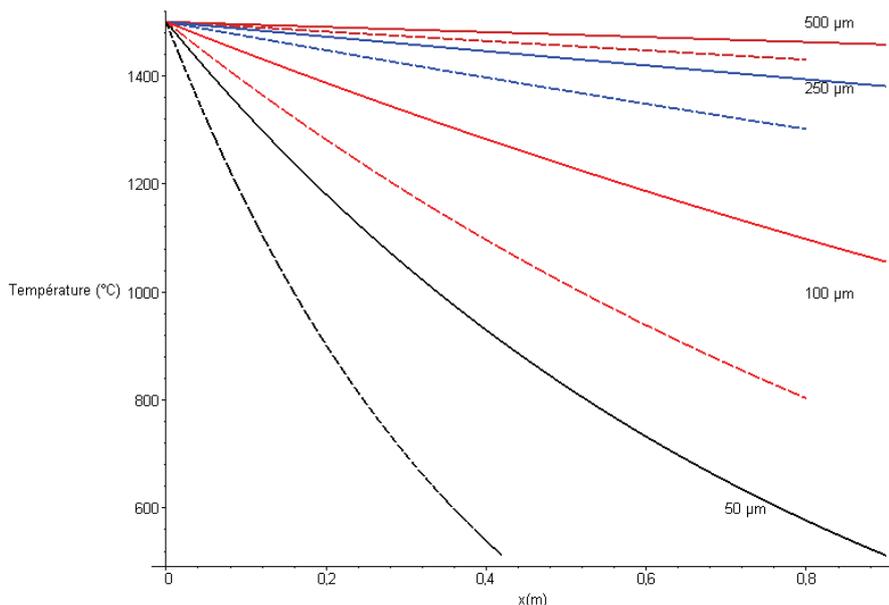
Avec  $P_{oxy}(S_p, T_p, t)$ , la puissance créée par la réaction exothermique d'oxydation des particules, celle-ci étant dépendante de la surface d'échange et de la température. La réaction d'oxydation a des effets très importants, cependant, dans les calculs suivants, nous ne la prenons pas en compte pour simplifier la résolution de l'équation de transfert de chaleur. Les résultats obtenus indiquent alors une température minimale de la particule. L'évolution de la température des particules en fonction de leur diamètre est tracée sur la Figure 12.



**Figure 12 - Evolution de la température « minimale » d'une particule de différents diamètres en fonction du temps**

Les particules de diamètre inférieur à 50  $\mu\text{m}$  ont une inertie thermique très faible et sont très rapidement à la température ambiante. Les particules de 500  $\mu\text{m}$  possèdent une inertie thermique importante et sont toujours à plus de 1000  $^{\circ}\text{C}$ , 0,5 s après leurs émissions.

Le coefficient d'échange de chaleur convectif ( $h$ ) dépend directement de la vitesse relative entre le fluide et la particule. Lorsque la vitesse de la particule diminue, le coefficient d'échange de chaleur diminue mais entraîne une augmentation du temps de transit de la particule pour arriver à une distance donnée. Afin de statuer sur ces deux effets, la Figure 13 représente l'évolution de la température pour des particules de 50, 100, 250 et 500  $\mu\text{m}$  émises à une vitesse de 40  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  (trait plein) et l'évolution de la température de ces mêmes particules émises à une vitesse de 20  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  (trait pointillé).



**Figure 13 - Evolution de la température d'une particule de différents diamètres émises à une vitesse de 40  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  (trait plein) et de 20  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  (trait pointillé)**

Pour les particules de 500  $\mu\text{m}$  de diamètre, l'effet de la vitesse initiale sur une distance de 80 cm est limité mais devient d'autant plus marqué que le diamètre des particules diminue.

Les trajectoires des particules sont dispersées et les mènent à des collisions avec les parois du conduit.

### 1.2.3. Impact pariétal des particules

Lors du contact d'une particule solide avec une paroi, deux phénomènes sont possibles, le rebond ou l'adhérence. Pour simplifier, nous considérerons que lorsque la force d'impact de la particule est supérieure à la force d'adhésion, il y aura rebond, autrement il y aura adhérence.

L'adhérence regroupe les forces de capillarité, électrostatique et de Van Der Walls. Dans une atmosphère avec un taux d'humidité faible, la force de Van Der Walls, rappelée sur l'Équation 13, est prédominante.

$$F_{VDW} = \frac{A_h \cdot d_p}{12 \cdot z^2} \quad (\text{N}) \quad \text{Équation 13}$$

Avec :

- $A_h$ , la constante de Hamaker, qui dépend des matériaux et de leur géométrie ( $10^{-19} < A_h < 10^{-20}$  J),
- $z$ , représente la distance entre la particule et la surface (pris généralement égal à  $4 \cdot 10^{-10}$  m).

La vitesse limite d'adhésion ( $V_r$ ) est ainsi définie selon l'Équation 14 (JORDAN, 1954).

$$V_r^2 > \frac{2 \cdot F_{VDW}}{m_p} \cdot \frac{1 - e^2}{e^2} \quad (\text{m} \cdot \text{s}^{-1}) \quad \text{Équation 14}$$

Avec  $e$  le coefficient de restitution défini comme le rapport de la vitesse de la particule après impact sur la vitesse de la particule incidente. Un coefficient de restitution de 1 signifie un contact parfaitement élastique et un coefficient de restitution de 0 indique que la particule adhère à la paroi.

La vitesse limite de rebonds d'une particule est tracée pour différents coefficients de restitution sur la Figure 14 pour une force de Van Der Walls moyenne (incertitude liée à la gamme de la constante de Hamaker).

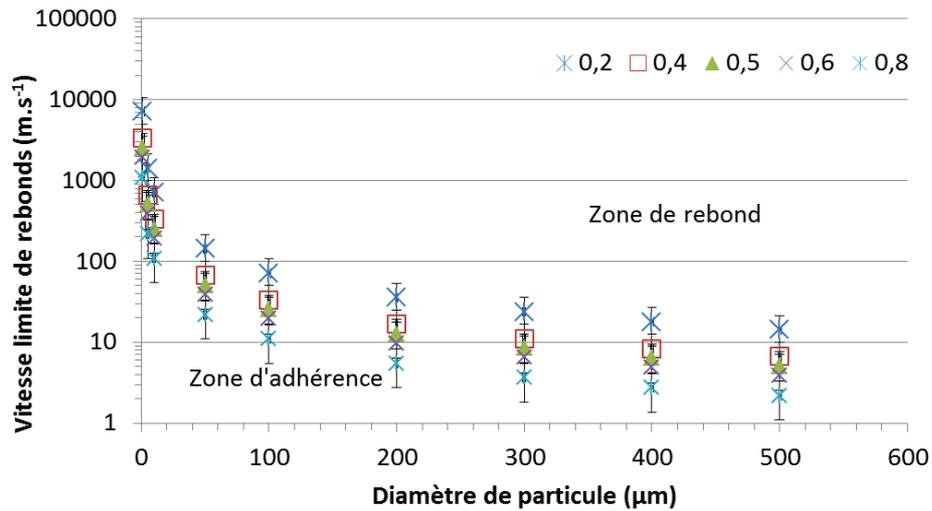


Figure 14 - Vitesse limite de rebond des particules en fonction de leur diamètre pour différents coefficients de restitution

La vitesse limite de rebond dépend fortement du coefficient de restitution. Or lui-même dépend de la vitesse incidente et de l'angle d'impact, de la température et des natures physico-chimiques de la paroi et de la particule. Des études expérimentales menées par Reagle (2012) et Seifried (2005), ont porté sur la détermination du coefficient de restitution dans des conditions éloignées de notre configuration et sont peu utilisables.

L'interaction de particules liquides sur un substrat solide est dépendante de la viscosité de la particule, elle-même dépendante de la température. Fukanuma (1994) propose 4 cas de figures, concernant l'impact normal de particules à la paroi, représentés sur la Figure 15.

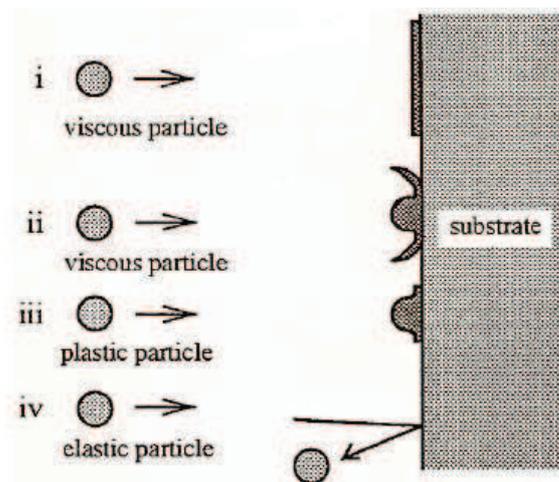


Figure 15 - Interactions possibles entre une particule liquide et un substrat (FUKANUMA, H., OHMORI, A., 1994)

Pour notre application, les particules impactent avec un angle inférieur à 90 ° mais nous considérons que les différents cas de figure sont transposables. Pour i), la particule fondue visqueuse impacte et s'étale sous la forme d'un film mince. Pour ii), la particule fondue visqueuse impacte avec formation d'éclaboussure en périphérie, seule sa partie centrale restant en contact avec le substrat. Pour iii), la particule subit une

déformation plastique après impact. Enfin pour iv), la goutte rebondit sur la surface grâce à la déformation élastique. La frontière entre chaque cas de figure n'est pas clairement définie. Nous pouvons considérer que dans le cas d'une particule liquide, il y a adhésion à la paroi, mais le comportement à l'impact d'une particule solide dépend de sa vitesse d'impact et de la valeur du coefficient de restitution.

En ce qui concerne l'énergie thermique échangée lors de l'impact de particules solides, l'échange thermique conductif dépend des caractéristiques des matériaux, du temps de contact, de la surface de contact et de la température (SUN, J., CHEN, M.M., 1988). Dans nos configurations, en présence d'un flux d'air important, l'énergie thermique échangée par un impact est considérée négligeable.

Etant donné les trajectoires dispersées des particules et leur confinement dans un conduit de ventilation, il peut également y avoir des interactions entre les particules. Les particules solides vont se comporter de la même manière que par rapport à une paroi et les particules liquides vont pouvoir fusionner. Comme dans le cas de la paroi, les échanges thermiques peuvent être considérés négligeables.

Conclusions : L'étude concernant les particules émises par une disqueuse ainsi que leur devenir a été étudié dans cette partie. Les particules possèdent une gamme de taille de 0,1  $\mu\text{m}$  à 10 mm et proviennent de l'outil et de la pièce. Les particules de diamètre inférieur à 50  $\mu\text{m}$  possèdent une faible inertie thermique et seront rapidement à la température ambiante. Les caractéristiques des particules émises dépendent des conditions de coupes ainsi que de la nature physico-chimique de l'outil et de la pièce. Les copeaux concentrent la majorité de l'énergie générée lors du processus d'enlèvement de matière. Ces particules sont ainsi émises à de haute température, ce qui favorise la réaction exothermique d'oxydation et les fait fondre. De plus, ces particules ont une composante de vitesse horizontale élevée, ce qui leur permet d'atteindre plusieurs mètres avant de se déposer dans la conduite. Afin de stopper la propagation des particules, des filtres sont positionnés dans les réseaux de ventilation.

### 1.3. Filtration de particules solides

#### 1.3.1. Etude du médium filtrant

La Figure 16 montre les différents éléments constitutifs d'un filtre.

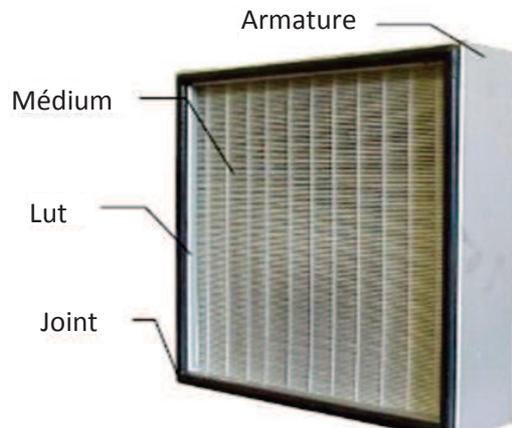


Figure 16 - Conception d'un filtre plissé (JOUBERT, 2009)

Un filtre est constitué d'une armature en acier galvanisé ou inoxydable (cas des filtres standards placés dans les réseaux de ventilation à l'intérieur de caisson de filtration) et parfois en polymères, dans le cas des cartouches filtrantes d'enceintes de types boîtes à gants ou des filtres pouvant être incinérés. Le lut est un produit placé à l'intérieur du cadre afin d'assurer l'étanchéité entre le médium filtrant et l'armature ; ce lut est en matière minérale ou en matière plastique (PVC, polyuréthane, silicone), les joints d'étanchéité placés en amont et aval du filtre autour de l'armature sont en néoprène, fibres de verre ou silicone.

Le médium est constitué de fibres de verre pour leur résistance à la chaleur et la possibilité qu'elles offrent de réaliser des fibres très fines (le diamètre des fibres est un paramètre déterminant de l'efficacité de filtration). On utilise un liant organique (moins de 5 % en masse) pour assurer une cohésion entre les fibres.

Les applications de traitement de l'air nécessitent l'assainissement d'importants volumes d'air. Afin de conserver des vitesses de filtration faibles (ce qui améliore l'efficacité de filtration), il est alors utilisé des médias sous forme plissée qui permettent, avec un même encombrement, d'augmenter la surface de filtration. La conception utilisée en France repose sur la mise en œuvre de filtres à petits plis dans lesquels les plis sont maintenus au moyen de fils intercalaires comme le montre la Figure 17.

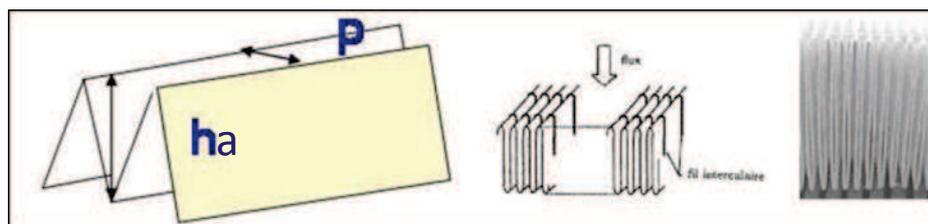


Figure 17 - Schéma de plissage d'un filtre plissé à petits plis - ha représente la hauteur et p le pas des plis (DEL FABBRO, 2001)

Le médium est en général caractérisé à l'aide de plusieurs grandeurs :

Le diamètre des fibres (df) est dans la majorité des cas polydispersé et on utilise souvent la valeur moyenne ou une valeur équivalente. Il est difficile à évaluer et nécessite l'emploi d'un microscope couplé à l'analyse d'image. Le diamètre des fibres est généralement de l'ordre du micromètre.

L'épaisseur du médium filtrant (Z) permet le calcul de la compacité, de la perte de charge et de l'efficacité. Cependant, elle est difficile à mesurer et est généralement de l'ordre de 0,4 mm.

La compacité ( $\alpha$ ) représente la fraction solide constituant le médium. Il s'agit du rapport du volume des fibres sur le volume total. C'est l'inverse de la porosité, qui représente le volume des vides sur le volume total.

Le médium est généralement caractérisé de manière industrielle par une efficacité et une perte de charge.

### 1.3.2. Efficacité du médium filtrant

Un filtre THE (Très Haute Efficacité) ou HEPA (High Efficiency Particulate Air) est un filtre qui présente une efficacité minimale de 99,97 % vis-à-vis d'un aérosol de DiEthylHexylSebacate (DEPA) monodispersé de 300 nm, selon l'ancienne norme militaire américaine MIL-F-51068F « Filters, Particulate, High-Efficiency, Fire Resistant » (BOUILLOUX, 2006).

En pratique, la catégorie d'un filtre est déterminée par une norme qui définit l'efficacité minimale à obtenir pour des caractéristiques aérodynamiques et un aérosol défini suivant Tableau 8.

**Tableau 8 - Normes utilisées dans le secteur nucléaire français pour la mesure de l'efficacité des filtres THE (ARTOUS, 2003)**

Norme	Aérosol utilisé	Diamètre aérodynamique médian massique de l'aérosol ( $\mu\text{m}$ )
Norme européenne NF EN 1822	Aérosol liquide à faible pression de vapeur à température ambiante (DEHS ou huile de paraffine)	0,15 – 0,3
Norme française NF X 44-011	Aérosol solide d'uranine (fluorescéine sodée)	0,18

Ces normes utilisent des aérosols ayant un diamètre médian compris entre 0,15 et 0,3  $\mu\text{m}$ , qui correspond au minimum d'efficacité du filtre. En effet, pour cette gamme de taille, l'effet des différents mécanismes élémentaires de collecte tels que l'impaction inertielle, l'interception et la diffusion brownienne ont une valeur minimale. Pour des particules de diamètre supérieur à 1  $\mu\text{m}$ , l'impaction inertielle et l'interception sont les mécanismes de collecte prédominants. Ils sont influencés par l'aérosol, le filtre et les conditions opératoires (Tableau 9).

**Tableau 9 - Influence de divers paramètres intrinsèques à l'aérosol, au filtre et à la filtration sur l'efficacité de collecte par diffusion, interception et impaction inertielle (GOUGEON, 1994)**

Efficacité de collecte	Aérosol		Conditions opératoires	Caractéristiques du filtre		
	$\rho_p \nearrow$	$d_p \nearrow$	$V_f \nearrow$	$d_f \nearrow$	$\alpha \nearrow$	Epaisseur $\nearrow$
Diffusion	-	$\searrow$	$\searrow$	$\searrow$	$\nearrow$	$\nearrow$
Interception	--	$\nearrow$	--	$\searrow$	$\nearrow$	$\nearrow$
Impaction inertielle	$\nearrow$	$\nearrow$	$\nearrow$	$\searrow$	$\nearrow$	$\nearrow$

Pour l'efficacité, trois grandeurs sont couramment utilisées :

**Le rendement d'épuration ou Efficacité (E)** est le rapport de la quantité de particules retenues par le filtre sur la quantité de particules incidentes.

$$E = \frac{C_{amont} - C_{aval}}{C_{amont}} \quad \text{Équation 15}$$

$C_{amont, aval}$  : concentration des particules en amont, aval du filtre.

**La Perméance (P)** est le rapport de la concentration des particules non retenues par le filtre sur la concentration des particules incidentes.

$$P = 1 - E = \frac{C_{aval}}{C_{amont}} \quad \text{Équation 16}$$

**Le Coefficient d'Épuration (CE)** est l'inverse de la perméance, c'est le rapport de la concentration des particules incidentes sur la concentration des particules non retenues sur le filtre.

$$CE = \frac{1}{P} = \frac{C_{amont}}{C_{aval}} = \frac{1}{1 - E} \quad \text{Équation 17}$$

La classification des filtres selon la norme EN-1822 est défini Tableau 10.

**Tableau 10 - Classification des filtres selon la norme EN-1822**

Groupe de filtre Classe de filtre	Valeur globale		Valeur locale <sup>1,2</sup>	
	Efficacité (%)	Pénétration (%)	Efficacité (%)	Pénétration (%)
E10	≥ 85	≤ 15	--- <sup>3</sup>	--- <sup>3</sup>
E11	≥ 95	≤ 5	--- <sup>3</sup>	--- <sup>3</sup>
E12	≥ 99,5	≤ 0,5	--- <sup>3</sup>	--- <sup>3</sup>
H13	≥ 99,95	≤ 0,05	≥ 99,75	≤ 0,25
H14	≥ 99,995	≤ 0,005	≥ 99,975	≤ 0,025
U15	≥ 99,9995	≤ 0,0005	≥ 99,9975	≤ 0,0025
U16	≥ 99,99995	≤ 0,00005	≥ 99,99975	≤ 0,00025
U17	≥ 99,999995	≤ 0,000005	≥ 99,9999	≤ 0,0001

<sup>1</sup> – Voir la norme EN 1822-4

<sup>2</sup> – Des valeurs de pénétration locales inférieures à celles indiquées dans le tableau peuvent être convenues entre le fournisseur et l’acheteur.

<sup>3</sup> – Les filtres groupe E (classes E10, E11, E12) ne peuvent et ne doivent être soumis à un essai d’étanchéité à des fins de classification.

Brown (1992) a défini l’efficacité globale du filtre en fonction des paramètres définissant le filtre suivant l’Équation 18.

$$E = 1 - \exp\left(-4 \cdot \eta \cdot \frac{\alpha}{1 - \alpha} \cdot \frac{Z}{\pi \cdot df}\right) \quad \text{Équation 18}$$

Avec  $\eta$ , l’efficacité unitaire de collection d’une fibre.

La capture des particules par les fibres entraîne une augmentation de la perte de charge du médium.

### 1.3.3. Perte de charge du médium

La perte de charge ( $\Delta P$ ) est dans ce cas la différence de pression entre l’amont et l’aval du médium (Pa).

$$\Delta P = P_{\text{amont}} - P_{\text{aval}} \quad (\text{Pa}) \quad \text{Équation 19}$$

Del Fabbro (2001) décrit l’évolution de la perte de charge des filtres plissés en trois étapes (Figure 18).

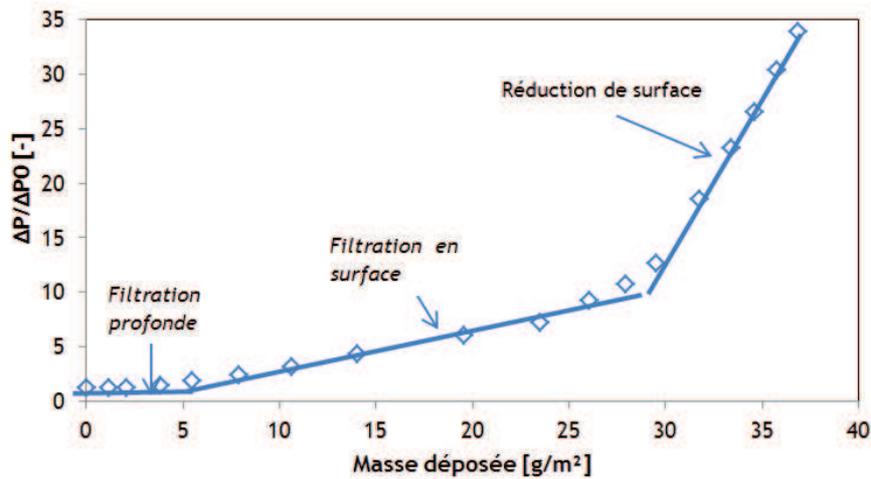


Figure 18 - Evolution de la perte de charge d'un filtre plissé (DEL FABBRO, 2001)

- une filtration en profondeur, correspondant à un dépôt des particules à l'intérieur du médium ; durant cette étape, la perte de charge du filtre évolue peu,
- une filtration en surface, relative au développement d'un gâteau de particules à la surface du médium,
- durant la troisième étape, propre au filtre plissé, une réduction de la surface de filtration par obturation des plis du médium filtrant devient très significative, ce qui entraîne une augmentation importante de la perte de charge.

Dès lors qu'il y a un dépôt en surface du filtre, le gâteau va être le principal collecteur des particules. Ce qui explique, comme illustré par la Figure 19, une diminution de la perméance avec l'augmentation de la perte de charge causée par le dépôt en surface.

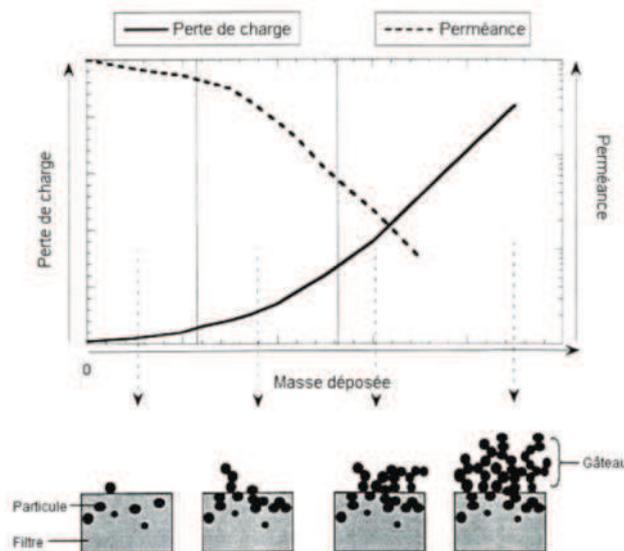


Figure 19 - Evolution de la perte de charge et de la perméance d'un filtre THE plan durant son colmatage par un aérosol solide (PENICOT-BAUGE, 1998)

Cependant il faut noter l'absence de lien réel entre la perte de charge et l'efficacité d'un filtre. Mouret (2009) s'est intéressé à la pénétration des nanoparticules lorsqu'un filtre est perforé avec des trous d'épingles de différents diamètres. Il montre une forte diminution de l'efficacité dès la présence de trous dans le filtre tandis que ces fuites ont peu d'impact sur la perte de charge du médium.

La Figure 20, met en évidence la perte de perméance sur un type de filtre suite à un trou de 1,32 et 2 mm de diamètre en fonction de la vitesse de filtration.

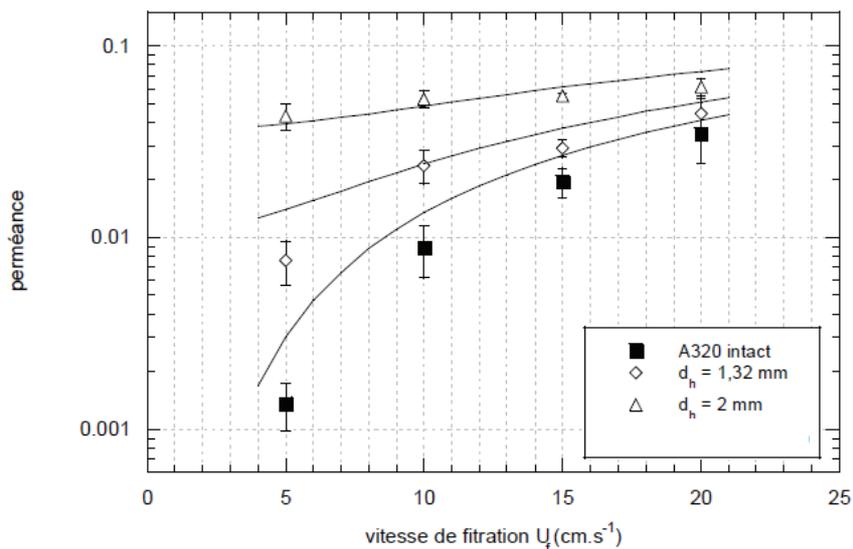


Figure 20 - Perméance d'un aérosol de cuivre globalement neutre de 6 nm au travers d'un filtre A320 en fonction de la vitesse de filtration ( $U_f$ ) et du diamètre de la perforation (MOURET, G. *et al.*, 2009)

De plus, l'effet de la variation de section du trou est d'autant plus important que la vitesse de filtration est faible. La Figure 21 représente l'évolution de la perméance en fonction du diamètre de particule pour un trou de 1,32 mm de diamètre selon 3 types de filtres.

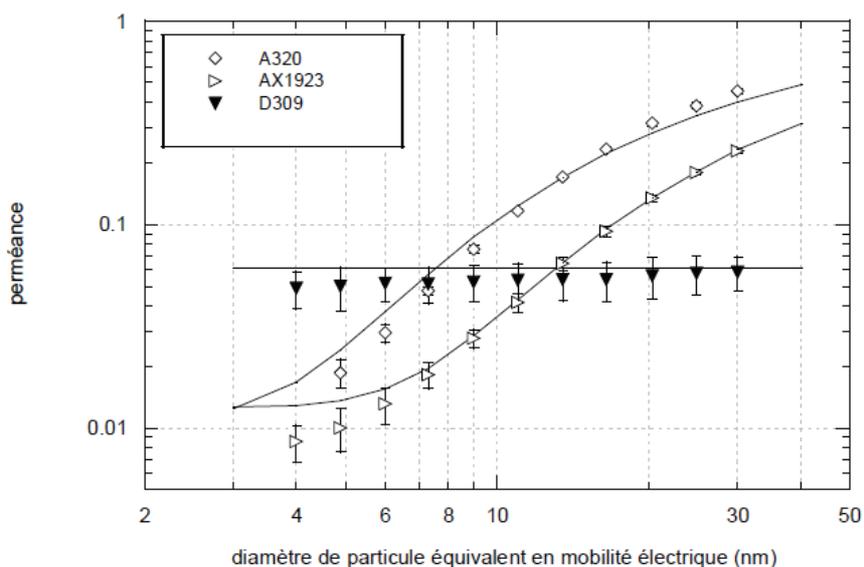


Figure 21 - Comparaison de la perméance d'un aérosol de cuivre globalement neutre au travers de chacun des trois filtres testés (perforation de 1,32 mm et  $U_f=15$  cm.s<sup>-1</sup>) (MOURET, G. *et al.*, 2009)

La perméance est d'autant plus importante que le diamètre des particules est faible.

La perte de charge du filtre permet de contrôler en temps réel l'encrassement, ou le colmatage, d'un filtre, afin de procéder à son remplacement lorsque sa perte de charge est trop importante. Cependant, la mesure de la perte de charge ne permet pas de faire un diagnostic quant à l'efficacité du filtre, laquelle n'est pas mesurée in situ en continu par l'exploitant.

### 1.3.4. Risque lié à l'impact de particules portées à hautes températures

Afin de limiter l'impact des particules incandescentes sur les filtres, des dispositifs de préfiltre et protection de type pare-étincelles sont mis en place par les exploitants. Des études portant sur l'efficacité de ce type de dispositifs de protection ont été réalisées à l'IRSN (Laborde (1996) et plus récemment Artous (2011)). Cependant, aucune étude ne s'est intéressée aux mécanismes responsables de la dégradation des filtres suite à l'impact de particules incandescentes pouvant conduire à une perte d'efficacité des systèmes de filtration.

Il existe plusieurs types de fibres de verre selon leurs compositions (INSERM, 1999). Les fibres les plus utilisées dans la filtration sont des fibres de type E dont la composition est listée dans le Tableau 11.

**Tableau 11 - Composition chimique des fibres (fraction massique) (INSERM, 1999)**

Oxyde	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	MgO	CaO	TiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	F <sub>2</sub>
E	54-55	14-15	7-8	0-0,2	0-0,6	0,3-3	18-21	0,5-0,6	0,2-0,4	0-1
Silice	99,5-100	5	7-8		0-0,5					

En l'absence d'information du fabricant, le type E est le type de fibre le plus utilisé. Les caractéristiques thermiques des fibres de verre de type E sont listées dans le Tableau 12.

**Tableau 12 - Caractéristiques thermique des fibres de verre de type E et de la silice (Textiles à usage technique)**

	Verre E	Silice
<b>Température limite d'usage (°C)</b>	- 60 à + 460	1 050
<b>Température de vitrification (°C)</b>	600	1 300 à 1 670
<b>Température de fusion (°C)</b>	1 120	2 000
<b>Conductivité thermique (W.m<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>)</b>	0,81	1,4
<b>Capacité thermique massique (kJ.kg<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>)</b>	0,84	0,96
<b>Masse volumique (kg/m<sup>3</sup>)</b>	2520 à 2630	2000 à 2730

Les températures de vitrification et de fusion sont bien inférieures à celle de la silice et sont dans la gamme de température des particules produites lors d'une opération de découpe de métal.

## 1.4. Conclusions

Ce chapitre a permis de définir les gammes des caractéristiques des particules émises, ainsi que leurs évolutions dans les conduits de ventilation afin de dimensionner l'installation expérimentale et l'instrumentation nécessaire à la caractérisation des particules.

- Les particules émises proviennent de deux sources, la pièce et l'outil, avec une répartition granulométrique qui s'étend de 0,1  $\mu\text{m}$  à 10 mm. La vitesse d'éjection est comprise entre 45 et 90 % de la vitesse périphérique de rotation du disque, quant à la température d'émission, elle peut aller jusqu'à 1000 °C.
- Les particules de diamètre inférieur à 50  $\mu\text{m}$  ont une faible inertie thermique et ne représenteront donc pas un enjeu de sûreté vis-à-vis de l'intégrité du filtre. Les particules de tailles supérieures possèdent une inertie thermique importante, couplée à une réaction d'oxydation exothermique qui peut les porter à leur température de fusion ( $T_{\text{fusion}}$  du fer = 1538 °C), et un comportement balistique inhérent à leur inertie cinétique importante.
- L'installation expérimentale représentative de chantier de démantèlement devra être composée d'un sas rigide, d'un captage à la source des particules et d'un moyen de découpe automatisée afin de contrôler les paramètres de coupes.

# Chapitre 2

## Dispositif expérimental

L'installation expérimentale dénommée « CAPIMIF » (CAractérisation des Particules Incandescentes et Mesure de l'Impact sur Filtre), a été développée dans le cadre de cette étude. Elle permet de reproduire des conditions représentatives de situations réelles de démantèlement qui ont été investiguées dans l'étude bibliographique précédente. D'autre part, des échanges avec le Centre d'Ingénierie de Déconstruction et ENvironnement (CIDEN) d'EDF nous ont permis d'optimiser le dimensionnement de cette installation afin de pouvoir réaliser des configurations de découpe de pièces métalliques telles que rencontrées lors d'essais opérationnels.

Toutefois, si les procédés mis en œuvre dans CAPIMIF lui confèrent un caractère assez appliqué et industriel, CAPIMIF doit pouvoir reproduire des essais analytiques pour lesquels les conditions initiales et limites sont bien maîtrisées et reproductibles. De plus, il est nécessaire d'implanter sur cette installation un ensemble de moyens métrologiques permettant de caractériser les particules générées par la découpe et pouvant être transportées jusqu'au système de filtration. La dégradation de celui-ci doit aussi pouvoir être quantifiée.

### 2.1. CAPIMIF

L'installation expérimentale CAPIMIF peut se décomposer en quatre parties :

- la génération des particules par un outil de découpe de type disqueuse,
- un sas de confinement,
- une conduite de ventilation équipée d'un filtre,
- un ensemble de moyens instrumentaux nécessaires pour mesurer les grandeurs physiques caractérisant les particules et pour quantifier l'endommagement du filtre.

Chacune des parties de l'installation CAPIMIF sera détaillée par la suite.

#### 2.1.1. Génération de particules incandescentes

L'étude bibliographique a montré que les caractéristiques des particules émises par une disqueuse étaient fortement dépendantes des conditions de coupe (la force d'appui, l'angle d'attaque, la vitesse de découpe, etc.). Dans le but de contrôler ces paramètres, la disqueuse choisie pour cette étude (modèle BOSCH GCO 2000 Pro) a été intégrée dans un dispositif mécanique automatisé (ce qui permet aussi d'assurer un pilotage à distance).

La disqueuse automatisée est présentée sur les photos Figure 22 et Figure 23.

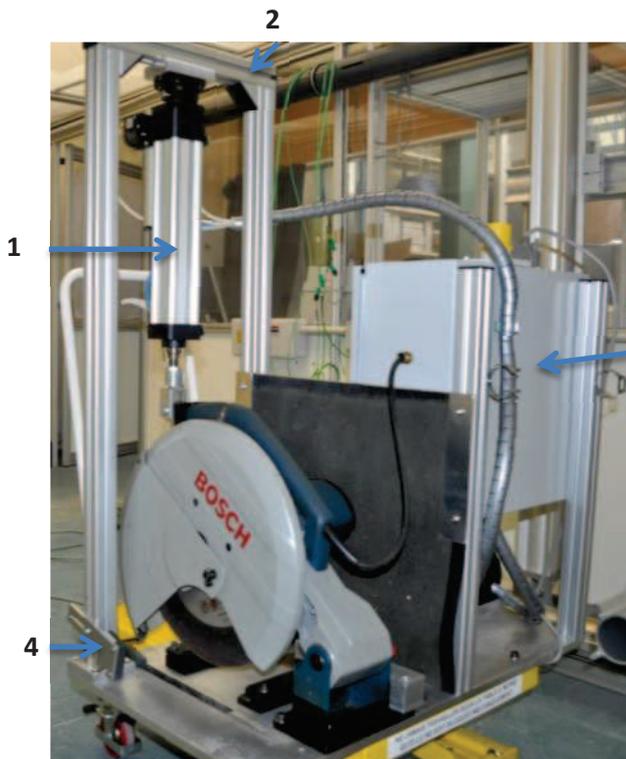


Figure 23 - Photo de la disqueuse vue de face

Le bras de la disqueuse est relié à un vérin pneumatique (1), fixé à un châssis (2) qui surplombe la disqueuse et travaille en extension. L'avance de la plaque, qui permet la réalisation de découpes successives, s'effectue à l'aide d'un vérin associé à une crémaillère (3) dont les dents sont espacés de 2 cm. Un boîtier de commande est déporté hors du sas, il permet le démarrage et l'arrêt de la disqueuse ainsi que le réglage de la force d'appui selon trois forces prédéterminées similaires aux valeurs trouvées dans la bibliographie (KACZMAREK, 2011). La vitesse de descente et le capteur de fin de course (4) peuvent être réglés manuellement au niveau de la disqueuse. Enfin, la disqueuse est placée sur un chariot élévateur (5) pour avoir plus de liberté dans son positionnement.

La force du vérin et la vitesse de descente du disque, qui sont des paramètres couplés, ont été mesurés respectivement avec une balance et une caméra rapide. La force du vérin détermine la force d'appui du disque sur la pièce et la vitesse de descente permet de déterminer le temps de découpe d'une plaque. Les résultats sont présentés dans le Tableau 13.

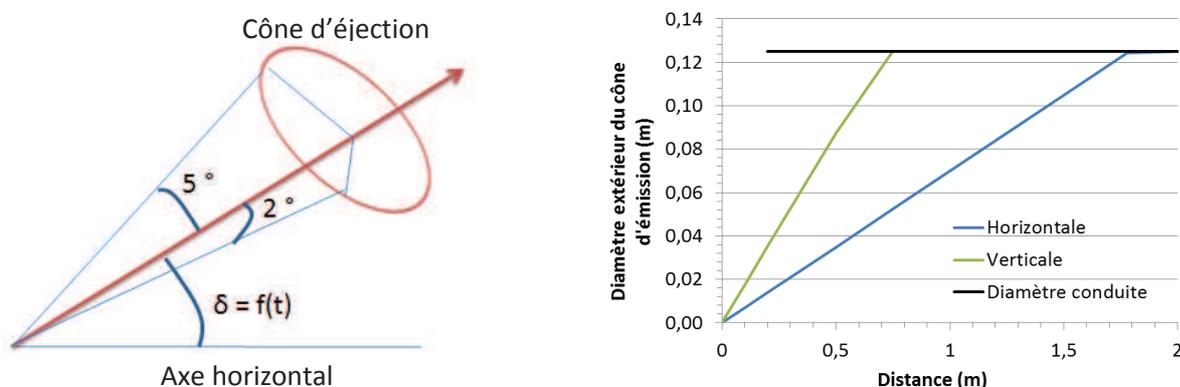
Tableau 13 - Points de fonctionnement de la disqueuse

Forces de réglage	Force d'appui attendue (N)	Force d'appui mesurée (N)	Vitesse de descente moyenne mesurée (mm.s <sup>-1</sup> )
F1	60	62	0,17
F2	70	78	0,225
F3	80	88	0,28

Pour plus de lisibilité, il a été attribué une force de réglage correspondant à un couplage des paramètres de force d'appui et de vitesse de descente du disque, que l'on peut ainsi assimiler à une configuration de découpe. Le réglage F1, correspond à la plus faible force et vitesse de descente. Cette configuration est représentative, par exemple, d'une découpe réalisée à bout de bras par un opérateur. Pour le réglage F3, la force et la vitesse de découpe sont maximales simulant une découpe pour laquelle l'opérateur peut s'appuyer plus facilement sur l'outil. Le réglage F2 est intermédiaire.

La force d'appui est réglable manuellement grâce à l'électrovanne et le distributeur pneumatique qui gèrent le vérin dans le boîtier de commande (6). La largeur du disque de 3 mm définit la largeur du trait de coupe. Les durées de chacune des phases de la séquence de découpe dépendent des forces (F1, F2, F3). Par exemple, pour une découpe d'acier inoxydable 304L avec une force F2, le temps de découpe est de 20 s (pour une épaisseur de plaque de 4,5 mm). Par la suite, nous parlerons uniquement de force d'appui pour le réglage commun de la force d'appui et de la vitesse de descente.

La gerbe d'étincelles provenant de la découpe forme une géométrie pseudo-conique qui représente l'enveloppe moyenne caractérisant l'émission des particules incandescentes. La Figure 24 représente les dimensions du cône de génération et les distances parcourues par les particules émises sur les bords du cône avant d'impacter les parois (axe du cône constant à l'horizontale).



**Figure 24 - Angles du cône d'émission et distances parcourues par les particules émises sur les bords du cône à la verticale et à l'horizontale en début de découpe jusqu'à l'impact avec la paroi du conduit**

Les angles ont été déterminés à l'aide de visualisations faites par la caméra rapide, ils sont de 4° horizontalement et 10° verticalement avec une incertitude de 0,07°. Les angles d'ouverture du cône restent quasiment constants pendant la découpe. En utilisant ces angles limites, il est possible de définir les trajectoires limites des particules dans le conduit de ventilation.

Lors de la découpe, l'expansion des particules dans le plan vertical est accentuée du fait de l'augmentation de l'angle entre l'axe du cône et l'axe horizontal ( $\delta$ ). L'évolution de l'angle  $\delta$  lors de la pénétration du

disque dans la pièce pendant une découpe a été mesurée par des visualisations avec la caméra rapide pour une vitesse de descente de  $0,4 \text{ mm.s}^{-1}$ . Elle est définie selon l'Équation 20. L'incertitude calculée est de  $0,21^\circ$ .

$$\delta = 0,6772 \cdot t + 4,7 \quad (^\circ) \quad \text{Équation 20}$$

La vitesse de rotation de la disqueuse a été déterminée à l'aide de la caméra rapide. Avec un disque de 350 mm de diamètre, la vitesse de rotation est de  $3200 \text{ tr.min}^{-1}$  (+/-  $90 \text{ tr.min}^{-1}$ ), ce qui correspond à une vitesse en périphérie du disque de  $59 \text{ m.s}^{-1}$  (+/-  $1,86 \text{ m.s}^{-1}$ ). Le diamètre minimal du disque utilisé est de 280 mm soit une vitesse périphérique de  $47 \text{ m.s}^{-1}$ .

La pièce à découper est une plaque métallique aux dimensions standardisées pour l'ensemble de cette étude :  $450 \times 190 \times 5 \text{ mm}^3$ . Il s'agit d'un acier doux ou d'un acier inoxydable (la composition des différents échantillons testés est présentée en Annexe 1). Selon Pilot (1995), l'acier inoxydable AISI 304L (selon la norme américaine ou 1,4307 (X2CrNi18-09) en norme européenne 10027) est présent en majorité dans les installations nucléaires et sera le matériau de référence de cette étude. La modification de la structure cristallographique provoquée par l'élévation de la température pendant la découpe modifie les propriétés de résistance mécanique du métal. Il convient donc de prendre en compte ce phénomène et de définir une procédure expérimentale qui permette d'assurer une bonne reproductibilité des propriétés de l'acier d'une découpe à l'autre. Ainsi, les découpes sont espacées de 2 cm et plusieurs minutes sont attendues entre chaque découpe afin que la pièce refroidisse.

L'outil est un disque de 3 mm d'épaisseur et de 350 mm de diamètre initial dont la composition indiquée selon la norme est A 36 R BF (cf. Annexe 1). Il s'agit d'un disque composé de grains d'oxyde d'aluminium et de liant en fibres de verre. La taille du grain codifiée est de 36 avec un indice de dureté R indiquant un niveau de dureté élevé recommandé pour la découpe des matériaux de faible dureté tels que les aciers doux et inoxydables.

Un bac à scories est présent au niveau de la disqueuse afin de récupérer les particules qui sédimentent à proximité de la disqueuse.

### **2.1.2. SAS de confinement**

Le sas se compose d'une paroi et d'un toit transparent schématisés en rouge sur la Figure 25 tandis que le reste des parois est assuré par les murs de la pièce (schématisés en noir).

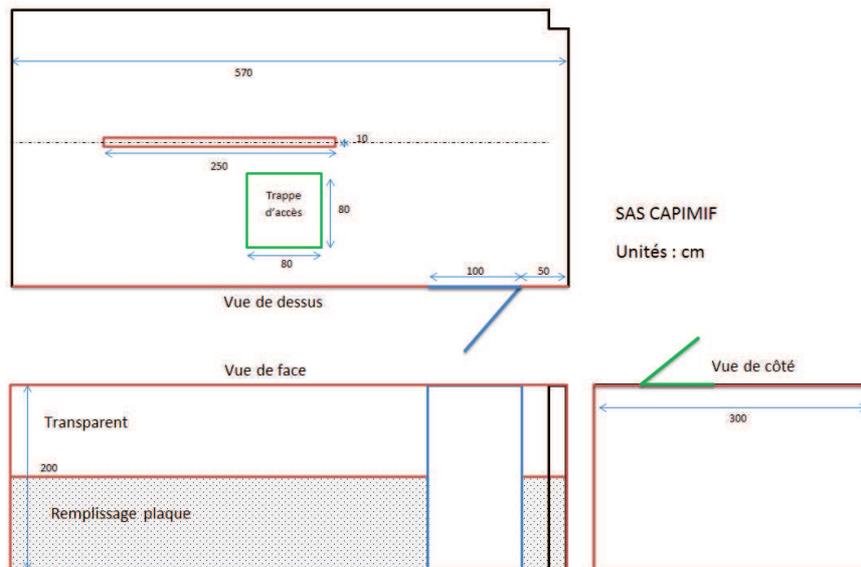


Figure 25 - Plan du sas de l'installation CAPIMIF

Le volume total du sas est de  $34,2 \text{ m}^3$ . Les cotes en bleu représentent les dimensions intérieures du sas. Les parois au-dessous de la mi-hauteur sont en plaques polycarbonate alvéolaire incolore (schématisées en grisés sur la Figure 25). Les parois au-dessus de la mi-hauteur, le toit et la porte, sont en polyméthacrylate de méthyle transparent.

Au niveau du toit une ouverture permet la translation d'un système de mesure optique PIV (technique détaillée au paragraphe 2.2.3) qui est placé à l'extérieur du sas afin d'en limiter l'encrassement par les poussières. Le sas est mis en dépression à l'aide de deux systèmes de ventilation qui sont décrits ci-après.

### 2.1.3. Systèmes de ventilation de CAPIMIF

Deux systèmes de ventilation sont mis en œuvre. Une ventilation dite « essai » pour l'aspiration des particules vers le filtre TEST et une ventilation dite « ambiante », qui permet d'épurer l'atmosphère du sas entre les essais. Les schémas d'implantation des deux ventilations sont présentés sur la Figure 26 et la Figure 27.

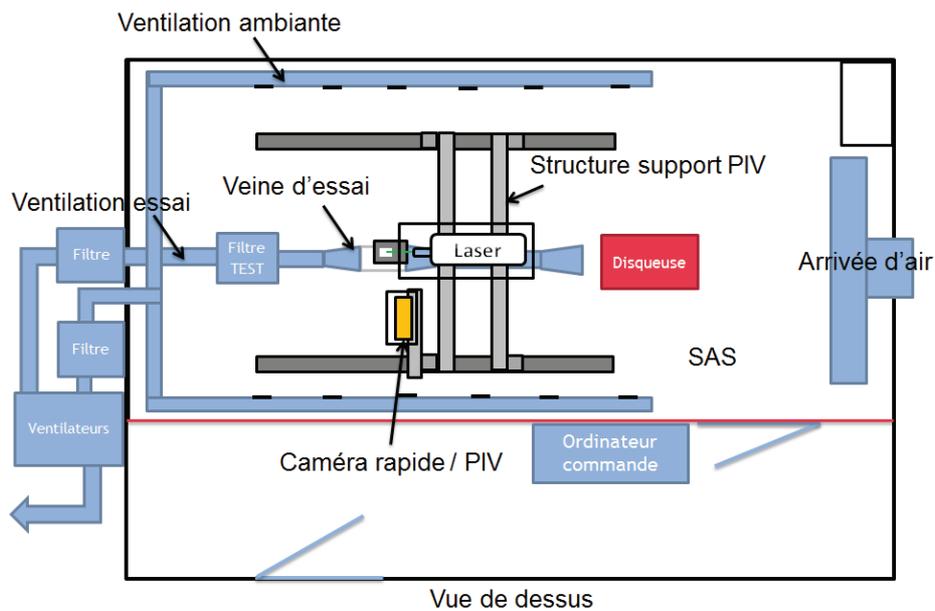


Figure 26 - Vue du dessus de l'installation CAPIMIF

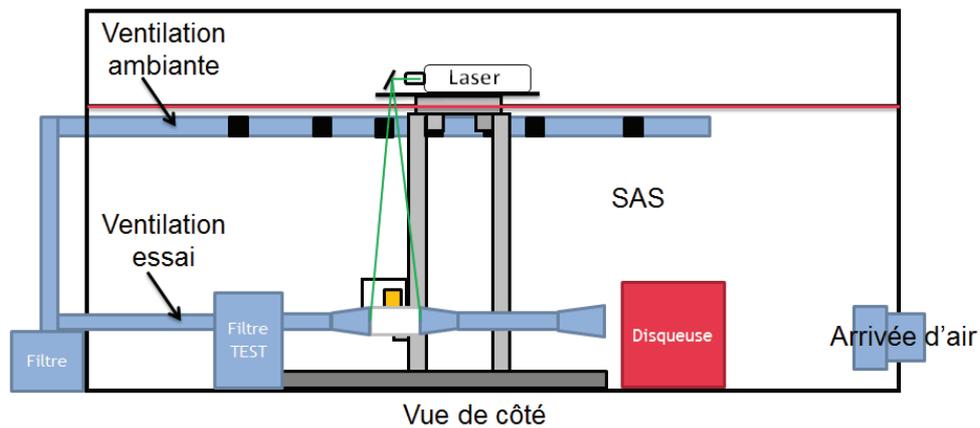


Figure 27 - Vue de côté de l'installation CAPIMIF

Le caisson de filtration utilisé pour intégrer le filtre TEST conditionne les contraintes aérauliques de CAPIMIF. Un second caisson de filtration dédié à la protection du ventilateur est implanté en aval du filtre TEST. Le filtre TEST est un filtre industriel THE à petits plis dont les caractéristiques sont listées dans le Tableau 14.

Tableau 14 - Caractéristiques des filtres industriels THE (filtre TEST)

Modèle	Dimensions (LxHxP) (mm)	Cadre	Lut	Joint	Débit nominal ( $m^3 \cdot h^{-1}$ )/ $\Delta P$ (Pa)	Type de médium plissé	Surface médium ( $m^2$ )
Polyèdre 450	600x130x202	Acier galvanisé	PVC	Néoprène	450/250	Fibre de verre	6,5

Les conduites placées en amont du filtre TEST sont en acier inoxydable de 0,125 m de diamètre. La vitesse débitante obtenue dans la conduite circulaire en amont du filtre est de  $10,2 m \cdot s^{-1}$ , ce qui est en

accord avec les recommandations d'EDF. L'écoulement est ainsi fortement turbulent avec un nombre de Reynolds de 80 000.

Le ventilateur fournit un débit nominal de filtration de  $450 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ , ce qui correspond à un taux de renouvellement du sas de  $13 \text{ h}^{-1}$ . Ce taux de renouvellement est supérieur à celui requis par la norme ( $10 \text{ h}^{-1}$ ) ce qui minimise l'empoussièrement du local et y facilite les interventions. Etant donné la faible augmentation de perte de charge des filtres liée à leur colmatage pendant la découpe, le ventilateur n'a pas été asservi à une vanne pour réguler le débit. L'opérateur règle manuellement le débit à l'aide du variateur présent dans l'installation.

Au plus près de la disqueuse est présent un convergent (cône de captage), afin d'aspirer un maximum de particules dans le conduit. Selon Dallavalle (1952), la vitesse de captage décroît très rapidement et la vitesse d'aspiration au niveau de la découpe est considérée négligeable au point d'émission des particules.

La distance entre la disqueuse et le filtre TEST, paramètre important dans cette étude, peut varier entre 0,9 et 4,5 m. Une configuration de CAPIMIF est présentée sur la Figure 28.



