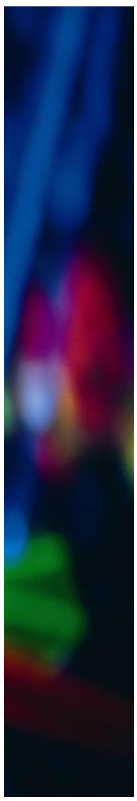
ParisTech
INSTITUT DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES
PARIS INSTITUTE OF TECHNOLOGY

ARTS ET MÉTIERS ParisTech



2018-ENAM-00642

École doctorale n° 432 : Sciences des Métiers de l'ingénieur

# Doctorat ParisTech

# T H È S E

**Pour obtenir le grade de docteur délivré par**

## L'École Nationale Supérieure des Arts et Métiers

### Spécialité "Génie Mécanique & Matériaux"

*Présentée et soutenue publiquement par*

**Abbas HAMIE**

Le 19/12/2018

# Étude des régimes thermo-hydrodynamiques du procédé d'oxycoupage assisté par laser

Directeur de thèse : **RANC Nicolas**
Encadrement de la thèse : **SCHNEIDER Matthieu**

**Jury**

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| **M. P. Salamand** | Professeur | Lab. ICB | UBFC Le Creusot | Examinateur |
| **M. B. Courant** | MDC et HDR | Lab. GeM | Université de Nantes | Rapporteur |
| **M. C. Bordreuil** | Professeur | Lab. LMGC | Université Montpellier | Rapporteur |
| **M. P. Aubry** | Professeur | CdM | DEN, CEA | Examinateur |
| **M. N. Ranc** | Professeur | Lab. PIMM | Arts et Métiers Paristech | Examinateur |
| **M. M. Schneider** | MDC | Lab. PIMM | Arts et Métiers Paristech | Examinateur |
| **M. P. Frye** | Responsable technique | CARDEM | Strasbourg | Invité |
| **M. N. Masson** | Président | CARDEM | Lyon | Invité |

**Arts et Métiers ParisTech – Campus de Paris**
**Laboratoire PIMM – Procédés et Ingénierie en Mécanique et Matériaux**

T H È S E

# A. Remerciements

**Ali, je dédie mon travail à ton âme qui maintenant repose en paix, et j'espère qu'où que tu sois cet hommage te remplit de bonheur. Le 01/11/2018 à 9h20, tu m'as quitté, toi mon frère, ma moitié. Ton souvenir est plus vif que jamais, et comme le dit Victor HUGO : « Tu n'es plus là où tu étais, mais tu es partout là où je suis. ». Merci infiniment pour tout ce que tu m'as appris, je t'envoie tout mon amour, et j'espère qu'un jour, dans un prochain monde, on pourra reprendre notre histoire là où on l'a laissé avec toutes les personnes qu'on a aimées.**

Je remercie le professeur Pierre SALAMAND du laboratoire ICB le Creusot, président du jury et également Pascal AUBRY du CEA Saclay, Cyril BORDEUIL du laboratoire LMGC Montpellier et Bruno COURANT du laboratoire GeM de l'université de Nantes en tant que membres du jury. Je tiens à remercier l'équipe encadrante constituée du Nicolas RANC, Matthieu SCHNEIDER et Frédéric COSTE du laboratoire PIMM pour leurs grandes qualités humaines, leurs soutiens scientifiques, leurs conseils et de leurs réflexions qui m'ont beaucoup apporté durant cette thèse. Je remercie également l'entreprise CARDEM représentée par Nicolas MASSON, Patrick FRYE et Nordahl GRENIER qui ont apporté toute leur confiance et leurs soutiens pour la réalisation des travaux de recherche tout en ayant un esprit de bienveillance sur le bon déroulement du projet. Tous mes remerciements aux membres du laboratoire PIMM et plus spécialement aux permanents de l'équipe Laser, les professeurs Patrice PEYRE, Rémy FABBRO, et Morgan DAL, les ingénieurs de recherche Cyril GORNY et Thierry MALOT pour les discussions scientifiques enrichissantes et leurs conseils. Merci à tous mes collègues du PIMM, mes voisins de bureaux et tous les membres de la plateforme laser qui ont rendu l'ambiance du travail très agréable en étant toujours sourient et serviable. Je remercie enfin ma famille pour qui m'ont orienté depuis mon enfance qui m'ont beaucoup appris et qui m'apprendront toujours

# B. Table des matières

**A. REMERCIEMENTS..... 3**

**B. TABLE DES MATIERES..... 4**

**C. TABLE DES FIGURES ..... 10**

**CONTEXTE DE L'ETUDE.....15**

**OBJECTIFS DE L'ETUDE..... 19**

**CHAPITRE I ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE..... 23**

**1 Interaction laser-matière et chauffage du milieu..... 23**

1.1 Modèle de Drude ..... 23

1.2 Détermination de l'absorptivité en incidence nulle ..... 26

1.3 Profondeur d'absorption du rayonnement..... 26

1.4 Élévation de la température d'un milieu soumis à un rayonnement laser 27

**2 Les différents phénomènes au cours du chauffage : oxydation, allumage et combustion ..... 29**

2.1 Différenciation des notions : oxydation et combustion ..... 29

2.2 La notion d'allumage ..... 30

**3 L'oxydation et la combustion des métaux ..... 32**

3.1 Processus d'oxydation ..... 33

- Adsorption physique ..... 34
- Adsorption chimique ..... 34

3.2 Oxydation en phase solide ..... 35

3.2.1 Oxydation du fer ..... 35

3.2.2 Oxydation de l'acier ..... 36

3.3 Oxydation de l'acier en phase solide jusqu'à la liquéfaction (condition « Lasox ») 37

**4 Mécanisme de l'oxycoupage ..... 39**

4.1 Oxydation de l'acier en phase liquide ..... 40

**5 Température en oxycoupage ..... 43**

5.1 Température à éviter en oxycoupage ..... 43

**6 Découpe laser assistée par oxygène ..... 44**

6.1 Intérêt de l'oxygène dans la découpe laser ..... 45

**7 Classification des paramètres influents sur la découpe ..... 47**

7.1 Paramètres du laser ..... 48

7.1.1 La puissance maximale ..... 49

7.2 Caractéristique de la pièce à découper ..... 49

7.2.1 Nature des matériaux et propriétés optiques ..... 50

7.2.2 Épaisseur de la pièce à découper ..... 51

7.3 Paramètres du procédé ..... 51

7.3.1 Diamètre de la tache focale ..... 51

7.3.2 Distance focale et profondeur de champ ..... 52

7.3.3 Position du point focal ..... 52

7.3.4 Vitesse (maximale) de découpe ..... 53

7.3.5 Inclinaison du faisceau ou de la pièce (angle d'incidence) ..... 54

7.3.6 Type de buse ..... 55

7.3.7 Distance buse-pièce (distance de travail) ..... 56

7.3.8 Alignement de la buse ..... 57

7.3.9 Gaz d'assistance (Nature, Vitesse et pression) ..... 58

**8 Conclusion ..... 59**

**CHAPITRE II ESSAIS ET RESULTATS ..... 61**

**1 Montage expérimental ..... 61**

1.1 Caractérisation de la distribution spatiale du faisceau laser ..... 62

**2 Plan d'expérience ..... 63**

2.1 Quantification des paramètres utilisés ..... 64

2.2 Domaine de fonctionnement : variation de la puissance, du rapport cyclique et de la durée d'impulsion ..... 65

2.3 Taux de recouvrement des impulsions en fonction de l'énergie nécessaire pour l'initiation ..... 67

2.4 Nombre d'impulsions et durée maximale entre deux impulsions successives 69

2.5 Epaisseur de découpe en fonction de la vitesse et la pression d'oxygène 70

**3 Observations et interprétations ..... 72**

3.1 Variation du rapport cyclique et résultats de découpe ..... 72

3.1.1 Caractéristiques du régime 1 ..... 73

3.1.2 Caractéristiques du régime 2 ..... 76

3.1.3 Caractéristiques du régime 1+2 ..... 78

3.1.4 Niveau d'apparition des différents régimes ..... 78

3.2 Influence du jet d'oxygène sur la largeur de la saignée en régime 2 . 81

3.3 Théorie et simulation du jet (ANSYS Workbench 14.5) ..... 82

3.3.1 Théorie sur l'écoulement à travers une buse convergente ..... 82

3.3.2 Buse convergent-divergent (buse de Laval) ..... 84

3.3.3 Ondes de choc dans une buse convergente ..... 85

3.3.4 Ondes de choc dans une buse convergente-divergente ..... 87

3.3.5 Simulation du jet à travers une buse convergente ..... 88

**4 Conclusion ..... 92**

**CHAPITRE III PYROMETRIE UV ET IR, MESURE DE LA TEMPERATURE ET DETERMINATION DE L'EMISSIVITE ..... 94**

**1 Introduction ..... 94**

**2 Aspects théoriques sur le rayonnement des matériaux à l'état solide et liquide ..... 96**

2.1 Puissance rayonnée par une surface corps noir ..... 96

2.2 Puissance rayonnée par une surface réelle ..... 98

2.2.1 Notion de facteur d'émission ..... 98

2.2.2 Effet du facteur d'émission en pyrométrie ..... 99

2.2.3 Effet du facteur d'émission sur la mesure de la température par pyrométrie 100

2.3 Conclusion ..... 102

**3 Montage expérimental ..... 102**

3.1 Pyromètre UV ..... 103

3.2 Pyromètre IR ..... 103

**4 Dimensionnement et optimisation du pyromètre UV ..... 104**

4.1 Limite de détection et de saturation du photomultiplicateur (courte longueur d'onde) ..... 104

4.1.1 Estimation du nombre de photon détectés par le capteur ..... 105

4.1.2 Calibration du pyromètre UV ..... 107

4.1.3 Optimisation de la longueur d'onde et de l'ouverture du diaphragme 111

**5 Pyrométrie IR ..... 112**

5.1 Calibration du système pyrométrique infrarouge ..... 113

**6 Résultats des mesures de température en oxycoupage laser .. 116**

6.1 Recalage des mesures UV et IR et identification de l'émissivité. ..... 117

6.2 Lien entre régime de découpe et température de découpe ..... 119

6.3 Effet de la puissance en mode continue et pulsée sur la température de découpe 120

6.4 Mesure de température par pyrométrie UV à différents paramètres de découpe 123

**7 Conclusion ..... 124**

**CHAPITRE IV TEMPERATURE, TEMPS ET SURFACE SEUIL NECESSAIRE POUR L'INITIATION DE LA COMBUSTION ..... 125**

**1 Introduction ..... 125**

**2 Plan d'expérience ..... 127**

2.1 Essais réalisés ..... 127

**3 Résultats ..... 128**

**4 Interprétation et discussion ..... 131**

4.1 Géométrie ..... 131

4.2 Maillage ..... 132

4.3 Conductivité thermique de l'échantillon en acier en fonction de la température (paramètre d'entrée du modèle) ..... 134

4.4 Capacité calorifique de l'échantillon en acier en fonction de la température (paramètre d'entrée du modèle) ..... 135

4.5 Prise en compte de l'évaporation du métal ..... 136

4.6 Taille de faisceau et température nécessaire. ..... 137

4.6.1 Profil thermique D=Xmm ..... 138

4.6.2 Profil thermique D=Xmm ..... 139

4.6.3 Profil thermique D=Xmm ..... 141

4.6.4 Profil thermique D=X mm ..... 143

4.6.5 Comparaison des différentes distributions spatiales de la température permettant l'initiation en utilisant différentes tailles de tache focale. 145

4.7 Bilan : Température et surface chauffée nécessaire pour l'initiation de la combustion ..... 146

4.8 Mesure de température avant initiation de la combustion ..... 147

4.8.1 Initiation de la combustion après formation de la phase liquide 148

4.8.2 Initiation de la combustion en phase solide ..... 150

**5 Conclusion ..... 153**

**CONCLUSION GENERALE ..... 154**

**PERSPECTIVES ..... 157**

**REFERENCES ..... 158**

# C. Table des figures

Figure 1 : Saignée de découpe....16

Figure 2 : Schémas traduisant la variation de la température dans une flamme chalumeau oxyacétylénique [1] ....17

Figure 3 : transmission de l'œil humaine et cette d'une fibre optique en fonction de la longueur d'onde....20

Figure 4 : Valeurs de la réflectivité de l'Al, Fe, Ni et Cr en fonction de la longueur d'onde ....21

Figure 5 : Déroulement de différents processus d'oxydation, d'allumage et de combustion durant le chauffage....29

Figure 6 : Triangle de feu....29

Figure 7 : Évolution des gains et des pertes thermiques lors de l'allumage [3] ....31

Figure 8 : Processus d'oxydation....34

Figure 9 : (a) Épaisseur de la couche d'oxyde formée sur du fer pur dans la plage de température de 773 à 868 K pendant 1,5 (courbe inférieure) à 54 s (courbe supérieure)[9] ; (b) diagramme de phase fer-oxygène ....36

Figure 10 : Température en surface de l'acier de 20mm d'épaisseur en fonction de la vitesse (a) pour une puissance incidente de 700W, (b) pour une puissance incidente de 1100W[2]. ....38

Figure 11 : Mécanisme d'oxycoupage et initiation de l'oxycoupage par laser ....40

Figure 12 : Composition de la couche d'oxyde dans la saignée de découpe par laser et oxygène [15] ....40

Figure 13 : (a) Cinétique d'absorption de l'oxygène par une surface de fer fondue ; (b) images correspondantes ....42

Figure 14 : Découpe laser (a) initiation (b) découpe....45

Figure 15 : Profil de température généré par le laser (a), profil de température générée par la réaction d'oxydation (b) [27]....47

Figure 16 : Paramètres de découpe laser assisté par oxygène ..... 48

Figure 17 : La variation de la réflectivité des matériaux en fonction de la longueur d'onde (M.Stenn W. , 1991) ..... 50

Figure 18 : Réflectivité en fonction de la température (longueur d'onde du faisceau incident de 1,06µm)[29] ..... 51

Figure 19 : Effet de la position du point focal sur la largeur de la saignée [32] ..... 53

Figure 20 : Largeur de la saignée en fonction de la vitesse de découpe [36] ..... 54

Figure 21 : Réflectivité de l'acier en fonction de l'angle d'incidence d'un faisceau (longueur d'onde de 1.06µm)[29] ..... 55

Figure 22 : Absorptivité de l'acier fondu ..... 55

Figure 23 : Différents types de buses ..... 56

Figure 24 : Buse off-axiale [41] ..... 58

Figure 25 : (a) dispositif expérimental ;(b) schématisation du dispositif expérimental ..... 62

Figure 26 : distribution spatiale du faisceau laser avec un diamètre de fibre de 200 µm, une collimation de 100 mm et une lentille de 500 mm. ..... 63