**Figure 28 - Photo illustrant une configuration de la conduite de ventilation et du filtre TEST sur l'installation CAPIMIF**

La ventilation ambiante a été conçue pour permettre l'intervention, dans le sas, d'un opérateur équipé d'un minimum de protection. Elle permet un taux de renouvellement d'air de  $16 \text{ h}^{-1}$ , ce qui correspond à un débit de ventilation de  $550 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ . L'air est expulsé en toiture en rejoignant le conduit d'extraction de la ventilation essai. L'extraction des ventilations essai et ambiante étant confondues, celles-ci ne peuvent pas fonctionner simultanément.

Il n'y a pas de soufflage mécanique et l'air entrant n'est pas filtré. De larges ouvertures permettent une arrivée d'air à faible vitesse, de l'ordre du  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ .

## 2.2. Instrumentation

L'instrumentation concerne les capteurs qui permettent de déterminer les paramètres aérauliques et thermiques rattachés au sas ainsi que la mesure du coefficient d'épuration des filtres réalisée ex-situ, et enfin, l'ensemble de l'instrumentation mise en place pour la caractérisation des particules en vol.

### 2.2.1. Capteurs et acquisition

CAPIMIF dispose de nombreux capteurs (Tableau 15) répartis sur l'installation.

**Tableau 15 - Détails des capteurs de l'installation CAPIMIF**

Nombre	Désignation	Gamme	Unité	Précision (%)
4	Thermocouples de type K	0 - 200	°C	1,1
4	Thermocouples de type K	0 - 900	°C	1,1
1	Perte de charge	0 - 3000	Pa	4
1	Température ambiante	0 - 50	°C	0,8
1	Hygromètre ambiant	0 - 100	%	0,8
1	Débitmètre à fil chaud	0 - 550	m <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup>	8

La perte de charge du filtre TEST est mesurée par un capteur de pression en amont et aval du filtre. Un hygromètre permet de mesurer l'humidité relative et la température ambiante tandis que des thermocouples sont positionnés à différents endroits dans l'installation. Ces thermocouples ont été testés à l'aide d'un four calibrateur (TC400 Instrutec®) et l'incertitude de mesure est de 1,1 %. Le manomètre et l'hygromètre ont été qualifiés par comparaison avec des appareils étalonnés.

Le débit de ventilation dans la conduite est mesuré à l'aide d'un débitmètre à fil chaud. Il est qualifié par comparaison avec la technique de mesure de débit volumique par traçage gazeux (NF EN ISO 16911-1 Avril 2013, précision estimée de 6 %). Il s'agit de libérer un gaz (ici de l'hélium) sous une certaine concentration, de l'ordre de quelques ppm, dans le conduit en amont du ventilateur, puis de mesurer sa concentration en aval du ventilateur. Le rapport des concentrations entre l'amont et l'aval dépend de la dilution, donc du débit d'air d'aspiration dans la conduite. La Figure 29 montre la comparaison des mesures de débit réalisées avec la technique par traçage gazeux et avec le débitmètre de l'installation.

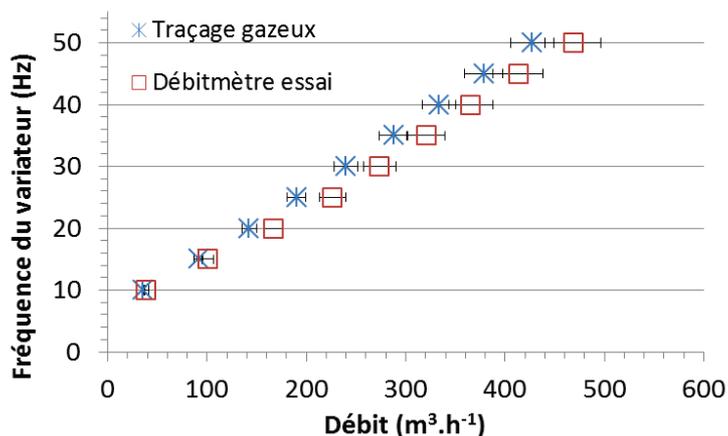


Figure 29 - Evolution du débit fournit par le ventilateur essai en fonction du réglage du variateur, mesurée par le débitmètre essai et par la technique de traçage gazeux à l'hélium

Tous les capteurs sont reliés à un ordinateur de commande présent hors du sas qui assure l'acquisition des données et leur affichage via un programme développé dans le cadre de cette étude à l'aide du logiciel TESTPOINT. L'interface affiche et trace les valeurs des capteurs en tension ou en unités SI avec les calibrations préalablement rentrées dans le programme (Figure 30).

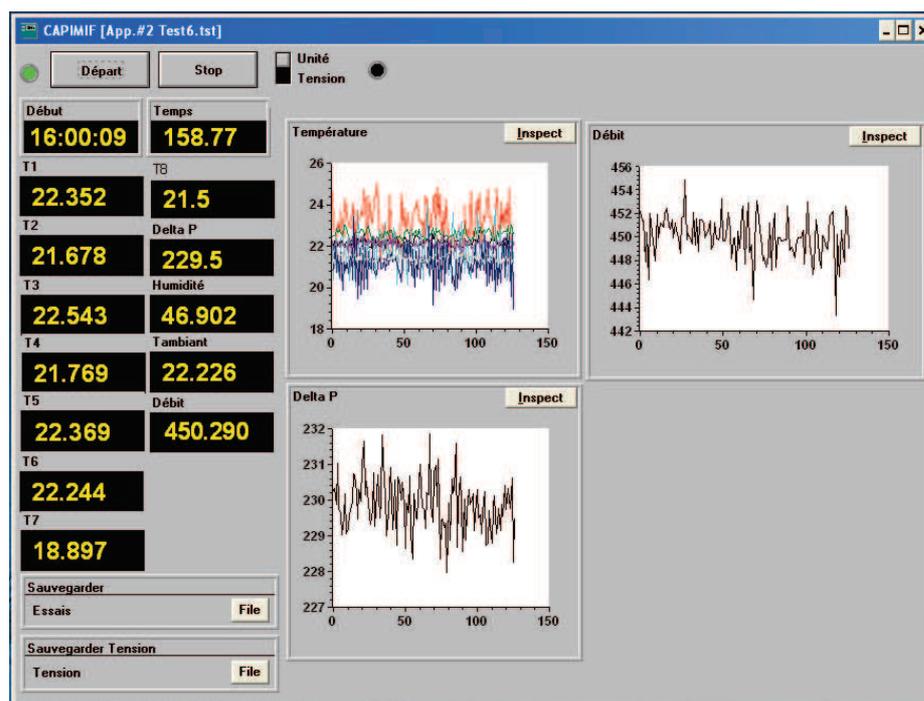


Figure 30 - Interface de l'acquisition des capteurs de l'installation CAPIMIF sur Testpoint

### 2.2.2. Mesure du coefficient d'épuration du filtre TEST

Le Coefficient d'Épuration (CE) a été défini au paragraphe 1.3.2. Selon la norme française NF-X-44-011, il consiste à faire le rapport de la concentration mesurée en amont et en aval du filtre d'un aérosol calibré d'uranine de diamètre aérodynamique médian massique de 0,18 µm.

L'IRSN dispose à Saclay d'une installation dédiée aux tests normalisés d'efficacité des filtres, usités dans le milieu nucléaire. L'installation présentée sur la Figure 31, dénommée Alizé, permet de mesurer le CE de différents types de filtres à leur débit nominal de filtration.

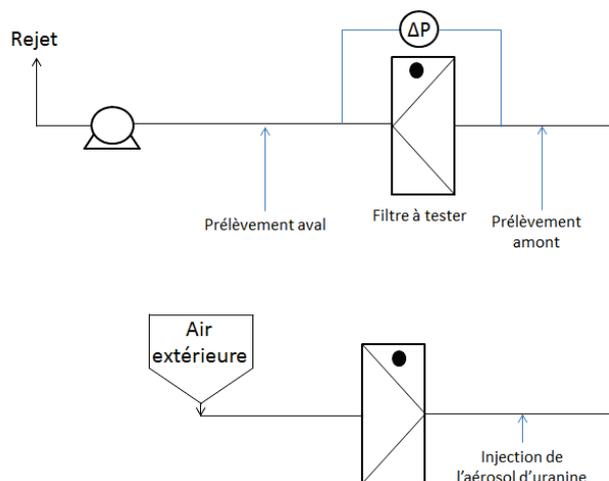


Figure 31 - Schéma de l'installation Alizé pour la mesure du CE des filtres

L'incertitude de la mesure du CE est estimée à 8 % dans notre configuration et prend en compte les incertitudes suivantes :

- le générateur d'uranine utilisé (qui est étalonné par l'IRSN sur le site de Saclay),
- l'erreur sur le débit de prélèvement,
- l'erreur sur le dosage des volumes de dilution,
- l'erreur sur la mesure du fluorimètre.

A ces erreurs de mesures, il faut ajouter l'erreur liée à la mise en place du filtre dans le caisson. Afin de quantifier l'effet de la mesure du CE sur sa valeur d'efficacité, des tests de répétabilité ont été effectués successivement sur un filtre vierge (Figure 32).

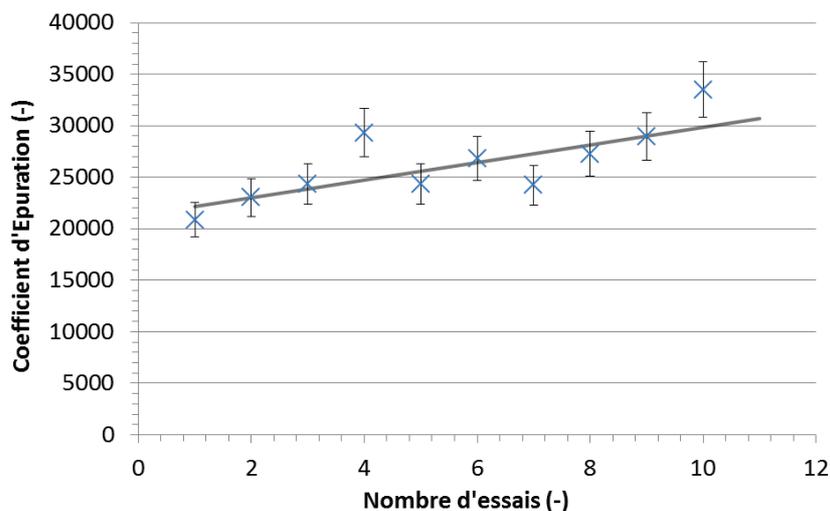


Figure 32 - Evolution du CE d'un filtre vierge soumis à onze tests d'efficacité successifs dans la boucle Alizé

Le colmatage des filtres par l'uranine entraîne une augmentation de l'efficacité qui reste dans la gamme d'incertitude de la mesure et peut donc être négligée.

Le non-respect des distances de bon mélange (ALENGRY, 2014) en amont et aval du filtre dans l'installation CAPIMIF ne permet pas la mise en place de techniques de mesure in-situ et en continu de l'efficacité du filtre (utilisation de granulomètres placés en amont et aval du filtre pour remonter à une efficacité spectrale). Ainsi, la quantification de l'efficacité du filtre par mesure de CE après essais sur CAPIMIF sera systématiquement effectuée sur l'installation Alizé.

### 2.2.3. Mesure de vitesse des particules

Les particules générées lors de l'opération de découpe sont aspirées par le cône de captage et transportées dans le conduit de ventilation suivant leurs caractéristiques. Comme il a été montré précédemment (cf. paragraphe 1.1.3), la population de particules est caractérisée par une distribution granulométrique polydispersée, ce qui engendre une dispersion importante de leurs vitesses dans la conduite de ventilation.

Des diagnostics optiques sont utilisés pour mesurer la vitesse des particules de manière non intrusive. Au point d'émission, l'aérosol est composé de particules métalliques incandescentes, qui émettent un rayonnement spontané continu dans le spectre visible, et de particules non incandescentes qui sont produites lors de l'usure de l'outil de découpe (cette hypothèse sera vérifiée par la suite). La propriété d'incandescence des particules est utilisée afin de mesurer leurs vitesses par la technique PTV (Particle Tracking Velocimetry). Cette technique est applicable compte tenu de la faible concentration particulaire. Pour les particules non incandescentes, il est nécessaire de les éclairer avec une source lumineuse. La densité particulaire étant trop faible pour utiliser la technique LDV (Laser Doppler Velocimetry), nous utilisons la technique PIV (Particle Image Velocimetry).

Le principe de mesure de ces deux techniques et leurs implantations dans notre configuration sont explicitées ci-après. Ces deux techniques non-intrusives nécessitent de pouvoir accéder à la visualisation des particules. Pour ce faire, une veine de mesure a été conçue telle que présenté sur la Figure 33.

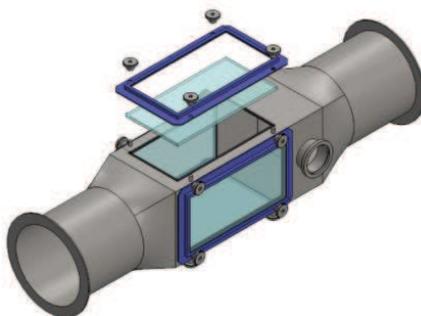


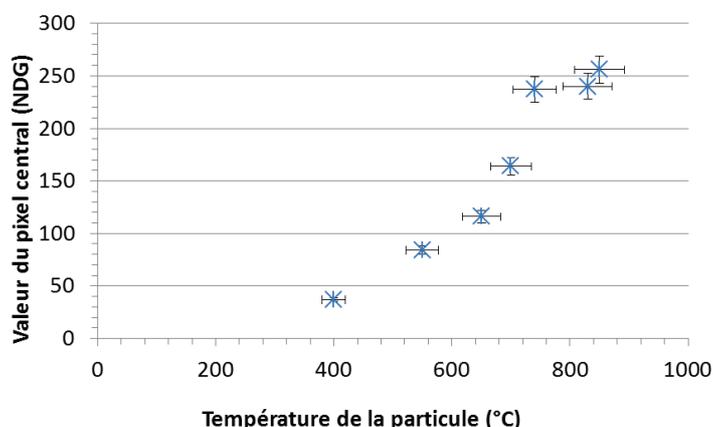
Figure 33 - Plan de la veine de mesure

Celle-ci est munie d'une section centrale rectangulaire dont les parois sont équipées de verres traités antireflet. La section rectangulaire est plus grande que la section circulaire (rapport des surfaces de 1,27), ce qui se traduit par une vitesse moyenne dans la section rectangulaire plus faible (8 contre 10,2 m.s<sup>-1</sup>). La différence de section entraîne la présence de singularités qui modifient localement l'écoulement. Ainsi, la technique PIV est également utilisée pour caractériser l'aérodynamique de la veine de mesure et quantifier l'influence de ces singularités.

#### a) Particle tracking Velocimetry (PTV)

Cette technique est basée sur l'analyse de la traînée laissée par la particule sur chacune des images acquises successivement. En effet, cette traînée représente la distance parcourue par la particule pendant le temps d'ouverture de la caméra et permet ainsi d'accéder à la vitesse moyenne de la particule incandescente.

Les particules incandescentes sont détectées par la caméra rapide dont le capteur CCD possède un seuil de détection du rayonnement lumineux. Des essais d'étalonnage ont été menés afin d'évaluer la température correspondante au début de l'incandescence des particules ; Une bille sphérique d'acier inoxydable de 5 mm de diamètre chauffée est placée dans le champ de vision de la caméra et sa température de surface est relevée à l'aide d'un thermocouple (Figure 34).



**Figure 34 - Correspondance de la valeur du pixel central représentant la particule sur la caméra rapide en fonction de la température de la particule**

La bille commence à être détectée par la caméra rapide à partir d'une température minimale de 400 °C, et une saturation du capteur CCD est observée pour une température de 850 °C. Pour l'œil humain, la température d'incandescence de ce même objet est située aux environs de 550 °C, ce qui montre une bonne sensibilité de la caméra rapide sur une plage de longueurs d'ondes dans le proche infrarouge. Ces mesures ne sont toutefois pas directement transposables aux particules qui sont plus petites (l'intensité varie en fonction du carré de la distance). Par contre, cela signifie que les particules vues par la caméra rapide ont à minima une température supérieure à 400 °C.

Dans la suite de la thèse, les mesures de vitesses des particules métalliques réalisées à l'aide de la caméra rapide, concernent donc uniquement les particules incandescentes, dont la température est supérieure à 400 °C.

La caméra utilisée est une caméra rapide IDT équipée d'un objectif de 60 mm et le champ de mesure est confondu avec les dimensions du hublot de la veine de mesure (*i.e.* 16 cm de longueur par 8 cm de hauteur). La profondeur de champ mesurée est de 15 cm, ce qui permet de visualiser les particules sur toute la profondeur de la conduite. La fréquence d'acquisition utilisée est de 150 Hz.

Cette technique possède l'avantage de pouvoir déterminer individuellement la vitesse de chaque particule incandescente. La mesure s'effectuant dans un plan vertical, la détermination de la vitesse de la particule peut être entachée d'un biais de mesure lié à sa composante radiale (dans le plan horizontal). Cependant, la génération des particules s'effectue selon un cône d'émission avec un demi-angle suivant la composante horizontale faible de 2°, ce qui entraîne un biais de mesure considéré comme faible.

Un programme de traitement d'image a été développé afin de traiter les images PTV. Il permet de calculer la vitesse et la trajectoire des particules dans le plan vertical. Des critères de sélection sont ainsi nécessaires afin de supprimer les particules parasites (chevauchement de particules/longueur des traînées). Le temps d'ouverture de la caméra est ajusté en fonction de la vitesse des particules afin de minimiser l'incertitude de mesure. De plus, les particules étant en décélération, la longueur de la traînée doit être inférieure à la moitié du champ de mesure.

#### b) Particle Image Velocimetry (PIV)

La PIV est une technique d'imagerie utilisée pour caractériser des champs de vitesse dans les écoulements (ADRIAN, R.J., 1986 et WILLERT, C.E., GHARIB, M., 1991). L'écoulement estensemencé par des particules dont la taille doit être idéalement choisie : des particules trop petites ne seront pas visibles car elles diffusent trop peu de lumière, et des particules trop grosses ne suivront pas les fluctuations de l'écoulement gazeux du fait de leur inertie. Les particules ensemencant cet écoulement sont éclairées par une nappe laser générée par un laser pulsé synchronisé avec une caméra CCD qui permet l'acquisition de deux images successives séparées temporellement par un délai fixé par l'expérimentateur. Les deux images sont ensuite divisées en petites surfaces (zones d'interrogation) qui sont corrélées entre elles d'une image à l'autre de manière à identifier le déplacement moyen des particules.

L'article de Willert (1991) décrit la technique de PIV. La première étape est la division des deux images en zones appelées zones multiples d'interrogation. A partir de chaque zone d'interrogation est calculé un vecteur vitesse. Un traitement par transformée de Fourier est appliqué à l'ensemble des zones définies sur chaque couple d'images. Les deux objets sont corrélés et le produit obtenu est soumis à une transformée de

Fourier inverse. Cette transformée inverse permet de déterminer un pic de corrélation qui correspond au déplacement moyen des particules entre les deux images dans la zone d'interrogation considérée. Connaissant le déplacement moyen (déterminé en pixels puis transformé après calibration en une longueur physique) et le temps entre les deux pulses du laser, le vecteur vitesse associé à la zone d'interrogation est calculé. Ces opérations sont répétées pour chacune des zones.

Dans notre configuration, 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 Neo (DANTEC®), dont la matrice CCD est constituée de 2560x2160 pixels mesurant 3,2  $\mu\text{m}$  de côté. Le laser est situé hors du sas afin d'éviter l'encrassement des composants optiques. Le plan laser éclaire la conduite par le haut et la lumière diffusée par les particules est récupérée par une caméra placée à 90°. Le schéma du dispositif a été présenté sur les Figure 26 et Figure 27.

La première utilisation de la PIV concerne la caractérisation aéraulique de la veine de mesure selon le dispositif de la Figure 27. L'ensemencement a été effectué avec des gouttes de Di-Ethyl-Hexyl-Sebacat (DEHS) générées à l'aide d'un six-jet atomiser (TSI-9306®).

Le profil de vitesse obtenu dans la veine pour un débit de  $550 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  est présenté sur la Figure 35.

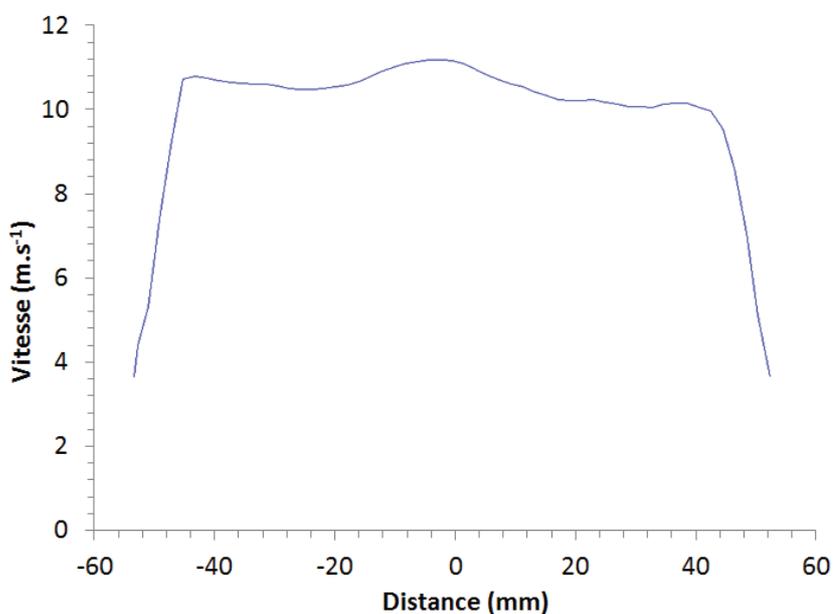


Figure 35 - Visualisation du profil de vitesse du fluide dans la veine de mesure réalisée par PIV

Conformément à nos attentes, le profil est celui d'un écoulement turbulent, avec une vitesse maximale égale à 1,12 fois la vitesse moyenne. Aucune dissymétrie significative de l'écoulement n'a été observée.

Pour l'utilisation de la technique PIV sur les particules générées par la disqueuse, le principe diffère des cas classiques de mise en œuvre de cette technique. Il ne s'agit pas de mesurer la vitesse d'un fluide

ensemencé de manière homogène avec des particules ayant une distribution granulométrique bien centrée, mais de caractériser la vitesse de particules polydispersées dont le comportement ne peut pas être forcément assimilé à celui du gaz porteur. De plus, la densité de particules reste encore relativement faible comparativement à un ensemencement adapté à la PIV.

Afin de s'affranchir de l'émission spontanée des particules, un filtre interférentiel centré sur la longueur d'onde du laser (532 nm) est mis en place sur la caméra. Un exemple de couple d'image (Frame 1 et Frame 2) acquis par la PIV est présenté sur la Figure 36.

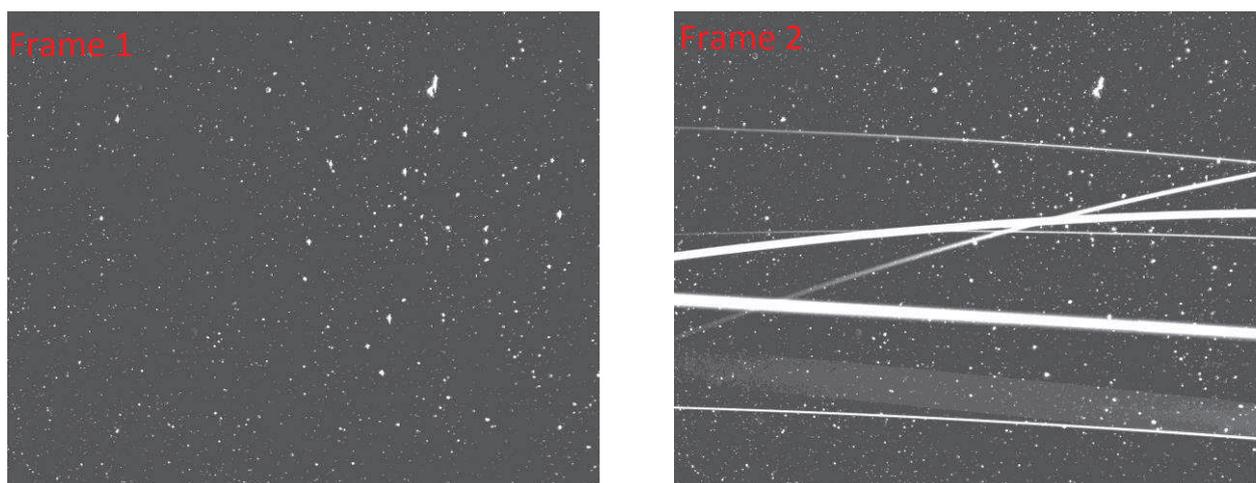


Figure 36 - Frame 1 et 2 d'un couple d'images PIV acquis dans la gerbe d'étincelles

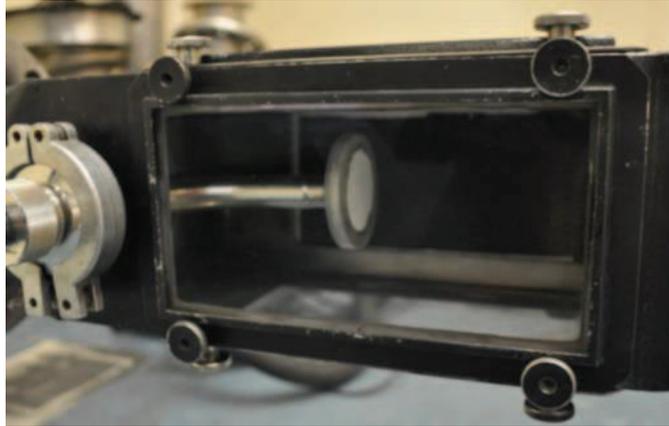
Malgré la présence du filtre interférentiel, des traînées de particules incandescentes apparaissent sur la seconde image PIV dont le temps d'exposition est supérieur à celui de la première image. Les traînées des particules peuvent être éliminées par traitement d'image, par l'utilisation de masques, qui permettent au calcul des champs PIV de s'effectuer sur les zones non masquées.

#### 2.2.4. Mesure de la granulométrie des particules

La gamme de taille de l'aérosol s'étend de 0,1  $\mu\text{m}$  à 10 mm (*cf.* paragraphe 1.1.3). Il est donc nécessaire d'utiliser différents moyens de mesure pour couvrir l'ensemble de cette gamme.

Un Aerodynamic Particle Sizer (APS, TSI-3321<sup>®</sup>) a été utilisé pour des particules de diamètre aérodynamique compris entre 0,5 et 20  $\mu\text{m}$  avec une résolution 0,39  $\mu\text{m}$ .

Pour les particules de diamètre supérieur à 20  $\mu\text{m}$ , des techniques de prélèvement sur un substrat sont mises en œuvre combinées à une analyse par microscope. Ces particules ne suivent pas les lignes de courant (*cf.* paragraphe 1.2.1), et le mécanisme prépondérant de capture est l'impaction. Le prélèvement est ainsi réalisé par obstacle au centre de la veine de mesure (Figure 37). La répartition spatiale de la gerbe d'étincelles est considérée homogène (*cf.* Annexe 6).



**Figure 37 - Photo du dispositif de prélèvement par impact à l'aide d'un filtre en fibre de verre de 47 mm de diamètre placé au centre de la veine de mesure**

Le diamètre limite des particules pouvant impacter le prélèvement est déterminé grâce au nombre de Stokes, en utilisant une surface de prélèvement circulaire de 47 mm de diamètre dans un conduit de section carrée de 0,125 m de côté et en considérant des particules sphériques de fer. Le diamètre de coupure du système de prélèvement est donc évalué à 5  $\mu\text{m}$ , mais ces particules sont mesurées à l'aide de l'APS.

Lorsqu'une particule impacte le prélèvement, 4 cas sont possibles :

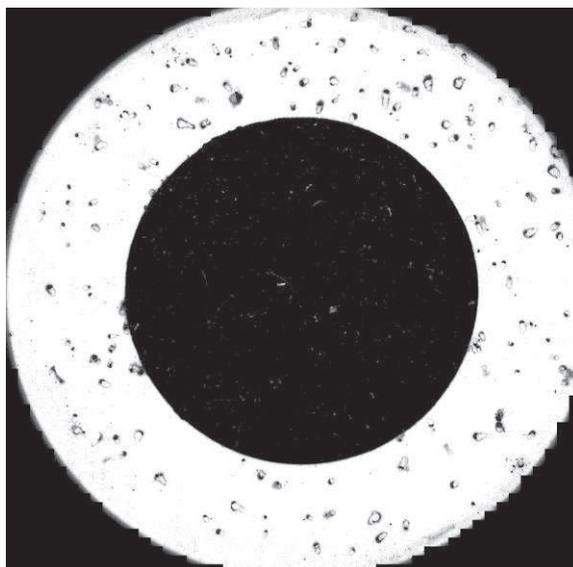
- (1) une particule solide peut rebondir sur le substrat, il est ainsi préférable d'avoir un substrat adhésif,
- (2) une particule solide peut se déposer sur le substrat,
- (3) une particule de métal liquide peut se fractionner ou s'étaler sur le substrat,
- (4) une particule peut perforer et traverser le substrat.

Les cas (3) et (4) peuvent conduire à un biais dans la mesure de la granulométrie des particules à partir de cette technique de prélèvement.

D'après ces considérations, une méthode de prélèvement avec un ruban adhésif (scotch carbone) est possible mais induit une saturation très rapide du prélèvement, ce qui ne permet pas d'analyser l'ensemble des particules prélevées sur une découpe complète. Le protocole entrepris consiste à échantillonner une découpe par pas de temps de 3 s. Cette mesure nécessite alors deux opérateurs. Un opérateur gère le contrôle commande de la disqueuse ainsi que de l'instrumentation. Un second opérateur présent à proximité de la gerbe d'étincelles, obstrue le passage des particules avec une plaque d'aluminium afin de ne laisser passer les particules que pendant une durée de 3 s, ceci à différents moments de la découpe. Cette approche est valable uniquement si les découpes sont reproductibles (cf. paragraphe 4.2.3). Enfin, le prélèvement est saturé immédiatement lorsque celui-ci est réalisé à moins de 1,5 m du point d'émission des particules.

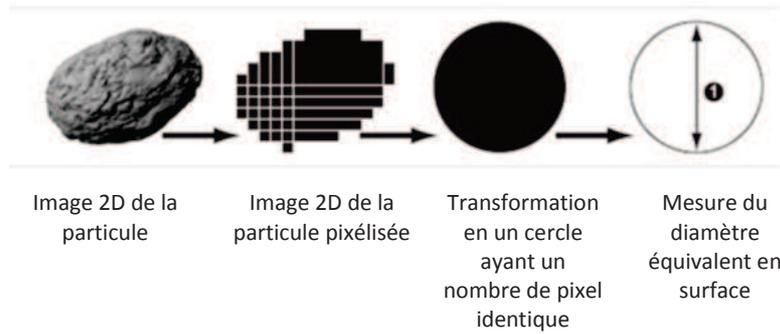
Le prélèvement sur scotch est un système adapté aux particules solides. En revanche, des particules liquides peuvent se fragmenter lors de l'impact rendant l'interprétation des mesures impossibles. Ainsi, un prélèvement sur filtre en fibres de verre permet de capter les particules de métal liquide et les particules ayant une température suffisante pour déformer localement le médium et y être piégée (voir paragraphe 5.2.5). Le second avantage d'utiliser des filtres de prélèvement est d'observer l'effet de l'impact de ces particules sur un médium composé de fibres de verre, similaire aux filtres industriels (propriété utilisée Annexe 7).

Pour comparer les deux types de méthodes, un système de prélèvement mixte composé d'un scotch carbone de 25 mm de diamètre et d'un filtre de 47 mm de diamètre a été mis en œuvre sur CAPIMIF durant une découpe d'une durée de 3 s, ceci à une distance de 258 cm de l'émission. La Figure 38 montre une photo faite au microscope du prélèvement après l'essai. La surface des deux prélèvements n'étant pas identique, un facteur correcteur est utilisé.



**Figure 38 - Photo du prélèvement à double substrat (scotch carbone - filtre) après 3 s de découpe**

Afin de mesurer la taille de particules prélevées à l'aide des deux méthodes, les prélèvements sont analysés au microscope optique Morphologi G3S de la société MALVERN®. Le système optique est un système Nikon® CFI 60 Brightfield/Darkfield. La caméra CCD utilisée possède 5 MegaPixel (2592 × 1944) et chaque pixel a une taille de 2,78  $\mu\text{m}$  × 2,78  $\mu\text{m}$ . Le Morphologi, équipé d'un objectif x2.5, a une plage de validité définie par le constructeur pour des particules de 13 à 1000  $\mu\text{m}$ , l'incertitude de la mesure étant de 0,2  $\mu\text{m}$ . Le Morphologi mesure une taille de diamètre équivalent en surface projetée, dont le principe est présenté sur la Figure 39.

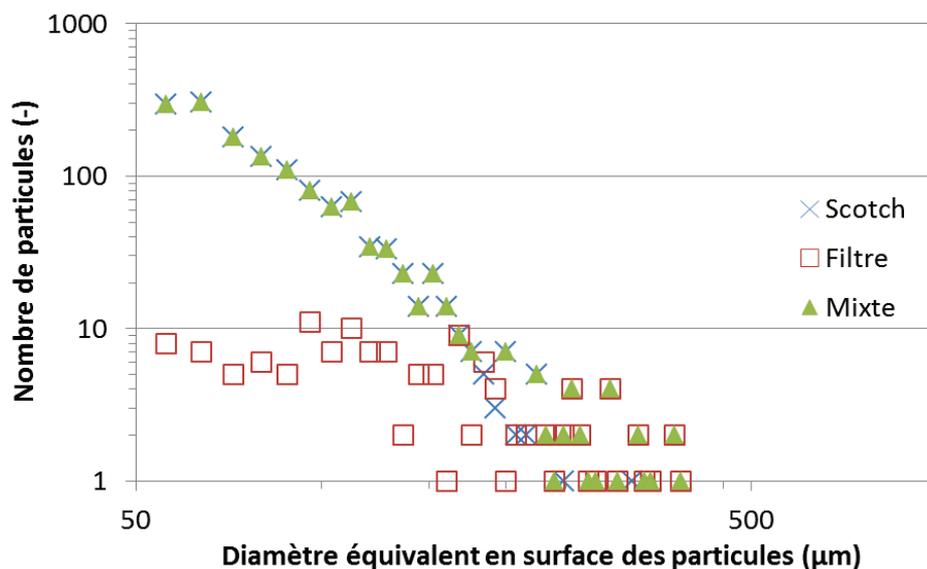


**Figure 39 - Principe de mesure du diamètre équivalent en surface du Morphologi**

En faisant l'hypothèse d'une particule non poreuse, symétrique par rapport à la surface observée et de composition homogène, nous pouvons calculer un diamètre aérodynamique de la particule.

L'avantage du Morphologi réside dans l'automatisation de l'acquisition et du traitement. Il peut scanner une zone prédéfinie d'un échantillon et y caractériser toutes les particules en termes de diamètre de surface, coefficient de circularité, périmètre, élongation, etc. Afin de minimiser les erreurs dues au recouvrement des images des particules, un filtrage manuel est réalisé et jusqu'à 10 % des particules peuvent être éliminées. La résolution fiable du Morphologi est fixée à un minimum de 50  $\mu\text{m}$ , car les particules de diamètres inférieurs à 50  $\mu\text{m}$  ne représentent pas un enjeu important du fait de la faible inertie thermique de ces particules.

A titre d'exemple, la Figure 40 présente les résultats de l'analyse de la Figure 38 avec le microscope Morphologi.



**Figure 40 - Répartition granulométrique en nombre de particules mesurées par le microscope Morphologi sur deux types de substrat : scotch carbone et filtre en fibre de verre, dont la réunion (Mixte) permet de définir la granulométrie de l'aérosol, à 258 cm de la génération**

Pour cet essai à 258 cm de l'émission, il existe un seuil (170  $\mu\text{m}$ ) pour lequel, le prélèvement sur filtre sous-estime, et au-dessus duquel, le prélèvement sur scotch sous-estime, le nombre de particules. Le

nombre de particules représentatif de notre aérosol est ainsi issu d'une complémentarité de ces deux types de prélèvements (« Mixte »), dont le seuil est dépendant de la distance à l'émission.

Le Microscope Electronique à Balayage (MEB) a été utilisé pour la caractérisation morphologique des particules et la compréhension des phénomènes physiques de l'interaction filtre/particule. Le MEB est équipé d'une colonne avec un filament de tungstène porté à haute température afin d'émettre un faisceau d'électrons qui est envoyé sur l'échantillon. L'interaction entre les électrons et l'échantillon génère des électrons secondaires, de basse énergie qui sont accélérés vers un détecteur d'électrons secondaires qui amplifie le signal. L'intensité de ce signal électrique dépend à la fois de la nature de l'échantillon au point d'impact qui détermine le rendement en électrons secondaires et de la topographie de l'échantillon au point considéré. Il est ainsi possible, en balayant le faisceau sur l'échantillon, d'obtenir une cartographie de la zone balayée ainsi qu'une analyse chimique de la surface de l'échantillon (Energy Dispersive X-Ray Spectrometer (EDS)). L'analyse EDS n'est que purement qualitative en l'absence d'échantillon étalon du matériau. De plus, l'analyse EDS ne permet pas d'identifier les éléments légers tels que l'oxygène. Donc il n'est pas possible de conclure quant à l'oxydation des particules.

Le MEB utilisé est un JEOL-JSM-6010 LA environnemental qui fonctionne pour tout type d'échantillon en vide partiel. Afin d'améliorer le signal en diminuant l'absorption des électrons par l'atmosphère, il est préférable d'utiliser le MEB en vide poussé. L'échantillon reçoit alors plus d'électrons et il est nécessaire d'augmenter sa conductivité en surface en procédant à la métallisation afin qu'il n'y ait pas d'accumulation de charges au sein de l'échantillon. Cela revient à déposer en surface de l'échantillon une fine couche de matériau conducteur. Ainsi, certains échantillons ont été métallisés au couple or-palladium (Au-Pd).

### **2.3. Conclusions**

Ce chapitre a permis de présenter l'installation expérimentale CAPIMIF ainsi que l'instrumentation nécessaire à la caractérisation des particules en vol en termes de vitesse, taille et morphologie.

- CAPIMIF est composée d'un sas de confinement rigide dans lequel une disqueuse automatisée réalise des découpes de différents aciers. Un cône de captage placé au plus près de la disqueuse guide les particules vers le caisson de filtration contenant le filtre industriel THE. La distance maximale entre la découpe et le filtre est de 4,5 m.
- La vitesse des particules incandescentes ( $T > 400\text{ °C}$ ) est obtenue à l'aide de la technique PTV. La vitesse des particules non-incandescentes est obtenue à l'aide de la technique PIV.
- La caractérisation granulométrique des particules dont le diamètre est supérieur à  $50\text{ }\mu\text{m}$  est obtenue par l'analyse complémentaire de deux méthodes de prélèvements. Des prélèvements sur scotch carbone adaptés aux particules solides et des prélèvements sur des médias plans en

fibre de verre, adaptés aux particules liquides. Les prélèvements sur des médias plans permettent de caractériser la morphologie et la taille de la particule, ainsi que de quantifier son impact sur le médium en termes de dégradation.

- La composition chimique de l'échantillon prélevé est analysée par méthode EDS.

## Chapitre 3

# Développement et qualification de la mesure en vol de la température de particules métalliques

Des développements métrologiques ont été entrepris pour mesurer en vol la température de particules, notamment dans le domaine de la projection plasma pour la réalisation de dépôt de couches minces (CETEGEN, B.M., YU, W. 1999 et FINCKE, J.R. *et al.*, 2001, et GOUTIER, S. *et al.*, 2008). Les dispositifs sont cependant peu nombreux pour une gamme de températures correspondant à notre étude (200 à 1500°C).

Les appareils optiques mesurent une luminance, représentant le flux radiatif émis par un corps, et en déduisent une température de surface. L'inversion du signal correspondant au flux radiatif émis permet d'accéder à la température, est une des difficultés de la méthode. Le détail du principe de la mesure de la luminance et de son inversion sont en premier lieu présentés. Ensuite, nous ferons un bilan de l'état de l'art sur les différents moyens de diagnostics couramment utilisés tels que les pyromètres ou les caméras rapides. Enfin nous détaillerons le type d'instrumentation retenue pour mesurer la température des particules dans l'installation CAPIMIF et nous exposerons les développements entrepris pour adapter et qualifier cette instrumentation vis-à-vis de nos conditions expérimentales.

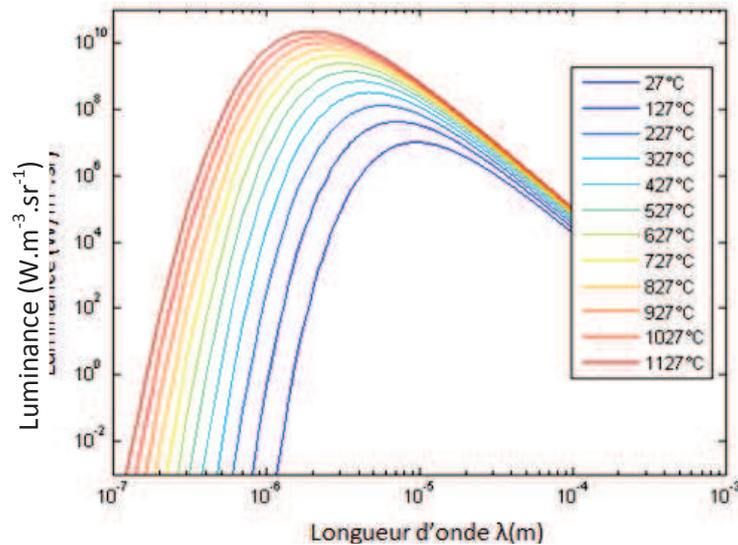
### 3.1. Principe de la mesure de luminance

De par l'agitation moléculaire, tout corps dont la température est supérieure au zéro absolu émet un rayonnement électromagnétique. La mesure de ce rayonnement permet d'obtenir de manière non intrusive la température du corps en utilisant la loi de Planck (ZHANG, Z.M. *et al.* 2010). A partir de l'énergie émise par un photon et de la statistique quantique, Planck (1906) a défini la luminance spectrale ( $L_{b,\lambda}$ ) émise par un corps noir dans le vide (Équation 21).

$$L_{b,\lambda} = \frac{C_{1,\lambda}}{\lambda^5 \cdot \left[ \exp\left(\frac{C_2}{\lambda \cdot T}\right) - 1 \right]} \quad (\text{W.m}^{-3}.\text{sr}^{-1}) \quad \text{Équation 21}$$

La luminance spectrale d'un corps noir dans le vide est fonction des deux constantes du rayonnement ( $C_{1,\lambda}$  et  $C_2$ ), de la température de l'échantillon ( $T$ ) et de la longueur d'onde de mesure ( $\lambda$ ).

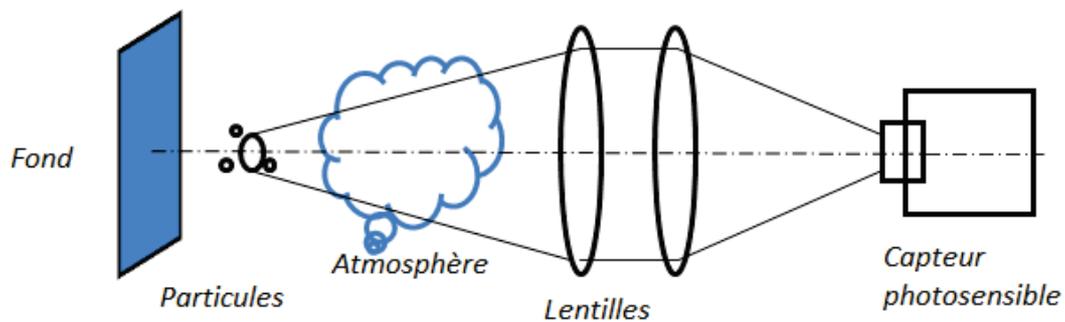
La loi de Planck, exprimant la luminance d'un corps noir dans le vide en fonction de la longueur d'onde, est tracée sur la Figure 41 pour différentes températures allant de 27 à 1127 °C.



**Figure 41 - Luminance d'un corps noir en fonction de la longueur d'onde selon la loi de Planck à différentes températures**

L'augmentation de la température translate le maximum de luminance vers les faibles longueurs d'ondes. Pour minimiser l'incertitude de mesure, il est préférable de travailler avec une longueur d'onde proche du maximum de luminance.

Le principe générique de la mesure de luminance est présenté sur la Figure 42.



**Figure 42 - Schéma de principe de la mesure de luminance**

La luminance reçue par le détecteur photosensible provient des particules, du fond et de l'atmosphère. Dans cette configuration, la luminance peut alors s'exprimer à l'aide de l'Équation 22.

$$L_{\lambda}(\lambda) = \tau_{env}(\lambda, T_{env}) \cdot [L_p(\lambda, T_p) + L_f(\lambda, T_f) + L_r(\lambda)] + L_{em}(\lambda, T_{env}) \quad \text{Équation 22}$$

Avec :

- $\tau_{env}$ , le coefficient de transmission de l'atmosphère,
- $L_p$ , 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,
- $L_{em}$ , l'émission de l'atmosphère.

L'atmosphère absorbe et émet des rayonnements. Dans l'installation CAPIMIF, une augmentation de la température de l'air est relevée au centre de la conduite pendant une découpe, mais reste très inférieure à la température des particules, ce qui permet d'en négliger le rayonnement. Quant à l'absorption, son influence peut être limitée en utilisant des bandes de longueurs d'ondes préférentielles. Sur la Figure 43 est tracé le pourcentage du rayonnement transmis (transmission en %) dans l'atmosphère, ainsi que les zones d'absorption des différentes molécules de l'air en fonction de la longueur d'onde.

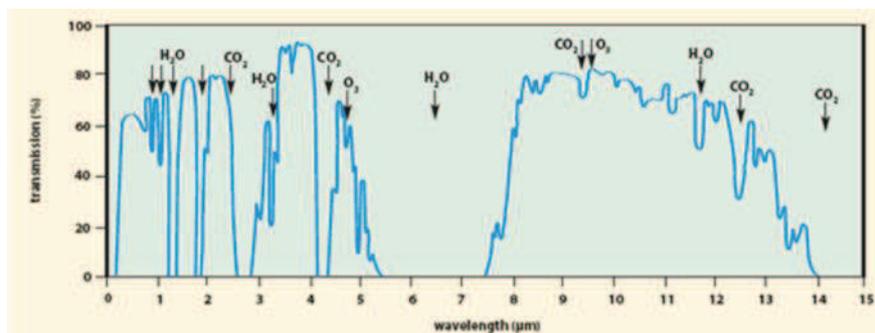


Figure 43 - Coefficient de transmission de l'atmosphère en fonction de la longueur d'onde et indication des zones d'absorption de certaines molécules de l'atmosphère (MEASURE, 1984)

Les composés bi-atomiques présents dans l'atmosphère sont peu absorbants dans l'infrarouge tandis que les composés tri-atomiques absorbent davantage mais sont présents en quantités très faibles (< 1 %).

La température des parois de la conduite de ventilation est mesurée à l'aide de thermocouples. Sur la paroi interne supérieure du cône de captage, qui correspond à la première zone d'impact d'un grand nombre de particules incandescentes, une élévation de la température a été observée (jusqu'à 45 °C) mais reste toutefois limitée. Sur tout le reste de la conduite, la température des parois varie très peu pendant les découpes. Nous négligeons donc le rayonnement des parois. De même, la réflexion du rayonnement des particules sur les parois n'est pas prise en compte.

En reprenant l'expression de la mesure de la luminance (Équation 22) et en appliquant les hypothèses listées ci-dessus, nous obtenons une simplification de l'expression de la luminance (Équation 23).

$$L_{\lambda}(\lambda) = \tau_{env}(\lambda, T_{env}) \cdot [L_p(\lambda, T_p)] \quad (\text{W.m}^{-3}.\text{sr}^{-1}) \quad \text{Équation 23}$$

La luminance reçue par le capteur est ainsi égale à la luminance émise par l'ensemble des particules au coefficient de transfert dans l'atmosphère près.

Un corps noir est un corps idéal qui absorbe et émet tous les rayonnements incidents quelle que soit sa température. En réalité, un corps émet moins d'énergie, il est limité par le terme d'émissivité, explicité par l'Équation 24.

$$\varepsilon = \frac{\text{La luminance émise par un corps à la température } T}{\text{La luminance émise par un corps noir à la même température } T} \quad \text{Équation 24}$$

L'émissivité est comprise entre 0 et 1. C'est le paramètre déterminant et intrinsèque de la mesure de la température par technique infrarouge. Il dépend de nombreux paramètres, comme la longueur d'onde de mesure, le matériau, la direction d'observation, l'état de surface, la température, etc. Pour aborder le problème lié à la détermination de la valeur de l'émissivité, il existe trois approches. La première consiste à effectuer une mesure de la luminance spectrale à deux longueurs d'ondes proches. C'est la méthode utilisée par les pyromètres bi-chromatiques. Les deux longueurs doivent être relativement proches afin de faire l'approximation du corps gris, *i.e.* où l'émissivité est indépendante de la longueur d'onde de mesure. Le rapport des luminances mesurées permet ainsi de simplifier le terme d'émissivité ce qui présente également l'avantage de limiter l'incertitude liée aux atténuations potentielles induites sur le chemin optique par le milieu ambiant. La deuxième approche consiste à limiter l'influence de l'émissivité, en augmentant artificiellement sa valeur. En effet, Zahang (2010) montre que l'incertitude sur la mesure de température est plus faible pour les fortes valeurs d'émissivité. Enfin, la troisième approche consiste à déterminer expérimentalement la valeur d'émissivité. Certains matériaux, comme le tungstène, sont très étudiés dans la littérature et il existe des abaques qui fournissent l'évolution des valeurs d'émissivité en fonction de la longueur d'onde et de la température.

Kruczeck (2001) a réalisé des études sur l'émissivité d'un acier dont les spécifications ne sont pas clairement identifiées. L'échantillon d'acier est chauffé à près de 800 °C dans un four. La différence entre la température pyrométrique, obtenue à différentes longueurs d'ondes, et la température obtenue à l'aide d'un thermocouple placé sur l'échantillon d'acier permet d'estimer le paramètre d'émissivité. Le suivi de l'émissivité est ainsi tracé pendant la période d'élévation puis de diminution de la température de l'échantillon sur la Figure 44.

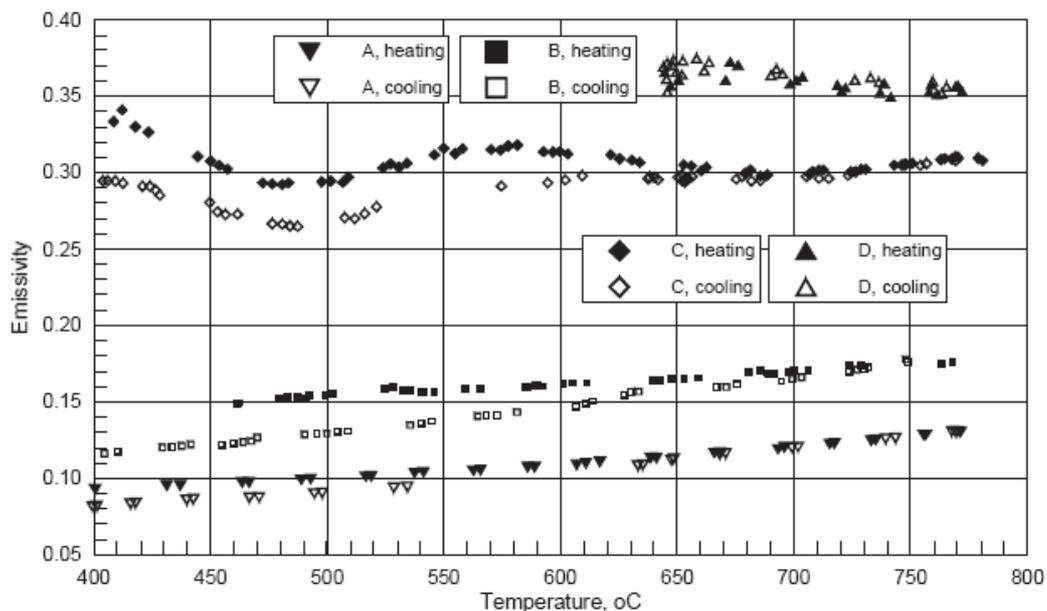


Figure 44 - Evolution de l'émissivité d'un acier en fonction de la température à différentes longueurs d'ondes, A=11 µm, B=5,1 µm, C=1,6 µm, D=1 µm (KRUCZECK, T. *et al.*, 2001)

Il est mis en évidence sur la Figure 44, que plus la longueur d'onde de mesure est faible, plus la valeur d'émissivité est importante. Une évolution linéaire croissante de l'émissivité est observée en lien avec l'augmentation de la température pour une longueur d'onde de mesure supérieure à 5,1  $\mu\text{m}$ . L'évolution de l'émissivité avec l'augmentation de la température pour les longueurs d'ondes inférieures à 5,1  $\mu\text{m}$  est variable (diminue globalement entre 400 et 800 °C). D'après ces résultats, les auteurs ont défini une relation sous forme polynomiale exprimant l'émissivité en fonction de la température.