Figure 27 : Essais de découpe réalisés à 320 W, avec différents rapports cycliques et une durée d'impulsion de 1 ms et données calculées pour chaque paramètre utilisé ; carré vert : découpe valable ; carré rouge : découpe non valable. ..... 64

Figure 28 : Domaine d'initiation de la découpe à différentes puissances représentées en fonction de la durée d'impulsion et de la fréquence (rapport cyclique) ..... 66

Figure 29 : Gammes de paramètres permettant l'initiation de la découpe en fonction de l'énergie par impulsion et du taux de recouvrement nécessaire. ..... 68

Figure 30 : Énergie nécessaire en fonction du nombre d'impulsions par mm parcouru et durée maximale correspondante entre deux impulsions successives. ..... 69

Figure 31 : Épaisseur de découpe sur une pièce d'épaisseur 50mm pour des pressions de 3, 6 et 9 bar et des vitesses de 100, 200, 300 et 500 mm/min (puissance de X W). ..... 71

Figure 32 : Les différents régimes de découpe observés sur une pièce découpée ; (a) pas d'initiation de la découpe ; (b) initiation de la découpe. ..... 73

Figure 33 : Image des faces supérieure et inférieure dans le cas du régime 1 ..... 73

Figure 34 : Hydrodynamique du régime 1 (image prise toute les 0,5s/échelle : la largeur de la saignée en face supérieure est de 1mm) ..... 75

Figure 35 : Image des faces supérieure et inférieure dans le cas du régime 2 ..... 76

Figure 36 : Hydrodynamique du régime 2(image prise toute les 0,5s/échelle : la largeur de la saignée en face supérieure est de 1mm) .....77

Figure 37 : Image des faces supérieure et inférieure dans le cas du régime 1+2 ..... 78

Figure 38 : Niveau de l'apparition des différents régimes de découpe en fonction du rapport cyclique ..... 81

Figure 39 : Largeur de la saignée en régime 2 ..... 82

Figure 40 : Vitesse en sortie de buse du gaz en fonction de la pression stagnante (C.Man, 1997). ..... 84

Figure 41 : Écoulement et ondes de choc dans une buse convergente ..... 86

Figure 42 : Ondes de choc dans une buse convergente-divergente..... 87

Figure 43 : Géométrie du modèle utilisé sous ANSYS Workbench 14.5 (buse/air/surface de l'échantillon)..... 89

Figure 44 : Maillage du modèle sous ANSYS Workbench 14.5..... 90

Figure 45 : Profil de pression en sortie de buse et jusqu'à la surface de l'échantillon (a) 3 bar (b) 6 bar (c) 9 bar .....91

Figure 46 : Emission d'un corps noir en fonction de la température et la longueur d'onde..... 97

Figure 47 : Sensibilité relative à la variation de la température ..... 99

Figure 48 : Luminance du corps noire (émissivité ε = 1) et du corps réel (émissivité ε = 0,5) en fonction de la température.....101

Figure 49 : Dispositif expérimental et installation des pyromètres. ..... 102

Figure 50 : Evolution d'un nombre de photon émis par un corps noir en fonction de la température à différente longueur d'onde ..... 105

Figure 51 : dispositif de calibration ..... 108

Figure 52 : Nombre de photon durant le processus de fusion des barreaux métalliques ..... 109

Figure 53 : Interpolation du nombre de pontons en fonction de la température. .....110

Figure 54 : Luminance d'un corps noir en fonction de la longueur d'onde ..... 111

Figure 55 : Nombre de photons en fonction de la température pour trois longueurs d'onde différentes 240nm, 360nm et 500nm. ..... 112

Figure 56 : Niveaux de gris durant le processus de fusion des barreaux métalliques 114

Figure 57 : Émissivité de V, Nb, Ta et W au point de fusion, en fonction de la longueur d'onde [54][55][56][53][48] ..... 114

Figure 58 : Courbe d'étalonnage du pyromètre IR en établissant la relation entre le niveau de gris « $Ngris$ » et la variable « $kIR$»..... 116

Figure 59 : Zone de mesure moyennée sur une surface de diamètre 1mm. ..... 117

Figure 60 : Mesure de température par pyrométrie IR sur des essais de découpe à ; (a) XW ;(b) XW et (c) XW. ..... 119

Figure 61 : Mesure de température dans le régime mixte 1+2 ..... 120

Figure 62 : Mesure de température par pyrométrie UV sur des essais de découpe à ; (a)XW ;(b) XW et (c) XW. ..... 122

Figure 63 : Les principaux éléments entrant en jeux dans l'initiation de la combustion .....125

Figure 64 : Initiation de la combustion en fonction de la puissance et la durée d'impulsion pour différentes tailles de tache focale. ..... 129

Figure 65 : Puissance minimale obtenue pour l'initiation de la combustion en fonction du diamètre de la tache focale (durée d'impulsion 100ms)..... 130

Figure 66 : Géométrie utilisé (a) les dimensions de la géométrie ; (b) endroit de la focalisation laser sur l'échantillon. .....132

Figure 67 : (a) maillage global ; (b) raffinement du maillage sur la zone d'intérêt....133

Figure 68 : Conductivité thermique de l'acier en fonction de la température [57], utilisé dans le modèle COMSOL..... 134

Figure 69 : Capacité calorifique de l'acier en fonction de la température [57], utilisé dans le modèle COMSOL.....135

*Figure 70*..... 136

*Figure 71* .....137

Figure 72 : Essais d'initiation de la combustion à différentes puissances et différentes durées d'impulsion avec un diamètre de tache focale de Xmm..... 138

Figure 73 : Essais d'initiation de la combustion à différentes puissances et différentes durées d'impulsion avec un diamètre de tache focale de Xmm..... 140

Figure 74 : Essais d'initiation de la combustion à différentes puissances et différentes durées d'impulsion avec un diamètre de tache focale de Xmm..... 142

Figure 75 : Essais d'initiation de la combustion à différentes puissances et différentes durées d'impulsion avec un diamètre de tache focale de Xmm..... 144

Figure 76 : Distribution spatial de température nécessaire pour l'initiation de la combustion en utilisant trois différentes taille de tache focale (diamètre X, X et Xmm). .....145

Figure 77 : Relation entre la température minimale au centre en fonction de la taille de la surface chauffé (au dessus de 1000K au bord) permettant l'initiation de la combustion .....147

Figure 78 : Mesure de température par IR sur la surface d'interaction en utilisant une tâche focale de diamètre Xmm, une puissance de XW et une durée d'impulsion de Xms. ..... 149

Figure 79 : Mesure de température par IR sur la surface d'interaction en utilisant une tâche focale de diamètre Xmm, une puissance de XW et une durée d'impulsion de Xms. .....152

# Contexte de l'étude

Le secteur de la déconstruction est soumis à des enjeux et des exigences importantes devant répondre à des problématiques existantes et d'autres pouvant apparaître dans un futur proche. Aujourd'hui, les chantiers de démantèlements dans les domaines civil et nucléaire s'étalent sur des périodes longues pouvant aller jusqu'à une quarantaine d'années ou plus. Chaque site représente un ensemble de sous-chantiers de plusieurs années dont les opérations sont longues, coûteuses et présentent des risques importants pour les personnels.

Durant un chantier de déconstruction, les opérateurs sont amenés à découper différents types de matériaux ; la découpe est l'opération la plus effectuée (préparation à la déconstruction…). Sur les structures métalliques, les découpes actuelles se limitent à deux techniques principales : la pince métallique et l'oxycoupage.

- La découpe par une pince mécanique :

  Cette pince caractérisée par sa dimension, son poids sa pression de découpe, disposée au bout d'un bras mécanique peut atteindre une hauteur de 40m et découper des épaisseurs allant jusqu'à 20 mm. Dans cette configuration, ce procédé doit répondre à trois contraintes fortes :

  - Une contrainte mécanique qui use prématurément l'outil. De par ses dimensions, le moment de force exercé sur la pince est important. Le poids manipulé est limité à deux tonnes et les risques de déformation de l'outil généré par les contraintes de cisaillement augmentent avec l'angle que fait le bras et l'effort réalisé pour découper, arracher et faire entrainer par la partie découpée.
  - La précision de manipulation lors de la mise en œuvre de ce procédé. Il n'est pas simple de téléopérer un tel outil à une distance de sécurité raisonnable. La mise en œuvre du procédé expose une large zone à des chutes de morceaux découpés, d'où la nécessité de délimiter une zone de sécurité de plusieurs dizaines de mètres.
  - La taille importante du dispositif induit des contraintes d'accessibilité aux zones de découpe.

Cette technique reste néanmoins limitée car les besoins peuvent atteindre des dimensions supérieures. Par exemple il n'est pas exceptionnel de trouver dans les centrales thermiques, des charpentes métalliques de 50 mm disposées à 60m de hauteur qui sont alors inaccessibles par des moyens courant dans ce secteur d'activité.

Enfin, du point de vue sécurité les risques pour les opérateurs sont importants sur un chantier de déconstruction avec dans ce contexte une perte totale ou partielle de la portance de la structure avec un risque d'écrasement ou de chute important.

- L'oxycoupage par chalumeau :

Le principe de l'oxycoupage se base sur la découpe des métaux en déclenchant une réaction fortement exothermique de type $Fe + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow FeO$. La présence d'une source chaude et d'un gaz réactif génère une quantité importante d'énergie avec une enthalpie de $\Delta H_{FeO}^{298K}$=-272 kJ/mol, $\Delta H_{FeO}^{1600K}$=-352,6 kJ/mol et $\Delta H_{fus\ FeO}^{1650K}$=24,1 kJ/mol. Le gaz réactif sous pression joue alors un double rôle, le premier est de contribuer comme acteur principal à la réaction exothermique tandis que le deuxième rôle est d'éjecter le métal fondu et oxydé pour assurer la présence de métal frais en surface. La continuité de la réaction de fusion et l'éjection du métal permet de créer une saignée de découpe Figure 1.

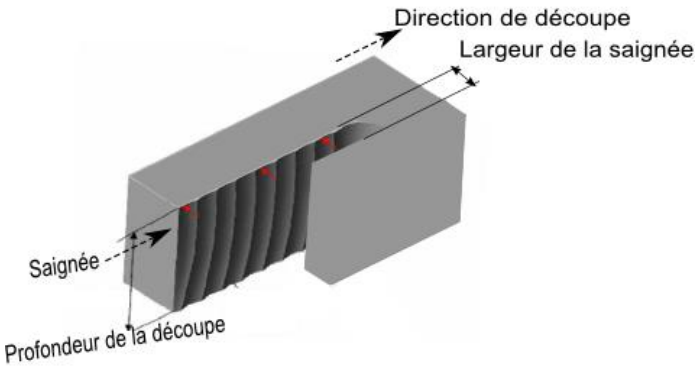



Figure 1 : Saignée de découpe

Le point fort de ce procédé est qu'il permet de découper des épaisseurs allant jusqu'à 1000 mm. Les limitations concernent principalement le temps de montée en température relativement long (environ 40 minutes de chauffe avant

de commencer à découper) et une vitesse de découpe de l'ordre de quelques mm/s et aussi l'importante variation de la température dans la flamme du chalumeau. La perte de chauffe dans l'élément à découper peut intervenir au court de l'opération lorsque la géométrie locale de l'objet découpé évolue (augmentant les pertes locales et abaissant la température) ou bien lorsque l'opérateur augmente quelque peu la distance de travail, alors la température de la flamme en contact avec la surface diminue et le procédé s'arrête. Ces aléas augmentent encore le temps d'opération et le cout du chantier. Le dernier point limitant de l'oxycoupage par chalumeau est l'importante variation de la température le long de la flamme en sortie. Le schémas Figure 2 montre la variation de la température dans les flames en sortie du chalumeau qui est de l'ordre de 1000K par 1,5mm de distance. Cette importante variation de la température rend la découpe par chalumeau moins flexible.

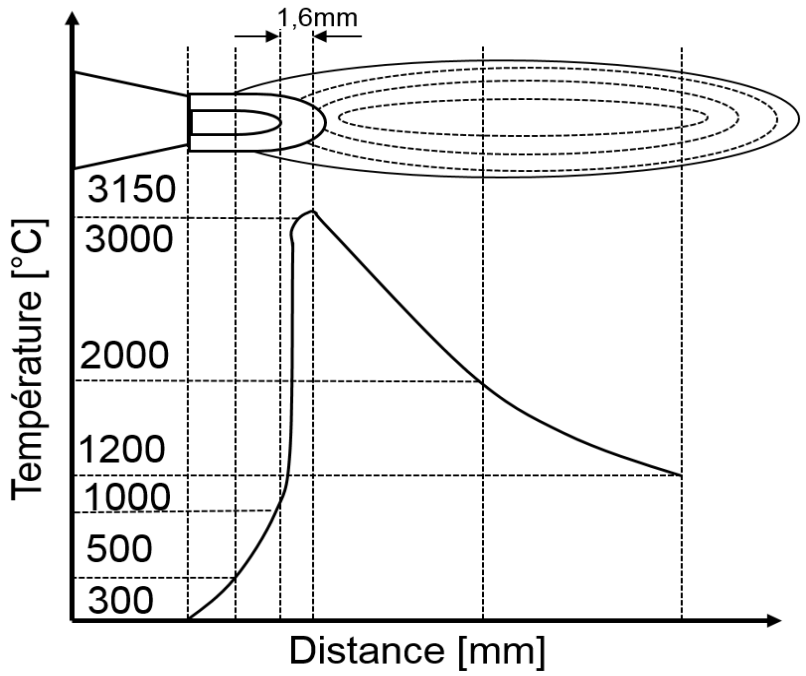



Figure 2 : Schémas traduisant la variation de la température dans une flamme chalumeau oxyacétylénique [1]

Le risque potentiel de ce procédé est la brûlure car l'opérateur doit se retrouver près de l'élément à découper.

Le besoin d'une entreprise de déconstruction peut être divisé en deux parties classées par priorité.

Sécurité :

Les techniques et les opérations de démantèlements actuels exposent les personnels à des risques de brûlure, d'irradiation, d'électrocution, de chute, d'écrasement… La mise en œuvre de ces procédés nécessite une importante ressource humaine et financière pour tendre vers le risque zéro. De plus afin d'améliorer les pratiques il est également nécessaire de mettre en place un processus de recherche, développement et innovation de procédé nouveaux limitant l'exposition des opérateurs au risque.