Nous allons maintenant nous intéresser aux différents dispositifs de mesure de luminance.

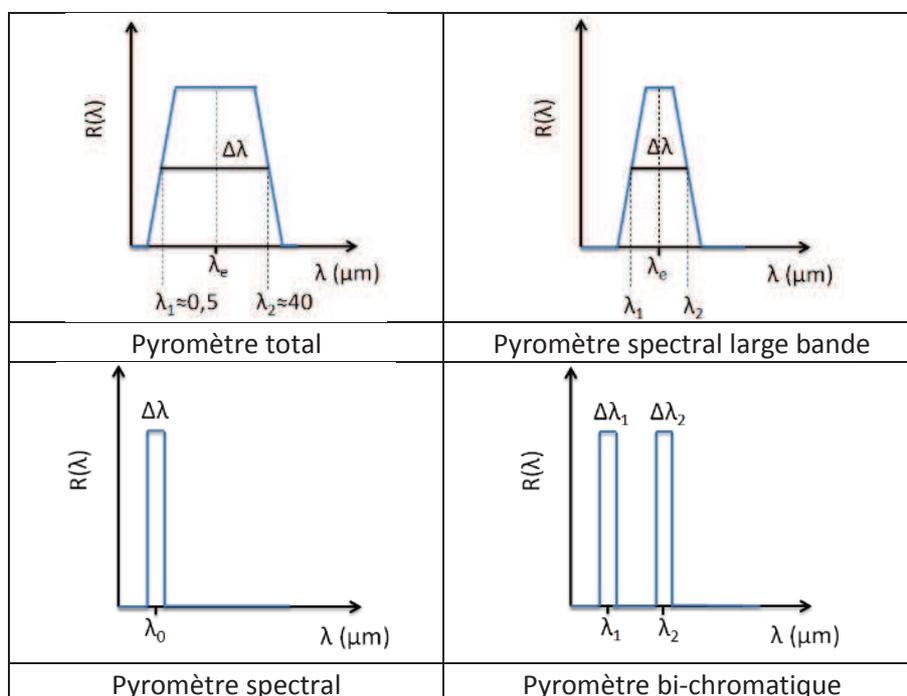
### 3.2. Revue des moyens de diagnostics

Ce paragraphe présente 3 moyens de diagnostics utilisés pour la mesure de luminance ; les pyromètres, les caméras thermiques et enfin les systèmes complets qui mesurent simultanément la taille, la vitesse et la température des particules.

#### 3.2.1. Pyromètres

Il existe plusieurs types de pyromètres généralement différenciés par leurs bandes de longueur d'onde. Le Tableau 16 représente leurs gammes spectrales.

Tableau 16 - Gammes spectrales des différents pyromètres



Le pyromètre total réalise une mesure sur un spectre très large (0,5 à 40  $\mu\text{m}$ ). Il permet de déterminer une mesure absolue précise si les caractéristiques du milieu ambiant sont constantes et identiques sur tout le spectre. Il est très peu utilisé car trop dépendant de l'environnement.

Le pyromètre spectral large bande est souvent utilisé avec une largeur de bande qui correspond à une zone de forte transmission de l'atmosphère (généralement quelques microns). L'absorption de l'atmosphère est ainsi réduite par rapport aux pyromètres totaux.

Le pyromètre spectral fonctionne dans une gamme spectrale étroite, de l'ordre de 20 nm dans le visible, et 100 nm dans l'infrarouge. Une bande spectrale étroite permet de faire l'hypothèse de la constance des propriétés optiques et du signal reçu. Ces pyromètres permettent d'acquérir un signal proportionnel au rayonnement spectral avec une très bonne résolution. L'intensité du signal reçu est par contre plus faible que pour les pyromètres totaux ou à larges bandes.

Le pyromètre bi-chromatique permet de s'affranchir de la valeur d'émissivité en utilisant l'approximation du corps gris. Il permet de faire le rapport des luminances sur des zones réduites du détecteur, ce qui est utilisé pour la mesure d'objets de petites dimensions ou en mouvement.

Il existe également le pyromètre à multi longueurs d'onde (FELICE, 2002). La température est déterminée en effectuant le rapport d'au moins trois signaux de luminance acquis à des longueurs d'onde différentes. Le principe est de s'affranchir du problème de la détermination de l'émissivité, laquelle varie avec la longueur d'onde, en utilisant une fonction de type  $\varepsilon = f(\lambda)$ .

### **3.2.2. Caméras thermiques**

Les caméras thermiques utilisent le même principe de mesure du flux thermique que les pyromètres. Cependant, les caméras thermiques sont composées d'une matrice de détecteurs photosensibles, ce qui permet de mesurer une répartition spatiale de la température d'un corps.

La matrice de photodétecteurs impose un refroidissement important pour réduire le bruit de fond et une acquisition ainsi qu'un traitement d'images plus sophistiqués, ce qui limite la fréquence d'acquisition.

### **3.2.3. Systèmes intégrés**

Des dispositifs commerciaux complets intègrent différentes technologies afin de réaliser simultanément une mesure de température, de vitesse et de taille des particules en vol. Nous pouvons citer par exemple le DPV-2000 de la société TECNAR®.

Le schéma descriptif du système DPV-2000 est présenté sur la Figure 45 (MAUER, G. *et al.* 2007).

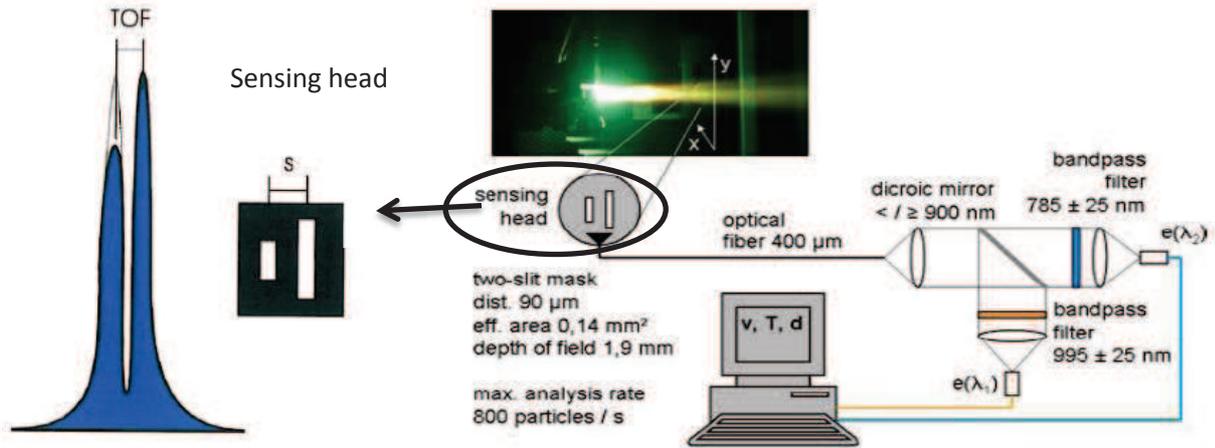


Figure 45 - Schéma descriptif du DPV-2000 (MARCHAND, 2010)

Le DPV-2000 présente l'intérêt de réaliser une mesure sur une seule particule. L'objectif de l'appareil est équipé de deux fentes de longueurs différentes afin de limiter le biais de mesure concernant les trajectoires des particules. Le signal reçu par un capteur photosensible correspondra à deux pics, qui représentent le passage d'une particule. La vitesse est définie par le rapport du temps entre les deux pics (TOF) avec la distance (S) entre les deux fentes. En utilisant la loi de Planck, la surface des pics permet d'avoir une valeur de température (précision annoncée par le constructeur 3 %). La taille des particules est obtenue à l'aide de la surface des pics et nécessite une calibration. Enfin, le taux de comptage est limité ( $< 800 \text{ particules} \cdot \text{s}^{-1}$ ) pour des vitesses de particule comprises entre 10 et  $1500 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  et la température minimale mesurable est d'environ  $1000 \text{ }^\circ\text{C}$  (dépend de l'émissivité du matériau).

Un autre système commercial est le Spraywatch de la société OSEIR® qui utilise un module comportant un laser, une caméra et un pyromètre bi-chromatique. La vitesse des particules est mesurée par suivi de particules (PTV) à l'aide d'une caméra et le système dispose d'un laser pour éclairer les particules qui n'émettent pas de rayonnement dans le spectre visible. La température minimale mesurable dépend de l'émissivité du matériau mais le seuil de détection est d'environ  $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ .

### 3.3. Spécifications requises vis-à-vis des conditions expérimentales de notre étude

L'étude bibliographique a mis en évidence les gammes des caractéristiques des particules qui conditionnent les spécifications requises pour la mesure de température.

La mesure s'effectue sur des particules en vol pour une gamme de vitesse de  $0 \text{ à } 40 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , ce qui signifie que le temps de transit de la particule dans le volume de mesure du capteur est un paramètre important qui peut limiter l'intensité du signal de luminance pouvant être captée par le détecteur. De plus, il est nécessaire d'avoir un volume d'échantillonnage suffisamment petit pour améliorer la précision de la mesure. La nature de nos conditions expérimentales fait que les particules polydispersées présentent une corrélation

taille/température marquée. Les contraintes physiques peuvent alors se transposer en contraintes technologique telles que décrites dans le Tableau 17. La gamme de longueur d'onde optimale pour mesurer la température des particules entre 100 et 1500 °C, est comprise entre 1 et 8 µm. En éliminant les bandes d'absorption de l'atmosphère présentées sur la Figure 43, des fenêtres de transmission optimales sont situées entre 2 et 2,6 µm, 3 et 4 µm et entre 4,3 et 4,5 µm.

**Tableau 17 - Contraintes techniques du capteur de flux thermique**

Température (°C)	Longueur d'onde (µm)	Temps de réponse (ms)	Diamètre de la surface de mesure (µm)
100 à 1500	1 à 8	< 1	500

Les systèmes intégrés ont une température minimale de détection trop élevée (1000 °C pour le DPV-2000 et l'Accuraspray), et ne sont donc pas adaptés à notre étude. Des essais de faisabilité, réalisés avec une caméra Flir® SC7000 ont mis en évidence un problème de sensibilité pour les particules dans notre gamme de taille et de vitesse. Le pyromètre représente un bon compromis entre prix, facilité d'utilisation et précision de la mesure. Les pyromètres bi-chromatiques semblent plus appropriés pour la mesure de particules en vol, toutefois, leur temps de réponse est plus élevé que ceux des pyromètres monochromatiques, à gamme de mesure comparable.

Il existe donc un couplage entre les spécifications en termes de température, temps de réponse et diamètre de la surface de mesure. Cela nécessite de faire un compromis pour obtenir un temps de réponse faible adapté à notre gamme de vitesses de particules et ceci pour une plage de températures correspondant à nos conditions. Il a été fait le choix d'utiliser deux pyromètres monochromatiques à large bande IP140 MB1 (100 – 700 °C) et IP140 MB3 (200 – 1300 °C) de la société Lumasense® dont les principales spécifications sont présentées dans le Tableau 18.

**Tableau 18 - Spécifications constructeur des pyromètres monochromatiques IP140**

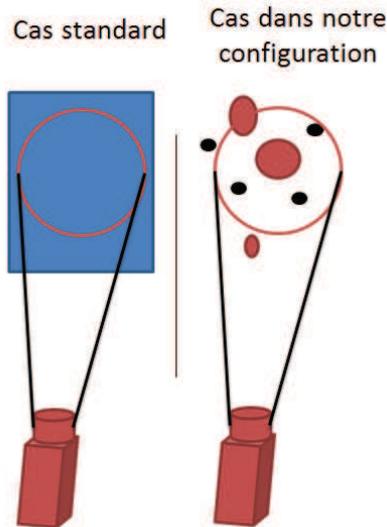
<b>Gamme de température : MB1 : 100 - 700 °C - MB3 : 200 - 1300 °C</b>			
<b>Bande Spectrale</b>	2 à 2,8 µm	<b>Précision</b>	< 400°C ; 2°C
<b>Temps de réponse</b>	1,5 ms		> 400°C ; 1°C + 0,3%
<b>Facteur émissif</b>	0,1...1 réglable	<b>Résolution</b>	0,1°C
<b>Distance de mesure (d)</b>	3 positions prédéterminées : 190, 260 et 440 mm	<b>Diamètre de mesure (d<sub>m</sub>)</b>	MB1 : 0,5 mm MB3 : 1 mm

Les deux pyromètres possèdent des caractéristiques similaires. Le changement de gamme de mesure s'effectue par une modification du volume de mesure et du gain utilisé pour l'amplification du signal.

Ces pyromètres ont un domaine d'utilisation qui a été défini par le constructeur :

- le corps, qui fait l'objet de la mesure de température, possède des dimensions supérieures au volume de mesure du pyromètre,
- le corps est immobile et situé au point focal de la lentille du pyromètre,
- sa température de surface est homogène et constante pendant le temps d'acquisition du pyromètre.

Pour notre application, ces conditions ne sont pas remplies (Figure 46).



**Figure 46 - Comparaison du cas standard et dans notre configuration de mesure du pyromètre**

Il s'agit donc de mesurer la luminance de particules en mouvement, plus petites que la surface de mesure, et dispersées autour du point focal de l'instrument. Notre application spécifique nécessite alors d'adapter le traitement du signal du pyromètre, c'est-à-dire de développer une nouvelle loi d'inversion du signal.

### **3.4. Etude et développement de la technique pyrométrique pour la mesure de température de particules**

Avant toute modification de la loi d'inversion du signal du pyromètre, il est nécessaire de valider le fonctionnement et les spécifications du pyromètre dans le cas standard (ou nominal).

Les deux pyromètres ayant des caractéristiques similaires, seuls les résultats concernant le pyromètre MB3 (200 – 1300 °C) sont présentés par la suite.

### 3.4.1. Principe de fonctionnement du pyromètre

La loi de Planck énoncée précédemment (Équation 21) possède un domaine de validité sur le spectre total. Lorsque  $C_2/\lambda T \gg 1$ , il est possible de simplifier cette loi par l'utilisation de l'approximation de loi de Wien (Équation 25) dont l'application entraîne un écart inférieur à 6 % (ZHANG, Z.M. *et al.* 2010).

$$L_{b,\lambda} = \frac{C_{1,\lambda}}{\lambda^5 \cdot \exp\left(\frac{C_2}{\lambda \cdot T}\right)} \quad (\text{W}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{sr}^{-1}) \quad \text{Équation 25}$$

Dans notre gamme de longueurs d'ondes et de températures, nous sommes à la limite de l'utilisation de la loi de Wien. Le pyromètre utilise alors une approximation de la loi de Wien, qui est explicitée par l'Équation 26. Cette loi utilise des coefficients obtenus de manière empirique (A, B, C) pour l'appareil considéré.

$$R = A \cdot \exp\left(\frac{-B}{C+T}\right) \quad (\text{A ou V}) \quad \text{Équation 26}$$

Avec :  $A = a \cdot \varepsilon^\alpha \cdot C_{1,\lambda} \cdot \lambda^{-5} \quad (\text{A ou V}) \quad \text{Équation 27}$

Avec :  $B = \frac{C_2}{\lambda_m} = 6641,5 \quad (^\circ\text{C}^{-1}) \quad \text{Équation 28}$

Avec :  $C = 293,15 \quad (^\circ\text{C}) \quad \text{Équation 29}$

R représente le signal brut de l'appareil en sortie du capteur photosensible. La constante  $a$  intègre les paramètres dépendants de la mesure, c'est-à-dire des optiques et de l'environnement (le coefficient de transfert dans l'atmosphère), et a été calibrée par le constructeur pour chaque pyromètre. L'émissivité est explicitée comme une fonction de la température et dépend de nombreux paramètres (détaillées au paragraphe 3.4.4). Le coefficient C permet d'utiliser la température en degré Celsius et prend en compte l'écart par rapport à la température ambiante.

Maintenant que le fonctionnement du pyromètre est mieux défini, des mesures de qualification dans le cas standard ont été effectuées afin de vérifier si ces spécifications sont en accord avec les données constructeur.

### 3.4.2. Validation des spécifications du pyromètre

Pour la vérification de la distance focale de mesure et des dimensions du volume de mesure, une pointe métallique (thermocouple de type K) est chauffée à différentes températures. Le pyromètre est positionné sur un système de déplacements suivant les trois axes x, y, z comme indiqué sur la Figure 47.

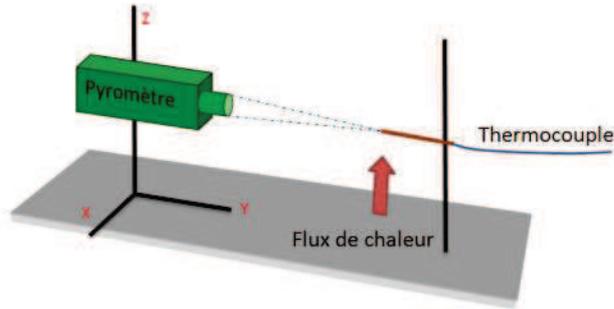


Figure 47 - Schéma du dispositif permettant la mesure de la distance focale et des dimensions du volume de mesure du pyromètre

Trois distances focales de mesure sont recommandées par le constructeur suivant le réglage de la lentille du pyromètre. Afin d’obtenir une bonne sensibilité pour des particules de faibles dimensions, il est préférable de travailler avec le plus faible volume de mesure possible, ce qui correspond à la distance focale la plus faible. L’étude relative à l’influence de la distance focale est présentée sur la Figure 48.

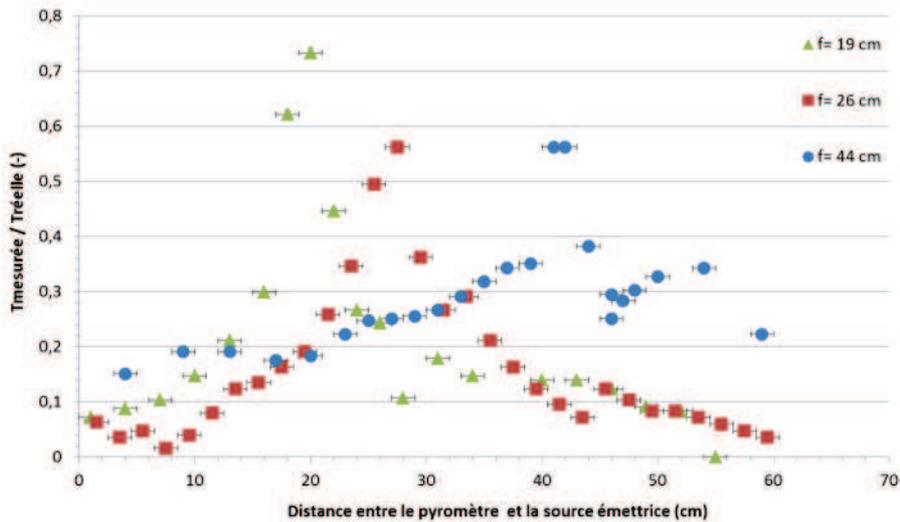


Figure 48 - Valeur du rapport de la température mesurée par le pyromètre sur la température de la source en fonction de la distance pyromètre - source pour 3 distances focales

La Figure 48 montre en effet une température plus proche de la température réelle à la distance focale la plus faible. L’émissivité de l’embout du thermocouple étant inconnue, les valeurs de température sont normées par rapport à la valeur maximale de température obtenue.

Dans le but de déterminer les dimensions du volume de mesure, le signal du pyromètre est mesuré suivant différents déplacements, présenté sur la Figure 49 suivant l’axe y et sur la Figure 50 suivant les axes x et z, pour la distance focale de mesure la plus faible (f=19 cm).

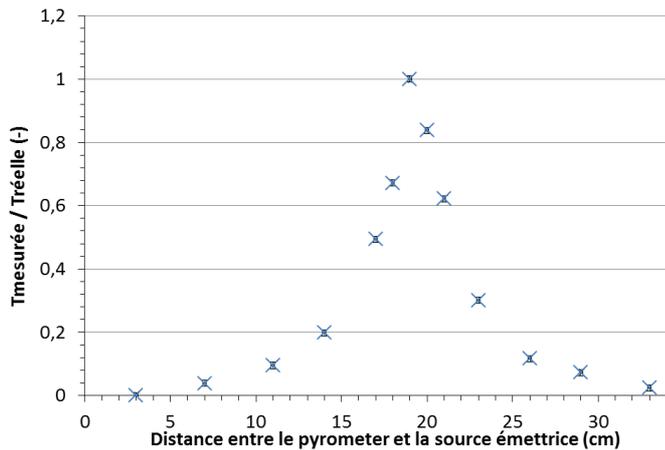


Figure 49 - Réponse du pyromètre en fonction du déplacement suivant l'axe y

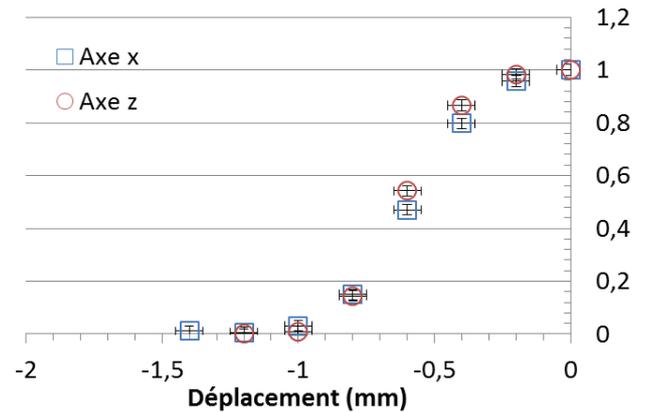


Figure 50 - Réponse du pyromètre en fonction des déplacements suivant les axes x et z

La Figure 49 permet de définir les dimensions axiales du volume de mesure du pyromètre. Ainsi, un signal est observé par le pyromètre sur une distance de 15 cm autour du point focal.

La Figure 50 permet de définir les dimensions radiales du volume de mesure du pyromètre. Elles sont très faibles (0,75 mm autour du point focal) et identiques suivant les deux axes x et z.

Le volume de mesure total du pyromètre est donc de  $\pi/4 \times 1,5^2 \times 300 \text{ mm}^3$ . Cependant, une mesure correcte du pyromètre n'est réalisée qu'au centre de cette zone, dans un volume de  $\pi/4 \times 0,5^2 \times 5 \text{ mm}^3$ . La position du volume de mesure dans la conduite est présentée sur la Figure 51.

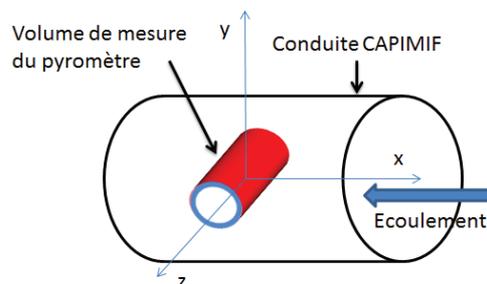


Figure 51 - Position du volume de mesure dans la conduite de CAPIMIF

Le volume de mesure du pyromètre peut s'apparenter à un cylindre, perpendiculaire à l'écoulement, dont le centre coïncide avec celui de la conduite.

### 3.4.3. Qualification du pyromètre pour la mesure de la température de particule en vol

La loi d'inversion du pyromètre a été explicitée précédemment (cf. Équation 26) et dépend de trois paramètres A, B et C. Les paramètres B et C sont clairement définis et proviennent de l'approximation de la loi de Wien tandis que le paramètre A englobe les spécificités de la mesure et demeure le paramètre déterminant, par lequel la loi d'inversion sera modifiée.

Soit  $A_1$  (Équation 30), le paramètre correspondant au paramètre A, pour la nouvelle loi d'inversion du signal du pyromètre.  $A_1$  est fonction du paramètre A et des paramètres correcteurs de surface ( $\beta$ ), de temps ( $\gamma$ ) et de dispersion spatiale autour du point focal ( $\theta$ ) qui sont explicités par la suite.

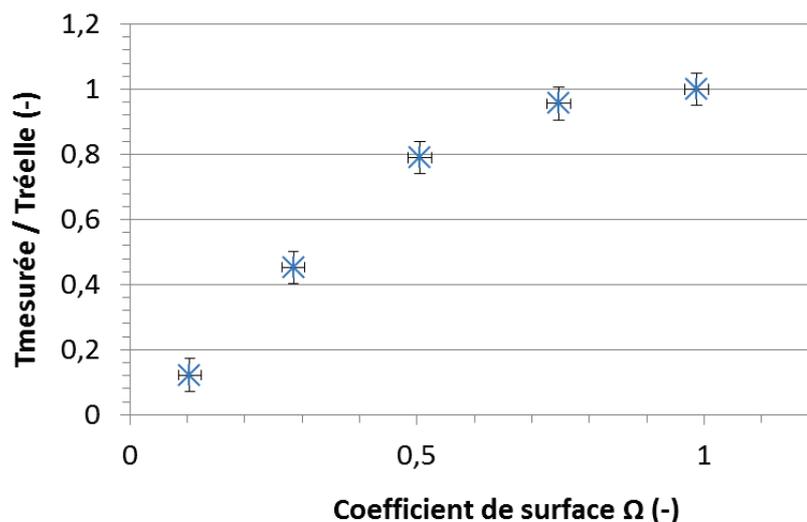
$$A_1 = A \cdot \beta \cdot \gamma \cdot \theta \quad (\text{A ou V}) \quad \text{Équation 30}$$

a) Facteur correcteur de surface ( $\beta$ )

Soit  $\Omega$  le coefficient de surface défini selon l'Équation 31.

$$\Omega = \frac{\text{Surface réellement émettrice dans la surface de mesure}}{\text{Surface de mesure}} \quad \text{Équation 31}$$

Le déplacement de la source émettrice à proximité du volume de mesure du pyromètre, dont les dimensions ont été déterminées précédemment (cf. paragraphe 3.4.2), permet de simuler différentes surfaces émettrices. L'évolution de la température en fonction de la surface émettrice est représentée sur la Figure 52 pour une source de 500  $\mu\text{m}$  de diamètre à une température de 1000  $^\circ\text{C}$ .



**Figure 52 - Evolution du rapport de la température mesurée sur la température réelle de la source en fonction du coefficient de surface**

Pour une température de 1500  $^\circ\text{C}$ , le diamètre minimal pour obtenir un signal est de 110  $\mu\text{m}$ .

Soit  $\beta$ , le facteur correcteur de la loi d'inversion, fonction du facteur de surface ( $\Omega$ ) défini afin qu'un objet dont les dimensions sont inférieures aux dimensions de la surface de mesure soit mesuré à sa température réelle.

$$\text{Signal brut avec surface émettrice totale } (T_p) = \text{Signal brut avec surface émettrice limitée } (T_f) \cdot \beta$$

Soit :

$$\beta = \exp\left(\frac{-B \cdot T_p + B \cdot T_f}{(C + T_p) \cdot (C + T_f)}\right) \quad \text{Équation 32}$$

Le coefficient  $\beta$  dépend du facteur de surface. Il est défini selon l'Équation 33 grâce aux essais de qualification.

$$\beta = 1,4 \cdot \Omega^{1,73} \quad \text{Équation 33}$$

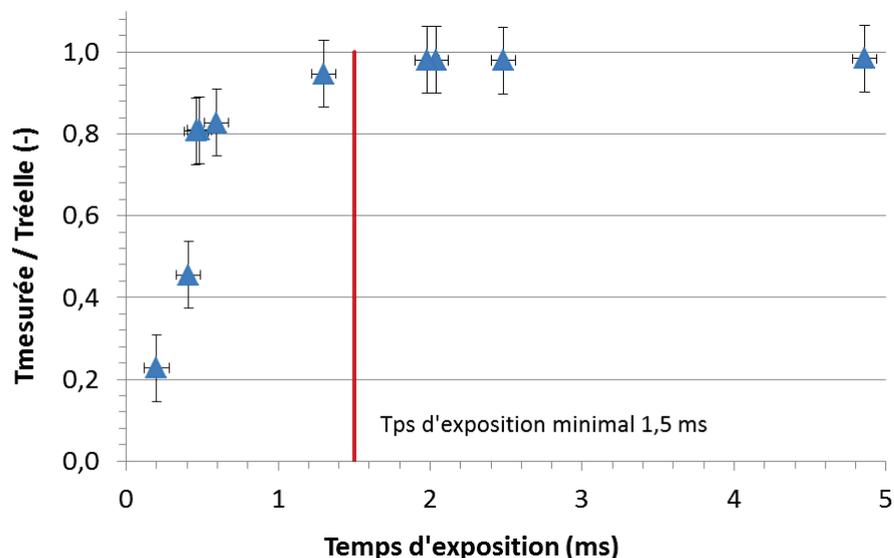
L'expression du coefficient correcteur de surface ( $\beta$ ) s'exprime sous forme de puissance, ainsi cela n'implique pas de seuil de surface détectable. Cette surface minimale a été déterminée lors des essais, équivalente à celle d'un disque de 110  $\mu\text{m}$  de diamètre.

b) Facteur correcteur de temps ( $\gamma$ )

Soit  $\tau$  le coefficient de temps défini selon l'Équation 34.

$$\tau = \frac{\text{Temps d'émission dans la surface de mesure}}{\text{Temps d'acquisition}} \quad \text{Équation 34}$$

Afin de simuler différents temps d'exposition du capteur, une roue à fentes est placée devant le pyromètre suivant la configuration présentée sur la Figure 47. L'évolution de la température en fonction du temps d'exposition est tracée sur la Figure 53.



**Figure 53 - Evolution du rapport de la température mesurée par le pyromètre sur la température réelle de la source en fonction du temps d'exposition**

La réponse du pyromètre est correcte pour des temps d'expositions supérieurs ou égaux à 1,5 ms, en accord avec les données constructeur. Pour des temps d'expositions inférieurs à 1,5 ms, le signal se dégrade progressivement jusqu'à être inexistant pour 0,16 ms. Le temps minimal de réponse du pyromètre (0,16 ms), correspond au temps mis par une particule à 15  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  pour traverser le volume de mesure.

Soit  $\gamma$  le facteur correcteur de la loi d'inversion, fonction du facteur de temps ( $\tau$ ), permettant de corriger l'effet du temps d'exposition lié au temps de transit des particules.

Signal brut avec temps total ( $T_p$ ) =  $\gamma$ ·Signal brut avec temps limité ( $T_f$ )

Soit :

$$\gamma = \exp\left(\frac{-B \cdot T_p + B \cdot T_f}{(C + T_p) \cdot (C + T_f)}\right) \quad \text{Équation 35}$$

Le coefficient  $\gamma$  est proportionnel au facteur de temps, selon l'Équation 36, déterminé d'après les essais de qualification.

$$\gamma = 1,07 \cdot \tau - 0,11 \quad \text{Équation 36}$$

Dans nos conditions, la valeur de température sous-estime la température réelle de la particule, cela signifie que le coefficient  $\gamma$  est nécessairement positif. Ce qui implique une valeur limite de 0,16 ms déterminée grâce aux essais de qualification.

c) Facteur correcteur de dispersion ( $\theta$ )

Les dimensions du volume de mesure du pyromètre ont été déterminées au paragraphe 3.4.2. Suivant le positionnement de la particule dans le volume de mesure, le rapport de la température mesurée sur la température réelle permet de définir un coefficient d'atténuation compris entre 0 et 1. Le coefficient d'atténuation globale ( $\theta$ ), défini par l'Équation 37, représente la dispersion spatiale des particules dans le volume de mesure en fonction de la distance par rapport au point d'émission ( $d$  en cm).

$$\theta = -0,2 \cdot d + 0,39 \quad \text{Équation 37}$$

Afin de limiter l'absorption du rayonnement infrarouge par les accès optiques implantés sur l'installation CAPIMIF, la mesure est réalisée à travers des hublots en quartz. Le quartz permet, dans cette gamme de longueurs d'onde, d'avoir un coefficient de transmission ( $q$ ) important. Ce coefficient a été déterminé expérimentalement en réalisant une mesure d'un objet à une température connue. Le coefficient de transmission sur la gamme de longueurs d'onde du pyromètre est de 89 %.

### 3.4.4. Etude de l'émissivité

La détermination de l'émissivité des différents métaux utilisés est réalisée selon une approche comparative de la mesure pyrométrique avec la température du thermocouple placé sur un échantillon chauffé. Les résultats pour différents métaux sont tracés sur la Figure 54.

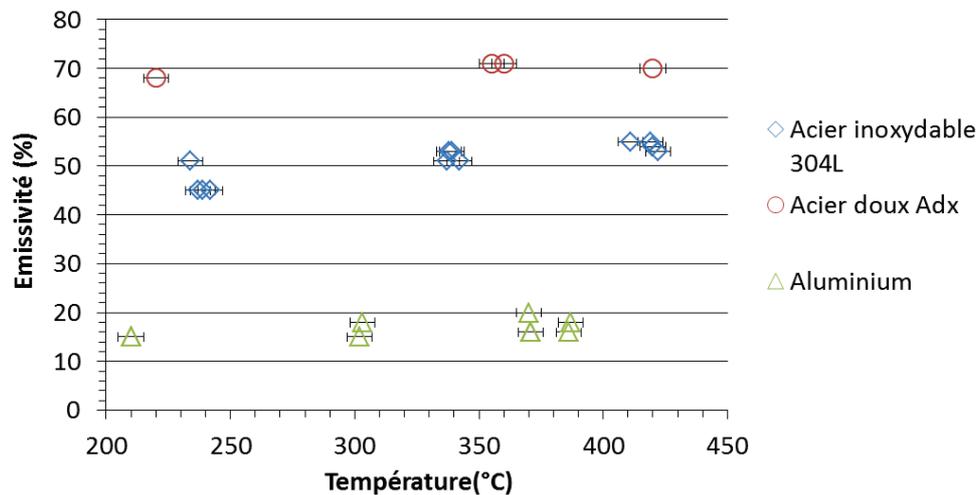
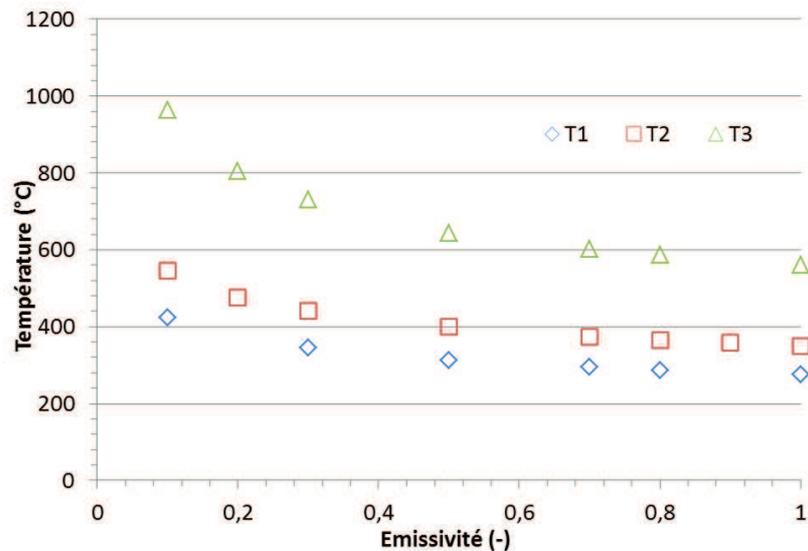


Figure 54 - Evolution de l'émissivité des échantillons de différents métaux en fonction de leur température sur une bande spectrale de mesure de 2 à 2,8 µm

L'émissivité de l'acier inoxydable 304L mesurée avec le pyromètre est voisine de 0,5 entre 200 et 400 °C. Dans la littérature, les valeurs d'émissivités sont rarement explicitées en fonction de la longueur d'onde de mesure et de la température. Cependant, pour de l'acier inoxydable des valeurs comprises entre 0,4 et 0,5 sont répandues. Sur la Figure 54, il apparaît que l'émissivité de l'acier inoxydable et de l'aluminium augmentent légèrement avec la température.

Afin de déterminer la loi intégrée relative à l'émissivité incluse dans le paramètre A, nous avons fait varier la valeur d'émissivité de 0,1 à 1 sur une source émettrice maintenue à différentes températures (Figure 55).



**Figure 55 - Valeurs des températures données par le pyromètre en fonction du réglage de l'émissivité du pyromètre pour trois sources T1, T2, T3 dont la température est maintenue constante**

De 0,1 à 0,5, l'émissivité influence fortement la valeur de température. En revanche, pour une émissivité de 0,5 à 1, la température calculée ne varie que de 6 %. La fonction utilisée par le pyromètre est de la forme puissance et l'expression utilisée, déterminée d'après la Figure 55, est celle de l'Équation 38.

$$T = (3,4966 \cdot T_1 - 337,15) \cdot \varepsilon^{(0,002T_1 + 0,1374)} \quad (^\circ\text{C}) \quad \text{Équation 38}$$

Avec  $T_1$ , la température de l'objet pour une émissivité prise égale à 1.

Martin (1980) a montré que l'émissivité est une fonction croissante de la rugosité, ce qui est en accord avec les résultats d'Ody Sacadura (1972). Cependant Bennet (1964), remarque que l'influence de la rugosité peut être négligée lorsque la taille des irrégularités est plus faible que la longueur d'onde de mesure. Par la suite, nous considérons l'émissivité indépendante de la rugosité.

L'évolution de l'émissivité en fonction de la température dépend du type de métal oxydé étudié (MARTIN, C. FAUCHAIS, P., 1980 et ISETTI, C. NANNEI, E., 1980 et WONG, H.Y., AGGARWAL, S.R., 1971 et BRANNON, Jr.R.R., GOLDSTEIN, R.J., 1970). Ces études sont réalisées sur des échantillons de matériaux portés à haute température pour faciliter l'oxydation. La couche superficielle de l'acier inoxydable est composée essentiellement d'oxyde de chrome mais le cœur est composé majoritairement de fer. Lors de la découpe, nous considérerons que les particules émises sont sous formes de fer puis en réaction avec l'oxygène, elles forment des oxydes de fer. Pour ces particules, d'après Burgess (1915), l'émissivité spectrale (à 0,65  $\mu\text{m}$ ) varie de 0,85 à 500 °C jusqu'à 0,89 à 1200 °C, pour un oxyde de fer composé à 60 % de FeO et 40 % de Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>.

### 3.4.5. Nouvelle loi d'inversion

Précédemment, nous avons défini le paramètre  $A_1$  permettant de modifier la loi d'inversion en prenant en compte nos conditions expérimentales. La température de la particule est ainsi calculée (Équation 40) en effectuant le rapport de la loi d'inversion initiale (Équation 39) sur la nouvelle loi d'inversion du signal du pyromètre (Équation 41).

$$\left. \begin{array}{l} R = A \cdot \exp\left(\frac{-B}{C + T_f}\right) \quad \text{Équation 39} \\ R = A_1 \cdot \exp\left(\frac{-B}{C + T_p}\right) \quad \text{Équation 41} \end{array} \right\} T_p = \frac{-B}{\left(\frac{-B}{C + T_f}\right) + \ln\left(\frac{A}{A_1}\right)} - C \quad (^\circ\text{C}) \quad \text{Équation 40}$$

Le rapport  $A/A_1$  permet d'éliminer les termes considérés constant entre une mesure dans le cas standard et dans notre configuration. De plus, l'absorption des hublots en quartz est prise en compte sur la valeur de mesure du pyromètre ( $T_f$ ) à travers le paramètre  $q$ . La loi d'inversion générale est donc définie selon l'Équation 42.

$$T_p = \frac{-B}{\left(\frac{-B}{C + q \cdot T_f}\right) - \ln(\beta) - \ln(\gamma) - \ln(\mathcal{G})} - C \quad (^\circ\text{C}) \quad \text{Équation 42}$$

Pour notre application, nous posons les hypothèses suivantes, dont certaines sont fortes et sont débattues au paragraphe 3.4.6.b :

- les particules sont sphériques et la surface émissive est assimilable à la surface d'un disque,
- la température des particules est considérée constante durant le temps de transit dans le volume de mesure,
- les particules sont supposés définies par un diamètre et une vitesse moyenne pour une distance donnée.

Ces hypothèses permettent de simplifier les facteurs de surface (Équation 43) et de temps (Équation 44).

$$\Omega = \frac{\omega \cdot Ci \cdot Vol \cdot d_{pm}^2}{d_m^2} \quad \text{Équation 43}$$

$$\tau = \frac{d_m}{V_{pm} \cdot t_{exp}} \quad \text{Équation 44}$$

Avec :

- Ci, la concentration en particules (Nb.m<sup>3</sup>),
- Vol, le volume de mesure du pyromètre (m<sup>3</sup>),
- d<sub>pm</sub>, le diamètre moyen des particules (m),
- d<sub>m</sub>, le diamètre de la surface de mesure (m),
- ω, le facteur de recouvrement (-),
- V<sub>pm</sub>, la vitesse moyenne des particules (m.s<sup>-1</sup>),
- t<sub>exp</sub>, le temps d'exposition du pyromètre (s).

Le facteur de recouvrement ω est déterminant mais difficilement accessible. Nous faisons alors l'hypothèse de la présence d'une seule particule dans le volume de mesure pendant le temps d'acquisition du pyromètre (hypothèse discutée au paragraphe 3.4.6.b). Cette hypothèse permet de simplifier le facteur correcteur de surface (Équation 45).

$$\Omega = \frac{d_{pm}^2}{d_m^2} \quad \text{Équation 45}$$

Ainsi, la loi d'inversion devient :

$$T_p = \frac{-B}{\left( \frac{-B}{C + q \cdot T_f} \right) - \ln \left( 1,4 \cdot \left( \frac{d_{pm}}{d_m} \right)^{3,46} \right) - \ln \left( 1,07 \cdot \frac{d_m}{V_{pm} \cdot t_{exp}} - 0,11 \right) - \ln(9)} - C \quad (^\circ\text{C}) \quad \text{Équation 46}$$

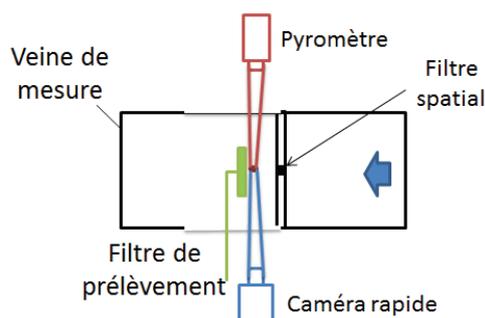
Les essais de qualification du pyromètre dans le cas nominal et dans notre configuration particulière ont permis d'élaborer une nouvelle loi d'inversion qui permet la mesure de la température de particules dont les caractéristiques sont connues.

### 3.4.6. Qualification de la loi d'inversion

#### a) Essai sur une particule dans CAPIMIF

Des tests de réponse de la loi d'inversion ont été menés sur des particules incandescentes dont la taille et la vitesse sont connues. Le diamètre des particules est obtenu avec un filtre de prélèvement et la vitesse des particules incandescentes à l'aide de la caméra rapide. L'intersection du plan de mesure de la caméra

rapide avec le volume de mesure du pyromètre représente le volume efficace de cette étude, tandis que le prélèvement sur filtre s'effectue à proximité. Le schéma du dispositif est présenté sur la Figure 56.



**Figure 56 - Schéma du dispositif de mesure de la vitesse, température et taille des particules**

Un filtre spatial (trou de 5 mm de diamètre sur une plaque d'aluminium) permet de négliger la dispersion axiale. Les résultats de la mesure des particules en termes de taille, vitesse et température du pyromètre, avec la loi initiale et la nouvelle loi d'inversion, à 90 cm de l'émission, sont présentés dans le Tableau 19.

**Tableau 19 - Mesure de la vitesse, taille et température des particules grâce à la loi d'inversion initiale et la nouvelle loi d'inversion**

	Température du pyromètre selon la loi d'inversion initiale (°C)	Vitesse mesurée (m.s <sup>-1</sup> )	Diamètre mesuré (µm)	Température avec la nouvelle loi d'inversion (°C)
1	499	2,48	189	1088
2	409	2,8	150	1062
3	266	8	172	953
4	264	5	120	891
5	335	1,7	132	782
6	620	3,1	340	941
7	499	1,8	155	1218
8	370	7,1	226	1024

Le seuil de détection limite de température de la caméra rapide est de 400 °C (cf. paragraphe 2.2.3). Les valeurs mesurées par le pyromètre sont régulièrement inférieures à 400 °C, ce qui implique que le pyromètre sous-estime la valeur de température. La mesure du diamètre et de la vitesse de la particule permet de calculer une température de particules avec la nouvelle loi d'inversion. Les nouvelles valeurs de température sont supérieures aux précédentes et en cohérence avec les valeurs attendues à cette distance de la génération.

## b) Essais sur un ensemble de particules dans CAPIMIF

Etant donné les faibles dimensions du volume de mesure (cf. paragraphe 3.4.2) et l'évolution de la concentration en particules incandescentes avec la distance (cf. paragraphe 4.5.2), il est possible de faire l'hypothèse qu'au-delà de 1 m de la génération, une seule particule incandescente traverse le volume de mesure pendant le temps d'acquisition du pyromètre.

La distribution des vitesses des particules incandescentes au centre de la conduite, obtenue grâce à la caméra rapide, est présentée sur la Figure 57 à différentes distances à la source d'émission des particules.

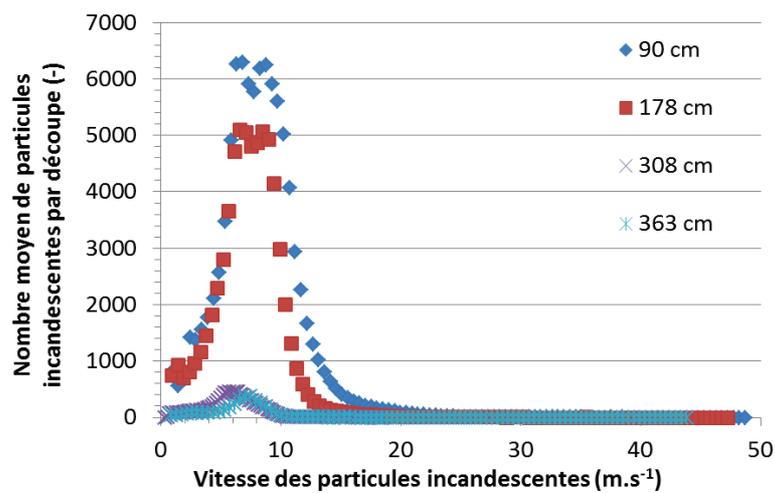


Figure 57 - Distribution de la vitesse des particules incandescentes au centre de la conduite

Les distributions permettent de calculer une valeur moyenne et un écart type, lequel permet de définir une incertitude de la nouvelle loi d'inversion. La même démarche est appliquée pour les mesures de taille. Ainsi, les valeurs de diamètres et de vitesses moyennes implémentées dans la loi d'inversion ainsi que leurs incertitudes respectives sont tracés sur la Figure 58.

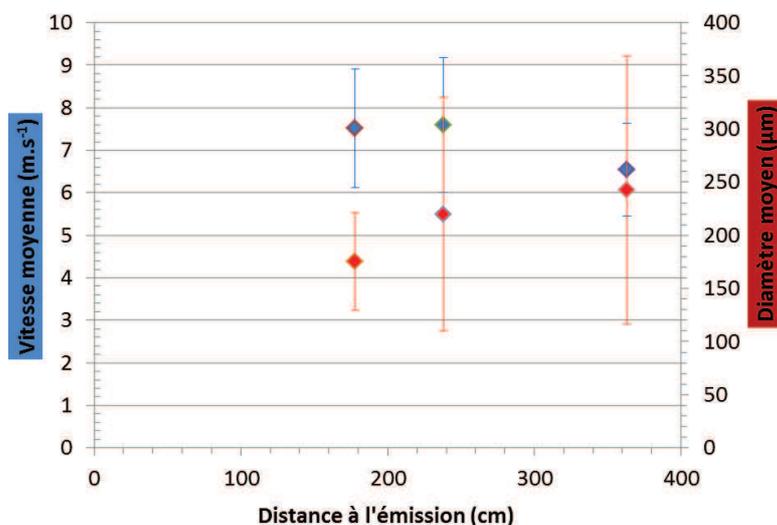
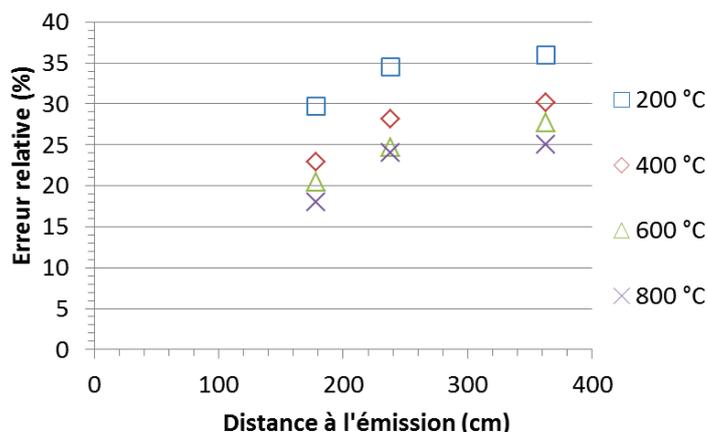


Figure 58 - Evolution des diamètres moyens et vitesses moyennes des particules au centre de la conduite avec leurs incertitudes utilisées dans la loi d'inversion modifiée du pyromètre

Le calcul de l'incertitude relative de la loi d'inversion est disponible en Annexe 2, les résultats sont présentés sur la Figure 59.



**Figure 59 - Erreur relative de la nouvelle loi d'inversion en fonction de la distance à l'émission pour différentes températures**

L'incertitude résultant de l'application de la loi d'inversion est comprise entre 20 et 30 %. Elle augmente légèrement avec la distance entre la mesure et la source des particules due à l'augmentation de la dispersion spatiale des particules dans le volume de mesure. De plus, l'incertitude relative diminue avec l'augmentation de la température.

L'erreur relative pour des températures inférieures à 400 °C est supérieure à 30 %. Nous considérons alors une gamme de mesure du pyromètre, avec la nouvelle loi d'inversion, de 400 à 1900 °C.

### 3.5. Conclusion

Ce chapitre a permis d'adapter un pyromètre monochromatique pour la mesure de température de particules en vol. La gamme de mesure s'étend désormais de 400 à 1900 °C, pour des particules dont le diamètre est supérieur à 110  $\mu\text{m}$ , ceci pour une vitesse inférieure à 15  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ . L'incertitude de mesure varie de 20 à 30 % suivant la distance à l'émission.

# Chapitre 4

## Devenir des particules de la source au dépôt

Ce chapitre présente les résultats concernant la caractérisation des particules produites lors de l'opération de découpe, en termes de taille, morphologie, vitesse et température. Une description et une analyse des phénomènes physiques s'opérant au cours du transport des particules, de leur lieu de génération jusqu'au filtre, sont présentées.

Les caractéristiques des particules ont été déterminées en vol au plus près du point où elles sont générées par l'outil de découpe ainsi qu'à différentes distances. Au préalable, des simulations CFD réalisées avec le code ANSYS CFX ont permis de pré-calculer les essais à réaliser dans l'installation expérimentale CAPIMIF afin de déterminer les gammes des grandeurs physiques attendues relatives aux particules.

### **4.1. Simulations numériques par CFD de l'évolution des caractéristiques des particules dans un conduit de ventilation**

Il s'agit de déterminer l'évolution des caractéristiques des particules en termes de diamètre, vitesse et température en fonction de la distance au point d'émission dans le conduit de ventilation.

#### **4.1.1. Conditions initiales des simulations**

La configuration de l'installation expérimentale CAPIMIF a été recréée sur le logiciel de CFD, ANSYS CFX. La génération des particules est réalisée dans un volume sans conditions aux limites dénommé « opening ». Le conduit de ventilation possède un diamètre de 0,125 m et s'étend horizontalement sur une distance de 5 m. La configuration géométrique simulée est présentée sur la Figure 60.