Aspect technico-économique :

Les chantiers de déconstruction s'étalent généralement sur des durées plusieurs années à plusieurs dizaines d'année. Une opération élémentaire telle que la découpe manuelle, constitue l'opération principale dans au cours du chantier. Dès lors la durée de réalisation et la facilité de mise en œuvre de cette opération, sont des leviers importants du calcul du prix de revient d'un chantier. La compétitivité économique pousse les entreprises de déconstruction à trouver des solutions d'améliorations des techniques existantes ou à innover en vue de mettre au point de nouvelles techniques permettant des avancées sur 4 axes technico-économiques principaux tels que :

- La télé-opération augmentant la sécurité de l'opérateur
- L'augmentation de la vitesse d'exécution
- L'amélioration de l'accessibilité de l'outil de découpe
- La possibilité de réaliser des découpes de géométries complexes

Pour répondre aux problématiques de sécurité et d'efficacité une étude amont a montré qu'un procédé de découpe automatisé par laser et oxygène semble bien adapté aux besoins tout en limitant les risques humains et en améliorant la maîtrise et l'efficacité du procédé. Cette technologie est actuellement destinée aux chaînes de production industrielle en milieu fermé, mais peut aujourd'hui être appliquée en milieu ouvert sans nécessiter des dispositifs de sécurité plus contraignants que ceux déjà existants dans le milieu de la déconstruction. La conception de ces éléments et l'étude du procédé dans ces configurations constituent l'objectif principale de cette thèse.

# Objectifs de l'étude

La contrainte majeure pour l'utilisation de procédé laser concerne la sécurité. En effet, la découpe d'un élément épais d'environ 50mm nécessite une configuration optique faiblement divergente et d'une puissance de l'ordre de 1 kW. Dans ces configurations, la Distance Nominale de Risque Optique (DNRO) atteint une centaine de mètres (voire plusieurs kilomètres si le faisceau reste collimaté), ce qui impose une distance de sécurité du même ordre de grandeur.

Schématiquement, le point sensible est la longueur d'onde du laser. Pour des longueurs d'onde classiques de 1 µm comme pour le visible, l'œil est transparent et le site d'absorption de l'énergie se situe alors sur la rétine. Le seuil d'endommagent est de l'ordre de $1mW.cm^{-2}$ à l'entrée de l'œil. Ceci nécessite alors de s'écarter suffisamment de la source pour que la divergence du faisceau abaisse l'intensité et ceci définie la DNRO. Les seuils d'endommagent de la peau et de la cornée sont de l'ordre de 1 Watt et donc beaucoup plus élevés. Un laser de longueur d'onde adapté impose alors une DNRO beaucoup plus courte passant du kilomètre à quelques dizaines de mètre.

Afin de mettre en œuvre un laser de puissance en limitant les aspects sécurités, il est intéressant de pouvoir propager le faisceau à travers une fibre optique. En comparant les courbes de transmission de l'œil humain et d'une fibre optique, il apparaît qu'une bande spectrale s'étendant d'environ 1,5 à 2µm répond aux conditions de transmission par fibre optique et de non-transmission à travers l'œil Figure 3.

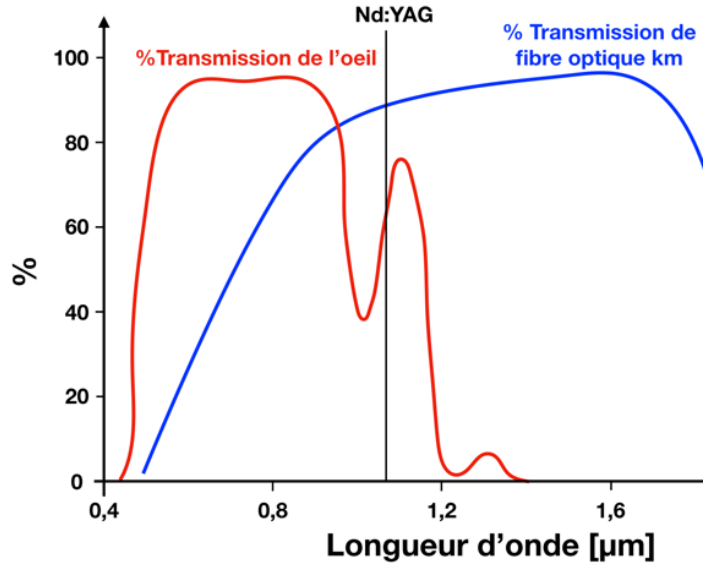



Figure 3 : transmission de l'œil humaine et cette d'une fibre optique en fonction de la longueur d'onde

Le laser X dont la longueur d'onde est de Xµm répond à ces contraintes et mets à disposition une puissance de XW continue. L'intégration dans une tête de découpe adéquate (incluant la barrière de sécurité et le contrôle du procédé) permet d'envisager une DNRO inférieure au mètre. La réalisation de cet outil constituerait une avancée considérable dans l'utilisation des lasers car permettant de les employer en milieu semi-ouvert (à l'intérieur d'un bâtiment ou dans une zone contrôlée) à ouvert.

Dans notre cas, la mise en œuvre d'une source laser de nouvelle génération nécessite l'étude de l'interaction du laser avec le métal pour l'application de découpe, car le coefficient d'absorption des rayonnements par les matériaux dépend fortement de la longueur d'onde ainsi que d'autres paramètres qui seront détaillés plus loin. Étant donné la nouveauté de ces sources laser, les informations techniques et la littérature relative à leur utilisation dans le cadre de procédés industriels sont pour le moment assez rares. La Figure 4 montrent les évolutions des coefficients de réflexion intrinsèque de quelques métaux. Il apparaît que pour le Fer, ce coefficient passe de 0,64 à une longueur d'onde de 1µm à 0,78 à une longueur d'onde de 2µm, soit une augmentation de +0,14 du coefficient de réflexion. Le Chrome et le Nickel réagissent de la même façon de +0,16. A cette longueur d'onde les métaux peuvent présenter des coefficients de réflectivité très importants comme par exemple le Nickel ou l'Aluminium (dès 1µm). Ces alliages seront plus difficiles à découper, néanmoins, en mobilisant une puissance laser supérieure, la zone éclairée pourrait atteindre la

température de fusion/dissolution des oxydes et permettre un processus d'oxydation par la surface. Le mécanisme sera détaillé plus précisément au chapitre suivant.

Dans notre étude, le Fer est le matériau présentant une évolution de la cinétique de réaction la plus importante aux vues de la configuration entre la puissance laser disponible, l'évolution de la réflectivité en fonction de la longueur d'onde, les températures (fusion du métal 1811K, des oxydes 1700K, et d'inflammabilité 1320K), et les enthalpies d'oxydation (environ 14 $kJ/g^{-1}$).