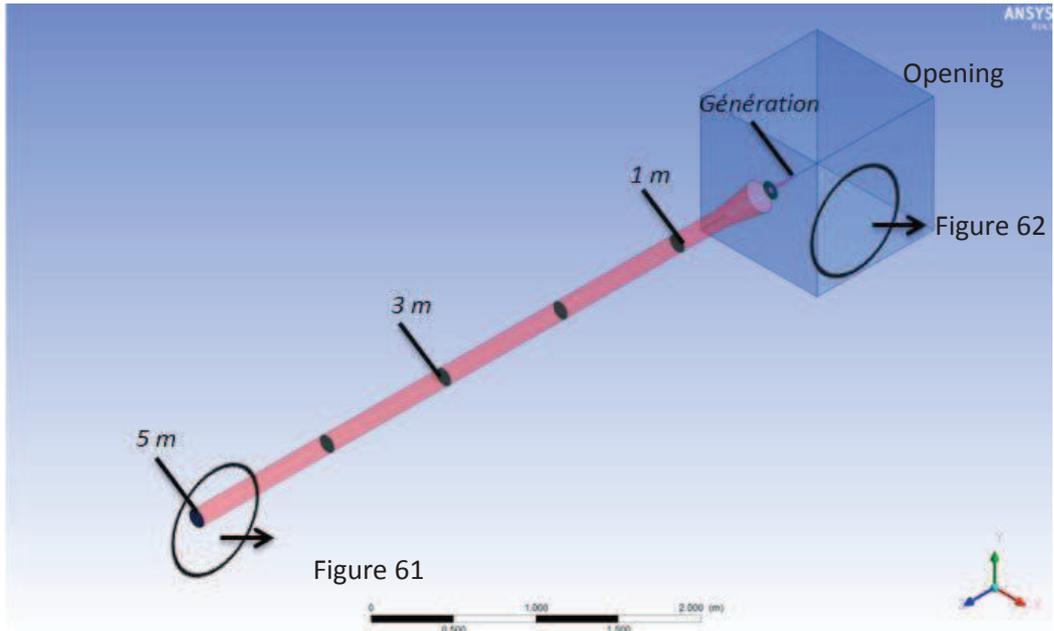


Figure 60 - Représentation de la géométrie utilisée pour le calcul CFD

Le maillage est composé de 296 500 éléments tétraédriques non structurés avec une inflation sur les bords. Un exemple de la structure est présenté sur la Figure 61 avec une taille de maille minimale et maximale respectivement de  $7 \cdot 10^{-4}$  m et de  $7 \cdot 10^{-2}$  m.

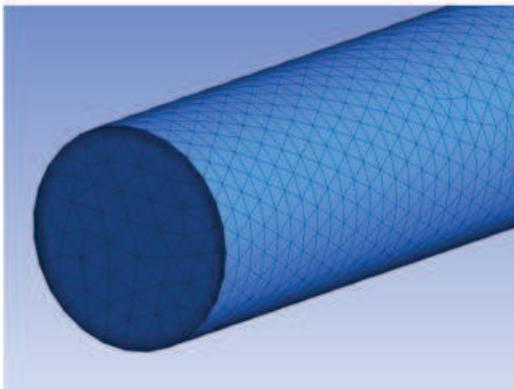


Figure 61 - Maillage retenu pour le calcul dans le code ANSYS CFX

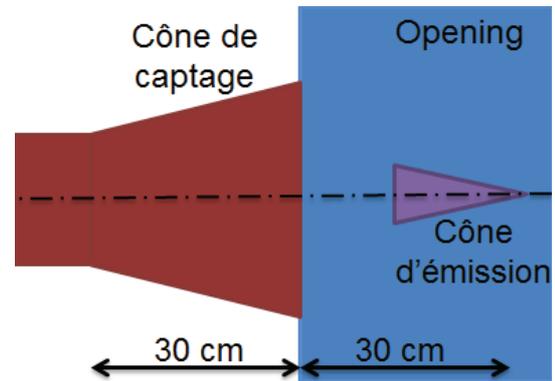


Figure 62 - Visualisation du cône d'émission des particules et du cône de captage utilisé dans la simulation

La génération des particules s'effectue selon une géométrie conique (cône d'émission) d'axe horizontal ayant un angle de 5 degrés d'ouverture et situé à 30 cm du cône de captage (Figure 62). Une approche lagrangienne est utilisée en considérant un nombre total de particules générées égal à  $10^7$ . Une étude de sensibilité a montré que ce nombre est suffisamment élevé pour avoir une convergence des calculs.

Dans la simulation, nous faisons les hypothèses suivantes :

- (1) les particules sont solides, sphériques et composées uniquement de fer,
- (2) les particules sont émises avec une vitesse et une température uniforme,
- (3) les phénomènes d'échanges de chaleur et de quantité de mouvement entre les particules ne sont pas pris en compte,
- (4) les phénomènes d'agrégation et de fragmentation des particules ne sont pas considérés,
- (5) pas de réaction d'oxydation des particules,
- (6) le contact entre les particules et les parois est considéré isotherme,
- (7) les conditions de rebonds sont stationnaires.

Certaines hypothèses sont réalistes physiquement comme l'hypothèse (6) (cf. paragraphe 1.2.3) et l'hypothèse (3) étant donné la faible concentration des particules métalliques dans le conduit de ventilation. Les hypothèses (1), (2) et (4) peuvent être considérées acceptables étant donné les effets limités tandis que les hypothèses (5) et (7) ont des conséquences déterminantes qu'il est difficile de quantifier. Ces hypothèses sont posées, d'une part, parce que les modules standards du code CFX ne permettent pas de prendre en compte ces paramètres et d'autre part, pour limiter le temps de calcul.

La distribution granulométrique des particules est considérée comme uniforme sur une gamme de diamètres de particules allant de 10  $\mu\text{m}$  à 1 mm, séparée en 20 classes. La gamme correspondante en diamètre aérodynamique équivalent s'étend de 30  $\mu\text{m}$  à 3 mm, pour une masse volumique égale à celle du fer. Les différents paramètres utilisés dans le code de calcul au niveau des modèles sont résumés dans le Tableau 20.

**Tableau 20 - Modèles et paramètres retenus pour la simulation**

<b>Modèle</b>		
Transfert de chaleur – Particule/Fluide	Ranz Marshall	
Force de traînée – Particule/Fluide	Schiller Naumann	
Turbulence	SST	
<b>Paramètres</b>	<b>Particule</b>	<b>Fluide</b>
Vitesse ( $\text{m.s}^{-1}$ )	40	10
Température initiale ( $^{\circ}\text{C}$ )	1500	27
Débit massique de particule ( $\text{g.s}^{-1}$ )	2	-
Capacité thermique ( $\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ )	434	1004.4
Masse volumique ( $\text{kg.m}^{-3}$ )	7854	1,17
Angle d'ouverture du cône d'émission ( $^{\circ}$ )	5	-
Coefficient de restitution (-)	0,5	

Pour prendre en compte l'interaction des particules avec les parois du conduit de ventilation et gérer ainsi les phénomènes de rebond, CFX utilise des Coefficients de Restitution (COR) tangentiels et normaux (cf. paragraphe 1.2.3). Le coefficient de restitution représente le rapport entre la vitesse de la particule avant son impact pariétal et la vitesse de la particule après impact ( $0 < \text{COR} < 1$ ). Un COR égal à 0 signifie que la

particule s'est déposée sur la paroi et un COR égal à 1 correspond à une interaction élastique avec la paroi, c'est-à-dire que la particule rebondit suivant un angle symétrique par rapport à son angle d'impact en conservant sa vitesse initiale. La valeur exacte du COR est difficile à déterminer, étant donné sa forte dépendance à de nombreux paramètres (cf. paragraphe 1.2.3) dont certains sont liés aux caractéristiques mêmes des particules (angle d'impact, taille, vitesse, etc.). Une étude de sensibilité du paramètre COR a été menée (cf. Annexe 3) et la valeur de 0,5 a été choisie constante pour l'ensemble des particules en tout point du conduit de ventilation.

Par ailleurs, afin de quantifier le dépôt des particules dans le conduit de ventilation en amont du filtre, des simulations ont été réalisées avec le code de calcul SYLVIA (SYstème de Logiciels pour l'étude de la Ventilation de l'Incendie et de l'Aérocontamination) développé par l'IRSN. Toutefois, le code SYLVIA ne permet pas d'imposer une vitesse initiale des particules, celle-ci étant considérée égale à la vitesse du fluide. Il s'en suit que les résultats sont plutôt représentatifs du comportement des particules dans un champ loin de leur génération. Les résultats, présentés en Annexe 4, ne sont donc pas directement transposables pour une comparaison avec la configuration de l'expérience CAPIMIF.

#### 4.1.2. Résultats et analyses des simulations

Les caractéristiques des particules sont scrutées, dans plusieurs sections de la conduite, à différentes distances de la génération (Figure 60). Pour plus de lisibilité, seule une fraction des particules est représentée sur les courbes de résultats.

Les distributions de la température des particules en fonction de leur diamètre sont présentées sur la Figure 63, à 1, 3 et 5 m de l'émission.

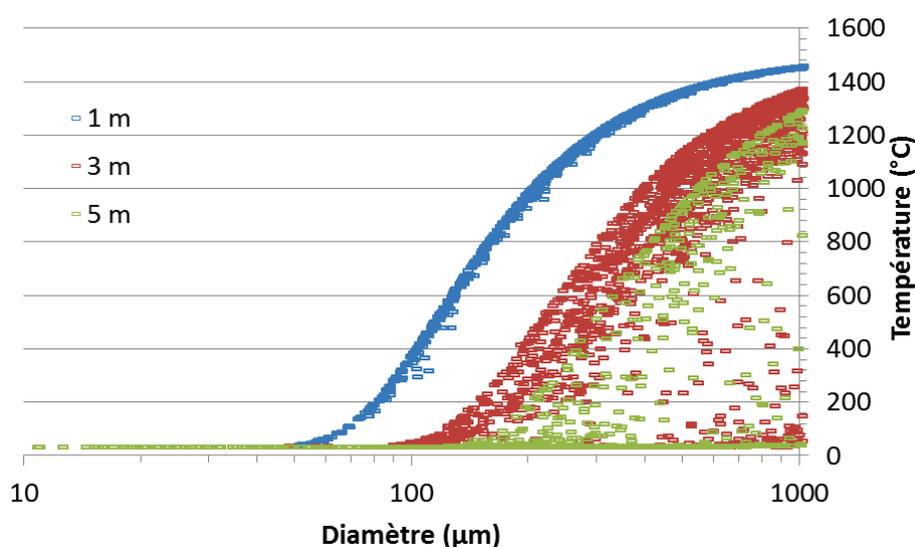
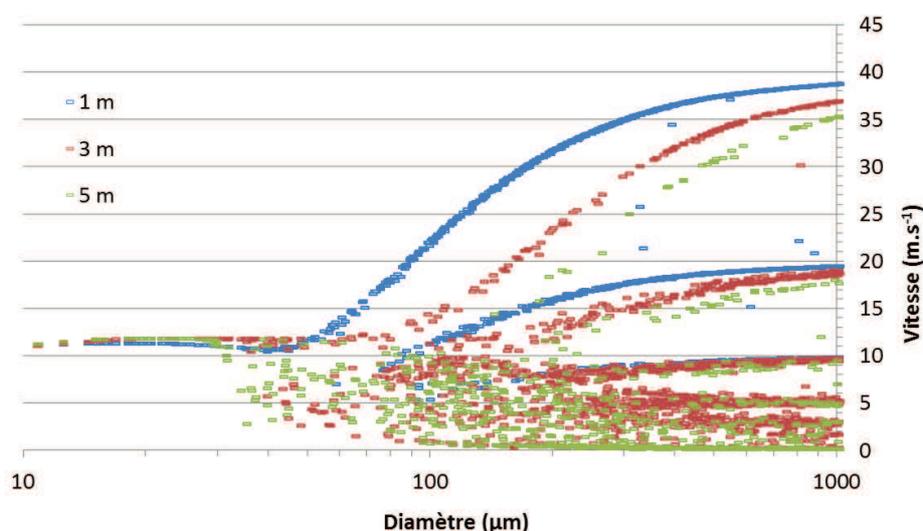


Figure 63 - Distribution en température des particules en fonction de leur diamètre à 1, 3 et 5 m de l'émission

A 1 m, les résultats montrent peu de dispersion dans les valeurs de température et la corrélation entre la taille et la température des particules est très marquée. Les particules dont le diamètre est inférieur à  $50 \mu\text{m}$  sont à la température ambiante à 1 m de la génération due à leur faible inertie thermique (cf. paragraphe 1.2.2). Pour un même diamètre de particule, une dispersion importante de la température est mise en évidence sur les profils réalisés à 3 et 5 m, le phénomène s'amplifiant avec l'augmentation de la distance par rapport à la source des particules. L'émission des particules selon une géométrie conique dans un milieu confiné contribue à accroître les interactions pariétales (sans échange de chaleur car les parois sont considérées comme isotherme) ce qui tend à différencier les trajectoires des particules injectées avec différentes composantes radiales. Cette dispersion est induite par le fait que les particules de même taille ont des trajectoires différentes ce qui engendre une variabilité de leurs temps de transit et donc de la quantité de chaleur échangée avec le fluide.

La distribution des vitesses des particules en fonction de leur diamètre sont présentées sur la Figure 64, à 1, 3 et 5 m de la génération.



**Figure 64 - Evolution de la répartition de la vitesse des particules en fonction de leur diamètre à 1, 3 et 5 m de la génération**

Les résultats des simulations montrent que les particules dont le diamètre est inférieur à  $30 \mu\text{m}$  (diamètre équivalent aérodynamique de  $84 \mu\text{m}$ ), semblent être à la vitesse du fluide à 1, 3 et 5 m. Pour les particules de diamètre supérieur à  $30 \mu\text{m}$ , la dispersion est due aux trajectoires et à l'impact pariétal, qui est dépendant du Coefficient de Restitution (COR). Rappelons qu'avec un COR fixé à la valeur de 0,5, la vitesse d'une particule après impact est ainsi divisée par 2.

Lors de la découpe, le diamètre du disque de l'outil diminue du fait de son usure. Sa vitesse de rotation étant constante, la vitesse d'éjection des particules en périphérie du disque décroît. De plus, le colmatage du filtre pendant la découpe entraîne une augmentation de sa perte de charge, qui en l'absence de régulation de la

ventilation, se traduit par une modification des conditions aérauliques dans le conduit, c'est-à-dire une diminution de la vitesse débitante. Ces deux aspects sont étudiés lors de l'étude de sensibilité présentée en Annexe 5.

En conclusion, les simulations CFD ont été réalisées pour déterminer l'évolution des caractéristiques des particules dans un conduit de ventilation. Les particules de tailles inférieures à 50  $\mu\text{m}$  possèdent une faible inertie thermique et une faible quantité de mouvement et ne représentent, à priori, d'après les simulations, pas un risque vis-à-vis de la problématique de la dégradation des filtres.

En revanche, pour les particules de diamètre supérieur, leur inertie thermique et leur comportement balistique leur permettent d'être encore à des températures très élevées à 5 m de l'émission. Dans la réalité, cette température est à majorer car les phénomènes exothermiques d'oxydation ne sont pas pris en compte dans les simulations.

## **4.2. Protocole expérimental**

### **4.2.1. Généralités**

Les objectifs des essais sont la caractérisation des particules en termes de taille, vitesse et température dans le conduit de ventilation, à différentes distances de l'outil de découpe et de quantifier la dégradation du filtre par la mesure de son Coefficient d'Épuration (CE). Pour caractériser les particules, il est nécessaire de reproduire les essais en effectuant différentes découpes de métal. La reproductibilité de la génération des particules est donc essentielle (*cf.* paragraphe 4.2.3).

Les pyromètres utilisés pour mesurer la température en vol des particules ont besoin d'une phase initiale de 30 minutes pour refroidir leurs détecteurs afin de limiter le bruit de fond de la mesure. Pendant ce temps, la configuration requise pour l'essai est mise en place. La disqueuse est préparée, positionnée et les pièces de métal à découper sont initialement pesées et mises en place.

Le filtre TEST neuf dont le coefficient d'épuration a été au préalable caractérisé (*cf.* paragraphe 2.2.2), est positionné dans le caisson de filtration.

Pendant la découpe, les mesures de la vitesse et de la température des particules sont acquises. Pour chaque découpe, la distance entre l'émission des particules et le filtre TEST est maintenue constante. Suite à cette première découpe, le filtre TEST est sorti de CAPIMIF et son CE est à nouveau déterminé dans l'installation Alizé. Un délai de 10 minutes entre chaque découpe est nécessaire afin de conserver les mêmes conditions initiales pour chaque essai.

Pour l'obtention de la granulométrie des particules, des essais spécifiques sont réalisés, car cette mesure par prélèvement sur filtre est intrusive.

A la fin de l'essai, la ventilation essai est arrêtée et la ventilation ambiante est mise en route afin d'assainir l'atmosphère du sas. La pièce de métal et l'outil sont de nouveau pesés afin d'estimer la répartition de perte de masse des divers composants. Enfin, le pesage du bac à scories permet de mesurer la fraction massique de particules déposée dans le champ proche de la disqueuse (rayon de 20 cm autour de la disqueuse).

#### 4.2.2. Grille d'essais

Les caractéristiques et le nombre des particules atteignant le filtre dépendent du terme source produit initialement et des conditions de son transport dans le conduit de ventilation.

Le Tableau 21 résume les paramètres de contrôle de l'installation CAPIMIF qui permettent de faire varier le terme source et les conditions de son transport dans le conduit de ventilation.

Tableau 21 - Paramètres pris en compte dans CAPIMIF

Paramètres	Valeurs
Distance outil/filtre (cm)	60 / 150 / 300 / 450
Débit d'aspiration ( $m^3 \cdot h^{-1}$ )	0 / 180 / 290 / 350 / 450
Matériaux	Acier inox 304L / Acier doux Adx
Force d'appui et vitesse d'avance	61 N – $0,17 \text{ mm} \cdot s^{-1}$ / 78 N – $0,225 \text{ mm} \cdot s^{-1}$ / 88 N – $0,28 \text{ mm} \cdot s^{-1}$

Les positions dans le conduit de ventilation où sont mesurées les grandeurs relatives aux particules sont présentées sur la Figure 65.

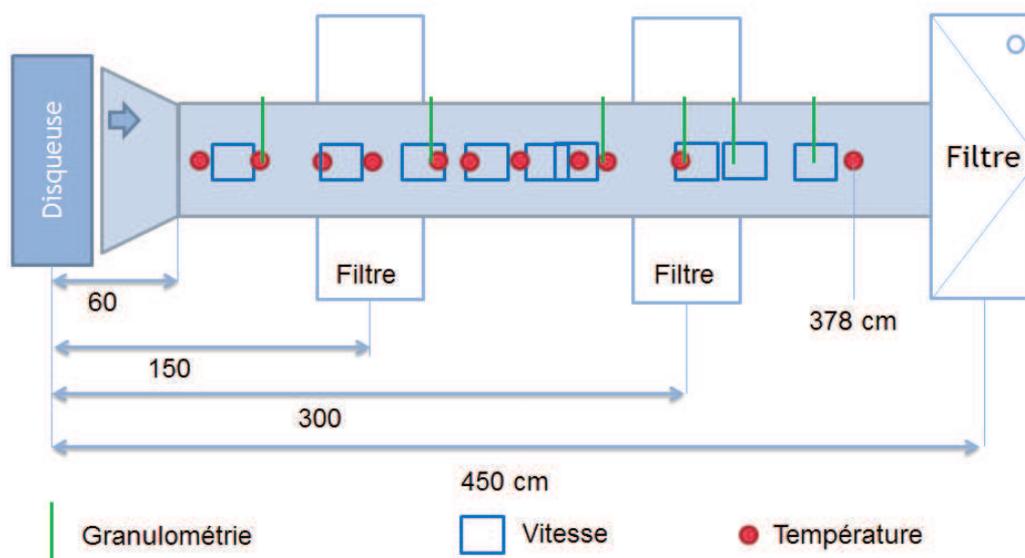


Figure 65 - Distances de mesures effectuées pour les mesures de vitesse, taille et température des particules, ainsi que les emplacements des filtres pour la mesure de CE

Signalons que la Figure 65 ne représente pas les positions des mesures effectuées dans le champ proche de la disqueuse ( $d < 60$  cm) afin de caractériser la production initiale de particules.

Par la suite, la découpe concerne une pièce d'acier inoxydable avec une force d'appui de 78 N.

### 4.2.3. Reproductibilité

Différents paramètres du procédé de découpe vont influencer la production initiale de particules. Il est donc important de déterminer la dispersion de ces paramètres afin d'estimer le nombre d'essais de répétabilité à réaliser.

La génération de particules, en termes de débit massique et de caractéristiques de particules, dépend de l'épaisseur de la plaque, de la géométrie du disque de découpe et de sa vitesse de rotation (*cf.* paragraphe 1.1.3).

Le Tableau 22 rassemble les dimensions des disques de découpe et des pièces métalliques utilisés dans la cadre de cette étude.

**Tableau 22 - Caractéristiques et tolérances des pièces métalliques (20 éprouvettes) et des outils de découpe (20 disques) utilisés pour cette étude**

	Pièce d'acier inoxydable		Disque de découpe	
	Valeur	Ecart type	Valeur	Ecart type
Dimension caractéristique ( $\pm 1$ mm si supérieure à 10 cm sinon $\pm 0,1$ mm)	3,96 mm	0,08 mm	Diamètre : 351,2 mm	1,2 mm
			Epaisseur : 3 mm	0,08 mm

La diminution du diamètre du disque mesurée pendant une découpe d'une durée de 20 s, avec une force d'appui de 78 N est de 1,7 mm ( $\pm 0,1$  mm). Cette usure du disque correspond à une diminution de la vitesse périphérique du disque de 3,7 %, ce qui peut être considéré comme négligeable.

La répartition aléatoire des grains d'abrasifs entraîne une certaine hétérogénéité au sein du disque. De plus, les grains d'abrasifs, outils élémentaires du disque, ont des caractéristiques (tailles, angles saillants, etc.) eux-mêmes aléatoires ce qui conduit potentiellement à produire une génération non stationnaires de particules. Afin de juger de la reproductibilité globale de la génération des particules, celles-ci ont été visualisées par caméra rapide sur plusieurs essais avec une configuration identique, à savoir, à une distance 178 cm de la génération, et un débit de ventilation de  $450 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ . Les résultats obtenus sur 10 découpes avec la caméra rapide sont présentés dans le Tableau 23.

**Tableau 23 - Moyennes et écarts types des trajectoires par image et vitesse moyenne des particules incandescentes, sur 10 découpes à 178 cm de la génération**

	Nb moyen de particules	Nb moyen des particules ascendantes	Nb moyen des particules descendantes	Nb moyen de particules horizontales	Vitesse moyenne (m.s <sup>-1</sup> )
Moyenne (10 découpes)	18,4	3,7	13,8	0,9	8,3
Ecart type (%)	5,1	20,4	17,9	55,66	2,7

Ces résultats montrent un écart type relativement faible concernant le nombre et la vitesse moyenne des particules. En revanche, l'écart type relatif aux trajectoires des particules (ascendantes, descendantes et horizontales), confirme la dispersion importante des trajectoires de particule.

Le volume de mesure du pyromètre étant de nature ponctuelle, l'effet des trajectoires des particules sur la mesure est importante. La durée de la génération des particules doit être choisie de manière à avoir un nombre suffisant de particules pouvant être détectées par l'instrument.

L'écart type des valeurs de température est présenté dans le Tableau 24.

**Tableau 24 - Moyennes et écarts types du nombre et de la température des particules sur 15 découpes à 185 cm de l'émission**

	Nombre moyen de particules	Température moyenne (°C)	Moyenne des écarts types par classe de température de 25 °C
Moyenne (15 valeurs)	4642	844	
Ecart type (%)	5,96	4	29,3

Le nombre de particules et la température moyenne sont caractérisés par un faible écart type, en revanche, l'écart type moyen défini par classe de température de 25 degrés sur 15 découpes est très élevé.

La dispersion de la granulométrie des particules, obtenue à l'aide de prélèvements sur filtre, à une distance de 363 cm a été évaluée. On considère, dans le Tableau 25, le diamètre moyen et l'écart type moyen pour chaque classe de taille.

**Tableau 25 - Moyennes et écarts types des valeurs obtenues avec le prélèvement sur filtre sur 10 découpes à 363 cm de l'émission**

	Diamètre moyen (µm)	Moyenne des écarts types par classe de tailles de 6 µm
Moyenne (10 valeurs)	134	
Ecart type (%)	16	44

Les différentes trajectoires des particules couplées à leur faible nombre impactant le filtre à cette distance mène à un écart type important.

Une certaine variabilité de la découpe nécessite la réalisation d'un grand nombre d'essais afin d'avoir une mesure représentative. Au minimum une moyenne de 20 essais a été réalisée dans chaque configuration.

Cette partie a permis de présenter le protocole des différents essais réalisés dont les résultats sont présentés et analysés ci-après.

### 4.3. Analyse de la production de particules en lien avec la phénoménologie de la découpe

La production de particules lors de la découpe d'une plaque d'acier inoxydable pour une force d'appui de 78 N est étudiée dans ce paragraphe. Les particules produites lors de la découpe proviennent de deux sources, la pièce et l'outil. La production totale de particules en masse est issue à 70 % de la pièce et 30 % de l'outil, comme le montrent les résultats présentés sur la Figure 66.

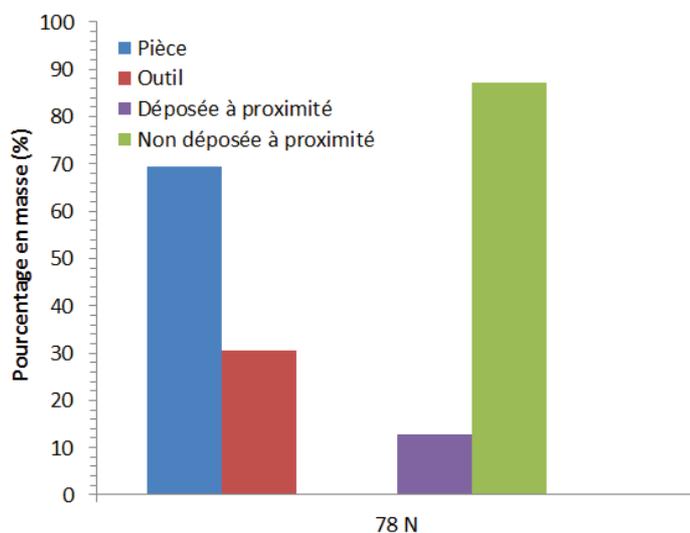


Figure 66 - Répartition en pourcentage massique des particules provenant de la pièce et de l'outil et la proportion de particules déposée et non déposée à proximité de la disqueuse, pour une découpe

Les mesures de pesée du bac à scories montrent que 13 % de la masse totale perdue par la pièce et l'outil, sédimente à proximité de la disqueuse.

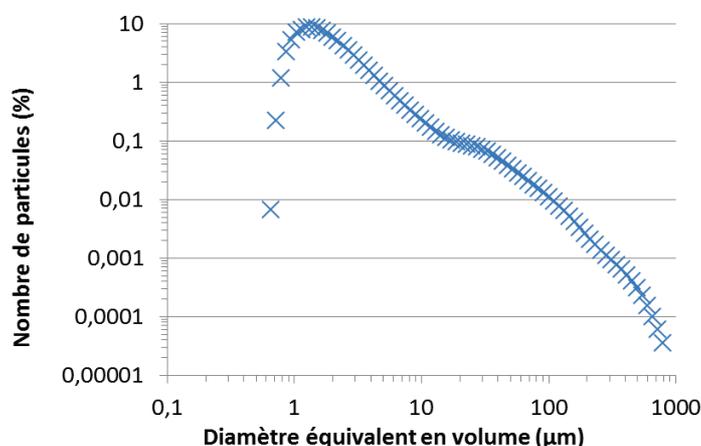
Par la suite, nous caractériserons les particules près du point d'émission puis nous nous intéresserons à l'évolution temporelle de la génération.

#### 4.3.1. Caractéristique des particules près du point d'émission

Les résultats suivants sont acquis dans une configuration en champs libre, c'est-à-dire sans le conduit de ventilation (pas d'aspiration).

#### 4.3.1.1. Granulométrie

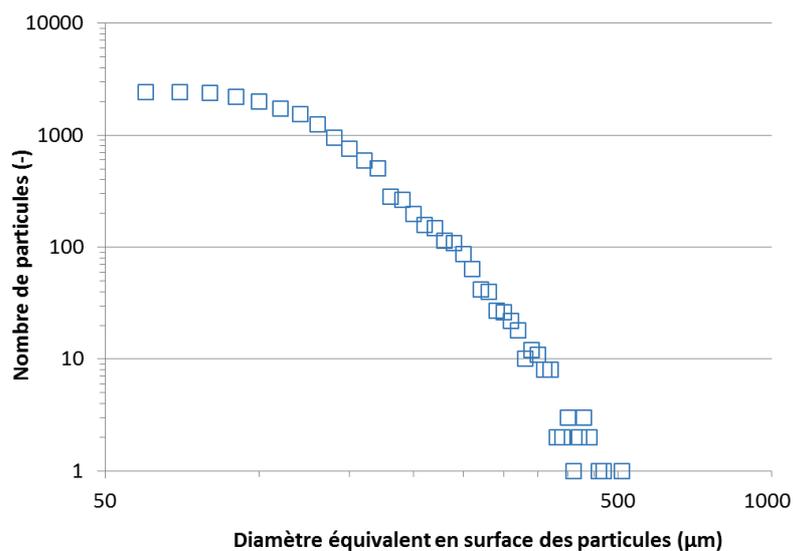
Les particules retenues dans le bac à scories, ont été analysées à l'aide d'un diffractomètre (Laser Diffraction Particle Size Analyser (LDPS) de Beckman Coulter®) et les résultats sont présentés sur la Figure 67.



**Figure 67 - Distribution granulométrique en pourcentage des particules ramassées à proximité de la disqueuse**

La distribution granulométrique des particules est très large avec des particules allant de 0,65 µm à 800 µm. Il semble que beaucoup de particules ayant une faible inertie, sédimentent à proximité de la disqueuse ainsi que des particules à plus forte inertie émises à faible vitesse et/ou avec des trajectoires verticales descendantes.

Nous nous intéressons maintenant aux autres particules qui ne sédimentent pas dans le voisinage immédiat de la disqueuse, et plus précisément aux particules encore en vol dans son champ proche (< 1 m). La forte concentration de particules à l'émission rend les prélèvements sur scotch inexploitable. Afin de déterminer la granulométrie des particules émises, un filtre plan carré de 40 cm de côté est placé perpendiculairement à l'axe de la gerbe d'étincelles, au centre de celle-ci, à 46 cm de l'émission. La distribution granulométrique obtenue est tracée sur la Figure 68.



**Figure 68 - Distribution granulométrique déterminée par le microscope Morphologi sur des filtres plans à 46 cm de l'émission en air libre**

Le diamètre maximal de particule relevé est de 510  $\mu\text{m}$ . Comme cela a été expliqué dans le paragraphe 2.2.4, une ségrégation de la collecte des particules par le filtre a été identifiée en fonction de la température des particules, laquelle influence l'interaction avec le médium filtrant (collecte, rebond). Toutefois, la dispersion de la température des particules est minimale au point d'émission, puis elle augmente avec la distance par rapport au point d'émission pendant la phase de refroidissement des particules. Nous pouvons donc considérer que le biais de mesure issu du prélèvement des particules sur le filtre est minimal dans le cas présent.

Pour caractériser les particules de taille inférieure au seuil de détection du microscope, des prélèvements ont été réalisés à une distance de 1 m en aval de la disqueuse en l'absence de ventilation et analysés à l'aide d'un APS. La distribution granulométrique de l'aérosol prélevé durant une découpe est présentée sur la Figure 69. Elle met en évidence une production importante de particules microniques et submicroniques.

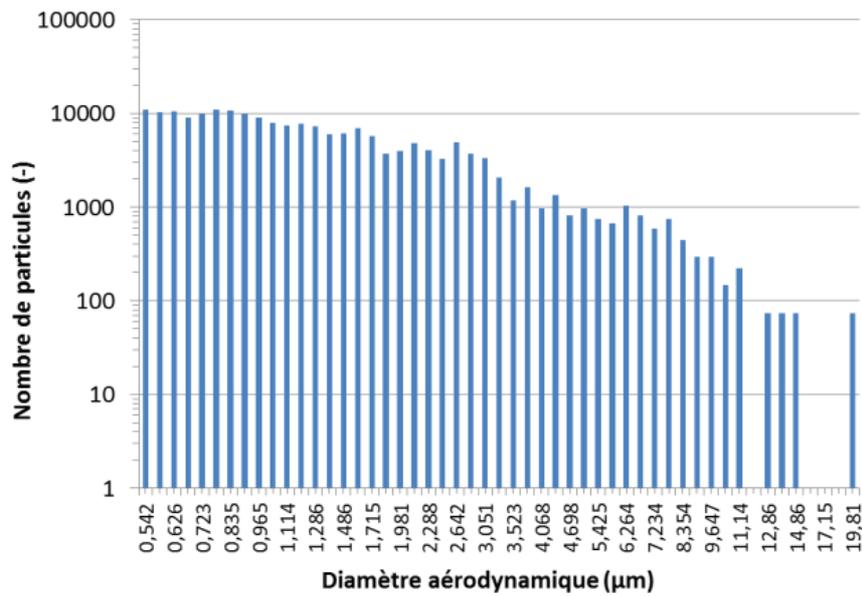
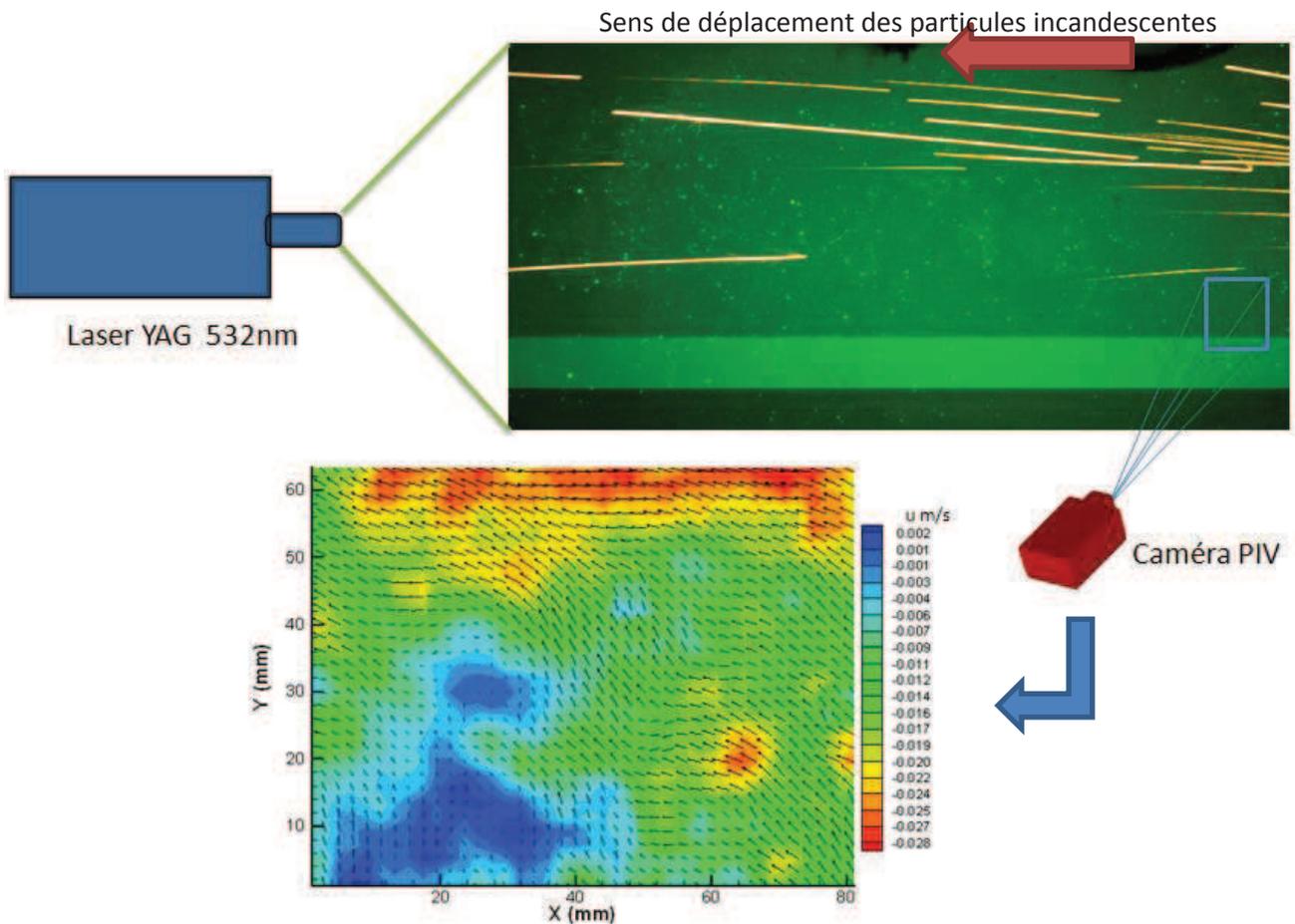


Figure 69 - Distribution granulométrique en nombre de particules mesurée à 1 m en aval de la disqueuse

#### 4.3.1.2. Vitesse des particules

Le champ de vitesses des particules microniques a été visualisé, à l'aide de la technique PIV, à proximité de l'émission. La présence des particules incandescentes, émettant en continu un rayonnement dans le spectre visible, perturbe la réalisation des mesures PIV et c'est pourquoi celles-ci ne peuvent s'effectuer qu'en dehors de la gerbe d'étincelles (cf. paragraphe 2.2.3). La Figure 70 montre une configuration et son champ moyen de vitesses associé, acquis durant une découpe.



**Figure 70 - Champ moyen de vitesses des particules non incandescentes acquis en dessous de la gerbe d'étincelles**

Les visualisations montrent une concentration très importante de particules non incandescentes, dont la présence est révélée par l'éclairage du plan laser. De plus, comme le montre la partie supérieure du champ de vitesse, la gerbe d'étincelle génère un écoulement colinéaire à la composante principale des étincelles, du fait de l'entraînement de ces dernières ainsi que par effet thermique. En s'éloignant de la gerbe d'étincelles, les vitesses relevées sont de l'ordre de celles caractéristiques d'un écoulement de convection naturelle dans un local.

Les particules métalliques éjectées de la pièce possèdent une énergie cinétique transmise par la rotation du disque. La mesure de l'évolution de la vitesse périphérique du disque pour 3 découpes est présentée Figure 71.

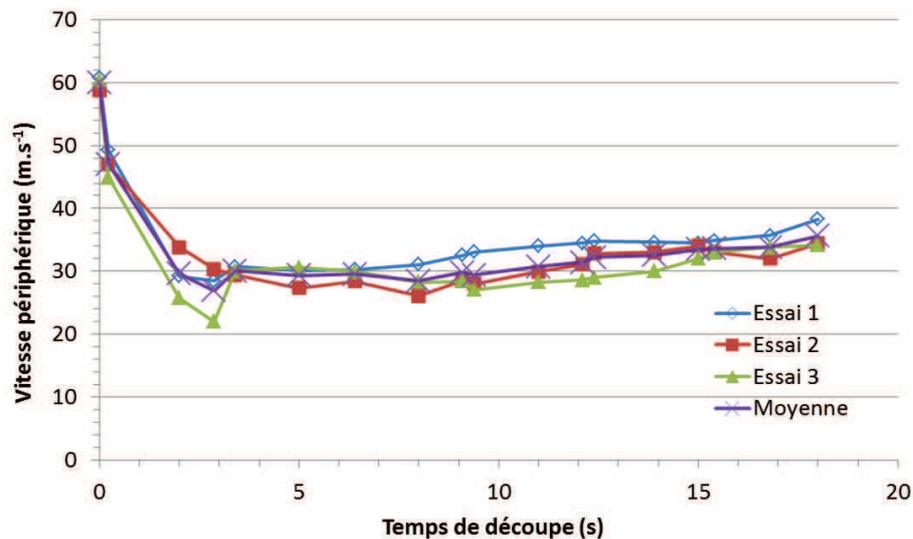
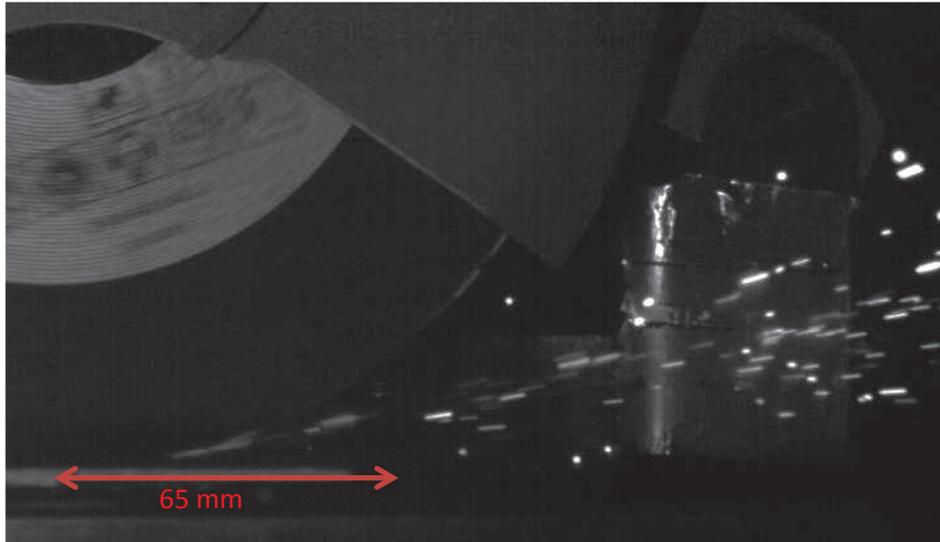


Figure 71 - Evolution de la vitesse périphérique du disque en fonction du temps pendant une découpe

La vitesse périphérique du disque sans contact avec la pièce est de  $61 \text{ m.s}^{-1}$  ( $t=0 \text{ s}$ ), puis lorsque la découpe débute ( $t=0,5 \text{ s}$ ), la vitesse chute brutalement à  $50 \text{ m.s}^{-1}$  et continue de diminuer au fur et à mesure que l'outil pénètre dans la pièce pour se stabiliser à une vitesse d'environ  $30 \text{ m.s}^{-1}$  au bout de 4 s de découpe. Après cette phase de stabilisation (12 s), la vitesse augmente à nouveau vers la fin de la découpe pour finir à  $35 \text{ m.s}^{-1}$  lorsque la surface de contact entre l'outil et la pièce diminue du fait de la traversée de la plaque par le disque.

Cette évolution est liée d'une part, à la pénétration du disque dans la pièce métallique et d'autre part, à des mécanismes complexes influençant les frottements entre le disque et la plaque dépendant de leurs températures respectives. La vitesse initiale d'éjection des particules est dépendante de la vitesse de rotation du disque mais aussi de l'évolution des propriétés physiques du métal de la pièce et du disque au cours de la découpe.

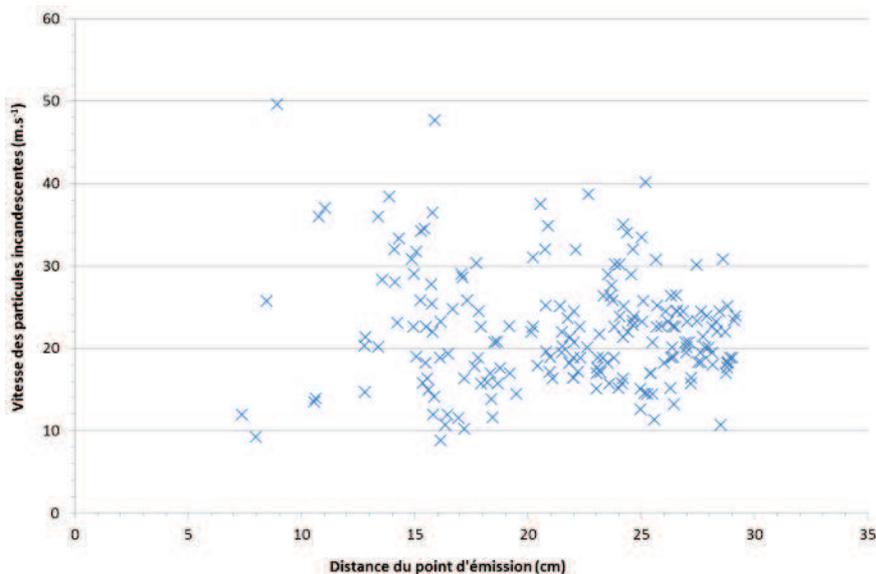
La vitesse des particules incandescentes est mesurée grâce à l'utilisation d'une caméra rapide et de la technique PTV (présentée au paragraphe 2.2.3). Une image de la caméra rapide obtenue au niveau du trait de coupe est présentée sur la Figure 72.



**Figure 72 - Image des particules incandescentes émises par la disqueuse**

Cette image met en évidence une zone peu lumineuse située autour du disque et l'éjection de particules plus lumineuses en aval du point d'émission. La profondeur de champ de la caméra étant de l'ordre de 120 mm, l'augmentation de la luminosité des particules métalliques est attribuée au phénomène d'oxydation du fer, composant majoritaire des particules. La cinétique d'oxydation étant très rapide, elle est compatible avec le temps mis par une particule pour parcourir les 15 cm de l'image (cf. Tableau 7). Cette réaction exothermique augmente la température de surface de la particule (cf. paragraphe 1.2.2) et modifie sa composition de surface responsable d'une augmentation de l'émissivité (cf. paragraphe 3.4.4), contribuant ainsi à la rendre plus lumineuse.

Les vitesses des particules incandescentes mesurées sur 1 s de découpe sont présentées sur la Figure 73.



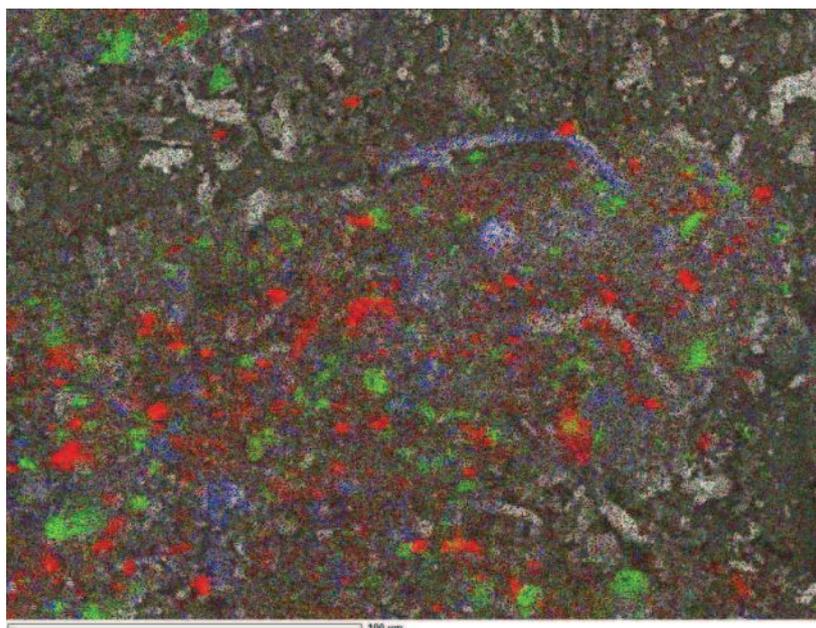
**Figure 73 - Répartition de la vitesse des particules incandescentes en fonction de la distance du point d'émission, pendant 1 s de découpe**

Il apparaît une dispersion de la vitesse des particules dès leur émission. Les vitesses minimale et maximale relevées sont respectivement 9 et 50  $\text{m.s}^{-1}$  avec une valeur moyenne autour de 20  $\text{m.s}^{-1}$ .

Plusieurs hypothèses peuvent expliquer cette dispersion. Tout d'abord, il y a une dispersion des vitesses initiales induite par la nature polydispersée des particules (cf. paragraphe 1.2.1). Par ailleurs, cette dispersion est aussi inhérente aux processus mécaniques intervenant dans la découpe de métal par un disque en rotation (hétérogénéité du disque, chargement dans les pores du disque, frottements latéraux, etc.).

#### 4.3.1.3. Composition des particules

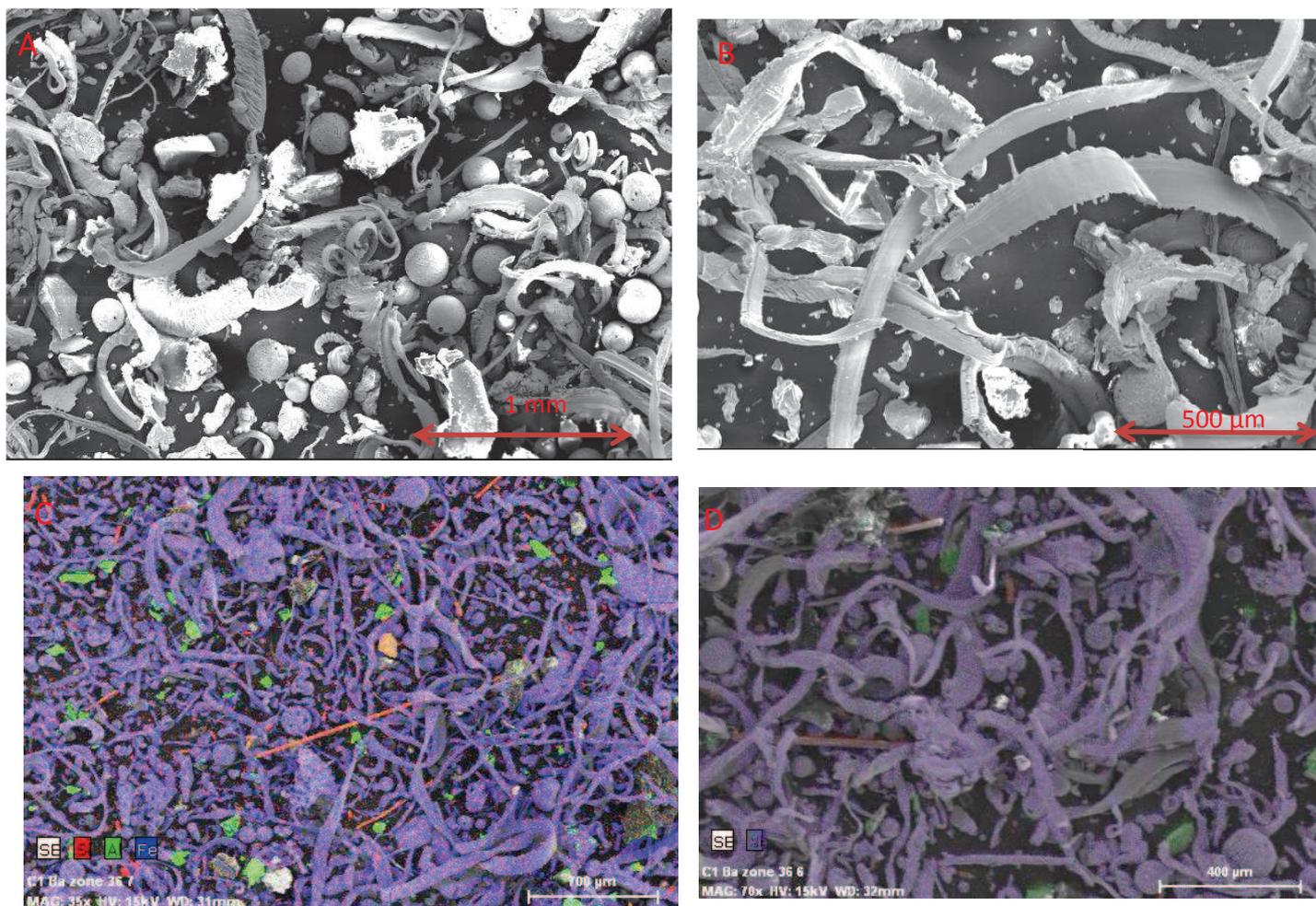
Les analyses par granulomètre et les visualisations PIV ne permettent pas de différencier la composition des particules non incandescentes. Pour cela, des prélèvements sur des filtres positionnés en série sur la ligne de l'APS ont été réalisés dans l'air ambiant pendant une découpe. Ils ont été analysés grâce à la technique de détection chimique à l'EDS afin de déterminer leur composition (Figure 74).



**Figure 74 - Visualisation au MEB avec analyse EDS de la composition chimique des particules (bleu = fer, rouge = silice et vert = aluminium)**

Le fer est détecté sous forme de traces tandis que les particules contenant de l'aluminium et de la silice sont révélées en quantité importante.

La morphologie des particules produites lors de la découpe et sédimentant à proximité de la disquetteuse a été analysée à l'aide de visualisations au MEB couplées avec une analyse EDS (Figure 75).



**Figure 75 – Visualisations des prélèvements réalisés à proximité de la disqureuse ; images A, B, visualisations au MEB, images C, D, analyses EDS (bleu = fer, rose = chrome, cyan = nickel, rouge = silice et vert = aluminium)**

Les images MEB visualisées sur la Figure 75 sont similaires à celles de Malkin (1984) avec des copeaux lamellaires, des copeaux « patatoïdes » et des particules sphériques. Les particules sphériques, dont la présence témoigne de l'atteinte de la température de fusion du matériau, proviennent exclusivement de la pièce qui est majoritairement composée de fer (pour le fer,  $T_{\text{fusion}} = 1538^{\circ}\text{C}$ ). Ces particules portées à l'état liquide se sont donc solidifiées en vol du fait de leur refroidissement, et n'ont, par conséquent, pas subi de déformation lors de leur impact sur le substrat du prélèvement. La majorité des copeaux observés dont la dimension caractéristique est supérieure à  $50\ \mu\text{m}$  sont composés de fer, nickel et chrome qui sont les principaux éléments de la pièce. Quelques grains d'alumine et des fibres de verre provenant du disque sont retrouvés mais en faible quantité.

#### 4.3.1.4. Température des particules

Des mesures de température réalisées sur la surface de la pièce à proximité du trait de coupe par le pyromètre indiquent une température de l'ordre de  $1000\ ^{\circ}\text{C}$ , ce qui en est accord avec les observations de Kazmarek (2008). Une mesure de la température des particules en vol à l'aide du pyromètre n'a pas pu être

réalisée dans le champ proche de la disqueuse. En effet, il a été montré au paragraphe 3.4.6 que l'incertitude de la loi d'inversion était trop importante à cette distance, en raison de la trop forte dispersion en taille et vitesse des particules.

En conclusion, cette partie a permis de mettre en évidence qu'une production massive prépondérante de particules provenait de la pièce métallique (70 %). Une faible proportion de particules en masse (13 %) est déposée dans le voisinage immédiat de la disqueuse. Les autres particules non sédimentées à proximité de la disqueuse ont une gamme de taille très large, allant de 0,5 à 500  $\mu\text{m}$ . Les particules de diamètre inférieur à 20  $\mu\text{m}$  caractérisées à l'aide de l'APS sont très majoritairement issues de l'outil et sont composées d'alumine et de fibre de verre. En revanche les particules de taille plus importante sont essentiellement composées de fer. D'autre part, nous pouvons noter que certaines de ces particules sont portées à une température supérieure ou égale à leur température de fusion.

Dans le cadre de cette étude nous porterons notre attention sur la population de particules dont l'inertie thermique est suffisante pour atteindre le médium filtrant à une température que nous fixerons, à ce stade du mémoire, comme étant supérieure à 100°C. Les simulations numériques CFD présentées précédemment ont montré que les particules métalliques dont la taille est de l'ordre de 50  $\mu\text{m}$  correspondent à cette population. Par la suite, on focalisera donc l'étude uniquement sur le comportement des particules métalliques dont la taille est supérieure ou égale à 50  $\mu\text{m}$ .

#### **4.3.2. Evolution temporelle des caractéristiques des particules au cours d'une découpe**

Nous allons voir dans cette partie si les caractéristiques des particules peuvent être considérées comme stationnaires en moyenne au cours d'une découpe. Les résultats de caractérisation des particules en termes de vitesse, taille et température dans la conduite de CAPIMIF, avec un débit de 450  $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ , sont présentés.

##### **4.3.2.1. Vitesse des particules incandescentes**

Il a été observé précédemment que la vitesse de rotation du disque évolue durant la découpe (Figure 71). L'évolution de la vitesse moyenne des particules incandescentes par images, mesurée à une distance de 258 cm de la génération est présentée sur la Figure 76.

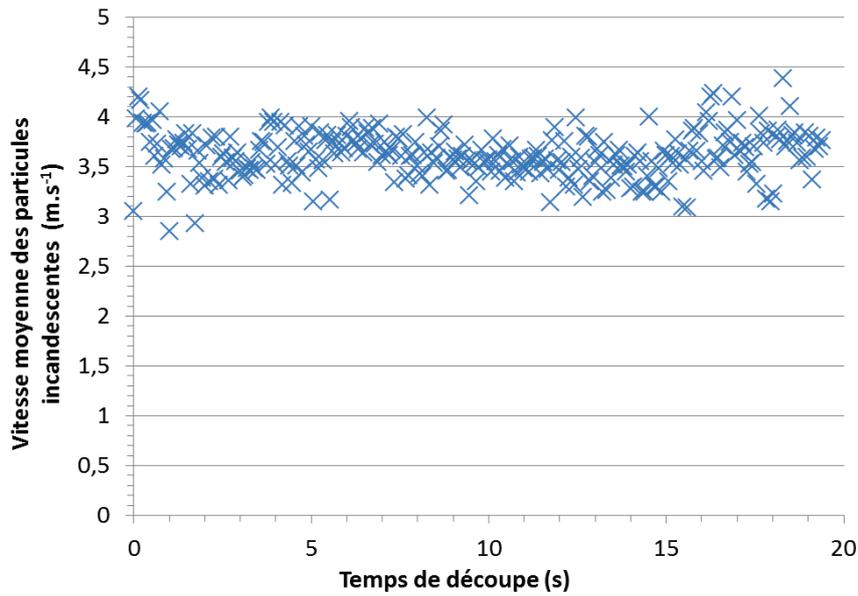


Figure 76 - Vitesse moyenne des particules incandescentes par image mesurée à 258 cm de la génération

Globalement, la vitesse moyenne des particules incandescentes peut être considérée comme stable au cours de la découpe.

#### 4.3.2.2. Granulométrie des particules

La Figure 77 représente l'évolution de la distribution granulométrique obtenue par l'analyse de prélèvements sur filtre acquis pendant une durée 5 s, ceci à différentes phases de la découpe (méthode cf. paragraphe 2.2.4).

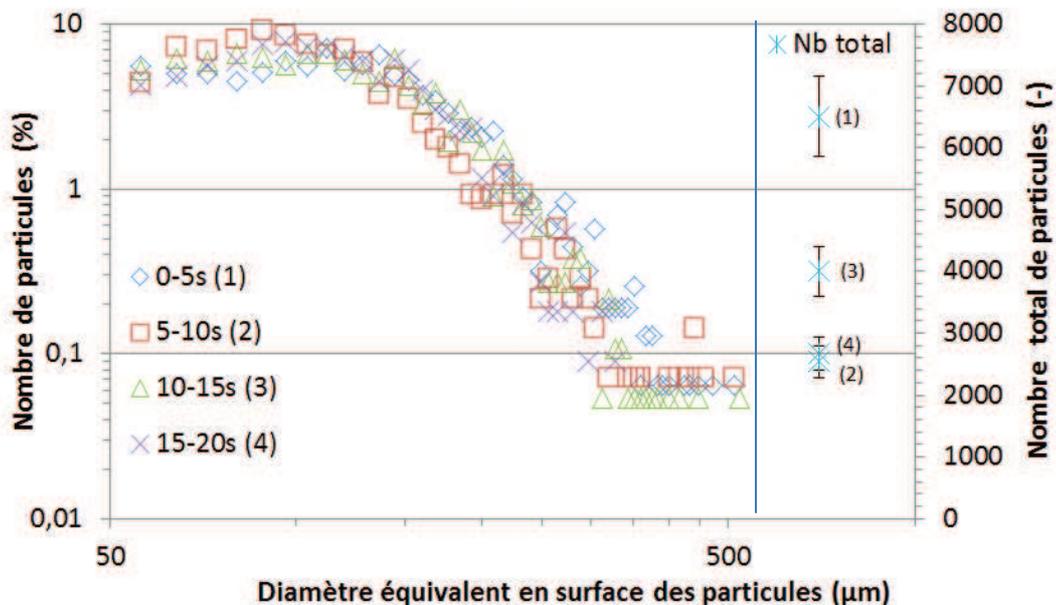


Figure 77 - Répartition du nombre de particules en pourcentage en fonction de leur diamètre à 258 cm de la génération à différents temps, et le nombre totale de particules relevé sur chaque prélèvement

La distribution granulométrique en nombre de particules est similaire pour chacune des phases de la découpe. On peut cependant observer une variation du nombre de particules produites pour les différentes phases considérées avec un pic de production de particules en début de découpe (phase de 0 à 5 s).

#### 4.3.2.3. Température des particules

Nous nous intéressons désormais à l'évolution de la température des particules obtenue en mesurant la luminance des particules à l'aide des deux pyromètres positionnés à 150 et 255 cm de l'émission (Figure 78), pendant une découpe et en appliquant la nouvelle loi d'inversion présentée au Chapitre 3.

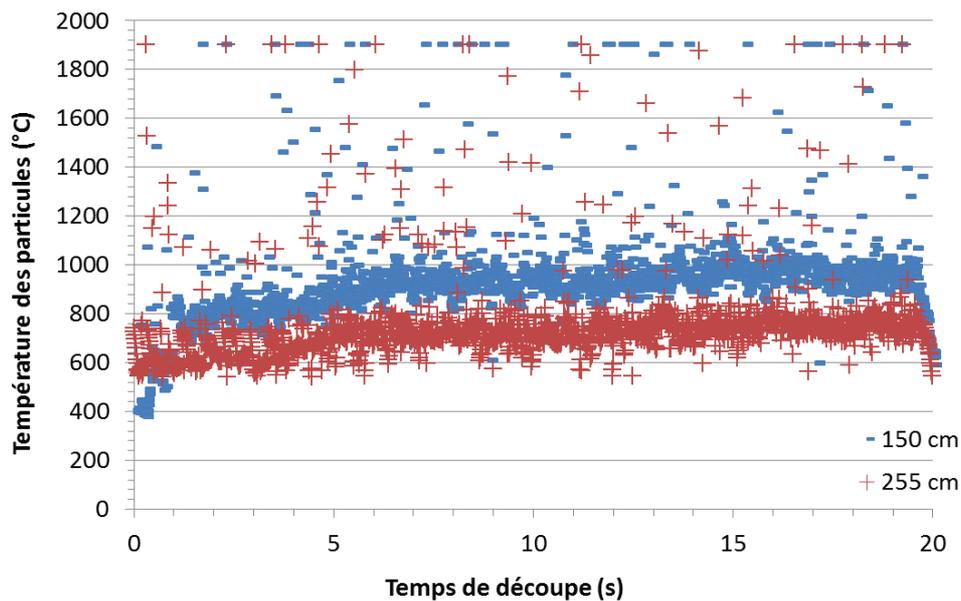


Figure 78 - Température des particules mesurée à 150 et à 255 cm de l'émission

L'évolution temporelle de la température moyenne des particules présente une tendance haussière pendant les 5 premières secondes de la découpe, puis une quasi-stabilisation.

En conclusion, nous avons observé que les caractéristiques des particules (vitesse, distribution granulométrique et température) peuvent-être considérées comme globalement stationnaires en moyenne au cours d'une découpe.

#### 4.4. Etude de l'évolution des caractéristiques des particules

Ce paragraphe est dédié à l'évolution des caractéristiques des particules dans le conduit de ventilation pendant le transport.

#### 4.4.1. Etude du transport des particules dans le conduit de ventilation

Des prélèvements ont été réalisés à différentes distances au centre du conduit de ventilation de l'installation CAPIMIF. La Figure 79 représente les distributions granulométriques des particules (en nombre) déterminées par des prélèvements pendant une découpe à différentes distances par rapport à l'émission.

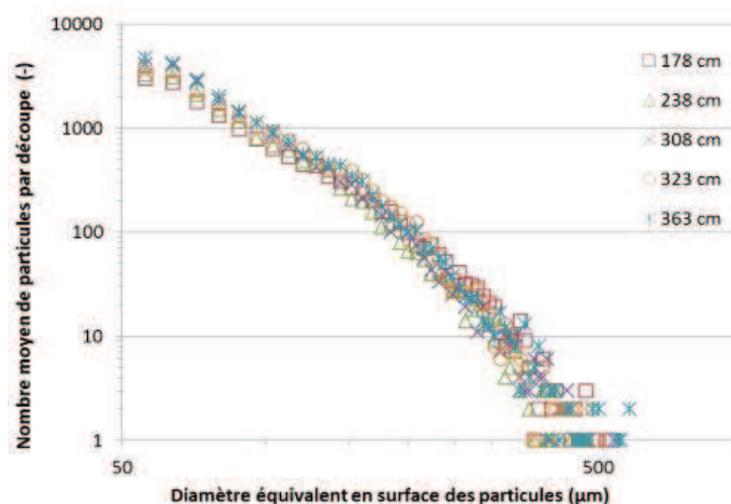


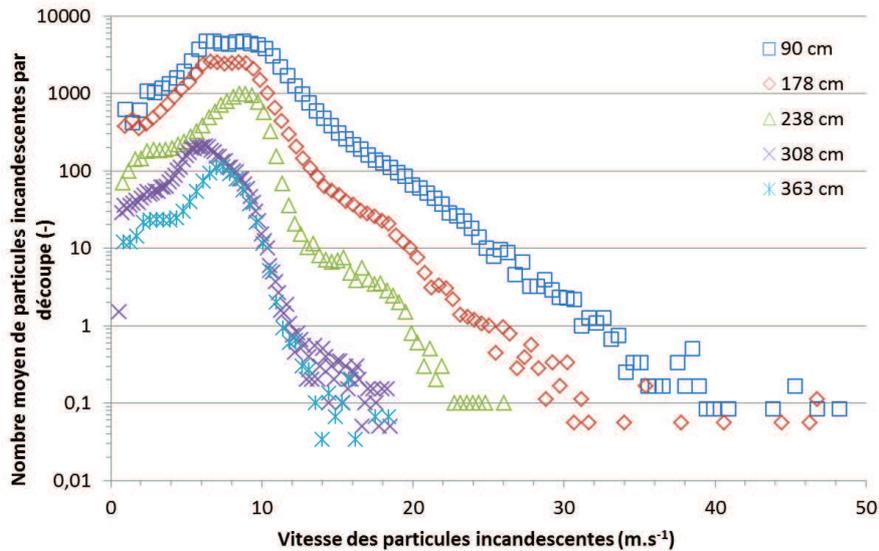
Figure 79 - Distributions granulométriques des particules en nombre mesurées à différentes distances de l'émission

L'échelle logarithmique des courbes rend compte des fortes variations en nombres des populations de particules pour chacune des classes de taille dans la gamme allant de 50 à 500  $\mu\text{m}$  mais cette représentation est peu lisible pour comparer les distributions granulométriques obtenues à différentes distances. Cependant, ces résultats montrent que la distribution granulométrique des particules ne subit pas d'évolution significative sur la gamme de distances considérées (de 178 cm à 363 cm). Cette constatation, qui pourrait à première vue paraître étrange peut s'expliquer simplement. A la distance de 178 cm, il s'est déjà opéré une sélection des particules dans la conduite liée aux phénomènes de rebond et de dépôt des particules, dont la trajectoire initiale n'était pas collinaire à l'axe du conduit de ventilation (gerbe d'étincelles de géométrie conique). Les particules prélevées entre 178 et 363 cm ont donc une inertie suffisante, et un comportement balistique, ce qui explique que leur distribution granulométrique n'est plus dépendante de la distance considérée.

#### 4.4.2. Energie cinétique des particules incandescentes

L'énergie cinétique dépend de la masse et de la vitesse des particules. La majorité des particules proviennent de la pièce et sont composées de fer (cf. paragraphe 4.3) avec une répartition granulométrique quasi constante dans le conduit de ventilation (cf. paragraphe 4.4.1).

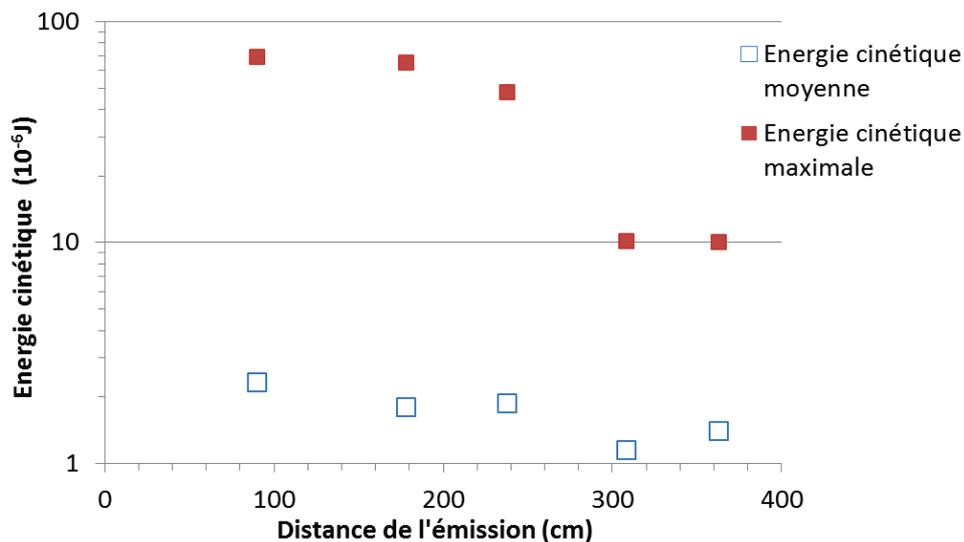
La vitesse des particules incandescentes a été mesurée en fonction de la distance et est représentée sur la Figure 80.



**Figure 80 - Distributions de la vitesse des particules incandescentes mesurées à différentes distances de l'émission**

Logiquement, la vitesse maximale mesurée à chaque distance diminue avec l'éloignement à la source. Ainsi, la vitesse maximale décroît de 50 m.s<sup>-1</sup> à 90 cm de la source jusqu'à atteindre 19 m.s<sup>-1</sup> à 363 cm de la source. Les distributions possèdent un mode principal sous forme de plateau à 98 et 178 cm puis sont plus resserrées au-delà. La vitesse moyenne des particules décroît avec l'augmentation de la distance. En revanche, le mode principal possède une vitesse stable autour de 10 m.s<sup>-1</sup>, ce qui correspond à la vitesse d'entraînement du ventilateur de la conduite de ventilation. L'influence de la vitesse d'aspiration est étudiée au paragraphe 4.5.2.

En associant les résultats concernant les mesures de diamètre et de vitesse des particules, il est possible d'évaluer l'énergie cinétique moyenne et maximale en fonction de la distance à l'émission, comme présenté sur la Figure 81.



**Figure 81 - Energie cinétique moyenne et maximale des particules évaluées à différentes distances de l'émission**

Pour calculer les énergies cinétique moyenne et maximale, nous considérons le diamètre moyen égal à 242  $\mu\text{m}$ . L'énergie cinétique maximale décroît avec la distance (de 69 à 10  $10^{-6}$  J), cependant, l'énergie cinétique moyenne varie peu (de 2,3  $10^{-6}$  à 1,4  $10^{-6}$  J).

#### 4.4.3. Energie thermique des particules

Les distributions de température à différentes distances sont tracées sur la Figure 82.

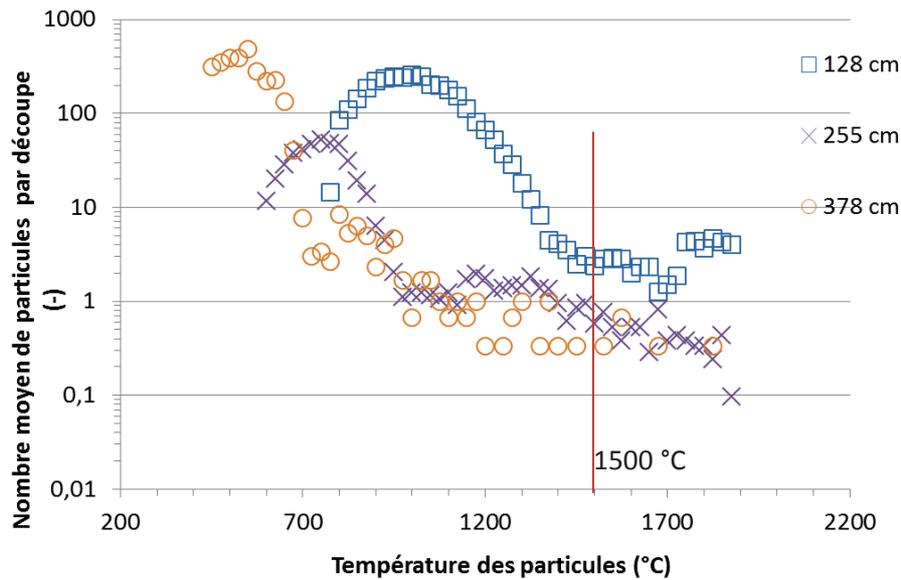


Figure 82 - Distributions de la température des particules à différentes distances de l'émission

Les distributions de température possèdent un mode principal qui, conformément aux attentes, se déplace vers les plus faibles valeurs avec l'augmentation de la distance à l'émission. On peut noter que, logiquement, le nombre de particules en fusion (dont la température est supérieure à 1500 °C) diminue avec la distance. Les distributions de l'énergie thermique moyenne des particules déterminée à partir des mesures de température sont présentées sur la Figure 83.

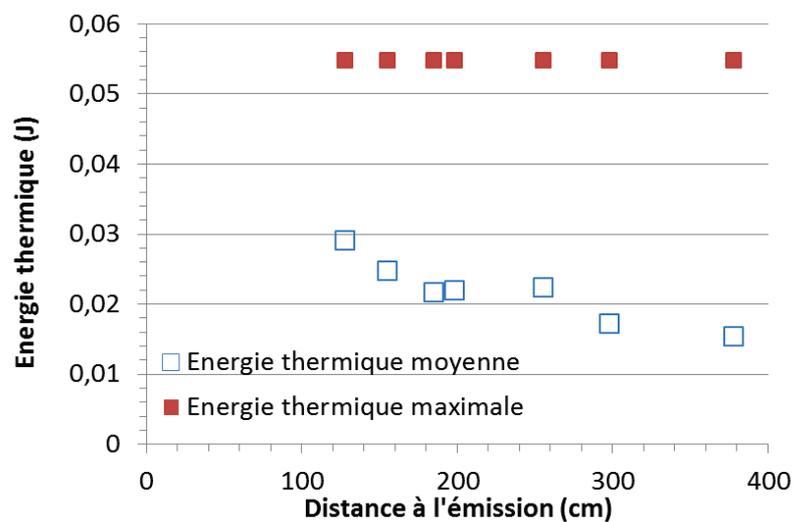


Figure 83 - Energie thermique moyenne et maximale à différentes distances de l'émission

L'énergie thermique des particules décroît avec la distance et est comprise entre 0,01 et 0,06 J, et est nettement supérieure à l'énergie cinétique ( $10^{-6}$  J).

#### 4.4.4. Conclusion

Le paragraphe 4.4 a permis de déterminer les distributions des particules en termes de diamètre, vitesse et température à différentes distances de l'émission. Ces distributions, liées à une dégradation de l'efficacité de filtration du filtre (cf. Chapitre 5), doit permettre d'établir des corrélations empiriques de dégradation du filtre en fonction des caractéristiques des particules.

L'évolution de la vitesse et de la température moyenne des particules incandescentes fonction de la distance à l'émission est représentée sur la Figure 84.

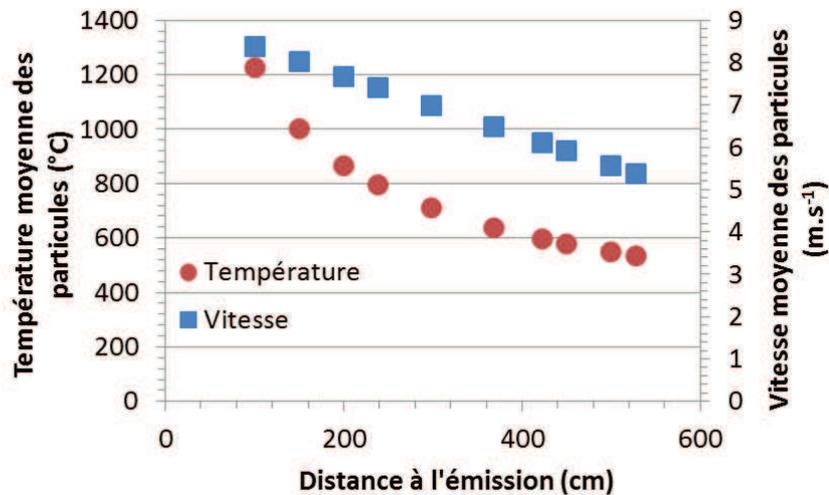


Figure 84 - Evolution de la vitesse et de la température moyenne des particules

La courbe de température moyenne des particules suit une décroissance sous une forme d'une courbe puissance due à la réaction exothermique d'oxydation. La courbe de vitesse moyenne des particules incandescentes suit quant à elle une décroissance linéaire. Cette évolution est due au caractère incandescent des particules, ce qui implique que seules les particules dont la température est supérieure à 400 °C sont mesurées.

## 4.5. Effet de sensibilité des paramètres influençant la génération des particules

Il a été montré au paragraphe 1.1.3 que les conditions de coupe (force d'appui, vitesse d'avance, etc.) et la nature du métal étaient des paramètres déterminants influençant la production de particules.

### 4.5.1. Métal et conditions de coupe

Nous avons abordé ce problème avec une approche industrielle par l'observation de l'évolution des caractéristiques des particules pour trois forces d'appui et deux types de métaux différents (composition en Annexe 1). Aucune analyse poussée des résultats pouvant expliquer le lien entre la production de particules et les caractéristiques des métaux n'a été effectuée. En effet, cela nécessiterait une étude spécifique de phénomènes complexes (métallurgie) qui sont à la marge de cette étude.

La Figure 85 rassemble les résultats concernant la répartition des pertes de masse, en pourcentage, selon la pièce et l'outil ainsi que la quantité totale non déposée à proximité de la disqueuse.

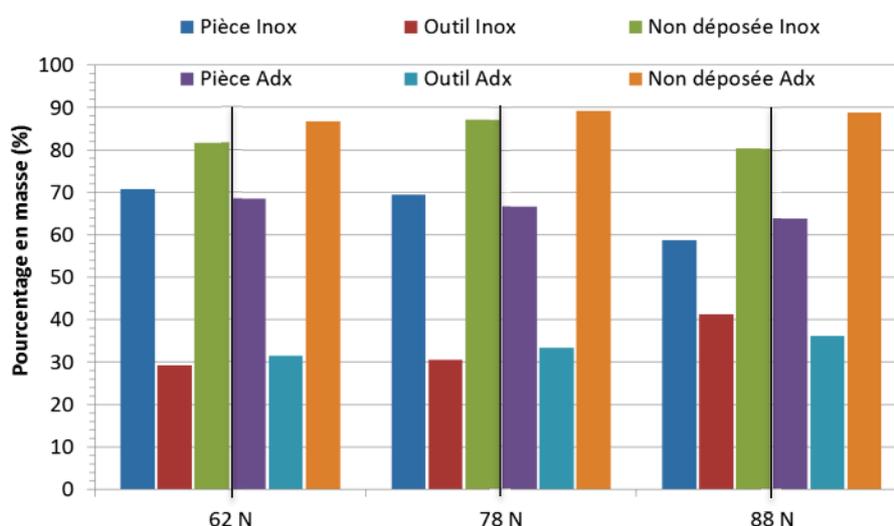
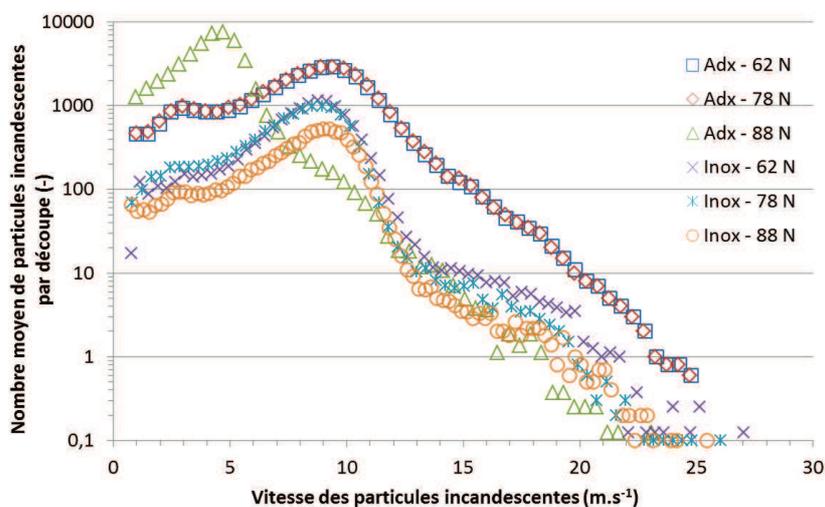


Figure 85 - Répartition des pertes de masse en pourcentage pour l'outil et la pièce, en acier inoxydable (Inox) et acier doux (Adx), ainsi que la fraction non déposée à proximité de la disqueuse, pour différentes forces d'appui (62, 78 et 88 N)

La répartition de perte de masse est similaire entre l'acier inoxydable et l'acier doux avec 70 % provenant de la pièce et 30 % de l'outil ainsi qu'une mise en suspension de 87 % de la masse découpée. Cette proportion évolue avec l'augmentation de la force d'appui ; l'émission issue de la pièce diminue tandis que celle provenant de l'outil augmente, ce qui est en accord avec les résultats de Kazmarek (2011). Cette tendance est similaire pour les deux métaux mais est néanmoins moins marquée pour l'acier doux. A 88 N, la fraction de particules non déposée à proximité de la disqueuse diminue légèrement pour l'acier inoxydable et l'acier doux.

La Figure 86 montre la distribution en vitesse des particules incandescentes, à 258 cm de l'émission, en fonction du matériau et de la force d'appui.



**Figure 86 - Distributions de la vitesse des particules incandescentes pour de l'acier inoxydable (Inox) et de l'acier doux (Adx) à 258 cm de l'émission pour différentes forces d'appui (62, 78 et 88 N)**

Il semble que pour les deux métaux, la variation de la force d'appui entre 62 et 78 N n'ait pas d'influence sur les distributions de vitesse des particules. En revanche, pour une force d'appui de 88 N, la modification de la distribution reste limitée pour l'acier inoxydable mais très marquée pour l'acier doux passant alors d'un mode principal de 10 à 5 m.s<sup>-1</sup>. Pour l'acier doux, la force de 88 N semble modifier les conditions de coupe qui mènent à des vitesses en conduite beaucoup plus faibles à 258 cm de l'émission.

Le nombre de particules incandescentes vues par la caméra rapide par seconde de découpe en fonction de la force d'appui est présenté dans le Tableau 26.

**Tableau 26 - Evolution du nombre de particules incandescentes par secondes de découpe en fonction de la force d'appui à 258 cm de l'émission**

Forces	Nombre de particules incandescentes par secondes de découpe	
	Inoxydable	Acier doux
62	481	1349
78	562	1827
88	569	3042

Le nombre de particules incandescentes augmente avec l'accroissement de la force d'appui pour la découpe des deux types de métal. Cependant, l'augmentation du nombre de particules incandescentes par seconde est beaucoup plus marquée pour l'acier doux à 258 cm de l'émission.

En ce qui concerne la répartition granulométrique, des prélèvements uniquement sur filtre ont été réalisés à 258 cm de l'émission de particules (Figure 87).

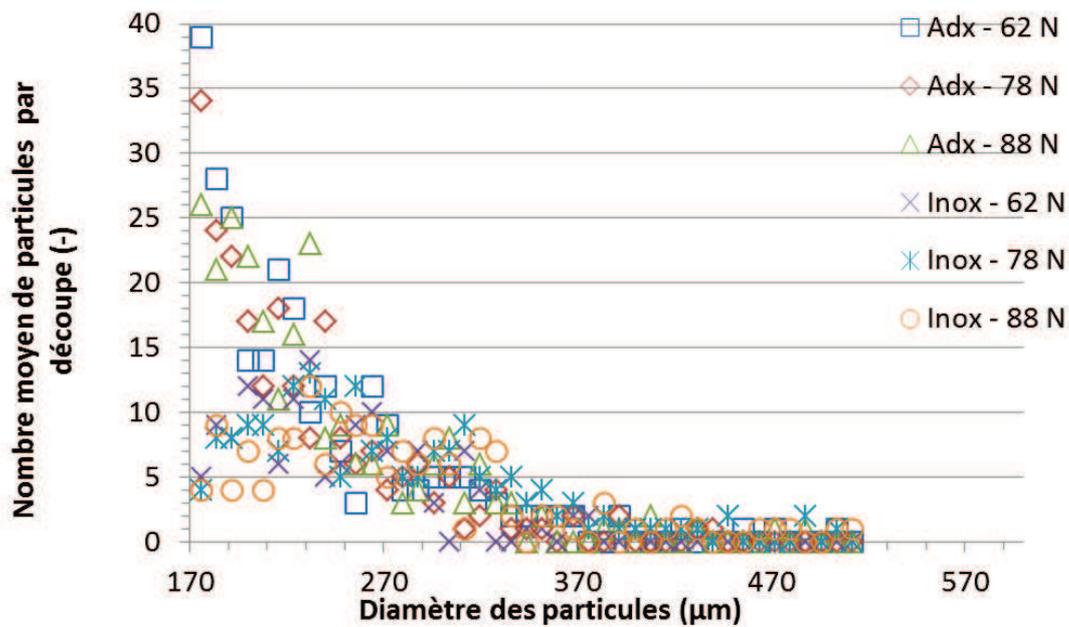


Figure 87 - Distributions granulométriques des particules pour une découpe d'acier inoxydable (Inox) et d'acier doux (Adx) à 258 cm de l'émission pour différentes forces d'appui (62, 78, et 88 N)

Comme énoncé au paragraphe 2.2.4, le seuil de validité du prélèvement sur filtre est de 170  $\mu\text{m}$  à 258 cm de l'émission. Les résultats montrent que la force d'appui a peu d'influence sur la répartition granulométrique de l'aérosol pour les deux métaux.

L'évolution de la distribution en température des particules mesurée à 185 cm de l'émission est présentée sur la Figure 88.

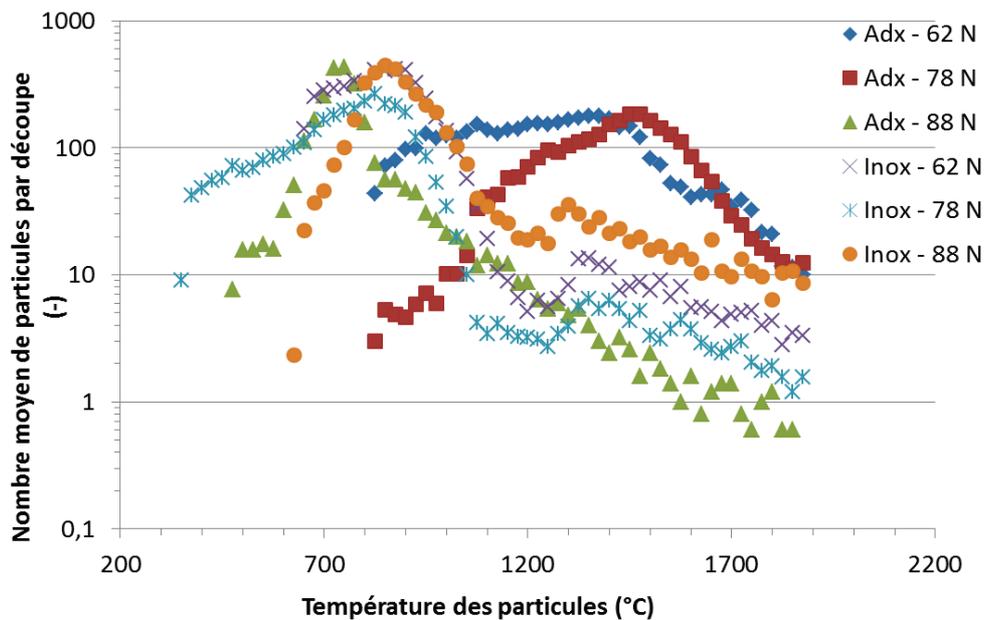


Figure 88 - Distributions de la température des particules pour de l'acier inoxydable et de l'acier doux à 185 cm de l'émission pour différentes forces d'appui (62, 78 et 88 N)

Les distributions de température pour l'acier doux à 67 et 78 N possèdent des modes principaux vers des températures élevées (1400 °C) par rapport aux modes principaux obtenus pour l'acier inoxydable (850 °C).

A contrario, une force d'appui de 88 N donne des modes principaux de température plus élevées pour une découpe d'acier inoxydable que ceux obtenus pour de l'acier doux.

Des découpes ont également été effectuées sur de l'aluminium et aucune particule incandescente n'a été produite. En effet, l'aluminium est un métal plus tendre, ce qui limite l'élévation de la température lors de la découpe par cisaillement et compression. De plus, l'aluminium est un bon conducteur de chaleur, ce qui entraîne une dissipation beaucoup plus rapide de la température. Enfin l'oxyde prépondérant formé est imperméable à l'air, ce qui forme une couche protectrice limitant la réaction exothermique d'oxydation.

En conclusion, nous avons vu dans ce paragraphe l'influence des paramètres de coupe sur la génération de particules. L'effet de la nature du métal et des conditions de coupe sont difficiles à quantifier. Les conditions de coupe idéales dépendent des objectifs fixés (Tableau 27).

**Tableau 27 - Effet de la force d'appui et du type de métal pour différents critères**

	Force d'appui (N)	
	Acier inoxydable	Acier doux Adx
Plus de dépôt à proximité	88	62
Usure faible de l'outil	62	62
Moins de particules incandescentes	62	62
Vitesse moyenne plus faible	88	88
Température moyenne plus faible	78	88

Par exemple, pour limiter la température des particules, il est préférable de travailler avec une force d'appui de 78 N associée à une vitesse de descente de  $0,7 \text{ mm.s}^{-1}$  pour les découpes d'acier inoxydable.

#### **4.5.2. Effet de la vitesse débitante**

Lorsque le filtre se colmate, la perte de charge de celui-ci augmente et en l'absence de régulation du débit d'air, le débit en conduite diminue modifiant la vitesse du fluide. Or, la vitesse du fluide est un paramètre influençant le transport (force de traînée) et le transfert de chaleur d'une particule (coefficient de convection).

Le nombre moyen de particules incandescentes calculé pour différents débits d'extraction en fonction de la distance est représenté sur la Figure 89.

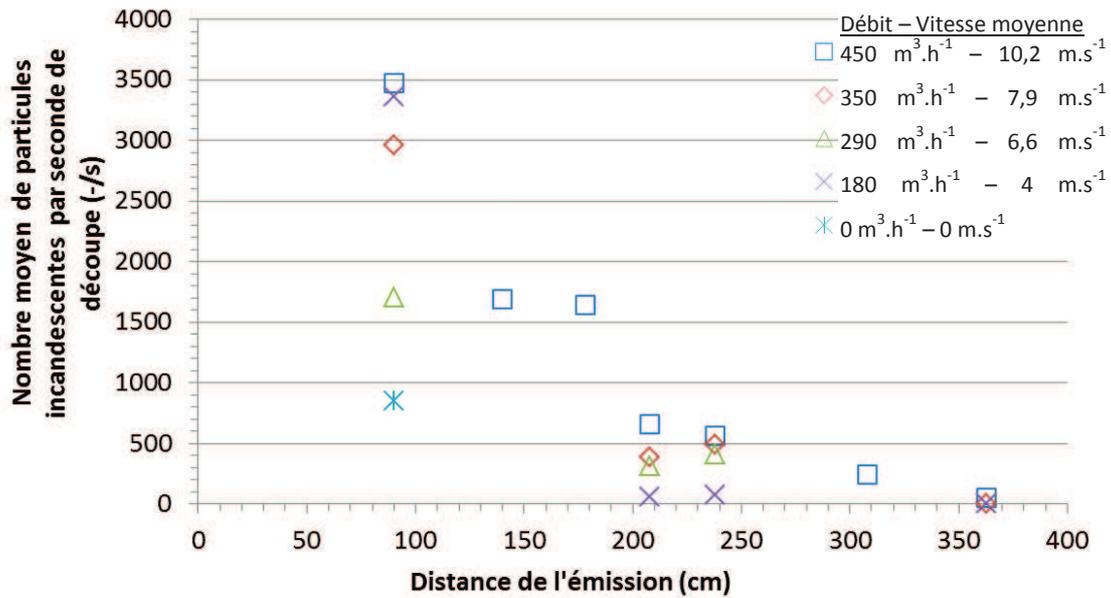


Figure 89 - Nombre de particules incandescentes en fonction de la distance à l'émission calculé pour différents débits d'extraction

Les résultats montrent que la quantité de particules incandescentes loin de l'émission est directement liée au débit en conduite. En l'absence de débit d'extraction, aucune particule incandescente n'est observée à 150 cm de l'émission.

Les résultats relatifs à la vitesse des particules incandescentes sont présentés en Annexe 8. La vitesse des particules diminue en correspondance avec la diminution de la vitesse débitante en conduite. Ces résultats sont en accord avec ceux des simulations CFD réalisées, et présentés dans l'Annexe 5.

Les distributions de la température des particules en fonction du débit à 185 cm de l'émission sont présentées sur la Figure 90.

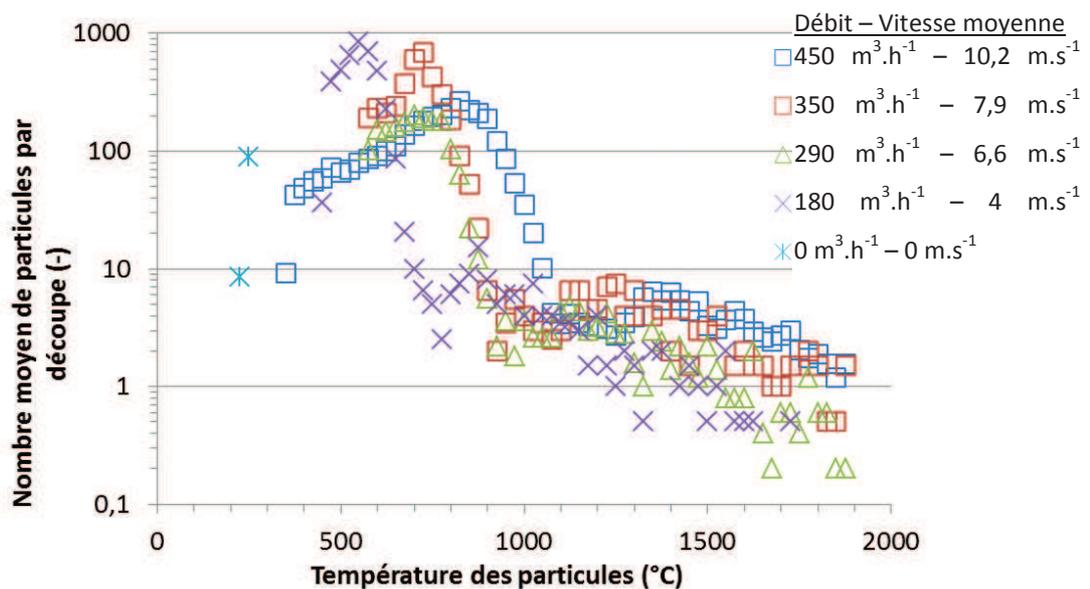


Figure 90 - Distributions de la température de particules pour différents débits d'extraction à 185 cm de l'émission

Lorsque le débit diminue, on observe globalement une diminution de la température. Cela s'explique par l'effet prépondérant de l'augmentation du temps de transit des particules lors de la diminution du débit vis-à-vis de la diminution du coefficient d'échange convectif, augmentant alors le temps d'échange de chaleur des particules. En l'absence de débit, il n'y a pas de particules supérieures à 400 °C (température d'incandescence pour la caméra rapide), ce qui est en accord avec les résultats de la Figure 89.

Le colmatage du filtre, entraînant une baisse du débit, conduit à une baisse de la vitesse et de la température des particules, ce qui implique que la configuration avec débit d'extraction maximale est la plus défavorable pour l'intégrité des filtres. Cependant, étant donné le nombre important de particules microniques (*cf.* paragraphe 4.3.1), une baisse du débit d'extraction va mener à un rapide empoussièrement du sas.

#### **4.6. Conclusions**

Ce chapitre a permis de déterminer l'évolution des caractéristiques des particules en vol avant l'impact sur un filtre. La corrélation de ces caractéristiques couplée à la dégradation du filtre doit permettre de déterminer les particules responsables de l'endommagement du filtre.

- La distribution granulométrique des particules dans la gamme de 50 à 500  $\mu\text{m}$  est quasi similaire quelles que soient les distances considérées (de 178 à 363 cm de l'émission).
- La vitesse moyenne des particules est comprise entre 8 et 5  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  suivant les distances considérées.
- La température moyenne des particules est comprise entre 1200 °C et 560 °C suivant les distances considérées. Des températures de particules largement supérieures à 1500 °C ont été observées à plus de 4 m de l'émission.



# Chapitre 5

## Effet de l'impact des particules sur un médium filtrant

Dans ce chapitre, nous nous intéressons à l'interaction entre les particules métalliques produites lors de la découpe et le médium filtrant. Deux approches ont été utilisées pour étudier l'impact de ces particules sur le filtre. L'une est une approche intégrale globale permettant de quantifier la perte d'efficacité d'un filtre THE industriel par la mesure du coefficient d'épuration à l'aide d'une méthode normalisée. L'autre est une approche locale qui permet d'identifier et de quantifier les mécanismes responsables de l'endommagement du médium filtrant. Cette approche locale couplée à une approche analytique dans laquelle les niveaux d'énergie des particules seront simulés, doit permettre de déterminer les valeurs seuils des grandeurs caractéristiques des particules pouvant conduire à une dégradation du médium. Enfin, des corrélations permettant de prévoir la perte d'efficacité d'un filtre en fonction des caractéristiques des particules seront proposées ainsi que des bonnes pratiques visant à limiter leur dégradation.

### 5.1. Approche globale

L'approche globale réside dans la mesure d'une valeur de l'efficacité de filtration définie selon la norme française NF-X-44-011.

Les filtres industriels THE (caractéristiques données au Tableau 14) ont été testés suivant le protocole explicité au paragraphe 4.2.1. Il se résume en une mesure du CE du filtre vierge (CE initial) et une mesure après exposition aux particules incandescentes (CE final), durant une ou plusieurs découpes, ceci à différentes distances de l'émission. Les résultats de la mesure du CE dans cette configuration sont présentés sur la Figure 91.

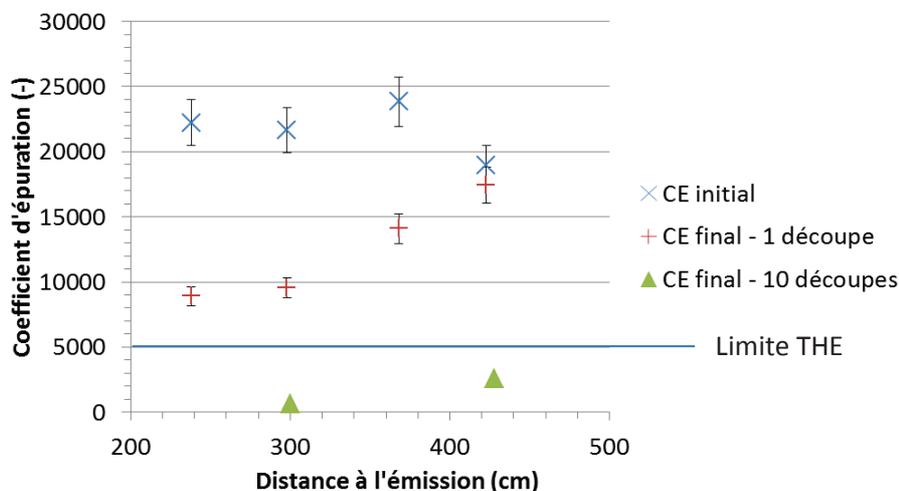


Figure 91 - Evolution du CE pour une et 10 découpes en fonction de la distance à l'émission

La dispersion des valeurs du CE initiale des filtres vierges est inhérente aux légères variations de qualité des filtres qui proviennent de lots différents et aux incertitudes expérimentales, qui à ces très hauts niveaux d'efficacité, se traduisent par une variation importante de la valeur absolue du CE. Il apparaît que pour une même configuration, la valeur du CE initiale n'a pas d'influence sur la valeur du CE final après dégradation.

Nous fixons arbitrairement une limite de coefficient d'épuration des filtres THE à 5000. Cette valeur est couramment utilisée pour l'homologation des filtres (cahier des charges CTHEN, Centre Technique d'Homologation des Equipements Nucléaires) et est majorante dans le cadre de notre étude.

Les essais de dégradation du filtre sont réalisés dans une configuration spécifique à CAPIMIF. Le filtre est composé d'une armature métallique avec une lame centrale qui coïncide avec le centre de la conduite de ventilation, dans l'axe de la gerbe d'étincelles. Dans le champ proche de la disqueuse, la gerbe d'étincelles étant émise selon un cône (cf. paragraphe 2.1.1), la surface issue de l'intersection entre cette lame métallique et la section de la gerbe d'étincelles varie en fonction de la distance à laquelle le filtre est placé. Ainsi, seules les mesures des CE réalisées au-delà de 200 cm sont exploitables en vue de comparaisons.

Le CE final, pour une distance à l'émission inférieure à 300 cm, est divisé par deux, mais reste supérieur à la limite de 5000. Pour les distances supérieures, l'effet de l'impact des particules est moins marqué ; ainsi, à 423 cm, l'effet de l'impact des particules sur le filtre est limité. Des essais identiques ont été réalisés, pour une exposition des filtres durant 10 découpes successives et montrent une baisse importante du CE des filtres qui ne sont alors plus considérés comme THE. La perte de charge du filtre a augmentée durant les 10 découpes, due au colmatage du filtre, tel que l'indique la Figure 92.

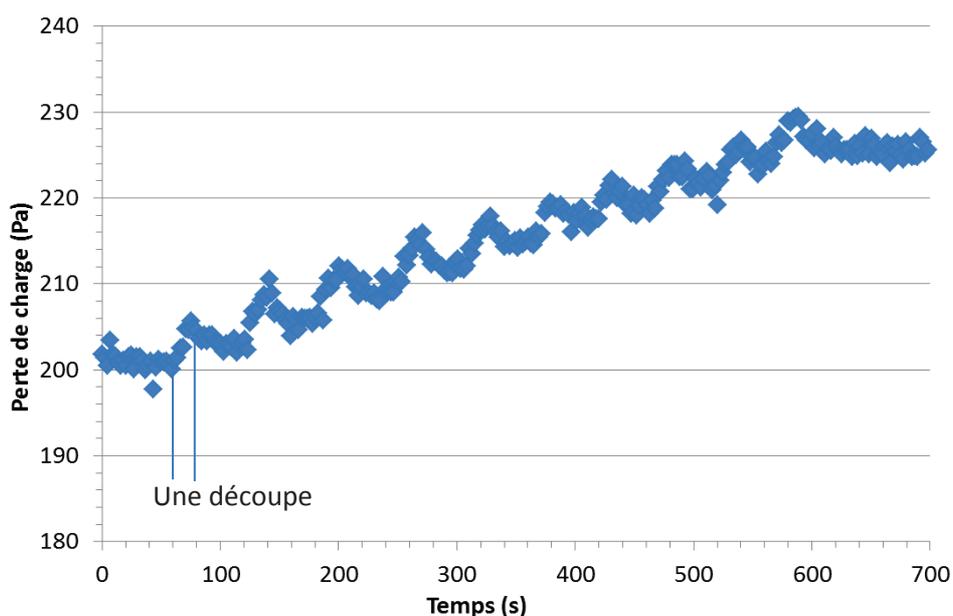


Figure 92 - Evolution de la perte de charge d'un filtre soumis à 10 découpes de 20 s à l'aide d'une disqueuse

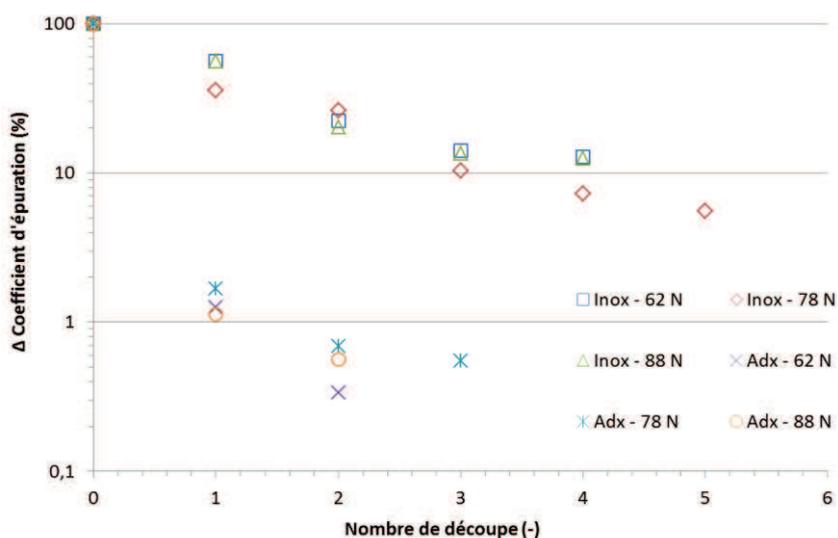
Pour chaque découpe, la perte de charge augmente en moyenne de 2 Pa. La perte de charge ne reflète donc pas la perte d'efficacité comme l'a indiqué Mouret (2009).