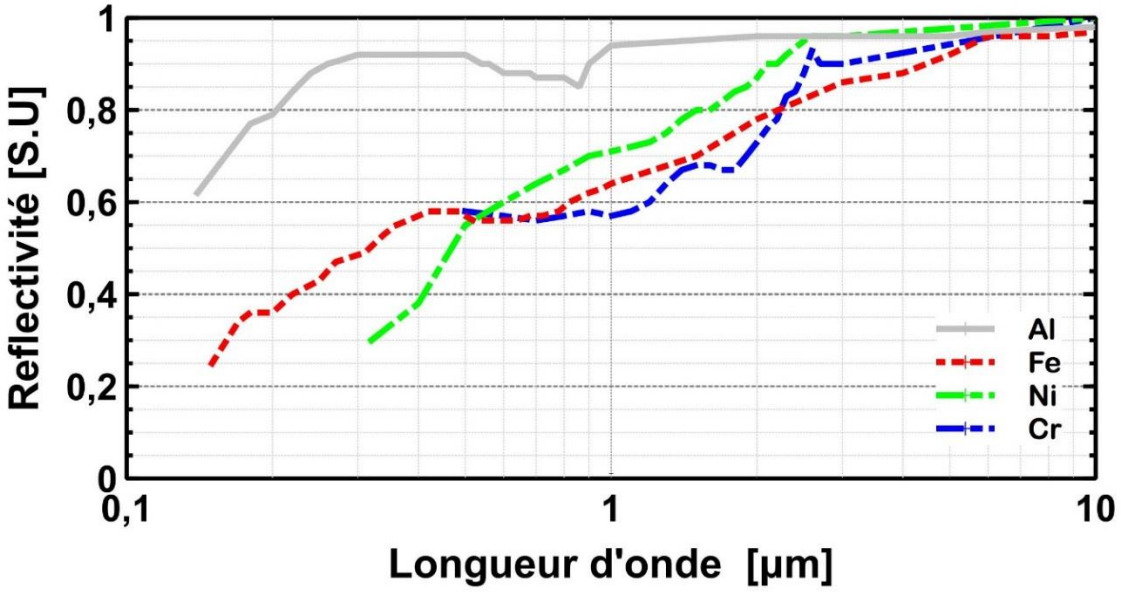



Figure 4 : Valeurs de la réflectivité de l'Al, Fe, Ni et Cr en fonction de la longueur d'onde

En résumé, l'objectif de cette thèse est de lever des verrous scientifiques et technologiques qui limitent actuellement la mise en œuvre d'un outil de découpe par laser en milieu ouvert. Plusieurs étapes ont été déterminées afin d'aboutir à la réalisation de cet objectif :

- Maîtriser le processus de découpe
- Optimiser les paramètres de découpe
- Définir la gamme opératoire de l'utilisation du laser
- Réaliser le prototype d'une version démonstrateur

Nous commencerons dans un premier temps par comprendre le phénomène d'interaction laser matière qui entraine le chauffage du métal. Ensuite nous évoquerons les différentes phases subies par le métal en raison du chauffage, allant de l'oxydation jusqu'à l'allumage et enfin la combustion. Suite à cela nous allons détailler

le procédé de découpe par laser et oxygène et les différents paramètres influent sur la découpe.

Dans un second temps nous réaliserons les essais en variant les différents paramètres de découpe afin d'identifier un volet sûr de fonctionnement du procédé.

Nous finirons par identifier les paramètres seuil de température, de taille de surface chauffée et de la durée d'interaction nécessaire pour déclencher le processus de découpe. Cela sera réalisé par l'identification du facteur d'émissivité trouvé par recalage entre les mesures de températures par pyrométrie IR et par pyrométrie UV.

# Chapitre I Étude bibliographique

## 1 Interaction laser-matière et chauffage du milieu

L'étude de l'interaction laser-matière nécessite de comprendre les mécanismes couplant le laser à la température. Le régime établit durant l'interaction est piloté par cette dernière. La connaissance de l'absorptivité et de la réflectivité du milieu selon la longueur d'onde utilisée, permet de déterminer l'indice complexe correspondant. La valeur de l'absorptivité est une valeur mesurable, intrinsèque au matériau et varie en fonction de la température et l'état de surface. La réflectivité est le complémentaire à 1.

Le modèle de Drude est un modèle qui décrit le passage des grandeurs microscopiques aux grandeurs macroscopiques. En considérant la structure atomique d'un métal sous forme de réseau et le rayonnement laser sous la forme d'une onde électromagnétique plane infinie qui vient solliciter les électrons libres. C'est électrons mis en mouvement, entrent en collision avec le réseau. C'est avec ces collisions que le modèle de Drude explique l'évolution de la température du réseau.

### 1.1 Modèle de Drude

Ce modèle semi-classique consiste à assimiler les électrons de conduction, superficiels à des particules identiques réagissant au champ électrique de l'onde incidente. Un métal est classiquement considéré comme un regroupement d'atomes ayant établit des liaisons entre proches voisins et mis en commun un nombre d'électron peu ou non liés avec les atomes du réseau. La matrice du réseau constitué par les atomes est considérée comme immobile au vu du rapport de masse important entre un atome métallique et un électron ($m_{Fe}/m_{e^-}=10^5$).

Une onde électromagnétique plane et infinie arrivant sur un métal fait subir aux électrons non liés le champ électrique qui la constitue (la partie magnétique est négligée). Considèrons un électron dans un champs électrique mobile dans un réseau solide. Au cours du déplacement induit par le champs électrique l'électron subit des collisions avec les imperfections du réseau et les phonons qui déplacent les niveaux d'énergie localement sur lesquels circulent l'électron. Le moteur du mouvement étant le champ électrique sinusoïdale de l'onde, son déplacement sera également de cette périodicité. En conséquence, nous allons définir en partant du principe fondamental de la dynamique (Equation 1), l'équation d'un oscillateur amorti (Equation 2) et trouver le courant induit.

$$\Sigma\vec{F} = m\vec{a} \qquad \textit{Équation 1}$$

$\vec{F}$ est la somme des forces extérieurs, $m$ la masse de la particule considérée, a l'accélération

En faisant l'hypothèse qu'un électron entre en collision avec le réseau et en définissant un temps caractéristique de collision τ, l'on trouve :

$$m\frac{d\vec{V}}{dt} = -e\vec{E} - \frac{m}{\tau}\vec{V} \qquad \textit{Équation 2}$$

$\vec{V}$ la vitesse de l'électron, $\vec{E}$ le champ électrique ressenti par l'électron,

En considérant que la vitesse suit la même périodicité que l'onde incidente, l'on trouve en intégrant :

$$\vec{V} = -\frac{e\tau(1 + i\omega\tau)}{m(1 + \omega^2\tau^2)}\vec{E} \qquad \textit{Équation 3}$$

Avec ω la pulsation en Hz, $\omega = 2\pi f = 2\pi\frac{c}{\lambda}$ et la vitesse de la lumière $c$=3.10$^8$m/s

$\vec{V}$ étant la Vitesse des électrons mis en déplacement par l'onde incidente, le courant peut en être déduit selon :

$$\vec{j} = \sigma\vec{E} = ne\vec{V} \qquad \textit{Équation 4}$$

d'où

$$\boldsymbol{\sigma = \sigma_0 \frac{(1 + iw\tau)}{(1 + w^2\tau^2)} \vec{E}} \qquad \textit{Équation 5}$$

avec

$$\boldsymbol{\sigma_0 = \frac{ne^2\tau}{m_{e^-}}} \qquad \textit{Équation 6}$$

avec $e$=1,602.$10^{-19}C$, $m_{e^-} = 9{,}10.10^{-31}Kg$, $\sigma_0[\Omega/m]$ la partie indépendante de la fréquence de la conductivité électrique.

$\sigma_o$ est une grandeur accessible par la mesure. Dès lors le temps caractéristique de collision est calculable par :

$$\boldsymbol{\tau = \frac{1}{n}\frac{m_{e^-}}{e^2}\sigma_0 = \frac{M}{N_a Z \rho_{m_{métal}}}\frac{m_{e^-}}{e^2 \rho_{métal}}} \qquad \textit{Équation 7}$$

avec $\rho_{m_{métal}}$ : la masse volumique du métal [Kg/$m^3$] et $\rho_{métal}$ : la résistivité électrique du métal [Ω.m], Z=26 et $N_a = 6.022.10^{-23}$ le nombre d'Avogadro.