Nous nous sommes également intéressés à l'effet de la variation de la force d'appui et du métal sur la dégradation du filtre. La variabilité des CE des filtres vierges n'a pas d'effet sur la valeur du CE final dans notre configuration. Ainsi, nous définissons la perte d'efficacité comme étant définie par le rapport du CE final sur une valeur du CE d'un filtre vierge prise égale à 30 000 (Équation 47).

$$\Delta CE = \left( \frac{CE \text{ final}}{30\,000} \right) \cdot 100 \quad (\%) \quad \text{Équation 47}$$

La limite de Très Haute Efficacité (THE) fixée à 5 000 correspond ainsi à un  $\Delta CE$  de 16 %.

Les résultats de perte d'efficacité suite à la dégradation occasionnée par une découpe réalisée à différentes forces d'appui et matériaux sont présentés sur la Figure 93.



**Figure 93 - Evolution de la perte d'efficacité du filtre en fonction du nombre de découpe pour différentes forces d'appui, pour de l'acier inoxydable (Inox) et de l'acier doux (Adx), à 298 cm de l'émission**

Pour l'acier inoxydable, une baisse de 50 % est observée dès la première découpe suivie d'une baisse plus faible les autres découpes. En ce qui concerne l'acier doux, la perte est de 99 % dès la première découpe puis une baisse limitée pour les découpes suivantes. La perte d'efficacité pour l'acier doux est nettement plus marquée que pour l'acier inoxydable. Le Chapitre 4 a permis de mettre en évidence que la découpe d'acier doux génère plus de particules dont la température est plus chaude par rapport à la découpe d'acier inoxydable, ce qui explique ces résultats. La force d'appui semble avoir un effet limité sur la perte d'efficacité du filtre, quel que soit le métal considéré.

L'approche globale a montré que l'impact des particules induisait une baisse très significative du coefficient d'épuration du filtre. Les corrélations exprimant cette dégradation en fonction des caractéristiques des particules sont développées au paragraphe 5.3.

## **5.2. Approche locale**

Dans le but d'observer l'interaction des particules avec le médium filtrant, des filtres plans de 47 mm de diamètre sont utilisés. Les caractéristiques du médium de ces filtres sont identiques à ceux des filtres plissés industriels THE. Les filtres plans possèdent une surface filtrante de 17 cm<sup>2</sup>, ce qui est faible vis-à-vis de la surface filtrante des filtres industriels THE testés précédemment (6,5 m<sup>2</sup>). La mesure du CE étant une mesure intégrale sur la surface totale de filtration, l'hétérogénéité du médium filtrant va avoir un impact d'autant plus important que la surface de filtration est faible. Ainsi, pour avoir une mesure représentative du CE d'un filtre plan de petite surface, il faut multiplier les essais, ce qui est possible pour la mesure du CE d'un filtre vierge. Cependant, cette procédure devient trop compliquée et chronophage dans le cas d'un filtre exposé aux particules, ce qui explique que les mesures du CE finale n'ont pas été réalisées sur ces filtres plans.

### **5.2.1. Caractérisation du médium**

Un médium filtrant peut se caractériser par son diamètre de fibres, sa compacité et son épaisseur (*cf.* paragraphe 1.3.1).

La mesure du diamètre des fibres est réalisée à l'aide d'un programme de traitement des images (créé sur le logiciel Matlab) de médias vierges prises au Microscope Electronique à Balayage (MEB), dont un exemple est présenté sur la Figure 94.

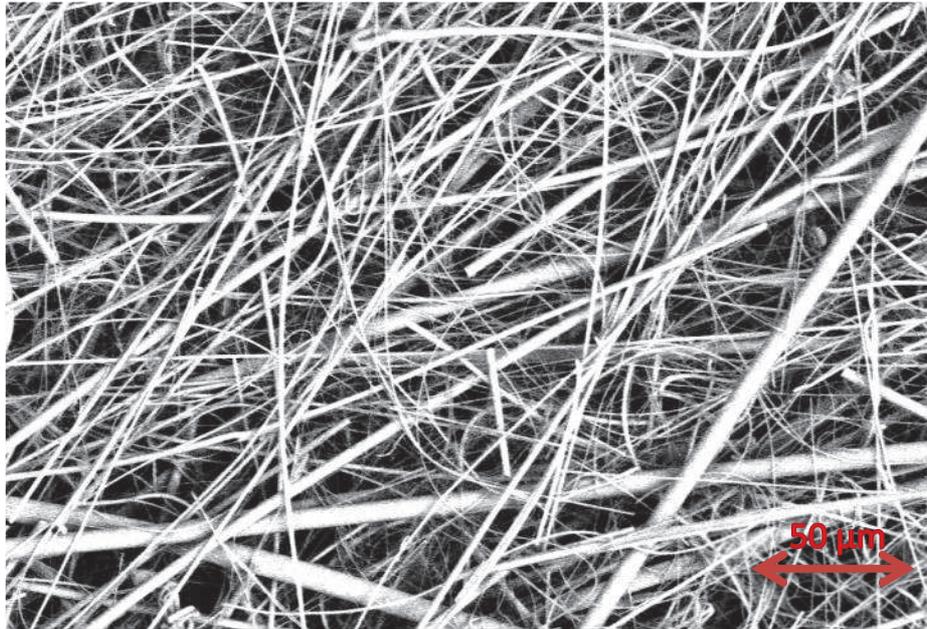


Figure 94 - Visualisation au MEB des fibres d'un médium vierge

Le programme réalise un seuillage de l'image, ce qui permet d'identifier les fibres dont le diamètre est obtenu par une méthode trigonométrique. Les résultats de granulométrie de fibre acquis sur 100 clichés sont présentés sur la Figure 95.

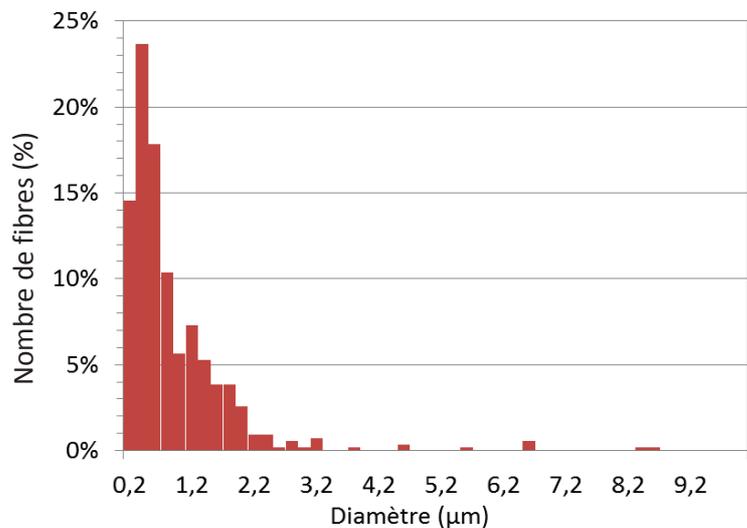
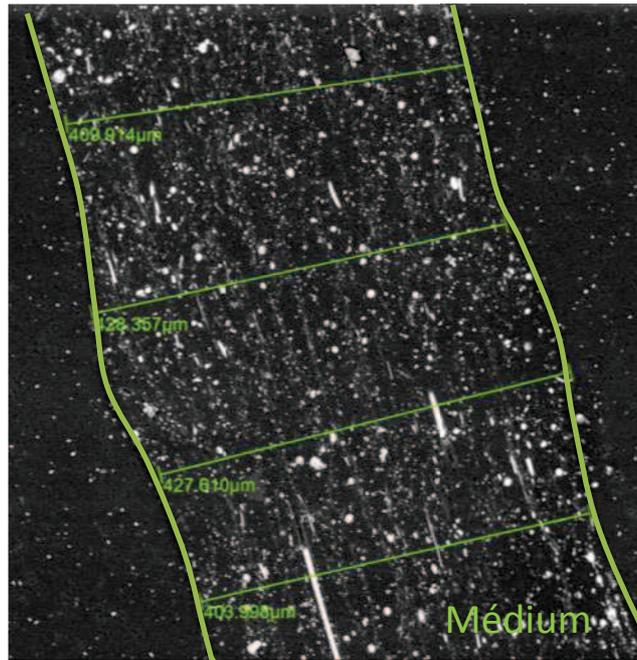


Figure 95 - Distribution de la taille des fibres d'un médium vierge

Le diamètre moyen des fibres mesurées est de 720 nm avec un écart type de 0,72. La distribution met en évidence la présence d'une grande quantité de fibres submicroniques qui contribuent à l'efficacité du médium couplée à des fibres de tailles microniques qui confèrent au médium sa résistance mécanique.

Des échantillons de filtres vierges fixés de profil dans de la résine selon la technique décrite par Bourrous (2014) sont observés au MEB (Figure 96).



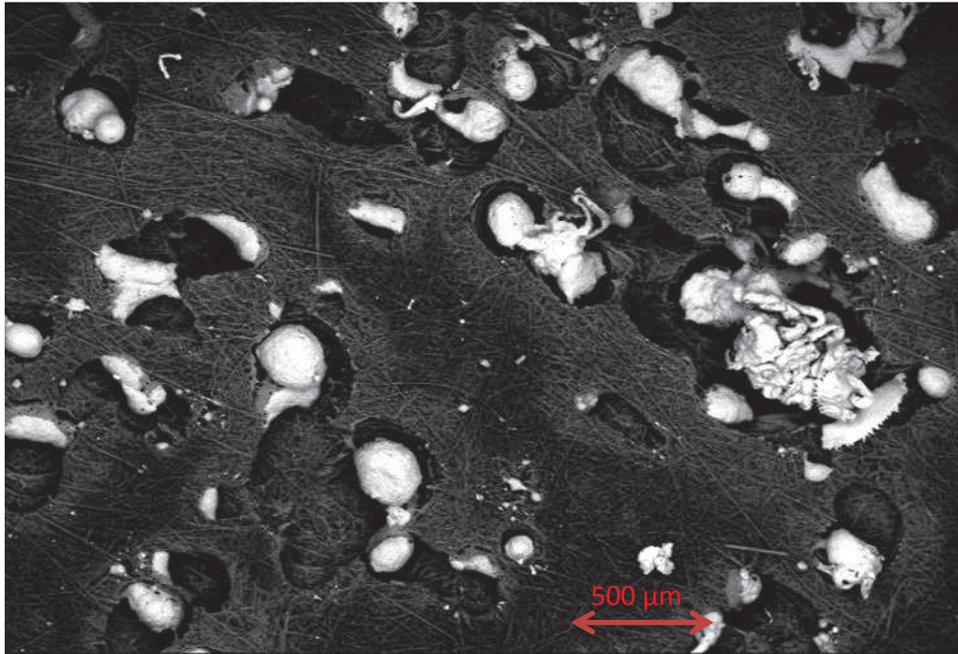
**Figure 96 - Vue en coupe d'un filtre vierge au MEB pris dans de la résine permettant de déterminer son épaisseur et sa compacité**

L'épaisseur du filtre est mesurée directement sur les images et la compacité est obtenue en faisant le rapport du signal des niveaux de gris intégrés sur l'épaisseur du médium avec une référence définie sur une fibre. Les mesures obtenues sur 10 filtres, soit 50 clichés, donnent une épaisseur moyenne de 410 µm ( $\pm 70$  µm) et une compacité de 0,065 ( $\pm 0,006$ ). Ces valeurs sont cohérentes avec celles de Bourrous (2014) obtenues sur un médium fibreux similaire.

### 5.2.2. Caractérisation de l'impact des particules sur le médium

Pour observer l'effet de l'impact des particules sur un médium, des visualisations au MEB d'un filtre de prélèvement plan placé au centre de la conduite pendant une découpe, sont analysées.

A 30 cm de la génération, le médium est fortement détérioré, percé, saturé d'agrégats de particules et de métal fondu (cf. Annexe 9), ce qui ne permet pas son analyse. Afin d'observer plus distinctement les particules, des visualisations ont été faites sur des filtres de prélèvements placés à 60 cm de la génération. Comme le montre la Figure 97, les impacts sont plus dispersés, ce qui permet leur caractérisation. Les visualisations faites au-delà de 60 cm sont similaires mais avec une concentration décroissante de particules avec la distance à l'émission.



**Figure 97 - Visualisation au MEB d'un médium impacté par des particules à 60 cm de l'émission**

Deux familles de particules sont à distinguer. La première rassemble les particules qui impactent le filtre sous forme solide. Il s'agit de particules portées à la température de fusion du métal et qui se sont refroidies et solidifiées en vol, par exemple sous forme de sphères. Suivant la température des particules lors de l'impact, il peut y avoir un endommagement du médium qui sera quantifié par la suite. Pour la deuxième famille, les particules portées à la température de fusion du métal atteignent le médium sous forme liquide. Ses gouttes sont potentiellement les plus chaudes et plus dangereuses pour le filtre. Du fait de la perte de résistance mécanique du médium, la particule va pouvoir pénétrer dans le médium et se solidifier sous des formes diverses.

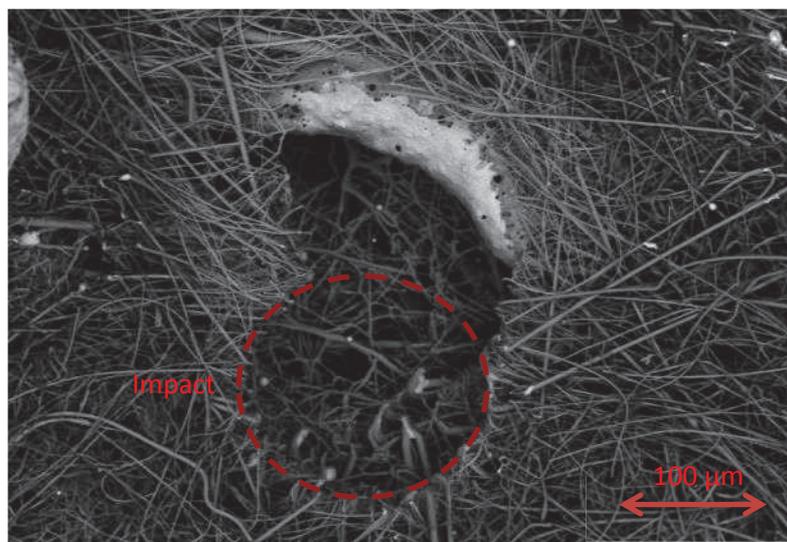
Il est intéressant de remarquer les traces de directions aléatoires laissées par les particules dans le filtre (*cf.* Annexe 7) et autour desquelles on peut observer un halo grisâtre qui représente la vaporisation du liant organique présent sur les fibres.

La Figure 98 montre l'interaction d'une particule sphérique solide de fer avec le médium. Il apparaît que les fibres ont fondu par conduction de la chaleur.



**Figure 98 - Visualisation au MEB d'un filtre impacté par une particule solide à 60 cm de l'émission (famille 1)**

Sur la Figure 99, la particule a atteint le filtre sous forme liquide. Cela s'identifie par l'impact de forme sphérique laissé dans le médium, associé à un élargissement qui correspond à l'écoulement du métal dans le médium fondu jusqu'à son refroidissement.



**Figure 99 - Visualisation au MEB d'un médium impacté par une particule liquide à 60 cm de l'émission (famille 2)**

Lorsqu'il y a perforation du médium, les effets sur l'efficacité du médium sont drastiques (Mouret (2009) et paragraphe 1.3.3). La pénétration dans le médium en l'absence de perforation peut modifier localement son épaisseur et sa compacité. La variation de ces deux paramètres va influencer directement la valeur de l'efficacité selon l'expression de Brown (1992).

Afin de connaître la profondeur de la pénétration des particules dans le médium, des vues en coupe ont été réalisées dont un exemple est présenté sur la Figure 100.

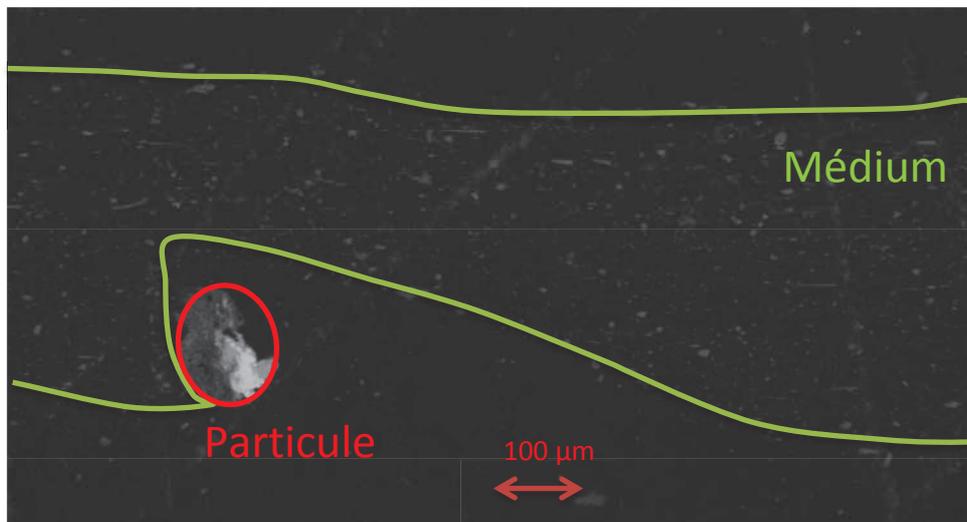


Figure 100 - Vue en coupe au MEB d'un filtre impacté par une particule

On y aperçoit une particule qui a pénétré au sein du médium tout en réduisant localement son épaisseur. Des mesures de compacité réalisées sur les profils de médium au niveau de l'impact de particules ne montrent pas de variation significative de la compacité (variation dans la gamme d'incertitude de la mesure). L'hypothèse avancée est que les particules font fondre les fibres sur leur passage, ce qui ne comprime pas le médium. La variation de compacité est alors considérée négligeable alors que l'épaisseur du filtre diminue.

L'expression de Brown (1992) permettant de définir l'efficacité selon les caractéristiques du médium, est rappelée par l'Équation 18.

$$E = 1 - \exp\left(-4 \cdot \eta \cdot \frac{\alpha}{1 - \alpha} \cdot \frac{Z}{\pi \cdot d_f}\right) \quad \text{Équation 18}$$

Les paramètres définissant le médium ont été définis déterminés expérimentalement au paragraphe 5.2.1 et sont rappelés dans le Tableau 28.

Tableau 28 - Paramètres déterminés expérimentalement définissant le médium vierge

Paramètres	Valeurs
Compacité, $\alpha$ (-)	$0,065 \pm 0,006$
Épaisseur, $Z$ ( $\mu\text{m}$ )	$410 \pm 70$
Diamètre moyen des fibres, $d_f$ ( $\mu\text{m}$ )	$0,720 \pm 0,04$

L'efficacité de collecte unitaire ( $\eta$ ) est déterminée grâce à l'Équation 18 en utilisant l'efficacité globale d'un filtre vierge (mesure du CE moyen obtenue sur 40 filtres plans) et les paramètres du Tableau 28.

L'efficacité de collecte unitaire ainsi obtenue est de  $0,172 \pm 0,043$ . Le coefficient de collecte unitaire de fibre est supposé constant et égal à cette valeur.

L'expression de Brown (1992) permet ainsi de mettre en évidence la baisse de l'efficacité en fonction de la diminution d'épaisseur du médium en considérant sa compacité constante (Figure 101).

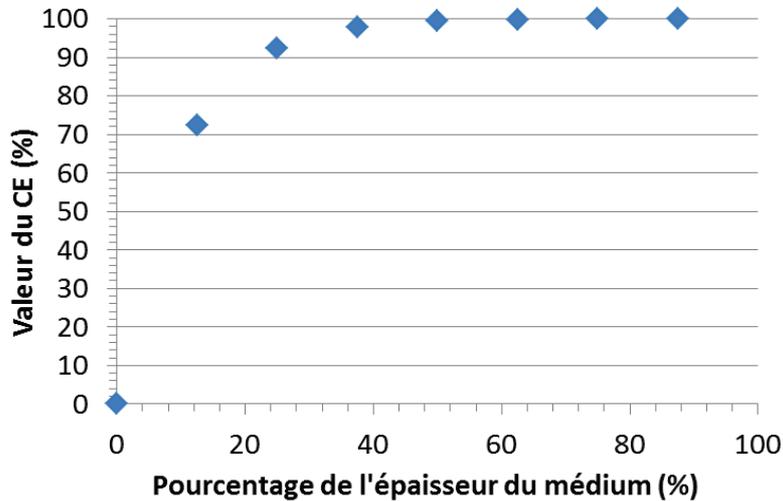


Figure 101 - Evolution du CE, selon Brown (1992) en fonction de l'épaisseur du médium à compacité constante

La fonction exponentielle, utilisée pour l'expression de Brown, indique que l'efficacité de filtration s'effectue sur une faible épaisseur du médium, le reste de l'épaisseur ayant pour fonction une bonne tenue mécanique. En effet, dans notre configuration, il apparaît que la perte d'épaisseur doit être importante, plus de 70 % (*i.e.* 300  $\mu\text{m}$ ) pour baisser significativement l'efficacité du médium.

Compte tenu de la géométrie des filtres plissés industriels THE, les particules impactent le médium tangentiellement, ce qui augmente la distance à parcourir pour le perforer. La répartition des impacts des particules sur un médium plissé est présentée sur la Figure 102.

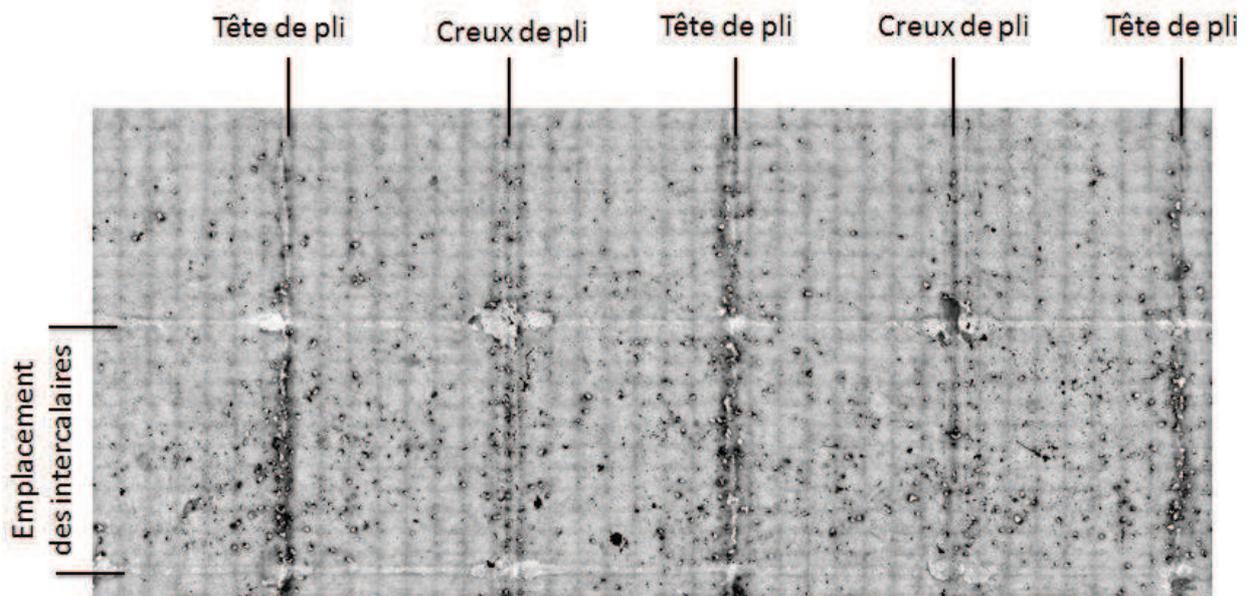


Figure 102 - Visualisation au microscope Morphologi d'un médium plissé démonté et aplani montrant la répartition des impacts

Les particules impactent le filtre de manière homogène. Cependant, l'endommagement du médium semble plus important au niveau des têtes de plis. Une vue au MEB-EDS (rouge = silicium) en coupe d'une tête de pli, d'un médium vierge, est présentée sur la Figure 103.

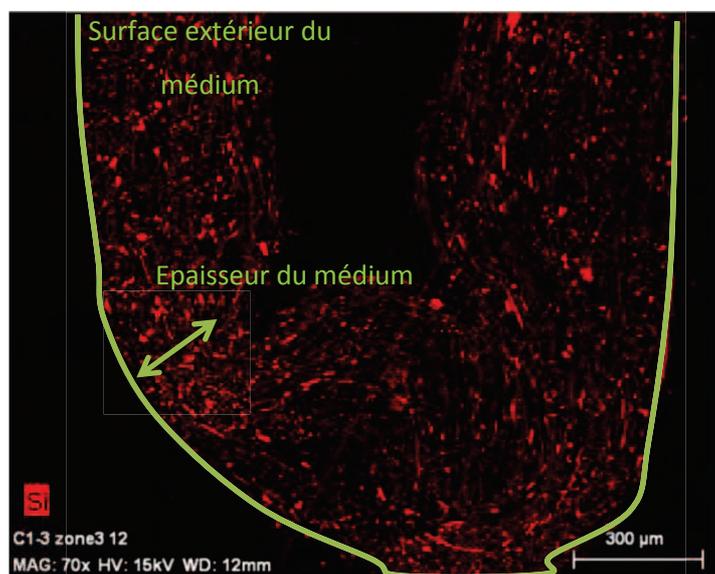


Figure 103 - Visualisation au MEB - EDS de la tête de pli d'un médium plissé vierge ; rouge = silice

Cette image montre qu'il n'apparaît pas de différence de compacité sur la face extérieure du médium mais elle est plus importante en profondeur. Cette configuration semble fragiliser le médium.

En conclusion, les visualisations au MEB ont permis d'identifier les dégâts subis par le filtre lors d'impacts de particules chaudes. Certaines particules perforent totalement le médium menant à une baisse importante de l'efficacité. D'autres, creusent localement le médium, ce qui réduit localement l'épaisseur du médium tout

en gardant une compacité supposée constante due à la fonte des fibres. Cette perte d'épaisseur locale à compacité constante entraîne également une chute de l'efficacité. La perforation du médium n'est donc pas requise pour mener à une importante baisse d'efficacité de filtration. Les dommages subis vont dépendre de l'énergie thermique apportée par la particule qui va faire perdre la résistance mécanique des fibres voir les faire fondre. L'énergie cinétique de la particule va influencer la déformation du médium et la progression de la particule au sein du médium. Ces deux effets sont étudiés par la suite.

### 5.2.3. Effet mécanique

Il a été montré au paragraphe 4.4.2 que l'énergie cinétique moyenne des particules est comprise entre  $1,4 \cdot 10^{-6}$  et  $2,3 \cdot 10^{-6}$  J. Lors de l'impact d'une particule sur le médium, il est possible que la particule rebondisse, ne transférant qu'une partie de son énergie cinétique. Le rebond dépend de la vitesse et de l'angle d'impact des particules ainsi que des caractéristiques mécaniques du filtre. Dans le cas d'une particule de métal en fusion, l'impact induit une fragmentation de la particule en particules secondaires de plus petites tailles. Le rebond des particules est complexe et n'est pas détaillé dans cette étude.

Un dispositif expérimental a été développé afin d'observer l'effet de l'impact des particules à forte inertie en l'absence d'énergie thermique. Les particules déposées dans la conduite sont ramassées et leur distribution granulométrique, analysée au diffractomètre (Figure 67), est comprise entre 0,65 à 800  $\mu\text{m}$ .

Le schéma descriptif du montage est présenté sur la Figure 104.

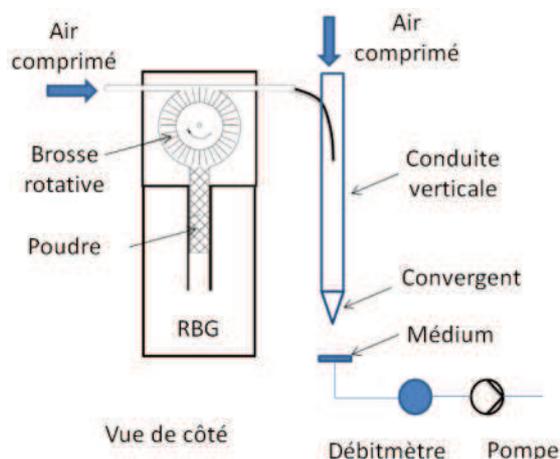


Figure 104 - Schéma de l'expérience de dégradation mécanique d'un médium fibreux

La poudre récupérée est placée dans le piston d'un générateur à brosse rotative (RBG 1000 Palas®). Les particules sont accélérées par un second flux d'air comprimé qui permet d'avoir des vitesses de fluide de 10 à 60  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Etant donné la géométrie verticale de la conduite et les vitesses initiales mises en jeu, les particules atteignent le médium avec une vitesse égale à la vitesse du fluide.

Les visualisations au MEB des médias plan et plissé n'ont montré aucun signe apparent de dégradation. Lorsqu'il s'agit d'un médium plissé, de grosses particules sont retrouvées déposées au fond des plis, le pli servant de capture.

En conclusion, l'énergie mécanique des particules, en l'absence d'énergie thermique, n'est pas suffisante pour dégrader le médium qu'il soit de type plan ou plissé.

#### 5.2.4. Effet thermique

Les particules atteignent le filtre avec une énergie thermique dont l'évaluation a été faite au paragraphe 4.4.3, qui est comprise entre 0,01 et 0,06 J, ce qui est très nettement supérieur à l'énergie cinétique des particules. Afin d'étudier l'impact de l'énergie thermique sur le médium filtrant, un montage analytique a été développé dans le but de simuler localement un apport contrôlé d'énergie thermique aux fibres. Cette énergie est générée par un faisceau laser continu (faisceau de 2 mm de diamètre émis par un laser argon émettant à 514 nm).

Le médium est un milieu composé majoritairement de vide (porosité de 0,94) et de fibres de verre translucides, ce qui en fait un milieu peu absorbant vis-à-vis des rayonnements. Ainsi, aucune élévation de température ni aucun effet sur les fibres n'ont été observés en utilisant un faisceau laser à une puissance de 5 W. En revanche, un filtre avec une surface légèrement opaque, lui permet d'absorber assez d'énergie pour conduire à la dégradation des fibres. Une visualisation au MEB de la fonte des fibres est présentée sur la Figure 105.

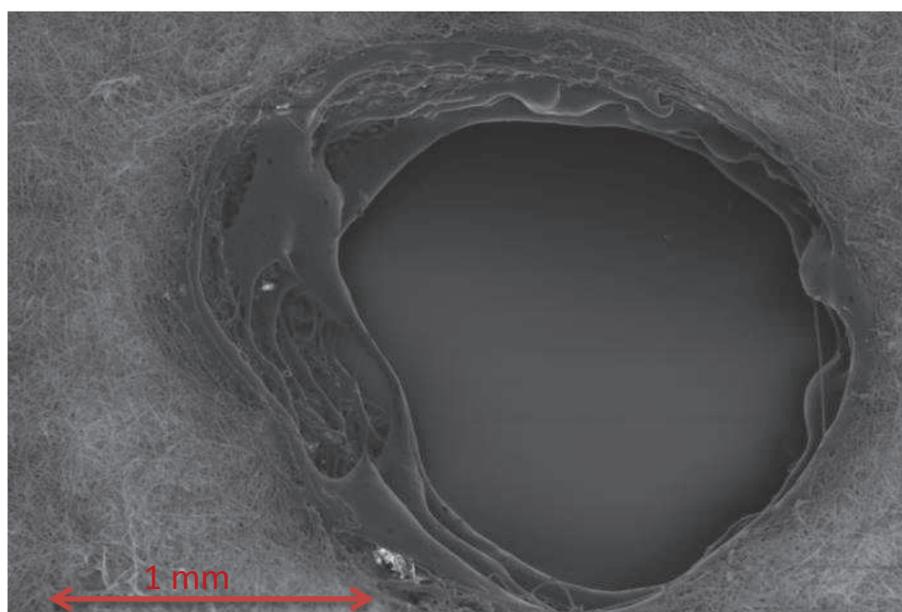


Figure 105 - Visualisation au MEB d'un filtre soumis à un faisceau laser

Qualitativement, la fonte des fibres s'apparente aux visualisations de fibres fondues suite à l'impact des particules. Cependant, la structure du filtre étant complexe, il est difficile d'obtenir l'énergie réellement absorbée par les fibres.

Une solution envisagée pour l'étude thermique de dégradation du filtre est l'emploi d'un four pouvant atteindre des températures de 2000 °C. Ceci permettrait de déterminer précisément la température de ramollissement et de fusion des fibres. Cependant, il n'y aurait eu aucun lien avec la dégradation et l'énergie cinétique apportées par un impact, ce qui va être simulé par une approche découplée explicitée ci-après.

### 5.2.5. Couplage entre effets thermique et mécanique

Il a été montré précédemment que l'énergie apportée au filtre par effet mécanique est très inférieure à celle apportée par effet thermique. Aucune dégradation des fibres du médium du filtre n'a pu être observée lors d'impacts sans effet thermique. A contrario, le niveau d'énergie thermique est suffisamment élevé pour faire fondre les fibres de verre. L'objectif de ce paragraphe est de pouvoir étudier l'influence des effets couplés liés à l'apport d'énergies cinétique et thermique, afin de quantifier les niveaux seuils d'énergies mécanique et thermique et de température, à partir desquels il est observé une dégradation du médium filtrant.

Ces niveaux d'énergie sont simulés, d'une part pour l'énergie thermique à l'aide d'un thermocouple de 1 mm de diamètre chauffé à l'aide du faisceau laser continu émis par un laser Argon. D'autre part, à l'aide d'un dispositif permettant d'imposer au médium une contrainte mécanique contrôlée (Figure 106). Le médium est disposé sur une plateforme mobile verticalement mis en mouvement à l'aide d'un ressort afin de simuler le transfert d'énergie mécanique entre la particule et le filtre. Le schéma du dispositif développé est présenté sur la Figure 106.

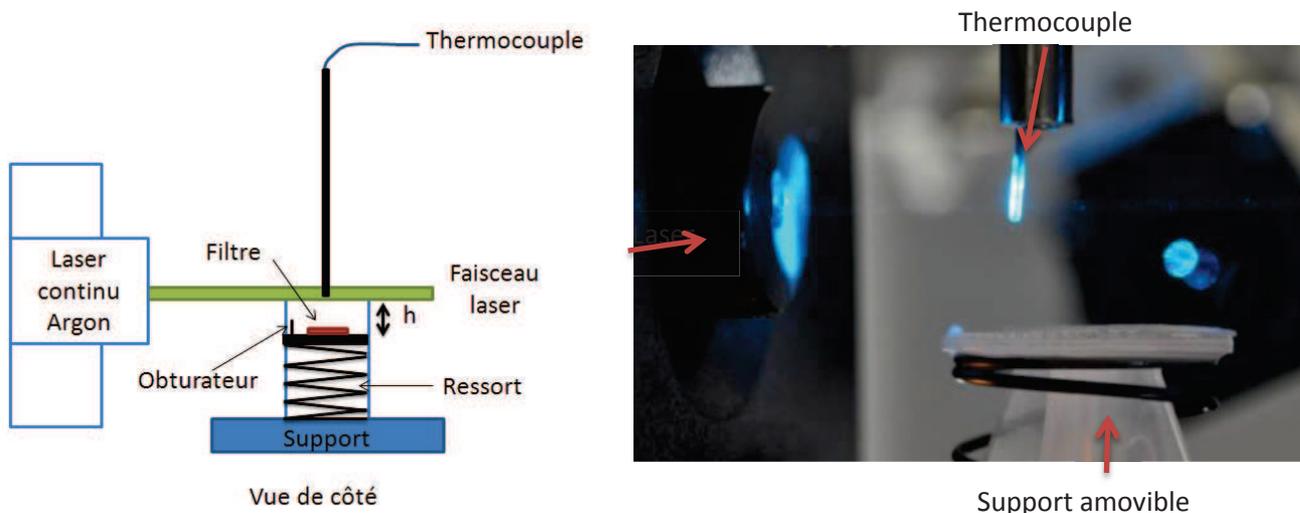


Figure 106 - Schéma et photo du montage utilisé pour la simulation du couplage des effets mécanique et thermique

Le réglage de la compression du ressort permet de simuler différentes vitesses de translation du filtre vers la pointe du thermocouple. Un obturateur du faisceau laser est placé sur le support mobile afin de stopper l'apport d'énergie thermique au moment du contact. Le laser permet de chauffer le thermocouple jusqu'à une température de 820 °C ( $\pm 10^\circ\text{C}$ ).

Un matériau piézo-électrique est utilisé dans le but de déterminer l'énergie cinétique mise en jeu au moment de l'impact. Celui-ci est composé d'une céramique synthétique ayant la capacité de se polariser électriquement sous l'action d'une contrainte mécanique (CHABRE, 1972). L'étalonnage du capteur piézo-électrique est détaillé en Annexe 10. La gamme d'énergie cinétique liée à la détente du ressort est présentée dans le Tableau 29.

**Tableau 29 - Energies cinétiques pouvant être simulées à l'aide du dispositif**

Réglage	Energie cinétique (mJ)	Incertitude (mJ)
R1	4	0,4
R2	10	0,8
R3	22	0,7

Il est à noter que le minimum d'énergie cinétique obtenue avec ce montage expérimental est supérieur à l'énergie cinétique maximale d'une particule.

Le contact entre le médium et le thermocouple est transitoire contrairement au cas réel où la particule reste piégée dans le médium, augmentant l'échange de chaleur par conduction.

Le thermocouple utilisé est un thermocouple chemisé de type K. La sonde est composée d'un couple d'alumel et de chromel placée au centre du thermocouple, entourée d'un isolant et d'un chemisage en acier galvanisé. La température de surface de la chemise est mesurée à l'aide du pyromètre IP140. La correspondance entre la température du thermocouple et l'énergie thermique est détaillée en Annexe 10. Les observations du médium au MEB ont permis de définir une échelle de dégradation que nous avons classée suivant 5 échelons (Figure 107).

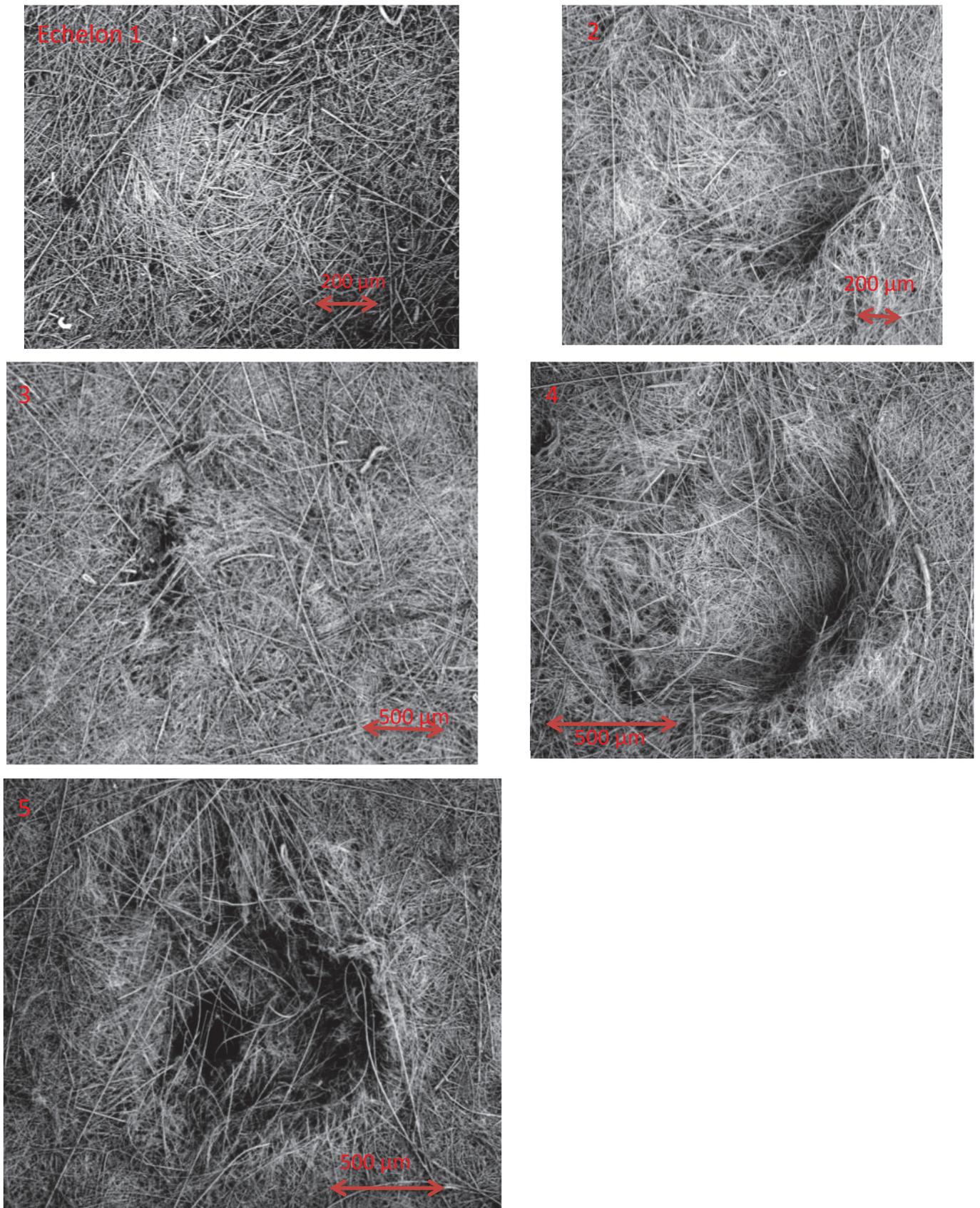


Figure 107 - Visualisations au MEB des dégradations du médium illustrant les 5 échelons définis pour évaluer la dégradation

L'échelon 1 correspond à une légère compression des fibres et induisant un changement de la morphologie du médium. Pour l'échelon 2, il apparaît une compression plus importante avec une modification locale de l'épaisseur du médium. Pour l'échelon 3 est identifié un arrachement local des fibres alors que pour l'échelon 4 un ramollissement très important des fibres est observé. Pour l'échelon 5, une perforation du médium est obtenue.

La Figure 108 représente l'évolution du niveau de dégradation du médium matérialisée par les différents échelons définis précédemment en fonction de la température, ceci pour les 3 valeurs d'énergie cinétique simulées (Tableau 29).

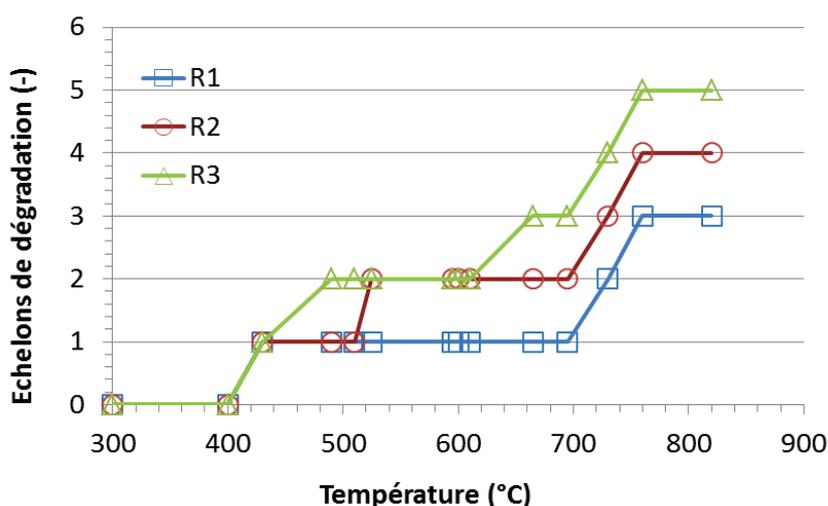


Figure 108 - Echelons de dégradation du médium en fonction de l'énergie cinétique d'impact et la température de contact

Pour des températures inférieures à 430 °C, aucune dégradation n'a été observée quelle que soit l'énergie cinétique. L'échelon 1 est atteint à partir de 430 °C, le médium ayant alors subi une déformation inélastique. Les visualisations au MEB montrent un compactage des fibres dû au début de la perte de la résistance mécanique des fibres. Nous pouvons donc conclure que la température seuil de dégradation est égale à 430 °C ( $\pm 10^\circ\text{C}$ ). Cette valeur de température est en accord avec la température limite recommandée par le fabricant (Tableau 13).

A partir de cette valeur seuil de température, la dégradation du médium est une fonction croissante de l'énergie cinétique des particules.

Un second seuil de température est atteint aux environs de 750°C ( $\pm 10^\circ\text{C}$ ), où l'on peut observer une nette intensification de la dégradation du médium en fonction de la température, ce qui signifie que les fibres ont perdu l'essentielle de leur résistance mécanique.

L'échelon 4 est atteint pour des températures supérieures à 770 °C pour R2 et 730 °C pour R3. La température nécessaire à la dégradation diminue avec l'augmentation de l'énergie cinétique. Toutefois,

rappelons que la gamme d'énergie cinétique étudiée est nettement plus importante que celle attendue pour les particules.

Les mesures de température de particules réalisées à 378 cm de l'émission, (Chapitre 4) sont rappelées ci-dessous (Figure 109).

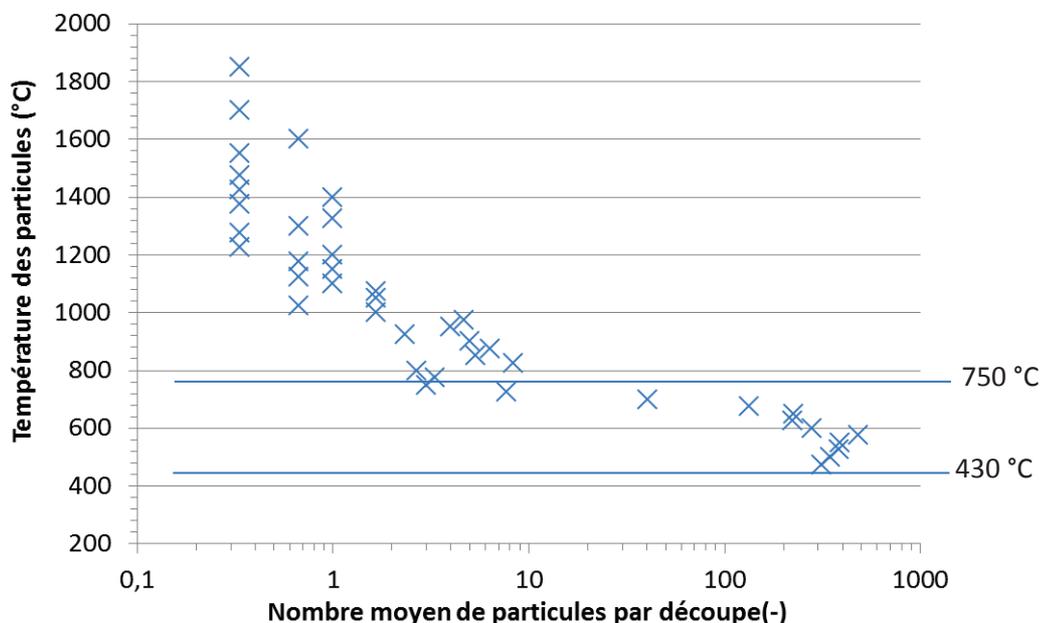


Figure 109 - Température des particules à 378 cm de l'émission

Ce résultat met en lumière la présence, à cette distance, de nombreuses particules dont la température est supérieure à 430°C et à 750 °C ce qui conduit à la dégradation du médium et à la perte d'efficacité du filtre, en accord avec les mesures du CE réalisées.

En conclusion, cette approche a permis de montrer que le médium conserve son élasticité jusqu'à une température de 430 °C ( $\pm 10^\circ\text{C}$ ). Au-delà de cette température, les fibres soumises à une contrainte mécanique se ramollissent et se déforment de manière inélastique. La seconde information importante obtenue par ces essais est le fait que la dégradation du médium est une fonction croissante de l'énergie cinétique à partir de cette valeur seuil de 430 °C.

### 5.3. Corrélation particules/dégradation

L'objectif de ce paragraphe est de développer des corrélations empiriques pouvant prédire l'évolution de la perte d'efficacité du filtre soumis à l'impact de particules incandescentes. Dans un premier temps, une corrélation empirique basée sur une approche physique à l'aide de nombres adimensionnels sera présentée. Dans un second temps, une corrélation empirique plus opérationnelle, basée sur des paramètres pouvant être accessibles aux exploitants, sera présentée.

### 5.3.1. Corrélation adimensionnelle

Les résultats du Chapitre 4 ont permis de déterminer les caractéristiques des particules en termes de diamètre, vitesse, température et nombres de particules incandescentes en fonction de la distance à l'émission. Ces paramètres jouent un rôle dans la dégradation quantifié par l'approche globale.

Une corrélation empirique, basée sur des nombres adimensionnels permettant de décrire la diminution de l'efficacité du filtre (Équation 47 rappelée ci-dessous) est ainsi explicitée par l'Équation 48.

$$\Delta CE = \left( \frac{CE \text{ final}}{30\,000} \right) \cdot 100 \quad \text{Équation 47}$$

$$\Delta CE = St^{\varpi} \cdot Q_m^{\chi} \cdot Ti^{\xi} \cdot N^{\psi} \quad \text{Équation 48}$$

Avec :

- St, le nombre de Stokes des particules (cf. paragraphe 1.2.1 – Équation 1),
- $Q_m$ , le rapport des densités de flux de quantités de mouvement,
- Ti, un paramètre qui rend compte de l'effet de la température des particules et de la température de début de perte de la résistance mécanique des fibres ( $T_s$ ),
- N, le nombre de particules incandescentes,
- $\varpi, \chi, \xi, \psi$ , constantes empiriques.

Les constantes de dégradation ont été déterminées expérimentalement dans notre configuration, pour une découpe d'acier inoxydable à 78 N (Tableau 30).

**Tableau 30 - Constantes de dégradation de la corrélation empirique**

Constantes	Valeurs
$\varpi$	- 11,8
$\chi$	- 13,5
$\xi$	- 3,8
$\psi$	- 6,5

Le paramètre  $Ti$ , explicité par l'Équation 49.

Soit :

$$Ti = \left( 1 - \exp\left( \frac{T_s - T_p}{T_s} \right) \right) \quad \text{Équation 49}$$

Avec  $T_s$ , la température seuil de la dégradation, déterminée précédemment (430°C). La forme exponentielle permet de prendre en compte l'influence de la température seuil de dégradation ( $T_s$ ).

Enfin, le paramètre  $Q_m$ , explicité par l'Équation 50, représente le rapport des densités de flux de quantités de mouvement de la particule et du fluide.

Soit :

$$Q_m = \frac{\rho_p \cdot U_p^2}{\rho_f \cdot U_f^2}$$

Équation 50

La comparaison de la corrélation empirique avec les résultats expérimentaux de perte d'efficacité est présentée sur la Figure 110.

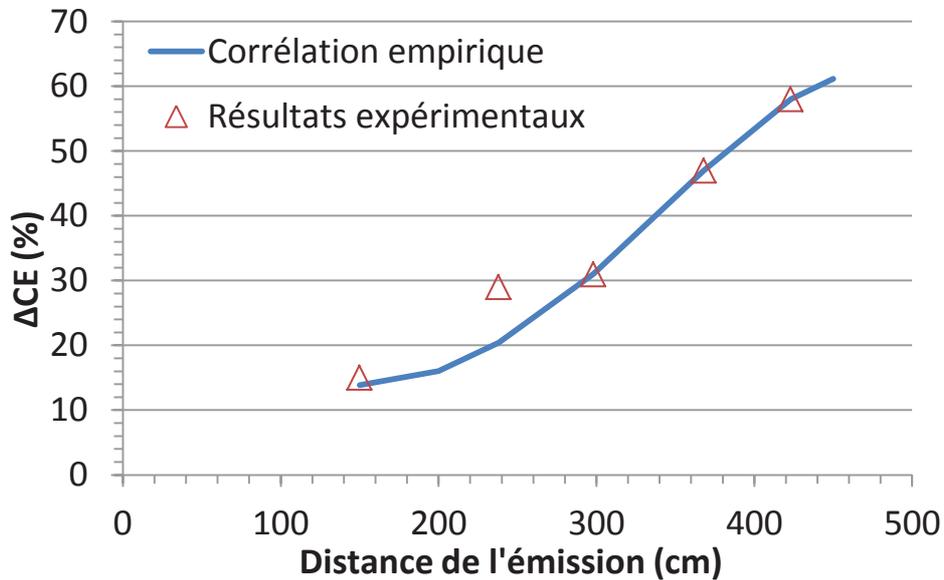


Figure 110 - Comparaison de la perte d'efficacité du filtre issue des résultats expérimentaux et de la corrélation empirique

Globalement, la corrélation empirique permet d'estimer la perte d'efficacité du médium en considérant les caractéristiques des particules pour des distances comprises entre 1 et 5 m. Les caractéristiques physico-chimiques du métal jouent un rôle dans le transfert de chaleur entre la particule et le médium, donc dans la dégradation de celui-ci, mais ces paramètres n'ont pas été inclus dans la corrélation.

Cette corrélation nécessite de connaître les caractéristiques des particules, ce qui la rend inadaptée à une utilisation opérationnelle dans le cadre d'un chantier de démantèlement. Ainsi, une corrélation à caractère industriel est proposée.

### 5.3.2. Corrélation industrielle

Les paramètres influençant la production de particules considérés ici sont la force d'appui, la distance à l'émission et le temps de découpe.

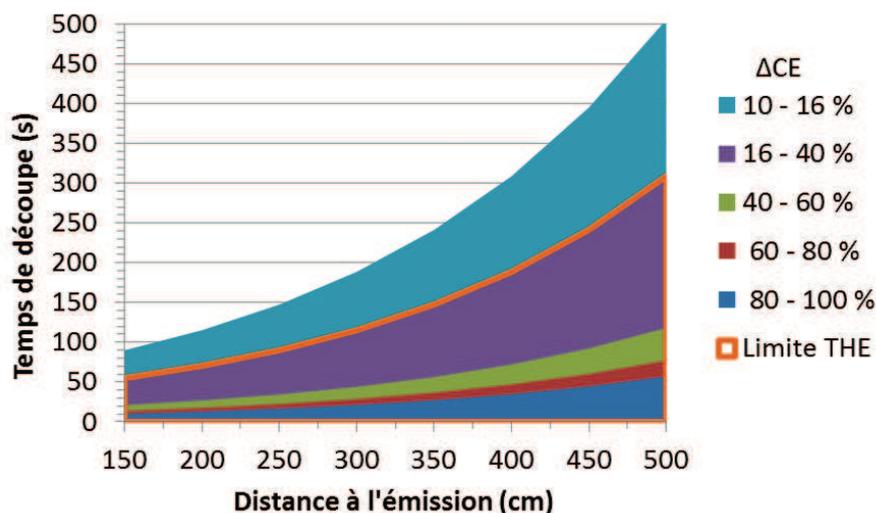
La corrélation décrivant la perte d'efficacité du filtre, dans le cas d'une découpe d'acier inoxydable est explicitée par l'Équation 51 suite aux essais réalisés dans l'installation CAPIMIF.

$$\Delta CE = 0,28 \cdot e^{(0,0047d_{ef})} \cdot (-0,4 \cdot F^2 + 62,8 \cdot F - 942,7) \cdot tps^{(0,0006F^2 - 0,9 \cdot F + 2,4322)} \quad \text{Équation 51}$$

Avec :

- F, la force d'appui (62, 78 ou 88 N),
- tps, le temps de découpe (s),
- $d_{ef}$ , la distance de l'émission au filtre (cm).

A l'aide de cette corrélation, il est possible de déterminer l'évolution du  $\Delta CE$  en fonction du temps de découpe et de la distance à l'émission (Figure 111).



**Figure 111 - Evolution du  $\Delta CE$  en fonction du temps de découpe et de la distance à l'émission pour une découpe d'acier inoxydable avec une force d'appui de 78 N**

Logiquement, plus la distance à l'émission augmente, plus le temps de découpe nécessaire pour atteindre la limite d'efficacité définie pour un filtre THE ( $CE > 5000$ ) est long. Notons que pour notre configuration qui est la plus défavorable pour un filtre exposé sans système de protection, le temps de découpe nécessaire pour lequel le filtre n'est plus considéré comme THE est compris entre 50 s et 300 s suivants les distances.

Durant les opérations de démantèlement, sont installés des dispositifs de protection de type pare-étincelles en amont du filtre. Des essais de découpe d'acier inoxydable réalisée à une distance de 3 m avec un dispositif de type pare-étincelles ont été menés dans CAPIMIF. Il s'agit d'un pare-étincelles TM Choc 2EN1 inox de la société CAMFIL-FARR® (Figure 112).

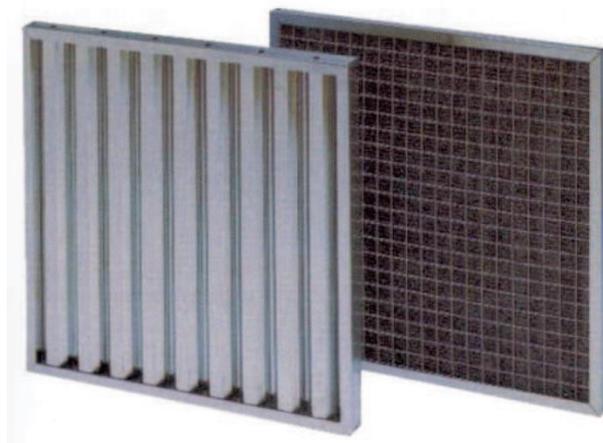


Figure 112 - Dispositif pare-étincelles TM choc 2EN1 de la société CAMFIL-FARR

La correspondance entre la perte d'efficacité avec et sans pare-étincelles, dans une configuration donnée, permet d'adapter la corrélation (Équation 51) pour décrire la baisse d'efficacité d'un filtre protégé (Figure 113).

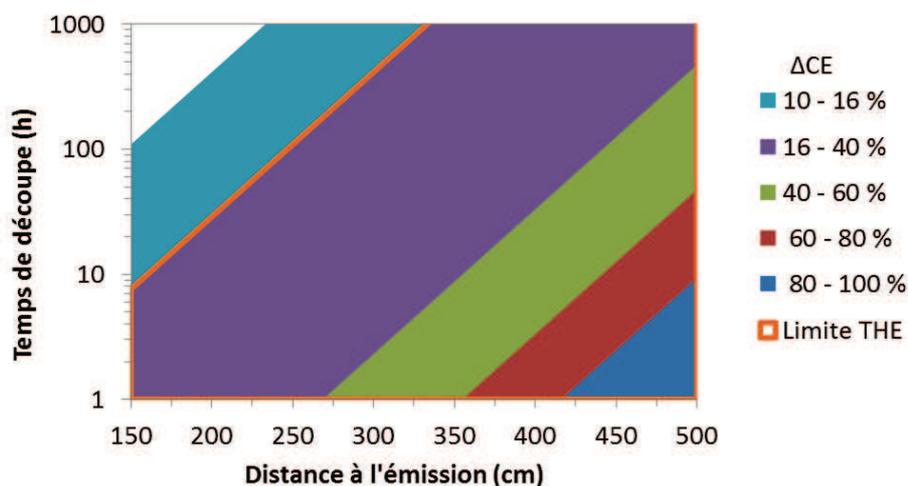


Figure 113 - Evolution du  $\Delta CE$  d'un filtre protégé par un dispositif pare-étincelles (TM choc 2EN1) en fonction du temps de découpe et de la distance à l'émission, pour une découpe d'acier inoxydable avec une force d'appui de 78 N

Avec la présence du dispositif, à une distance de 150 cm, le temps de découpe nécessaire pour atteindre le seuil d'efficacité du filtre THE, est de huit heures. Au-delà de 3 m, le temps de découpe nécessaire à la perte d'efficacité du filtre est supérieur à 1000 heures en présence d'un système pare-étincelles.

Les premiers résultats de cette étude témoignent de l'efficacité du pare-étincelles à protéger le filtre THE mais mettent aussi en évidence, le passage de certaines particules, qui entraînent une diminution du CE du filtre THE exposé aux particules (le temps d'exposition se compte désormais en heures). Nous suspectons les phénomènes de rebonds des particules responsables du passage de certaines particules, phénomène qu'il serait intéressant de vérifier.

Cette corrélation a été établie pour un type de dispositifs pare-étincelles, il pourrait être intéressant de l'étendre pour d'autres dispositifs. De plus, elle n'est valable que pour la découpe d'acier inoxydable avec l'aide d'une disqueuse, d'autres essais seraient nécessaires pour l'adapter à d'autres types de métaux et outils de découpe.

Ces corrélations sont conservatives car elles n'intègrent pas l'effet du colmatage du filtre par la population de particules microniques produite lors de la découpe (paragraphe 4.3.1) qui contribue à augmenter l'efficacité du filtre.

#### **5.4. Bonnes pratiques**

La capitalisation de tous les essais réalisés dans le cadre de cette étude a mis en évidence certains résultats permettant de limiter le risque de détérioration des barrières de confinement vis-à-vis des particules incandescentes dans le cadre de chantiers de démantèlement, tels que :

- a) Ne pas orienter la gerbe d'étincelles directement vers le système de ventilation
- b) Minimiser le débit d'extraction
- c) Utiliser des systèmes de protection des filtres
- d) Utiliser des filtres vierges
- e) Optimiser les conditions de coupes

Ces points sont détaillés par la suite. Ils sont valables uniquement pour la découpe d'acier doux et inoxydable par une disqueuse.

- a) Ne pas orienter la gerbe d'étincelles directement vers le système de ventilation

Les particules potentiellement dangereuses identifiées dans le cadre de cette étude ont un diamètre minimal de 50  $\mu\text{m}$  et possèdent un caractère balistique. Les trajectoires des particules sont peu modifiées par la ventilation et dépendent de leurs directions initiales. Ainsi, la mise en œuvre d'une gerbe d'étincelles non orientée vers le système de ventilation permet de limiter la probabilité de présence de particules incandescentes sur le filtre.

- b) Minimiser le débit d'extraction

La baisse du débit d'extraction augmente le temps de transit des particules et permet une baisse de leur température et une diminution de leur vitesse (paragraphe 4.5.2).

A contrario, une baisse du débit d'extraction peut entraîner un empoussièrément important du local étant donné le nombre élevé de particules microniques émises pendant la découpe, ce qui peut engendrer d'autres contraintes pour les opérateurs.

c) Utiliser des systèmes de protection des filtres

D'après les résultats obtenus au paragraphe 5.3.2, il advient :

- Sans dispositif de protection, à une distance de 1,5 m, le filtre perd son niveau THE dès 60 s de découpe.
- Avec un dispositif de protection du filtre de type pare-étincelles (CAMFIL-FARR Choc 2EN1), à une distance de 1,5 m, le filtre perd son niveau THE au bout de 8 h.

D'autres systèmes de protection existent mais n'ont pas été testés sur CAPIMIF.

d) Utiliser des filtres vierges

Durant les essais réalisés lors de cette étude (400 découpes), dont certains dans les configurations les plus défavorables (découpe à 1 m du filtre non protégé), aucun départ de feu n'a été constaté sur les filtres industriels THE. Les filtres utilisés dans CAPIMIF étaient vierges ou colmatés par des particules non combustibles issues de la découpe du métal (particules métalliques, alumine et fibre de verre).

Le corolaire de ce constat est que les départs de feu rencontrés en exploitation seraient probablement la conséquence de l'inflammation d'un gâteau d'éléments combustibles déposé sur le filtre, issu d'un colmatage antérieur aux opérations de découpes.

L'emploi de filtre THE vierge, dans les chantiers de démantèlement, permet ainsi de limiter le risque d'incendie.

e) Optimiser les conditions de coupes

La Figure 114 représente le temps de découpe nécessaire à une dégradation du filtre en fonction de la distance à l'émission, du métal et de la force d'appui.

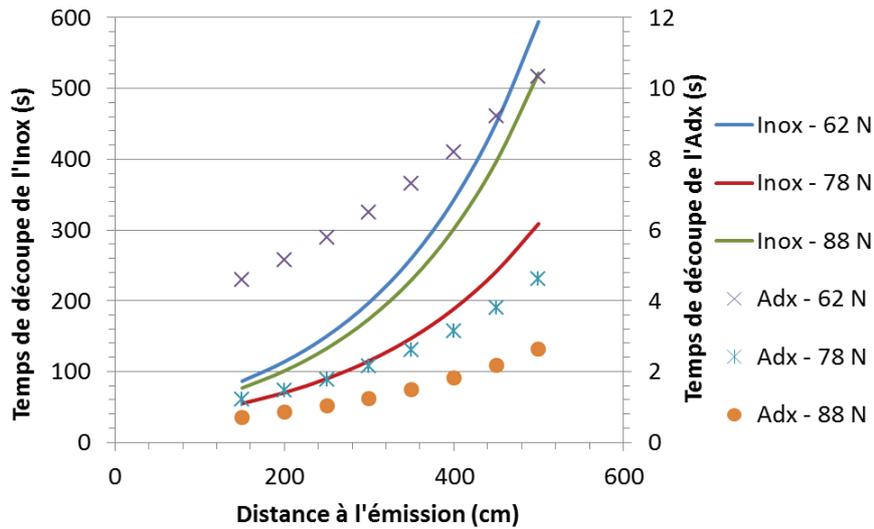


Figure 114 - Limites d'efficacité d'un filtre THE en fonction du temps de découpe, de la distance, de la force et du type de métal

Le temps nécessaire à la dégradation du filtre suite à une découpe d'acier doux (Adx) est de quelques secondes tandis que pour une découpe d'acier inoxydable, il est compris entre une dizaine et une centaine de secondes. Cette tendance s'explique grâce aux résultats obtenus au Chapitre 4 qui montrent que la production de particules incandescentes est beaucoup plus importante dans le cas de l'acier doux.

Pour une découpe d'acier doux, l'augmentation de la force d'appui diminue le temps d'exposition aux particules nécessaire pour arriver à la limite de l'efficacité d'un filtre THE. Il est donc préférable de travailler avec une forte force d'appui (88 N) pour la découpe d'acier doux.

Une tendance non monotone est mise en évidence dans le cas de l'acier inox, en accord avec les observations faites par différents auteurs (paragraphe 1.1.3). Les phénomènes de découpe étant très complexes, il est difficile de statuer sur une bonne pratique à mettre en œuvre en ce qui concerne l'acier inoxydable.

## 5.5. Conclusions

Ce chapitre a permis de quantifier et de qualifier la dégradation du filtre, notamment en déterminant les seuils requis pour induire un début de modification de la structure du médium conduisant à une diminution de son efficacité de filtration. Basées sur ces résultats, des corrélations empiriques décrivant cette perte d'efficacité ont été proposées.

- La mesure de CE d'un filtre plissé industriel THE a montré que pour toutes les configurations et pour une distance inférieure à 5 m, une baisse de l'efficacité du filtre était mise en évidence.

- Des visualisations au MEB ont permis d'identifier que localement, la réduction de l'épaisseur du médium à compacité constante, induite par la fusion des fibres, entraînait une perte d'efficacité du filtre.
- Via des essais analytiques, une température seuil correspondant au début de la dégradation du médium a été déterminée (430 °C). Au-delà de cette température, l'énergie cinétique accentue la dégradation.
- La perte de résistance mécanique des fibres à 430 °C se poursuit pour atteindre aux environs de 750 °C, un ramollissement important des fibres.
- Des corrélations empiriques, physiques et plus opérationnelles ont été développées afin de prévoir la perte d'efficacité du filtre en fonction des caractéristiques des particules et des grandeurs accessibles par l'exploitant.
- Des bonnes pratiques ont été proposées afin de limiter la dégradation des systèmes filtrants.

## Conclusions & Perspectives

En réponse à des incidents de départ de feu dans des installations nucléaires de base suite à des découpes de métal à chaud lors d'opérations de démantèlement, l'IRSN s'intéresse aux particules émises par les procédés de découpe et leurs effets potentiels de dégradation des barrières de confinement. Un état de l'art a permis d'identifier la disqueuse comme premier outil de découpe à caractériser. Dans la littérature, les travaux concernant la caractérisation des particules émises par une disqueuse s'intéressent plus particulièrement aux particules microniques pour des problématiques liées à la dissémination de la contamination et au risque d'inhalation des opérateurs. Peu d'études s'intéressent aux particules incandescentes, qui de par leurs inerties thermique et cinétique, sont susceptibles de dégrader les systèmes de filtrations.

Ce sujet de recherche appliquée a été abordé en couplant une approche semi industrielle à une approche plus analytique.

Ainsi l'installation CAPIMIF a été développée permettant de reproduire des opérations de découpe de métaux représentatives de chantiers de démantèlement. Afin de lui conférer un caractère semi analytique, cette installation a été automatisée et instrumentée avec des moyens de diagnostics permettant de caractériser en vol les particules générées lors de la découpe de métaux. Un développement spécifique a été entrepris pour étendre le domaine d'application d'un pyromètre utilisé pour mesurer en vol la température des particules métalliques pouvant être à l'état solide ou liquide, particules qui compte tenu de leur énergies cinétique et thermique sont responsables de la dégradation du filtre.

L'analyse de la dégradation des filtres a été menée par des approches, qualifiées de globale et de locale.

De l'approche globale, il ressort que la diminution de l'efficacité du filtre exposé aux particules est significative, ceci quelles que soient les distances considérées. La caractérisation du devenir des particules a en effet montré que celles-ci peuvent impacter le filtre en ayant des températures supérieures à 1500 °C, c'est-à-dire à l'état liquide.

L'approche locale a permis d'identifier et de quantifier les mécanismes de dégradation du médium. La baisse d'efficacité est induite par la réduction, localement, de l'épaisseur du filtre ceci à compacité constante.

Des essais analytiques ont été menés pour étudier de manière séparée puis couplée, les effets de la contribution des énergies cinétique et thermique des particules vis-à-vis de la dégradation du médium. Le médium conserve son élasticité jusqu'à une température de 430 °C. Au-delà de cette température, la

résistance mécanique du médium diminue et celui-ci se déforme d'autant plus, de manière inélastique, qu'il est soumis une contrainte mécanique importante.

La mise en corrélation des caractéristiques des particules avec le niveau de dégradation du médium, évalué par la mesure du coefficient d'épuration du filtre, a permis d'établir de manière empirique des relations exprimant la variation d'efficacité d'un filtre exposé à des particules.

Cette approche empirique lui confère un caractère opérationnel et permet à l'exploitant d'estimer la perte d'efficacité d'un filtre non protégé en fonction de différents paramètres qui sont accessibles dans les chantiers de démantèlement.

Les perspectives sont nombreuses. En termes d'enjeu de sûreté, l'efficacité des systèmes de protection des filtres THE pourrait être investiguée en conservant le caractère semi analytique de cette étude, pour identifier et quantifier les phénomènes mais aussi les expliquer. D'autres configurations pourraient aussi être étudiées, à savoir, différents outils de découpe, présence de singularités, etc.

En termes de développements métrologiques, une qualification complémentaire du pyromètre permettrait de réduire l'incertitude de la mesure de température.

En termes de simulations numériques, de nouveaux développements de modèles seraient nécessaires pour prendre en compte de manière plus réaliste l'interaction des particules avec les parois de la conduite de ventilation. De même, les réactions d'oxydations des particules ferriques qui peuvent conduire à leur fusion pourraient être intégrées dans les simulations ce qui nécessiterait une étude à part entière compte tenu de la complexité des phénomènes métallurgiques.

# Références

- ADRIAN, R.J. (1986). Multi-point optical measurements of simultaneous vectors in unsteady flow. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 7, 127-145.
- ALENGRY, J. (2014). *Etude numérique et expérimentale des longueurs de bon mélange : application à l'évaluation de la représentativité des points de prélèvement en conduit*. Thèse de doctorat.
- ALENIUS, S., JOHANSSON, J. (1996). Air flows and particle distribution around a rotating grinding wheel. *Aerosol Science and Technology*, 25(2), 121-133.
- ARTOUS, S. (2003). *Influence de l'humidité sur la filtration Très Haute Efficacité dans les installations nucléaires*. Mémoire CNAM de Chimie Industrielle.
- ARTOUS, S., NORVEZ, O., TEPPE, A.L. (2011). *Etude de l'impact d'étincelles produites par une disqueuse sur l'efficacité de filtres THE*. Rapport d'étude IRSN/DSU/SERAC/LECEV/11-32.
- Auteurs et Experts ETI. (n.d.). *Textiles à usage technique* (Vol. 42534210). (T.I., Ed.)
- BACH, F.W., STEINER, H., SCHRECK, G., PILOT, G. (1993). *Analysis of results obtained with different cutting techniques and associated filtration systems for the dismantling of radioactive metallic components*. Commission of the European Communities. EUR 14213.
- BARON, P.A., WILLEKE, K. (2001). *Aerosol Measurement : Principles, Techniques and Applications*. Second Edition - John Wiley & Sons.
- BASSET, A. (1888). *A treatise on Hydrodynamics - with numerous examples* (Vol. 2). Cambridge : Deighton, Bell and Co.
- BENNET, H. (1964). Influence of surface roughness, surface damage and oxide films on emittance. *NASA SP-55*, 145-151.
- BISHOP, A. (1989). *Ventilation and filtration techniques for handling aerosols produced by thermal cutting operations*. Commission of the European Communities. EUR 12321.
- BLACK, J. (1979). Flow stress model in metal cutting. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 101(4), 403-415.
- BOUILLOUX, L. (2006). *Filtres à Très Haute Efficacité (THE)*. INERIS: Document de synthèse relatif à une barrière de sécurité.

- BOURROUS, S., BOUILLLOUX, L., OUF, F.X., APPERT-COLLIN, J.-C., THOMAS, D., TAMPERE, L., MORELE, Y. (2014). Measurement of the nanoparticles distribution in flat and pleated filters during clogging. *Aerosol Science and Technology*, 48, 392-400.
- BOUSSINESQ, J. (1885). *Application des potentiels à l'étude de l'équilibre et du mouvement des solides élastiques*. Paris : Gauthier-Villards.
- BRANNON, Jr.R.R., GOLDSTEIN, R.J. (1970). Emittance of oxide layers on a metal substrate. *Journal of Heat Transfer*, 92(2), 257-263.
- BROWN, R.C. (1992). *Air Filtration - An integrated approach to the theory and applications of fibrous filters*. Oxford: Pergamon Press.
- BURGESS, G.K., FOOTE, P.D. (1915). The emissivity of metals and oxides. IV. Iron oxide. (249), 83-89.
- CETEGEN, B.M., YU, W. (1999). In-situ particle temperature, velocity and size measurements in DC Arc Plasma thermal sprays. *Journal of Thermal Spray Technology*, 8(1), 57-67.
- CETIER, P. (1989). *Caractérisation des transferts de contaminants lors des découpes thermiques et mécaniques d'échantillons métalliques*. Thèse de doctorat.
- CHABRE, A. (1972). *Etude de l'impact de fines particules solides sur une cible piézo-électrique en vue de la détermination de leur masse et de leur concentration*. Thèse de doctorat.
- DALLAVALLE, J. (1952). *Exhaust hoods* (2nd ed.). New York: Industrial Press.
- DEL FABBRO, L. (2001). *Modélisation des écoulements d'air et du colmatage des filtres plissés par des aérosols solides*. Thèse de doctorat.
- FAUVEL, S., PILOT, G., DE DINECHIN, G., GOSSE, X., ARNAUD, P. (2005). Caractérisation de l'aérosol émis lors d'une découpe par laser. *Congrès Français sur les Aérosols*. Paris.
- FELICE, R. (2002). The spectropymeter - a practical multi-wavelength pyrometer. *The 8th Symposium on Temperature : Its measurement and control in Science and Industry*.
- FINCKE, J.R., HAGGARD, D.C., SWANK, W.D. (2001). Particle temperature measurement in the thermal spray process. *Journal of Thermal Spray Technology*, 10(2), 255-266.
- FUKANUMA, H., OHMORI, A. (1994). Behavior of molten droplets impinging on flat surface. *Journal of Thermal Spray conference*, 563-567.

- GOUGEON, R. (1994). *Filtration des aérosols liquides par les filtres à fibres en régime d'interception et d'inertie*. Thèse de doctorat.
- GOUTIER, S., NOGUES-DELBOS, E., VARDELLE, M., FAUCHAIS, P. (2008). Particle temperature fluctuations in Plasma Spraying. *17*(5-6), 895-901.
- HINDS, W. (1999). *Aerosol technology : properties, behavior, and measurement of airborne particles*.
- HOOVER, M.D., NEWTON, G.J., BARR, E.D., WONG, B.A. (1982). Aerosols from metal cutting techniques typical of decommissioning nuclear facilities - Inhalation hazards and worker protection. Seattle, WA: International Decommissioning Symposium.
- INSERM. (1999). *Effets sur la santé des fibres de substitution à l'amiante*. Paris: Expertise collective INSERM.
- INSTN. (1987). Guide de ventilation des installations nucléaires. *Centre Technique de Référence en Ventilation et Epuration - CETREVE*.
- ISETTI, C., NANNEI, E. (1980). Influence of surface treatments on the total normal emittance of AISI 316 stainless steel. *Thermo and Fluid Dynamics*, *14*, 211-215.
- JORDAN, D. (1954). The adhesion of dust particles. *British Journal of Applied Physics*, *5*(Supplément 3), 194.
- JOUBERT, A. (2009). *Influence de l'humidité en filtration Très Haute Efficacité*. Thèse de doctorat.
- KACZMAREK, J. (2008). The effect of abrasive cutting on the temperature of grinding wheel and its relative efficiency. *Archives of civil and mechanical engineering*, *8*(2), 81-90.
- KACZMAREK, J. (2011). Using a thermovision method for measuring temperatures of a workpiece during abrasive cut-off operation. *Advances in Manufacturing Science and Technology*, *35*, 85-95.
- KRUCZECK, T., RUDNICKI, Z., SACHAJDAK, A. (2001). Measurements of the spectral emissivity of steel in a gaseous reduction atmosphere. *3rd International Symposium on Radiative Transfer*.
- LABORDE, J. (1996). *Performances de dispositifs de protection des filtres THE contre les aérosols incandescents*. Rapport d'étude IRSN/DSU/SERAC/LECEV/96-21.
- LALLEMENT, R. (2004). Démantèlement des installations nucléaires : les voies de la maîtrise industrielle. *Revue Général Nucléaire*(5), 21-31.
- LILLERUD, K.P., KOFSTAD, P. (1980). On high-temperature oxidation of chromium. (I). Oxidation of annealed, thermally etched chromium at 800-1100°C. *Journal of the Electrochemical Society*, *127*(11), 2397-2410.

- MALKIN, S. (1984). Grinding of metals : Theory and application. *Journal of Applied Metalworking*, 3(2), 95-109.
- MARCHAL, P., PORCHERON, E. (2014, Septembre-Octobre). R&D : Impact des particules incandescentes dans les réseaux de ventilation. *Revue Générale Nucléaire*(5), 55-59.
- MARCHAL, P., PORCHERON, E., GREHAN, G., LAFANECHERE, L., WALTER, J., GELAIN, T. (2015). Characterization of incandescent particles emitted by a cut-off grinder during decommissioning operations for evaluating filter degradation. *Nuclear Engineering and Radiation Science*.
- MARCHAL, P., PORCHERON, E., LAFANECHERE, L., WALTER, J., GREHAN, G. (2013). Incandescent particle characteriation emitted by a cut-off wheel grinder during decommissioning operations for evaluating filters degradation. *International Conference on Nuclear Engineering (ICONE21)*. Chengdu, Chine.
- MARCHAL, P., PORCHERON, E., LAFANECHERE, L., WALTER, J., GREHAN, G. (2014). Extension of pyrometer application field for temperature measurement of incandescent particles in flight. *Aerosol Technology*. Karlsruhe, Allemagne.
- MARCHAND, O. (2010). *Etude du procédé de projection plasma de suspension pour l'élaboration du coeur de pile à combustible SOFC*. Thèse de doctorat.
- MARTIN, C., FAUCHAIS, P. (1980). Mesure par thermographie infrarouge de l'émissivité de matériaux bons conducteurs de la chaleur. Influence de l'état de surface, de l'oxydation et de la température. *Revue de Physique Appliquée*(15), 1469-1478.
- MAUER, G., VASSEN R., STÖVER, D. (2007). Comparison and applications of DPV-2000 and Accuraspray-g3 Diagnostic Systems. *Journal of Thermal Spray Technology*, 16(3), 414-424.
- MEASURE, R. (1984). *Laser Remote Sensing*. Wiley-Interscience - John Wiley & Sons.
- MENDY, H. (2008). *Etudes expérimentales et simulations des processus de corrosion aux interfaces matériaux métalliques-environnement*. Thèse de doctorat.
- MOURET, G., THOMAS, D., CHAZELET, S., APPERT-COLLIN, J-C., BEMER, D. (2009). Penetration of nanoparticles through fibrous filters perforated with defined pinholes. *Journal of Aerosol Science*, 40, 762-775.
- NEWTON, G.J., HOOVER, M.D., BARR, E.D., WONG, B.A., RITTER, P.D. (1981-1982). *Aerosols from metal cutting techniques typical of decommissioning nuclear facilities - Experimental system for collection and characterization*. Inhalation Toxicology Research Institute Annual Report.

- NEWTON, G.J., HOOVER, M.D., BARR, E.D., WONG, B.A., RITTER, P.D. (1987). Collection and characterization of aerosols from metal cutting techniques typically used in decommissioning nuclear facilities. *American Industrial Hygiene Association journal*, 48(11), 922-932.
- ODY SACADURA, J. (1972). Influence de la rugosité sur le rayonnement thermique émis par des surfaces rugueuses - essai de modèle. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 15, 1451-1465.
- ONODERA, J., YABUTA, H., NISHIZINO, T., NAKAMARA, C., IKEZAWA, Y. (1991). Characterization of aerosols from dismantling work of experimental power reactor decommissioning. *Proceedings of the 19th annual European Aerosol Conference*. Karlsruhe, Germany.
- OSEEN, C.W. (1933). *Neuere Methoden und Ergebnisse in der Hydrodynamik*. Akademische Verlagsgesellschaft.
- PAIDASSI, J. (1958). The kinetics of the air oxidation of iron in the range 700-1250°C. *Acta Metallurgica*, 6(3), 184-194.
- PEILLON, S., FAUVEL, S., CHAGNOT, C., GENSDARMES, F. (2014). Caractérisation des émissions d'aérosols produits lors d'opérations de démantèlement par découpe laser sous eau. *Congrès Français sur les Aérosols*. Paris.
- PENICOT-BAUGE, P. (1998). *Etude de la performance des filtres à fibres lors de la filtration d'aérosols liquide ou solide submicroniques*. Thèse de doctorat.
- PILOT, G., BERNARD, J. (1995). *Evaluation of the segmentation by various cutting techniques*. Rapport d'étude IRSN/DSU/SERAC/LPMA/95-06.
- PITTOIS, E. (1924). *L'essai aux étincelles*. Paris: Librairie Delagrave.
- PLANCK, M. (1906). *The theory of heat radiation*.
- RANZ, W.E., MARSHALL, W.R. (1952). Evaporation from drops. *Chemical Engineering Progress*, 48(4), 173-180.
- REAGLE, C. (2012). *Technique for measuring the coefficient of restitution for microparticle sand impacts at high temperature for turbomachinery applications*. Thèse de doctorat.
- RENOUX, A., BOULAUD, D. (2003a). *Physique des aérosols, partie 1*. Techniques de l'ingénieur.
- ROWE, G.W., WETTON, A.G. (1969). Theoretical considerations in the grinding of metals. *Journal of Institute of Metals*, 97, 193.

- SEIFRIED R., SCHIEHLEN, W., EBERHARD, P. (2005). Numerical and experimental evaluation of the coefficient of restitution for repeated impacts. *International Journal of Impact Engineering*, 32, 508-524.
- STANLEY, J.K., HOENE, J.V., HUNTOON, J.T. (1951). *Transactions of American Society for Metals*, 43, 426.
- SUN, J., CHEN, M.M. (1988). A theoretical analysis of heat transfer due to particle impact. *International Journal of Heat and Mass transfer*, 31(5), 969-975.
- TARASOV, L. (1950). Machining theory and practice. *American Society for Metals*, 409-464.
- THOMAS, D. (2001). *Etude de la filtration des aérosols par des filtres à fibres*. Habilitation à Diriger des Recherches.
- WILLERT, C.E., GHARIB, M. (1991). *Digital particle image velocimetry*. Dept. of Applied Mechanics and Engineering Sciences, R-011, university of California, San Diego, La Jolla, CA 92093, USA.
- WITSCHGER, O. (1996). *Etude théorique et expérimentale des facteurs physiques d'échantillonnage des polluants particulaires. Application aux capteurs à fente annulaire*. Thèse de doctorat.
- WONG, H.Y., AGGARWAL, S.R. (1971). Total hemispherical emittance of stainless steel AISI 321. *Journal of Iron and Steel institut*, 8, 635-637.
- ZHANG, P., MILLER, M.H. (2006). *Investigation of wheel loading based on adhesion theories and temperature*. Michigan technological University, Houghton, MI.
- ZHANG, Z.M., TSAI, B.K, MACHIN, G. (2010). *Radiometric temperature measurements - I. Fundamentals* (Experimental methods in the physical sciences ed., Vol. 42).

## Annexes

Annexe 1 : Composition de l'outil et des pièces utilisées.....	160
Annexe 2 : Incertitude de la loi d'inversion du pyromètre.....	162
Annexe 3 : Etude de sensibilité des paramètres pour la simulation.....	164
Annexe 4 : Essais avec SYLVIA.....	168
Annexe 5 : Simulations CFD de l'influence de la vitesse initiale d'émission et de la vitesse débitante sur les caractéristiques des particules.....	170
Annexe 6 : Répartition spatiale des particules.....	173
Annexe 7 : Analyse des filtres utilisés pour la distribution granulométrique.....	174
Annexe 8 : Résultats expérimentaux concernant l'évolution de la vitesse des particules en fonction de la vitesse débitante.....	176
Annexe 9 : Visualisations au MEB de médias dégradés.....	177
Annexe 10 : Etalonnage du dispositif de dégradation à effets mécanique et thermique.....	179

## Annexe 1

### Composition de l'outil et des pièces utilisées

L'outil est un disque de 350 mm de diamètre, 3 mm d'épaisseur, composé de grains d'oxyde d'aluminium et de liant en fibre de verre. La Figure 115 rassemble les caractéristiques du disque utilisé.

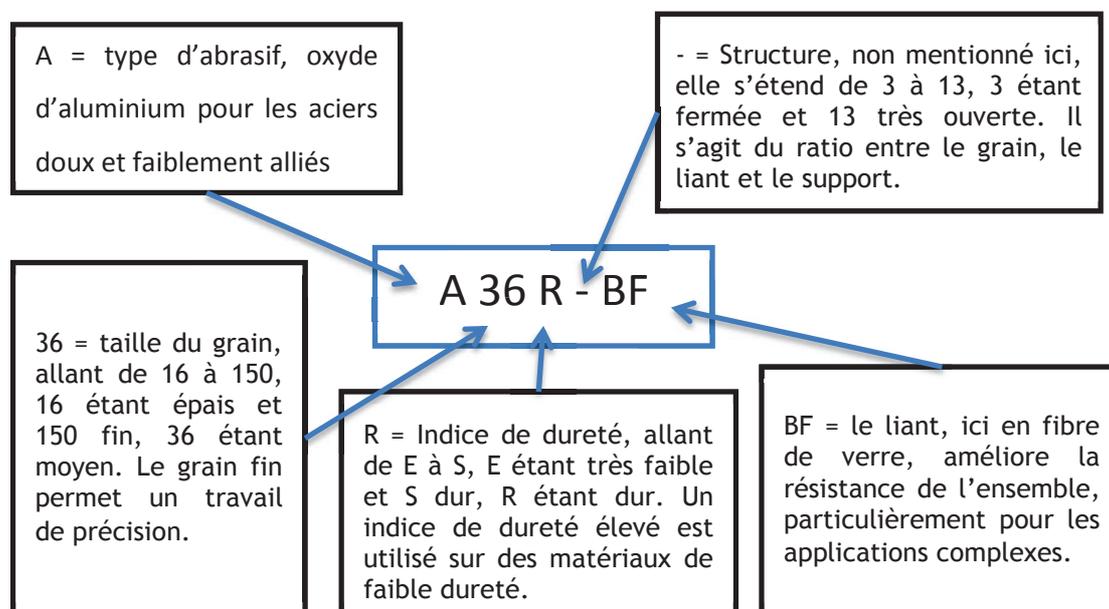


Figure 115 - Éléments caractéristiques du disque

Les différents éléments composant le disque sont ensuite décrits dans le Tableau 31.

Tableau 31 - Descriptif des différents éléments présents dans le disque

Oxyde d'aluminium	Fibre de verre
<p>Corindon ou émeri (<math>Al_2O_3</math>) Il s'agit d'une forme stable de l'aluminium.</p> <p><math>T_{\text{fusion}} = 2072 \text{ } ^\circ\text{C}</math></p> <p><math>\rho = 3950 \text{ kg.m}^{-3}</math></p>	<p>La silice est le composant principal.</p> <p>On recense actuellement une grande variété de fibres de verre utilisées comme renforts des structures composites.</p> <p>En tant que matière minérale, la fibre de verre est incombustible par nature. Elle ne propage pas et n'entretient pas la flamme. Elle ne dégage ni fumée ni produit toxique à haute température. Il y a une dégradation de ces caractéristiques lors de la montée en température qui dépend bien entendu de la nature de la fibre. Sous l'effet de la température, les fibres de verre se ramollissent et forment un mélange en fusion pâteux.</p>

Les pièces à découper sont des plaques d'aciers doux et inoxydables aux dimensions : 450 x 190 x 5 mm<sup>3</sup>.

L'acier est un alliage composé majoritairement de fer et de carbone mais d'autres additifs sont présents en quantités diverses afin de lui confier certaines propriétés particulières.

Les aciers doux sont composés à 97 % de fer et jusqu'à 2 % de carbone, le résidu restant étant constitué d'autres additifs. Le diagramme de phase du couple fer-carbone présenté sur la Figure 116 permet de déterminer la composition du métal suivant le pourcentage de carbone présent et la température.

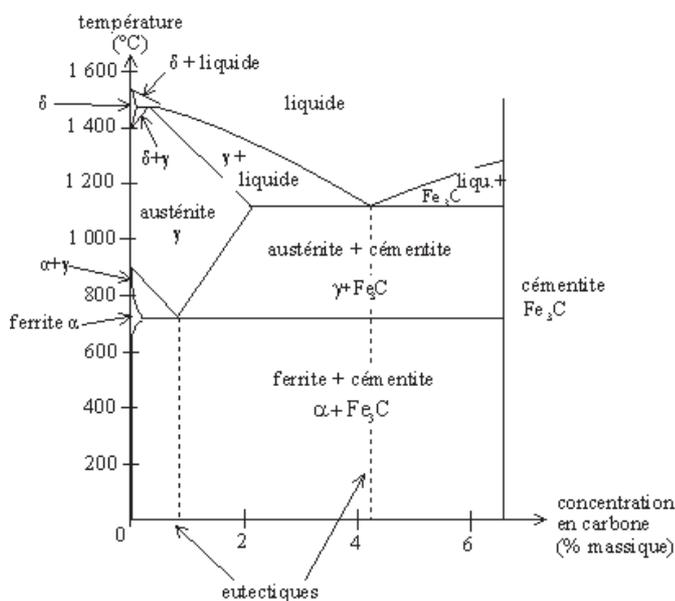


Figure 116 - Diagramme de phase du couple Fer-Carbone (MENDY, 2008)

L'acier est ainsi composé de différents cristaux dénommés alpha (réseau cubique centrée) et gamma (réseau cubique face centrée).

Les différentes formes allotropiques du fer ont des propriétés physiques et une réactivité chimique différente. Le changement de pression et de température influencent l'agencement du fer.

Tableau 32 - Composition de l'acier doux Adx

Désignation EN 10111 : 2008	%C	%Si	%Mn	%P	%S	%Al
DD11	0,06	0,009	0,409	0,014	0,014	0,049

L'acier inoxydable est composé d'au moins 10,5 % de chrome, qui protège le fer de l'oxydation en formant une couche d'oxyde de chrome protectrice (phénomène de passivation). Il doit également avoir moins de 1,2 % de carbone pour éviter la formation de carbure (le chrome se transforme avec le carbone et ne forme plus la couche de passivation). Le nickel apporte des propriétés de ductilité, de malléabilité et de résilience.

Tableau 33 - Composition de l'acier inoxydable AISI 304L

EN 10027 (européenne)	Afnor NF A 35573 (France)	AISI (États-Unis)	Composition								
			% C	% Cr	% Ni	% Mo	% Si	% Mn	% P	% S	Autres
X2CrNi18-09 1.4307	Z3CN18-10	304 L	0	17 à 19	9 à 11	—	1	2	0	0	—

## Annexe 2

### Incertitude de la loi d'inversion du pyromètre

La nouvelle loi d'inversion définie selon l'Équation 42 est rappelée ci-dessous.

$$T_p = \frac{-B}{\left(\frac{-B}{C + q \cdot T_f}\right) - \ln(\beta) - \ln(\gamma) - \ln(\mathcal{G})} - C$$

La loi d'inversion étant relativement simple, nous utilisons une approche simplifiée par les dérivées :

Ce qui peut s'écrire :  $T_p = \frac{-B}{U} - C$       L'incertitude absolue s'écrit alors :  $\partial T_p = \frac{B \cdot \partial U}{U^2}$

Avec :  $U = x - y - z - w$       Soit :  $\partial U = \partial x + \partial y + \partial z + \partial w$

Donc :  $\partial T_p = \frac{B \cdot [\partial x + \partial y + \partial z + \partial w]}{(x - y - z - w)^2}$

Avec :  $x = \frac{-B}{C + q \cdot T_f}$       soit :  $\partial x = \frac{-B \cdot (\partial q \cdot T_f + q \cdot \partial T_f)}{(C + q \cdot T_f)^2}$

Avec :  $y = \ln(\beta) = a \cdot \Omega + b$       soit :  $\partial y = a \cdot \partial \Omega$

Avec :  $z = \ln(\gamma) = a \cdot \tau + b$       soit :  $\partial z = a \cdot \partial \tau$

Avec :  $w = \mathcal{G}$       soit :  $\partial w = \partial \mathcal{G}$

Les incertitudes des valeurs sont rassemblées dans le Tableau 34.

**Tableau 34 - Valeurs et incertitudes de la nouvelle loi d'inversion**

Noms	Valeur	Incertitudes
T <sub>f</sub>	200 à 1300 °C	2 °C si < 400 °C puis 1 °C+0,3 % si > 400 °C
q	0,89	0,02
d <sub>m</sub>	1,5 mm	0,05 mm
t <sub>exp</sub>	1,5 ms	0,05 ms
d	Variable	5 cm

$\Omega$ ,  $\tau$  dépendent de la distance selon la Figure 58. A cela s'ajoute les erreurs sur l'émissivité (6 % sur  $T_f$ ), la non sphéricité des particules. L'incertitude en pourcentage liée à l'utilisation de la nouvelle loi d'inversion en fonction de la distance est tracée sur la Figure 117. L'incertitude est comprise entre 20 et 30 % en fonction de la distance et de la température mesurée par le pyromètre. Elle augmente légèrement avec la distance due à l'augmentation de la dispersion spatiale des particules.

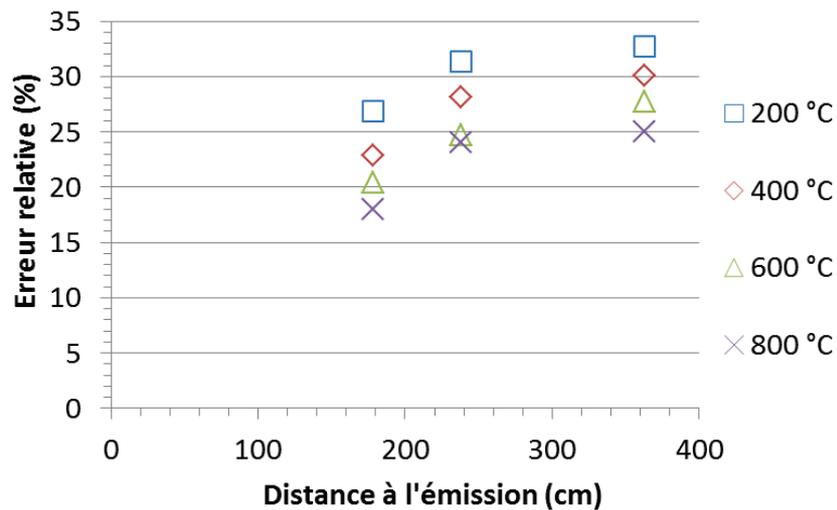


Figure 117 - Pourcentage d'erreur de la nouvelle loi d'inversion en fonction de la distance et de la température mesurée par le pyromètre

## Annexe 3

### Etude de sensibilité des paramètres pour la simulation avec le code ANSYS CFX

Les résultats suivants concernant les Coefficients de Restitution (COR) dans le code ANSYS CFX, l'angle de la génération et la présence de la veine de mesure ont été réalisés pour une température initiale de 1500 K et une émission concentrée uniquement sur les bords du cône de 5°. Ces valeurs initiales diffèrent du cas présenté au paragraphe 4.1, ce qui implique l'étude uniquement de l'évolution.

#### a. Coefficient de restitution (COR)

L'impact d'une particule avec les parois est régi par les COR normaux et tangentiels. Les COR représentent le rapport de la vitesse de la particule avant l'impact pariétal sur la vitesse de la particule après impact. Le COR est compris entre 0 et 1. Pour le code, si le COR est différent de 0, la particule va perdre une certaine quantité d'énergie cinétique déterminée par le COR et rebondira jusqu'à atteindre une vitesse négligeable.

Etant en milieu confiné, les impacts de particules avec les parois sont nombreux et cette valeur est très importante pour la bonne estimation de la vitesse des particules. La Figure 118 représente l'évolution de la vitesse des particules selon les COR Normaux et Tangentiels (COR\_N\_T).

COR\_0\_0 : toute particule impactant une paroi s'y dépose. Il est intéressant de remarquer que toutes les particules de diamètre supérieur à 60  $\mu\text{m}$  ont impacté les parois après 1 m de la génération.

COR\_1\_1 : c'est le cas idéal avec un contact élastique. Les courbes sont très peu dispersées et similaires à des courbes théoriques.

COR\_0,5\_1 : la composante normale de la vitesse est divisée par deux à chaque impact. Les résultats montrent peu d'effet du contact normal, les particules impactent avec une faible composante normale.

COR\_0,5\_1 : la composante tangentielle de la vitesse est divisée par deux à chaque impact. Les résultats indiquent un très fort effet de la composante tangentielle.

COR\_0,5\_0,5 : Les composantes tangentielles et normales de la vitesse sont divisées par deux à chaque impact. L'effet couplé semble être important.

Cette étude a montré l'importance des COR normaux et tangentiels. La valeur de 0,5 prise arbitrairement semble être une valeur cohérente mais étant donné l'influence importante de ce paramètre, sa bonne détermination semble essentielle pour une étude comparative entre les résultats issus de la simulation et des essais expérimentaux.

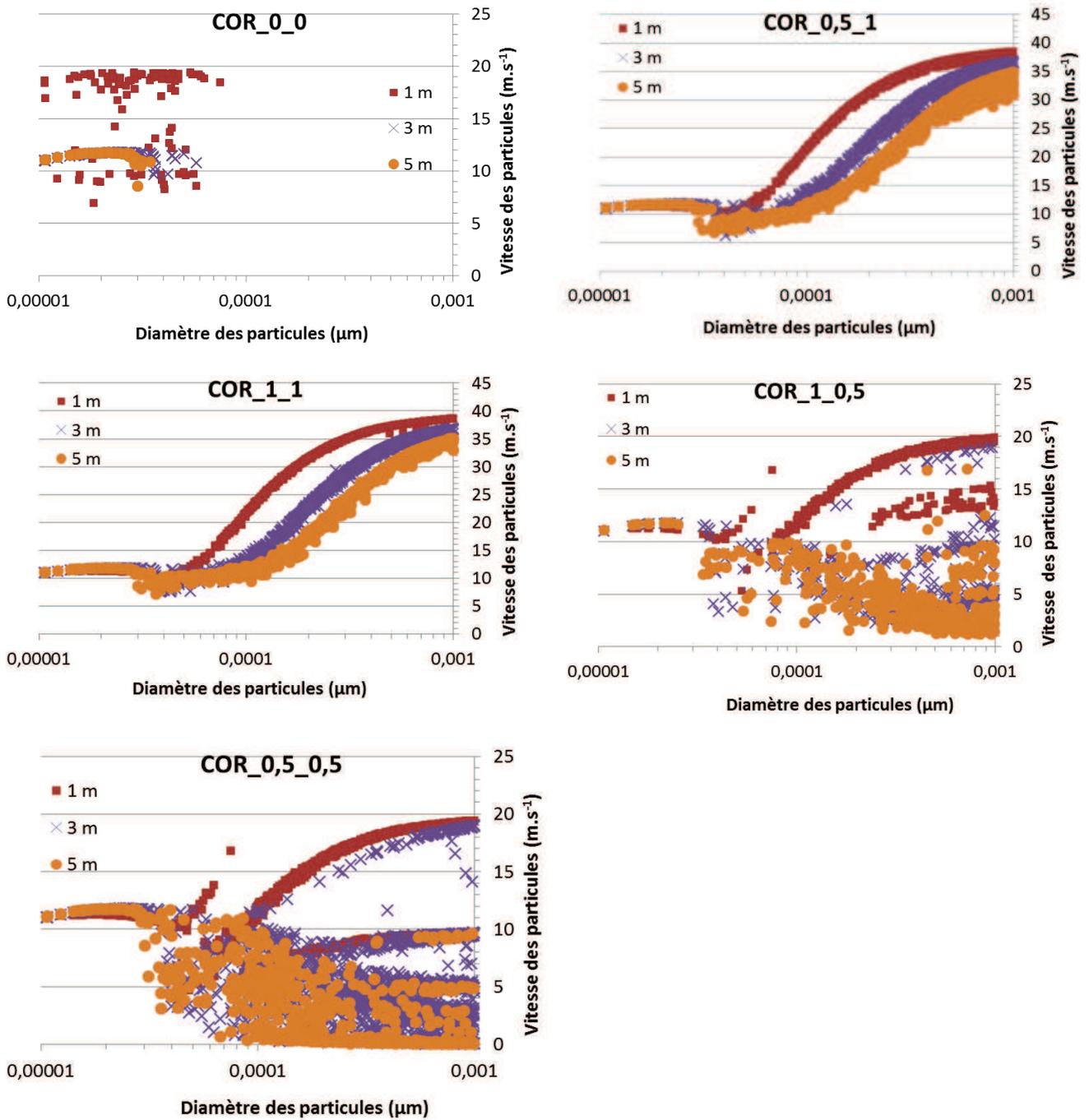


Figure 118 - Evolution de la vitesse des particules selon les coefficients de restitution Normaux et Tangentiels (COR<sub>N</sub>, COR<sub>T</sub>)

b. Veine de mesure

La veine de mesure a été recrée sur ANSYS CFX (Figure 119).