Une application numérique dans le cas du Fer, donne comme résultat $\tau_{Fer}$=2,7.$10^{-15}$s. Ceci fixe l'ordre de grandeur des cinétiques de transfert d'énergie entre l'onde et le réseau du matériau irradié que l'on peut considérer dans notre cas comme instantanée. Ce dépôt local instantané est diffusé par la suite.

Afin de connaitre la relation de susceptibilité $\chi$ avec la fréquence ω, on définit la polarisation électrique ($\vec{P} = \varepsilon_0 \chi \vec{E} = Ne\vec{x}$) d'un matériau comme étant sa réponse à la sollicitation d'un champ électrique extérieur et on définit aussi la fréquence plasma notée $\omega_p^2$ $avec$:

$$\boldsymbol{\omega_p^2 = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0 \tau}} \qquad \textit{Équation 8}$$

Avec $\varepsilon_0$ la permittivité

En intégrant V (onde plane) on trouve :

$$\boldsymbol{\vec{x} = \int \vec{V} dt = \frac{e\tau(i - \omega\tau)}{m\omega(1 + \omega^2\tau^2)} \vec{E}} \qquad \textit{Équation 9}$$

$$\boldsymbol{\vec{x} = \frac{\omega_p^2}{\omega}\frac{(i - \omega\tau)}{(1 + \omega^2\tau^2)}} \qquad \textit{Équation 10}$$

Une fois que l'on a défini la susceptibilité, on peut retrouver l'indice optique du milieu. Celui-ci peut être calculé par la relation qui relie l'indice optique à la susceptibilité :

$$(\boldsymbol{n} + \boldsymbol{ik})^2 = (\mathbf{1} + \boldsymbol{\chi})\boldsymbol{\varepsilon_0} \qquad \textit{Équation 11}$$

*n* est l'indice optique du milieu et *k* le coefficient d'extinction

Ce qui donne :

$$\boldsymbol{n^2} = \frac{\mathbf{1}}{\mathbf{2}}\sqrt{\boldsymbol{\varepsilon_1^2} - \boldsymbol{\varepsilon_2^2}} + \boldsymbol{\varepsilon_1} \qquad \textit{Équation 12}$$

$$\boldsymbol{\varepsilon_1} = \mathbf{1} - \frac{\boldsymbol{\tau^2 w_p^2}}{\mathbf{1}+\boldsymbol{\tau^2 w^2}} \qquad \textit{Équation 13}$$

avec

$$\boldsymbol{k^2} = \frac{\mathbf{1}}{\mathbf{2}}\sqrt{\boldsymbol{\varepsilon_1^2} - \boldsymbol{\varepsilon_2^2}} - \boldsymbol{\varepsilon_1} \qquad \textit{Équation 14}$$

$$\boldsymbol{\varepsilon_2} = \frac{\boldsymbol{\tau w_p^2}}{\boldsymbol{w}(\mathbf{1}+\boldsymbol{\tau^2 w^2})} \qquad \textit{Équation 15}$$

## 1.2 Détermination de l'absorptivité en incidence nulle

L'absorptivité *A*, la réflectivité *R* et la transmission *T* d'un matériau peuvent être déduites à partir des coefficients de Fresnel et de l'indice optique *n* et du coefficient d'extinction *k*.

Comme dans notre cas le faisceau incident arrive à la surface sous une incidence nulle, on peut déduire l'absorptivité par la formule de Fresnel :

$$\boldsymbol{A_0} = \mathbf{1} - \boldsymbol{R_0} = \mathbf{1} - \left|\frac{\boldsymbol{n_c} - \mathbf{1}}{\boldsymbol{n_c} + \mathbf{1}}\right|^2 = \mathbf{1} - \frac{(\boldsymbol{n}-\mathbf{1})^2 + \boldsymbol{k^2}}{(\boldsymbol{n}+\mathbf{1})^2 + \boldsymbol{k^2}} = \frac{\mathbf{4}\boldsymbol{n}}{(\boldsymbol{n}+\mathbf{1})^2 + \boldsymbol{k^2}} \qquad \textit{Équation 16}$$

Grace à ce résultat nous pouvons à partir des mesures de la conductivité $\sigma_0$ et de la réflectivité *R* retrouver toutes les grandeurs considérées par le modèle de Drude.

## 1.3 Profondeur d'absorption du rayonnement

La loi Beer-Lambert est une relation qui définit l'atténuation d'un rayonnement lumineux d'intensité $I_0$ en fonction d'une distance optique parcourue dans le milieu :

$$\frac{\boldsymbol{I}}{\boldsymbol{I_0}} = \boldsymbol{e^{-\alpha x}} \qquad \textit{Équation 17}$$

Ou $I_0$ est l'intensité de lumière incidente, *I* l'intensité de la lumière sortante, *x[m]* : la longueur du trajet optique et $\alpha$ le coefficient d'absorption défini par :

$$\alpha = \frac{2kw}{c} = \frac{4\pi k}{\lambda} \qquad \textit{Équation 18}$$

Et la profondeur d'absorption sera donc :

$$x = \frac{c}{2kw} ln\left(\frac{I}{I_0}\right) = \frac{\lambda}{4\pi k} ln\left(\frac{I}{I_0}\right) \qquad \textit{Équation 19}$$

D'après l'*Équation 19* le rayonnement laser sur un métal est absorbée à 90% et 99% sur des épaisseurs de 20 et 40 nm. Ceci traduit également la faible épaisseur de peau des métaux et ne représente que 50 à 100 couches atomiques. Une très faible épaisseur de métal est donc capable d'arrêter un rayonnement optique même intense.

En conclusion, le modèle de Drude, permet de fixer les ordres de grandeurs des cinétiques de couplage entre le laser et le réseau et le volume de matière absorbant l'énergie laser. Ceci justifie que les dépôts d'énergie laser sur les métaux sont supposés instantanés et de surface.

## 1.4 Élévation de la température d'un milieu soumis à un rayonnement laser

Après avoir décrit le modèle semi-classique de Drude, nous allons faire le lien avec la thermique du matériau induite par cet éclairement. Le modèle de diffusion n'est simplement résolu que dans une configuration à 1 dimension. Pour des aspects 2D et 3D, il sera nécessaire d'utiliser un code de calcule numérique pour fixer les valeurs du champ de température. La grandeur qui définit la ou les dimensions du problème considéré est la longueur caractéristique de diffusion thermique définie par :

$$L_T = 2\sqrt{Dt} \qquad \textit{Équation 20}$$

*O*ù

$$D = \frac{K}{\rho C_p} \qquad \textit{Équation 21}$$

avec $D\,[m2s\text{-}1]$ la diffusivité thermique, $K\,[W.m\text{-}1K\text{-}1]$ la conductivité thermique, $\rho[kg.\,m\text{-}1\,]$ la masse volumique et $C_p\ [J.kg\text{-}1K\text{-}1]$ la chaleur spécifique.

- Si $L_T < R$ (R : le rayon de la tache focale) le chauffage est considéré comme unidimensionnel suivant l'axe du rayon.
- Si $L_T > R$ le chauffage et s'effectue sur le volume et le problème peut être considéré comme 2D axisymétrique.

En faisant le calcul on constate qu'on se retrouve dans la configuration 2D où $L_T > R$.

$L_T$ étant dépendante du temps, nous pouvons calculer un temps caractéristique de validité du modèle 1D suivant.

$$t = \frac{1}{D}\left(\frac{R}{2}\right)^2 \qquad \textit{Équation 22}$$

Où R est une dimension caractéristique du problème égale au rayon la tâche focale. Dans notre cas nous trouvons que $t$=3ms.