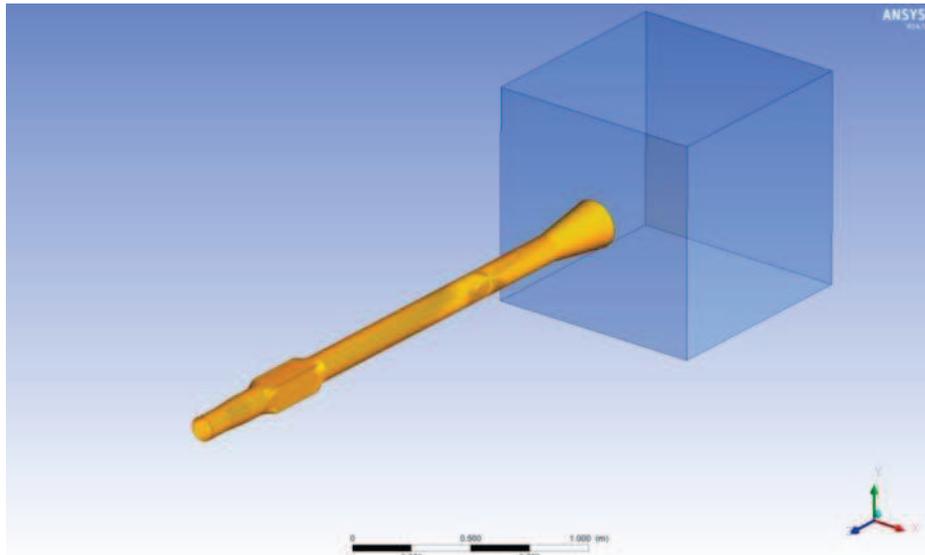


Figure 119 - Représentation de la géométrie avec la veine de mesure sur CFD

Les évolutions de température et de vitesse des particules à 3 m de la génération sont tracées sur la Figure 120. La présence de la veine de mesure influence peu la température des particules. La veine de mesure possède une section plus grande, ce qui diminue la vitesse du fluide en son sein. Les particules suivant les lignes de courant du fluide sont moins rapides, par contre pour les tailles supérieures, l'effet de la modification de la vitesse a peu d'influence.

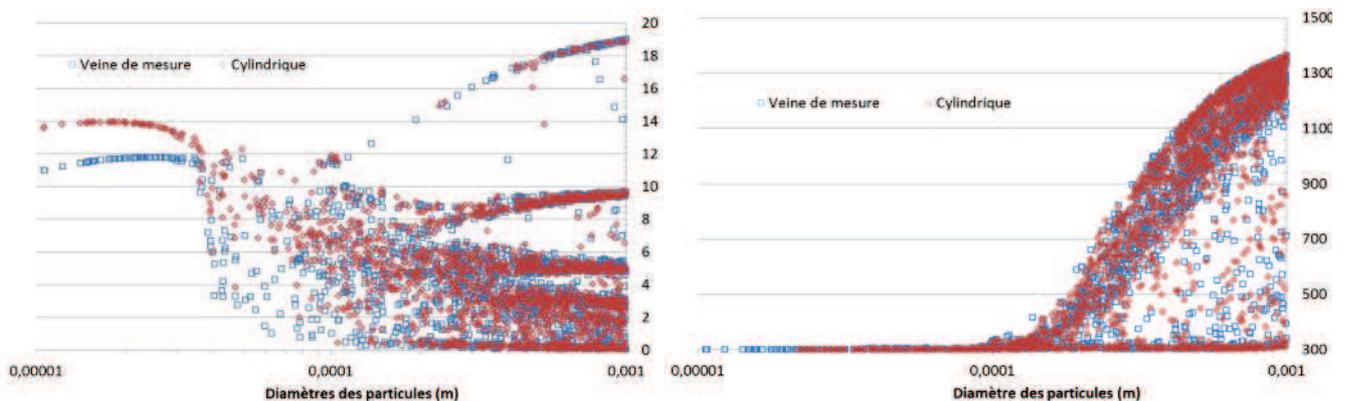


Figure 120 - Comparaison de la vitesse et de la température des particules en fonction de la présence de la veine de mesure

Pour simplifier la multiplicité des calculs, l'hypothèse est faite que la veine de mesure a une influence négligeable sur les particules qui possèdent un diamètre supérieur à 50  $\mu\text{m}$ .

### c. Angle de génération

La configuration la plus défavorable est prise avec l'axe du cône de la génération colinéaire à l'axe horizontal. Pour voir l'effet de l'axe du cône des simulations ont été comparés avec un angle de 25 degrés par rapport à l'axe horizontal. Les résultats sont présentés sur les Figure 121 et Figure 122.

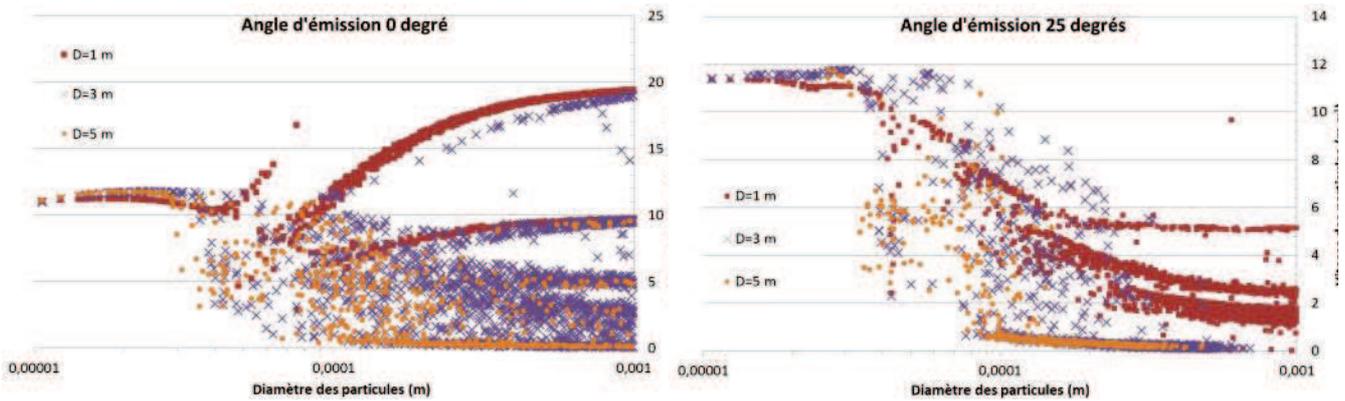


Figure 121 - Evolution de la vitesse des particules pour un angle d'émission de 0 et 25 degrés par rapport à l'axe horizontal

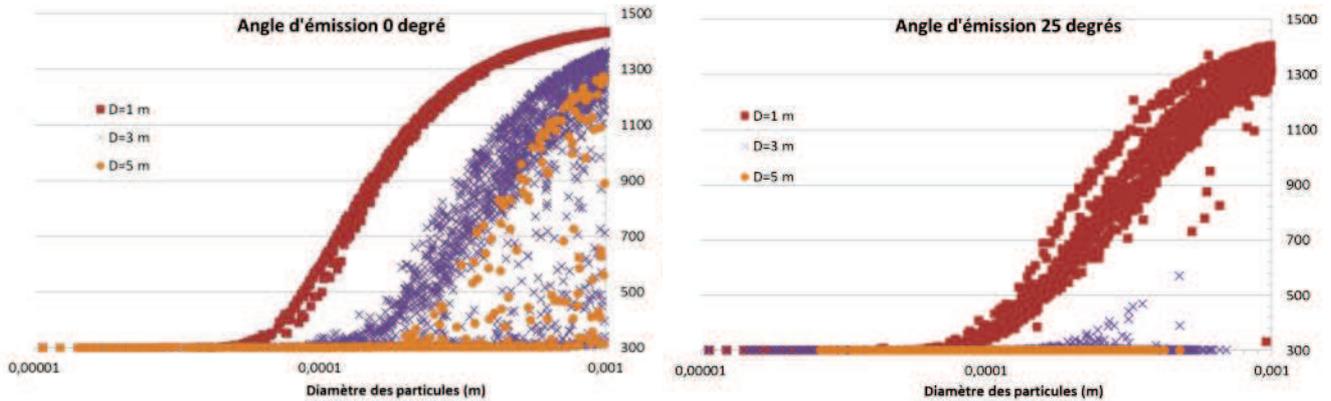


Figure 122 - Evolution de la température des particules pour un angle d'émission de 0 et 25 degrés par rapport à l'axe horizontal

Avec un angle de 25 degrés, les particules impactent très rapidement les parois et avec un COR de 0,5 perdent beaucoup d'énergie cinétique. En ce qui concerne les températures, elles sont peu modifiées à 1 m mais au-delà, le temps de transit est plus important ce qui mène à une baisse majeure de la température.

L'angle d'émission est une valeur importante puisqu'elle détermine les trajectoires des particules. Cela modifie le temps de transit de la particule mais également les probabilités d'impact avec les parois ce qui se traduit par l'intervention des COR (dont l'incertitude est importante).

Les valeurs obtenues avec un angle de 0 degré permettent bien de se placer dans le cas le plus défavorable.

## Annexe 4

### Simulations des dépôts de particule en gaine avec le logiciel SYLVIA

Le code SYLVIA (SYstème de Logiciels pour l'étude de la Ventilation de l'Incendie et de l'Aérocontamination) est un outil de simulation de l'IRSN permettant de calculer et prédire les conséquences d'un incendie dans une installation. La présence de modèles spécifiques de transport et de dépôt de particules en gaine permet d'estimer la fraction de particules déposées suivant différentes configurations.

Le montage aéraulique représenté sur SYLVIA (Figure 123) est constitué de nœuds, qui sont les intersections et de branches qui représentent les équipements de ventilation (ici des conduites).

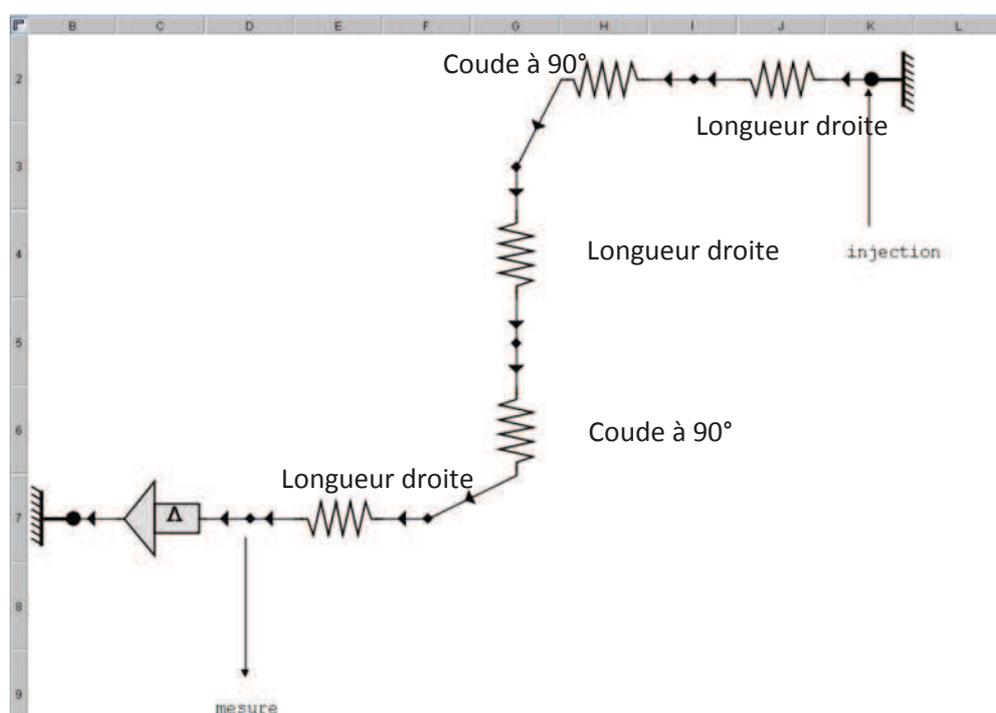


Figure 123 - Schéma du montage aéraulique sur le code SYLVIA

Le débit en gaine est fixé à  $450 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  avec des conduites circulaires de 0,125 m de diamètre. L'aérosol est injecté dans un nœud dénommé injection. La mesure de l'aérosol s'effectue dans le nœud dénommé mesure à la fin des conduits, en amont du ventilateur d'extraction. L'aérosol est injecté sans vitesse initiale et possède une distribution uniforme entre 1 et  $1000 \mu\text{m}$ . L'absence de vitesse initiale est problématique, l'inertie des particules étant très importante pour les particules dont le diamètre est supérieur à  $50 \mu\text{m}$ . Ces calculs sont tout de même cohérents pour les particules de  $10 \mu\text{m}$  dont l'inertie est négligeable.

Plusieurs cas ont été étudiés, différentes longueurs uniquement horizontales et un cas avec la présence de deux coudes à 90 degrés (cas de la Figure 123). Les résultats concernant l'évolution de la fraction massique déposée selon différentes configurations sont présentés sur la Figure 124.

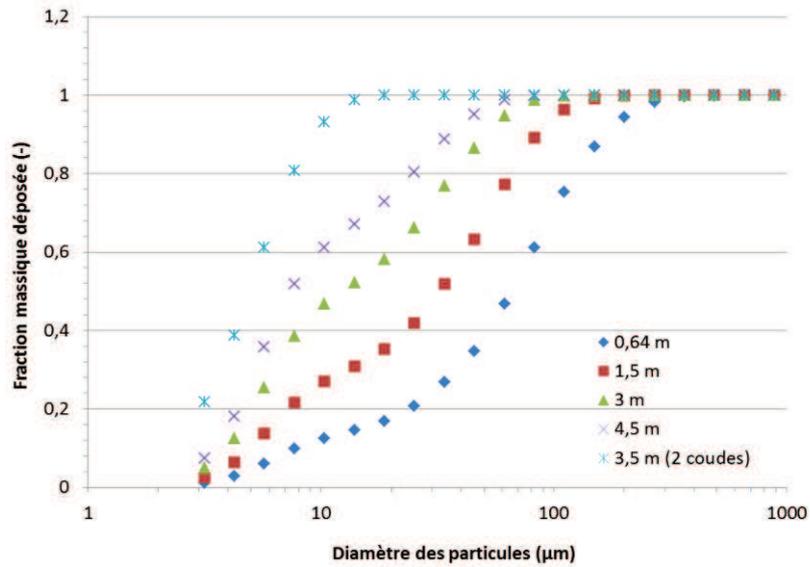


Figure 124 - Evolution de la fraction massique déposée simulée avec SYLVIA dans les conduits de ventilation en fonction de la configuration

Logiquement, les valeurs de dépôts sont bien supérieures à ce que l'on a observé expérimentalement ce qui met en avant l'importance de la vitesse initiale des particules.

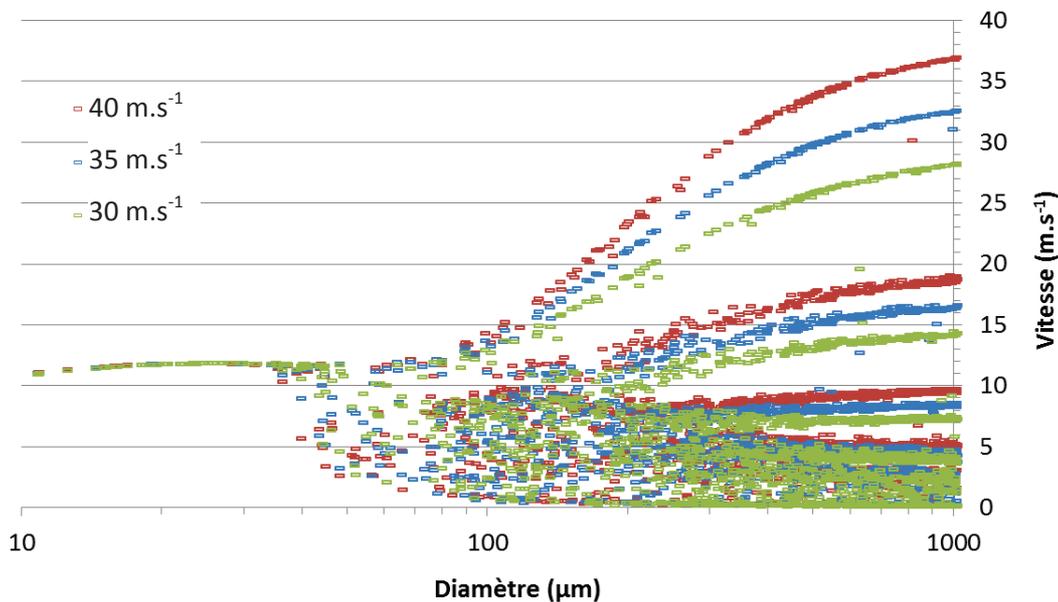
## Annexe 5

### Simulations CFD de l'influence de la vitesse initiale d'émission et de la vitesse débitante sur les caractéristiques des particules

#### a) Influence de la vitesse initiale

La vitesse initiale des particules est fixée à  $40 \text{ m.s}^{-1}$  ce qui correspond à 70 % de la vitesse périphérique maximale d'un disque neuf. Lorsque le disque s'use, la vitesse périphérique maximale diminue et potentiellement la vitesse d'émission des particules.

La Figure 125 présente l'évolution de la vitesse des particules dans le conduit de ventilation en fonction de leur vitesse initiale d'éjection.



**Figure 125 - Effet de la vitesse initiale d'éjection sur la vitesse des particules dans le conduit de ventilation à une distance de 3 m de la source pour les différentes classes de taille**

Logiquement, l'augmentation de la vitesse initiale des particules n'a pas d'influence sur la vitesse des particules qui ont une faible inertie. A une distance de 3 m, l'effet de cette augmentation commence à être significatif pour les particules de tailles supérieures à  $200 \mu\text{m}$ .

L'influence de la vitesse des particules sur leur température en air libre en l'absence d'oxydation a été vue au paragraphe 1.2.2. Les simulations CFD réalisées s'effectuent dans une conduite cylindrique. L'évolution de la température des particules selon différentes vitesses initiales est présentée sur la Figure 126.

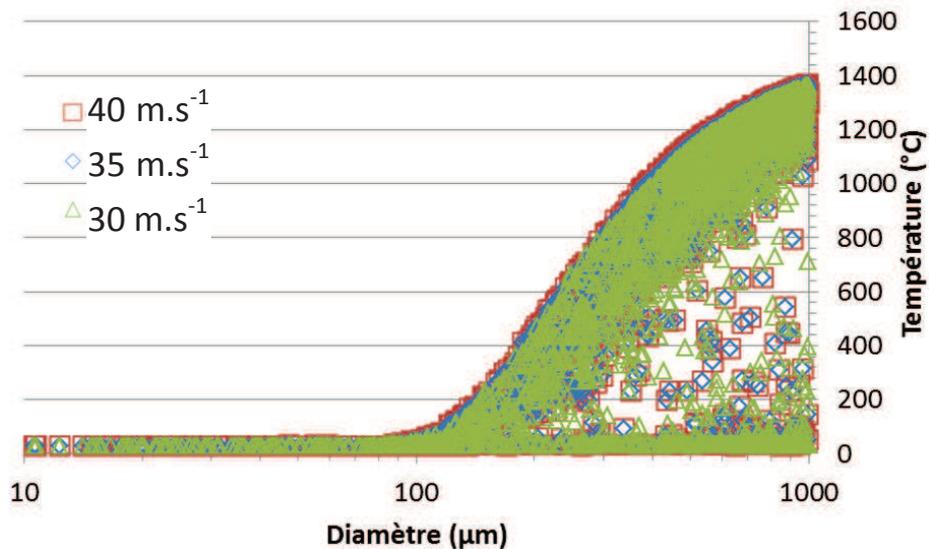


Figure 126 - Influence de la vitesse initiale d'émission sur la répartition en température des particules à 3 m de l'émission

La baisse de la vitesse initiale d'éjection entraîne une légère baisse de la température, pour une classe de diamètre à une distance donnée qui peut être considérée négligeable. C'est-à-dire que la baisse du coefficient d'échange de chaleur par convection est compensée par l'augmentation du temps de transit de la particule.

b) Influence du débit d'extraction

Le débit nominal de filtration est de  $450 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ . La Figure 127 montre l'évolution de la vitesse des particules pour une modification du débit de ventilation.

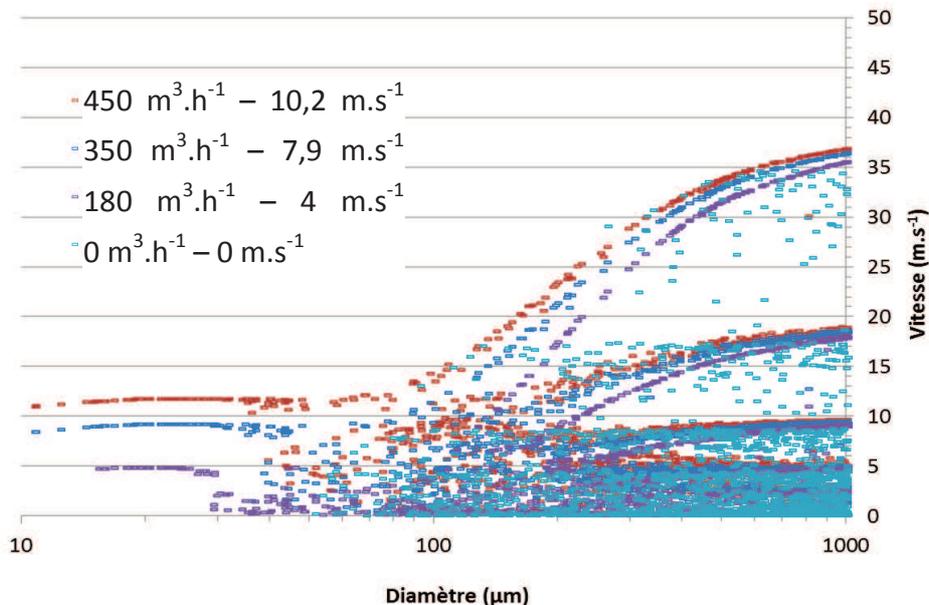


Figure 127 - Effets de la vitesse débitante dans le conduit sur la répartition de la vitesse des particules en fonction de leurs diamètres à 3 m de l'émission

A la distance de 3 m, les particules de tailles inférieures à  $30 \mu\text{m}$  semblent toujours portées par le fluide en accord avec leur vitesse à l'équilibre avec la vitesse moyenne débitante dans le conduit. En l'absence de

ventilation, seule l'inertie des particules liée à leur masse et à leur vitesse initiale est à considérer. Ainsi, à une distance de 3 m, la taille minimale de particule présente dans le conduit se situe autour de 50  $\mu\text{m}$ , ce qui est en accord avec les résultats attendus (cf. paragraphe 2.1.3).

Les simulations CFD réalisées en modifiant le débit sont présentées sur la Figure 128 et en l'absence de débit sur la Figure 129.

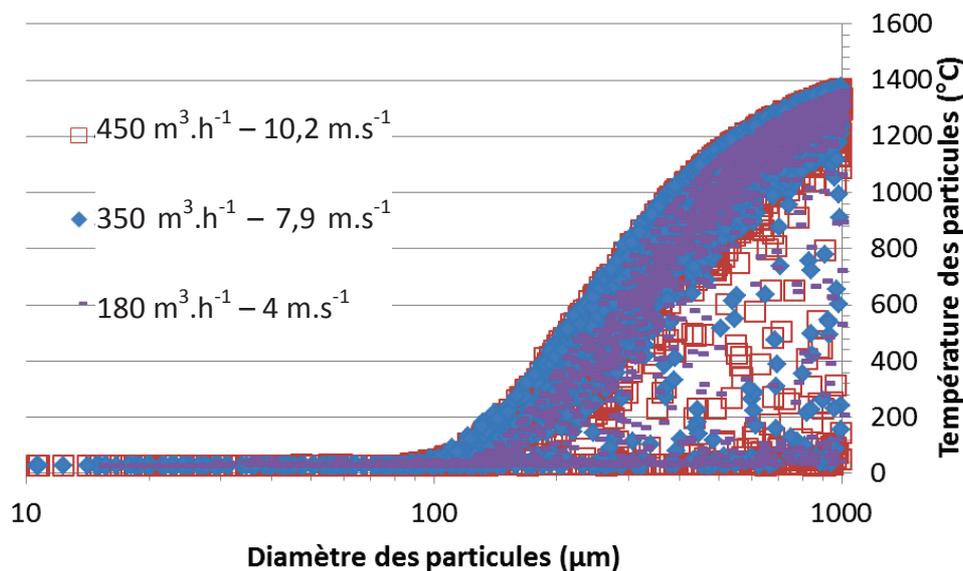


Figure 128 - Evolution de la température des particules pour différents débits d'extraction à 3 m de l'émission

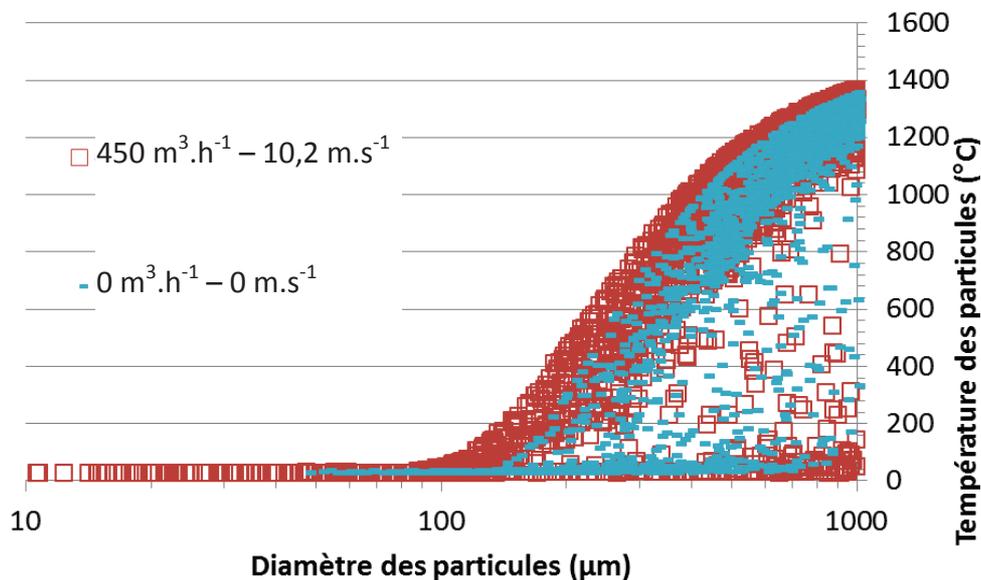


Figure 129 - Influence de la température avec et sans débit d'extraction à 3 m de l'émission

La température des particules baisse avec la diminution du débit d'extraction. Les différences sont faibles lorsque le débit passe de 450 à 350  $\text{m}^3.\text{h}^{-1}$  mais devient significatif pour un débit de 180  $\text{m}^3.\text{h}^{-1}$ .

En l'absence de ventilation, l'effet est plus important pour les particules inférieures à 300  $\mu\text{m}$ . Sans aspiration, le temps de transit des particules à faible inertie est plus important, ce qui laisse plus de temps aux particules pour revenir en équilibre avec le fluide.

## Annexe 6

### Répartition spatiale des particules

Un filtre plan carré de 40 cm de côté placé à 46 cm de la disquuse en air libre a été découpé en zones de tailles plus petites accessibles pour le microscope Morphologi (Figure 130). Les zones de découpe ayant des surfaces variables, le nombre de particules a alors été adimensionné par sa surface (en mm<sup>2</sup>). A cette distance, le centre de la gerbe d'étincelles est très concentré et la mesure n'est pas fiable. La gerbe d'étincelles n'est pas positionnée exactement au centre du filtre plan, ce qui montre une légère dissymétrie entre les côtés droit et gauche mais la forme des distributions est identique. Les résultats indiquent que les zones au-dessus de la gerbe sont moins concentrées en particules.

Tous les prélèvements ont des allures similaires ce qui permet de considérer la répartition spatiale homogène.

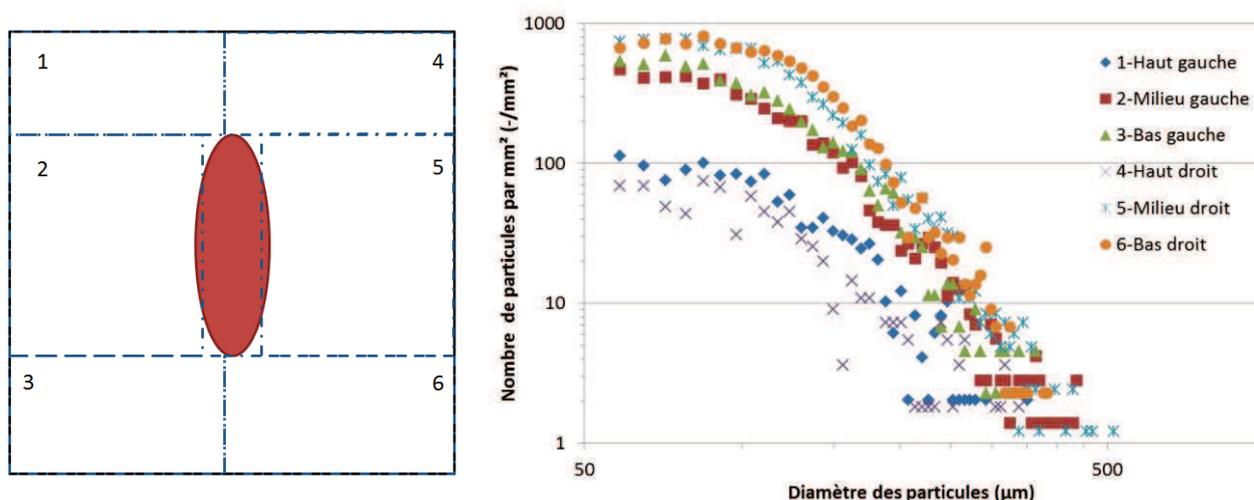
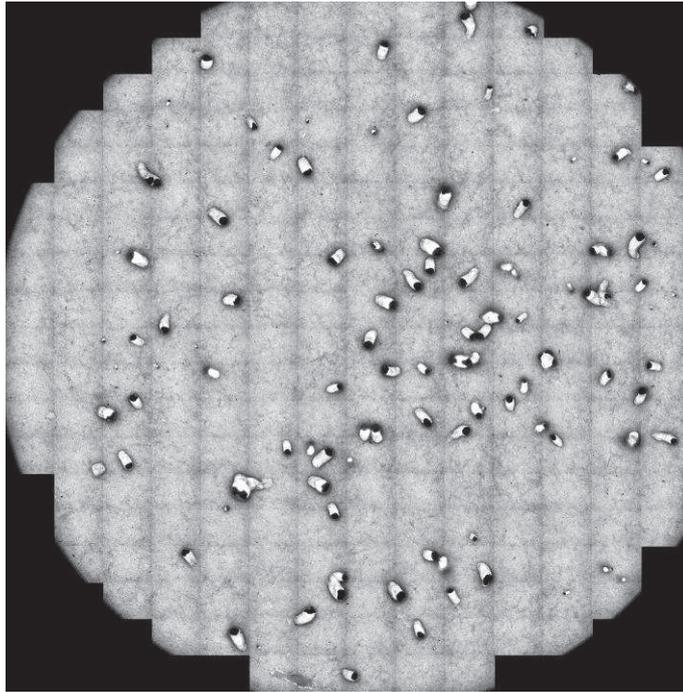


Figure 130 - Découpage et répartition spatiale de la granulométrie d'un filtre plan placé à 46 cm mesurée par le microscope Morphologi

## Annexe 7

### Analyse des filtres utilisés pour la distribution granulométrique

Les images des filtres de prélèvements utilisés pour les mesures granulométriques ont été utilisées, grâce à un programme écrit sur le logiciel Matlab, afin d'avoir une information sur l'angle d'impact et le rapport entre la taille d'une particule et sa traînée dans le médium. Un exemple de visualisation du médium plan de prélèvement à 178 cm de la génération réalisé à l'aide du Morphologi est présenté sur la Figure 131.

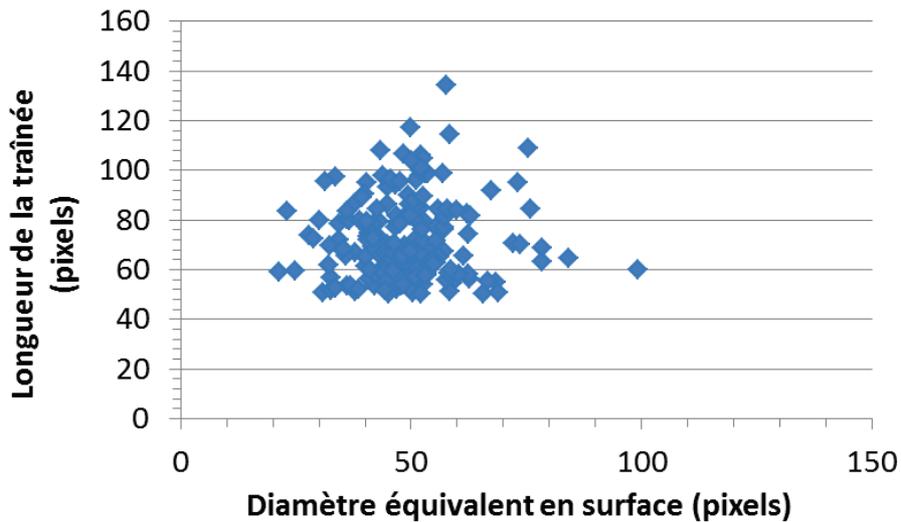


**Figure 131 - Visualisation au microscope optique Morphologi d'un filtre de prélèvement à 178 cm de l'émission**

Des visualisations de médium par un éclairage vertical ascendant à l'aide du Morphologi ont été effectuées. Lorsque la particule impacte et pénètre dans le médium, elle réduit localement l'épaisseur du médium. La traînée apparaît alors plus lumineuse que le reste du filtre sur les images. La surface équivalente de la particule est mesurée ainsi que la longueur des traînées dans un plan horizontal.

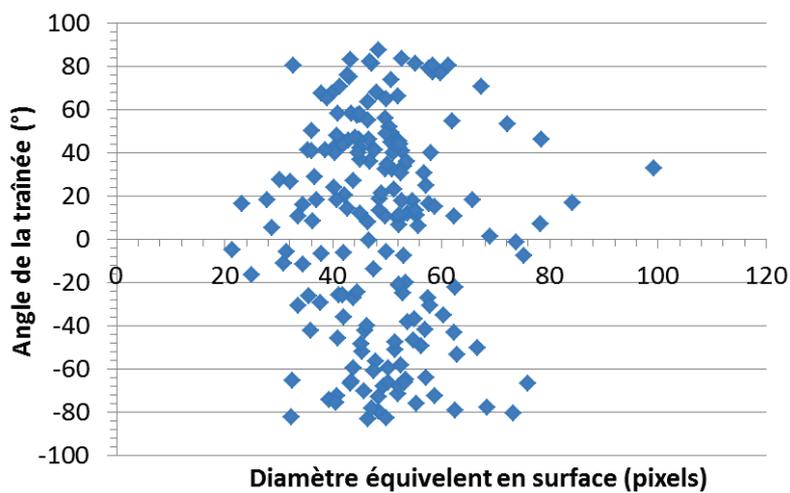
Il est mis en évidence que les particules lamellaires n'apparaissent pas sur le médium de prélèvement à cette distance. De même, peu de particules apparaissent déposer à la surface du médium, les particules présentes sont celles qui ont dégradé le médium.

Les images réalisées sur des filtres plans de prélèvement à 363 cm ont pu être traitées car la faible concentration de particules permet de limiter les rejets de traitement dus aux chevauchements des traînées. Les résultats sont présentés sur la Figure 132. La distribution observée n'est pas très large tandis que les longueurs des traînées, pour un même diamètre, peuvent varier du simple au double.



**Figure 132 - Rapport de la surface des particules avec la longueur de leurs traînées à 363 cm de l'émission**

Sur ces mêmes images, nous avons également déterminé l'angle de la traînée par rapport au plan du filtre (Figure 133).



**Figure 133 - Rapport du diamètre des particules avec l'angle de leurs traînées dans le filtre à 363 cm de la génération**

Pour un même diamètre équivalent en surface, l'angle des traînées balaye toutes les valeurs comprises entre -90 et +90 degrés. Cela peut s'expliquer par deux phénomènes complémentaires. Tout d'abord, la gerbe est émise sous forme d'un cône dans un conduit confiné. Les prélèvements sont effectués à 363 cm de la génération, ce qui laisse un grand nombre de trajectoires de particules possibles avant l'impact sur le filtre. Ensuite, les particules atteignent le filtre et pénètrent en son sein grâce à leurs températures. Le filtre est très hétérogène et la résistance locale du médium va conditionner la direction de pénétration de la particule.

Ces analyses ont permis de mettre en évidence que la longueur des traînées et l'angle de pénétration dans le médium ne dépendent pas uniquement de la taille des particules. Leurs vitesses d'impact, température et l'hétérogénéité du médium sont des paramètres clés.

## Annexe 8

### Résultats expérimentaux concernant l'évolution de la vitesse des particules incandescentes en fonction du débit d'extraction

Les mesures de vitesses des particules incandescentes à l'aide de la caméra rapide ont été menées pour différents débits d'extraction à différentes distances. L'écoulement est de nature turbulente pour tous les débits d'extraction réalisés. Les Figure 134 et Figure 135 montrent la distribution en nombre moyen par découpe de la vitesse des particules incandescentes respectivement à 90 et 238 cm de la génération.

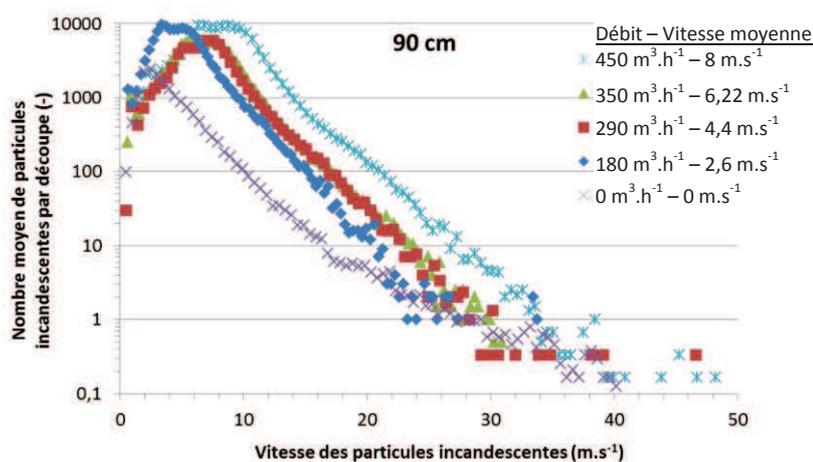


Figure 134 - Distribution en nombre moyen par découpe de la vitesse des particules incandescentes pour différents débits à 90 cm de la génération

Logiquement, plus le débit est élevé, plus la vitesse des particules est importante. Cependant, il est intéressant de remarquer que les particules avec une vitesse supérieure à 30 m.s<sup>-1</sup> sont nombreuses en l'absence d'aspiration. Ces particules représentent les particules à forte inertie qui sont peu impactées par le débit d'extraction. Les conclusions faites à 90 cm sont similaires à celles de 238 cm avec une baisse de la vitesse liée à la chute du débit d'extraction. Cependant, aucune particule incandescente n'est observée en l'absence de ventilation.

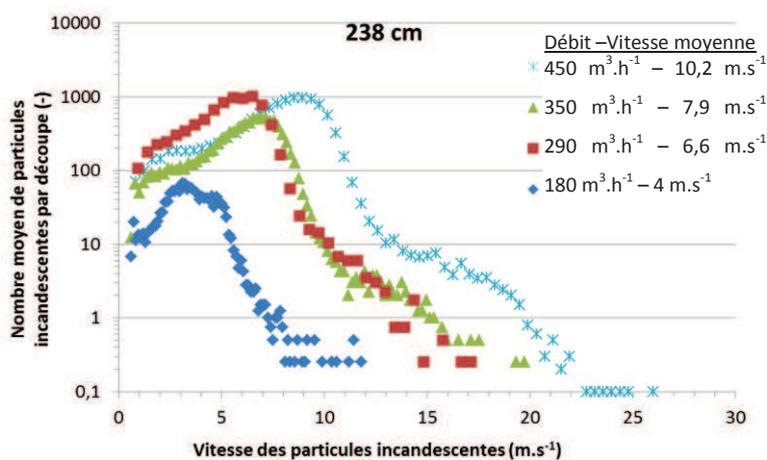


Figure 135 - Evolution de la répartition en vitesse des particules incandescentes pour différents débits à 238 cm de la génération

## Annexe 9

### Visualisations au MEB de médias dégradés

Une grande quantité d'analyse MEB sur des médias impactés ont été menés à différentes distances de la génération. Les dégradations les plus importantes ont été observées à 30 cm de la génération.

La Figure 136 donne un aspect d'un filtre plan soumis à l'impact des particules pendant une découpe.

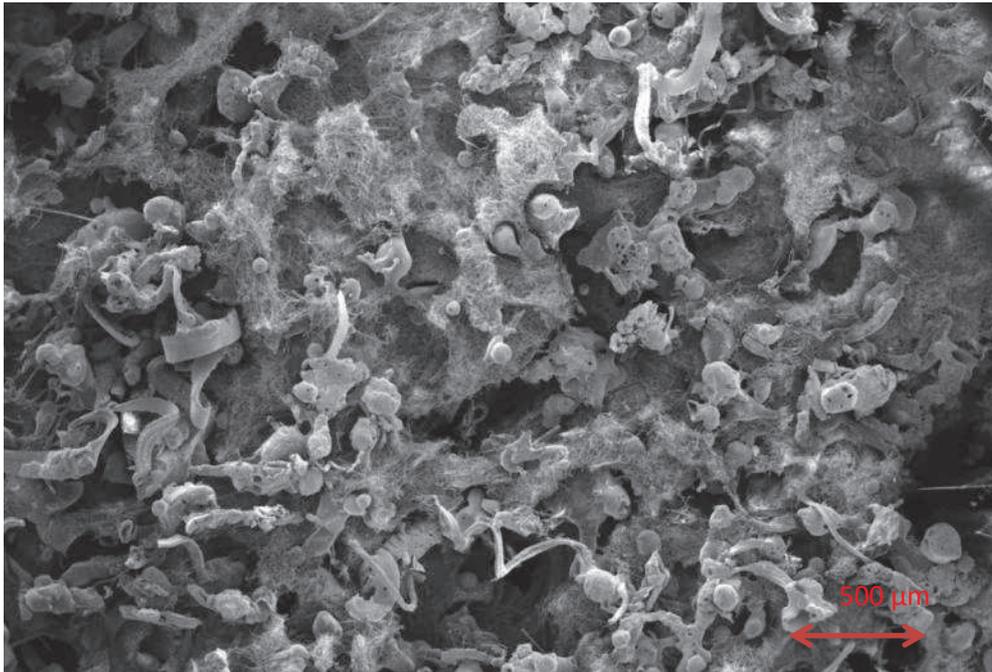


Figure 136 - Visualisation 1 au MEB d'un médium plan impacté par des particules à 30 cm de l'émission

Il y a une très forte concentration de particules qui creuse le médium filtrant. Il est ainsi difficile de distinguer la surface initiale du filtre. Il apparaît des particules sphériques, de grands copeaux de particules et des amas, regroupement de particules liquides qui se sont agglomérés. Ces amas peuvent ainsi dégrader totalement le médium et le perforer comme le montre la Figure 137.



Figure 137 - Visualisation 1 au MEB d'un filtre plan impacté par des particules à 30 cm de l'émission

Sur cette figure, les éléments avec la masse atomique la plus élevée apparaissent en clair, ce qui indique les particules métalliques. Le liquide grisâtre recouvrant les particules est de la silice fondue au contact des particules qui s'est solidifiée. L'impact des particules et la fonte des fibres font perdre toute résistance mécanique du médium qui devient très difficilement manipulable. Les visualisations de la dégradation du filtre à des distances plus éloignées permettent de distinguer plus aisément la part de dégradation de chaque particule comme le montre la Figure 138.



Figure 138 - Visualisation au MEB d'un filtre impacté par des particules à 60 cm de l'émission

## Annexe 10

### Etalonnage du dispositif de dégradation à effets mécanique et thermique

Ce dispositif permet de dégrader un médium filtrant tout en maîtrisant la connaissance de l'énergie cinétique et thermique apporté au filtre.

#### a) Energie thermique

L'énergie thermique est apportée par un thermocouple de type K de 1 mm de diamètre chauffé avec un laser continu argon. La surface en contact est égale à la surface du thermocouple de 1 mm de diamètre. La masse d'énergie transférée est comprise dans l'embout du thermocouple assimilable à un cylindre d'acier inoxydable de 0,5 ou 1 mm de longueur, ce qui donne une fourchette d'estimation de l'énergie transférée.

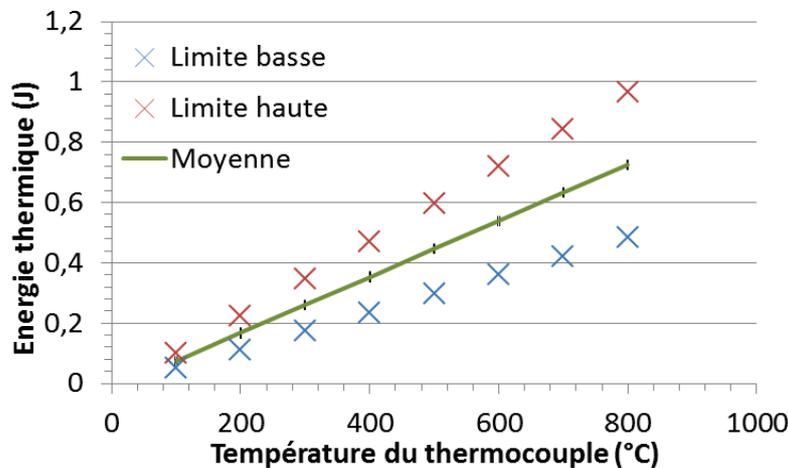


Figure 139 - Energie thermique apportée au filtre par l'intermédiaire du thermocouple en fonction de sa température

#### b) Energie cinétique

Afin de déterminer précisément l'énergie cinétique d'impact du thermocouple sur le filtre, le dispositif est équipé d'un capteur piézo-électrique. Le piézo-électrique retenu est composé de Titane de Zirconate de Plomb (PZT) qui possède une grande sensibilité et une très bonne tenue mécanique. Une membrane protège la cellule piézo-électrique et sert d'amplificateur. Une étape d'étalonnage a été réalisée afin de déterminer la corrélation entre l'énergie d'impact et le signal délivré. Pour cela, des billes de différents diamètres et matériaux chutent de différentes hauteurs. Le capteur étant très sensible, le bruit de fond peut être important. Ainsi, une légère modification de la zone d'impact modifie considérablement le signal. Afin de limiter l'erreur due à la position de chute de la bille, le montage présenté sur la Figure 140 a été réalisé. Le contact est maintenu centré et ponctuel par le montage réalisée en bleu sur la Figure 140. L'incertitude de la mesure sur ce dispositif est ainsi de 5 %.

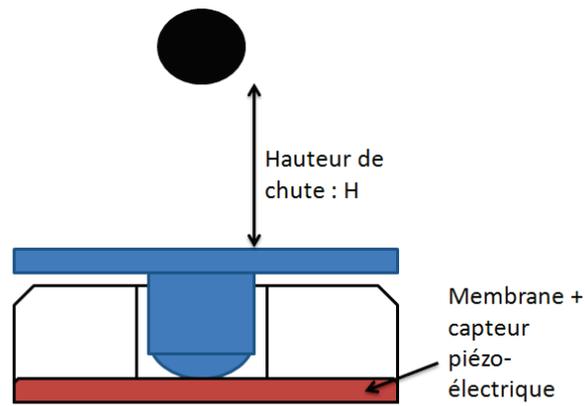


Figure 140 - Schéma du dispositif d'étalonnage du capteur piézo-électrique

Les résultats de l'étalonnage sont présentés sur la Figure 141. La relation entre l'énergie et la tension du capteur est sous forme puissance.

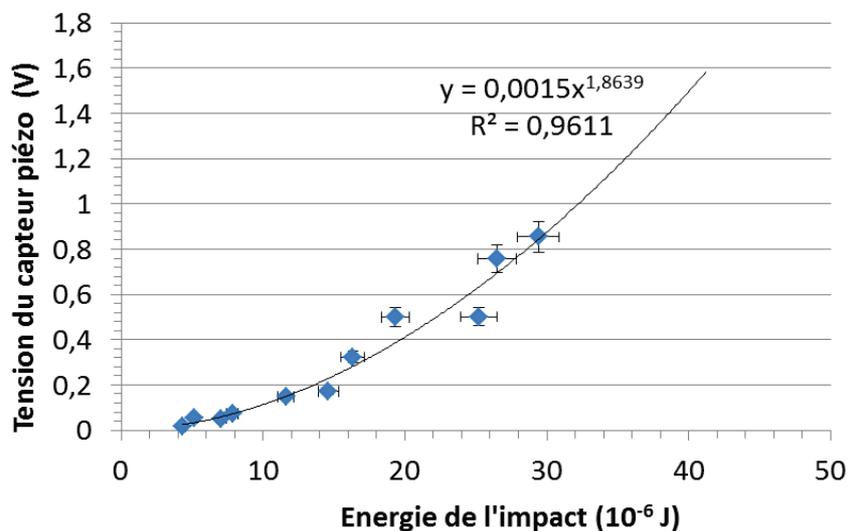


Figure 141 - Etalonnage du capteur piézo-électrique

Une fois le capteur étalonné, il est utilisé pour étalonner le ressort. Trois positions ont été définies correspondant aux énergies cinétiques déterminées dans le Tableau 35. L'énergie cinétique des particules est très faible, ce qui est difficile à reproduire. L'énergie minimale obtenue par l'emploi d'un ressort permet tout de même de déterminer une tendance ou une importance relative de l'énergie cinétique.

Tableau 35 - Energie cinétique pouvant être simulé à l'aide du ressort

Positions	Energie cinétique (J)	Incertitude (J)
P1	0,004	0,0004
P2	0,010	0,0008
P3	0,022	0,0007



## Résumé

En réponse à des incidents de départ de feu dans des installations nucléaires de base suite à des découpes de métal à chaud lors d'opérations de démantèlement, l'IRSN s'intéresse aux particules émises par les procédés de découpe et leurs effets potentiels de dégradation des barrières de confinement. Si le comportement des particules fines ( $< 10 \mu\text{m}$ ) produites lors d'opérations de découpe de métaux a été investigué en raison du risque sanitaire vis-à-vis des opérateurs, peu d'études concernent la caractérisation et le devenir des particules incandescentes. Ces particules sont majoritairement composées de fer, provenant du métal de découpe, siège d'une réaction exothermique d'oxydation à haute température qui contribue à liquéfier les particules métalliques. L'installation CAPIMIF a été développée pour reproduire des opérations de découpe de métaux représentatives de chantiers de démantèlement. Afin de lui conférer un caractère semi analytique, cette installation a été automatisée et instrumentée avec des moyens de diagnostics permettant de caractériser en vol les particules, en termes de taille, de vitesse et de température. Une approche couplant des essais locaux et globaux montre que les particules dont la température est supérieure à  $430 \text{ }^\circ\text{C}$ , dégradent le médium filtrant, pouvant ainsi le perforer ou diminuer localement son épaisseur, ce qui conduit à une baisse de son efficacité de filtration définie selon la norme française. La comparaison des caractéristiques des particules et de l'efficacité de filtration des filtres impactés a permis d'établir des corrélations empiriques permettant de prévoir la perte d'efficacité de filtration en fonction des conditions de coupe et de proposer des bonnes pratiques visant à protéger les systèmes de filtration vis-à-vis des particules incandescentes.

## Abstract

Fire hazards while metal cutting on dismantling operations led IRSN to focus a study on incandescent particles emitted by these cutting tools and their impact on air filter. If microniques particles ( $< 10 \mu\text{m}$ ) have been studied for their negative impact on human health, few studies are dealing with incandescent particles, despite their strong thermal energy. These particles are mainly made of iron, coming from the metal cutting, and the exothermic oxidation reaction coupled to a high temperature emission causes them to melt. An experimental system was designed, representative of dismantling operations with instrumentations adapted for in-flight particles measurement, such as size, velocity and temperature. The particles are characterized from the emission source (automated cut-off grinder) and all along their path into the ventilation duct to their impact on a filter. An analytical approach of the impact of these particles on the filter shows that the temperature of the particles, greater than  $430 \text{ }^\circ\text{C}$  damages the filter medium, and may reduce the filter thickness or perforate it, which leads to a decrease of its filtration efficiency determined according to the French standard. Comparison between the characteristics of the particles and the filtration efficiency has permitted to establish empirical correlations in order to predict the loss of filtration efficiency versus the cutting parameters and some good practices have been proposed to protect the filter.