Une fois connue la valeur de l'absorptivité du milieu, on peut calculer analytiquement l'élévation de température de la surface soumise à un rayonnement lumineux. Connaissant les valeurs de la conductivité thermique $K$, de la capacité thermique $Cp$ et de l'intensité du rayonnement $I_{inc}$ *[W/m2]* on peut calculer le temps qui correspond à l'atteinte d'une température visée par la formule suivante :

$$\Delta t = \pi \rho K C_p \left(\frac{\Delta T}{2 I_0}\right)^2 \qquad \textit{Équation 23}$$

Avec $I_0$ *[W/m2]* l'intensité absorbée.

Nous pouvons dès lors calculer la puissance continue nécessaire à la fusion du matériau pour un temps correspondant au temps de validité du modèle 1D.

$$P = \pi^{\frac{3}{2}} \sqrt{\frac{\rho K C_p}{\Delta t}} \Delta T R^2 \qquad \textit{Équation 24}$$

L'application numérique donne $P$=228W pour un rayon de 300 µm. Il apparaît ici que quelques centaines voire quelques dizaines de watt absorbés par le matériau suffisent à le faire fondre et potentiellement à amorcer le procédé. Cette valeur de puissance nécessaire est maximisée car nous ne considérons que 3ms d'interaction.

L'approche en régime stationnaire 1D donne :

$$P = \pi K \Delta T R \qquad \textit{Équation 25}$$

Et dans notre configuration $P$=113W.

Ces 2 valeurs nous permettent de conclure que la puissance absorbée nécessaire pour la fonte du matériau se situe entre ces 2 valeurs.

# 2 Les différents phénomènes au cours du chauffage : oxydation, allumage et combustion

D'après ce que nous avons détaillé dans la section 1 sur le modèle de Drude et que l'interaction du laser avec le métal entraine le chauffage de ce dernier, dans cette partie nous allons différencier les différentes phases d'oxydation, d'allumage et de combustion entrainées par le chauffage du métal. Nous définissons aussi les conditions de passage d'une phase à l'autre. Sachant que l'ordre dans lequel se passe les différentes phases est le suivant :




Figure 5 : Déroulement de différents processus d'oxydation, d'allumage et de combustion durant le chauffage

## 2.1 Différenciation des notions : oxydation et combustion

Généralement tous les métaux placés dans un milieu enrichi en oxygène sont inflammables. L'initiation de la combustion d'un métal est déclenchée par la présence des trois éléments du triangle de feu Figure 6: un combustible (le métal), un comburant (l'oxygène) et une source de chaleur ou d'énergie.

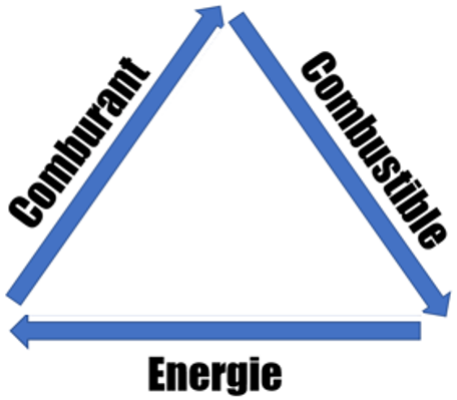



Figure 6 : Triangle de feu

Un métal présent dans un environnement naturel à température ambiante s'oxyde malgré l'absence d'une source de chaleur, c'est l'exemple typique de la rouille.

La réaction d'oxydation du métal est une réaction exothermique lente qui peut se dérouler à la température ambiante. La présence d'une source de chaleur sur un couple combustible-comburant (dans notre cas métal-oxygène) entraîne une accélération de la vitesse de réaction et mène le métal à la combustion.

Le taux *d'oxydation* $r\ (s^{-1})$ des métaux est soumis à la loi d'Arrhenius :

$$r = A.e^{-\frac{E_\alpha}{R.T}} \qquad \textit{Équation 26}$$

où $A\ (s^{-1})$ est le facteur pré-exponentiel de vitesse de la réaction, $E_\alpha\ (J.mol^{-1})$ est l'énergie d'activation, $R\ [J.mol^{-1}.K^{-1}]$, est la constante des gaz parfaits et $T\ [K]$ est la température.

Lorsque la réaction d'oxydation exothermique est accélérée du fait de la présence d'une source de chaleur portant le métal à une température critique, une transition brusque du phénomène d'oxydation vers la combustion du métal se produit. La combustion n'est capable de s'auto-entretenir que du fait de la présence d'oxygène sous pression.

Les conditions critiques de température et de surface d'interaction sont décrites par O'Neill et Gabzdyl [2] qui estiment que la combustion peut être initiée dans l'acier solide sur une zone d'interaction d'un diamètre minimale de 3mm à une température d'au moins 1270K soumise à un jet d'oxygène. Une fois ces conditions atteintes, la réaction d'oxydation maximise son rendement et mène à la combustion complète. Le processus de combustion se poursuivra ensuite dans l'épaisseur du métal liquide générant un ensemble de réactions exothermiques qui participeront au bilan énergétique du procédé de découpe.

## 2.2 La notion d'allumage

Il existe une phase intermédiaire entre la phase d'oxydation et la combustion appelée phase d'allumage. Si la phase d'allumage est accompagnée d'une forte augmentation de la température et si l'approvisionnement en combustible et comburant est suffisant, la réaction de combustion s'amorce. Le facteur principal qui pilote la transition entre les régimes d'oxydation, d'allumage et de combustion en un point est le bilan d'équilibre énergétique entre les gains et les pertes de chaleur locales.

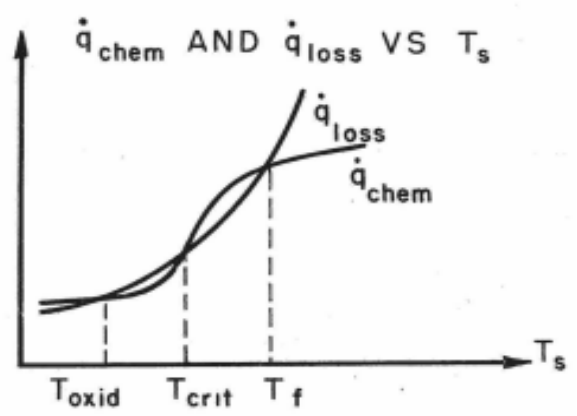



Figure 7 : Évolution des gains et des pertes thermiques lors de l'allumage [3]

Le graphe de la Figure 7 représente le diagramme de Van Heerden sur l'allumage des aciers, montrant les courbes de gain et de perte en fonction de la température. On remarque que la courbe de perte croît exponentiellement tout le long du processus. L'allure et la croissance de la courbe des pertes en fonction de la température regroupent les pertes par conduction, convection et radiation dépendant des propriétés thermiques et optiques intrinsèques du matériau.

Sur la courbe des gains de la Figure 7 qui regroupent l'apport énergétique provenant de l'oxydation et de la source externe, on distingue trois zones :

- $T < T_{oxid}$: la pente de la courbe de gain croît très faiblement, cela est dû à l'apport énergétique faible provenant de l'oxydation lente (partie avant $T_{oxid}$ Figure 7).
- $T_{oxid} < T < T_f$ : Moyenne température : la pente de la courbe de gain croît fortement, cela est dû à l'apport énergétique important induisant la transition du matériau du régime d'oxydation au régime de combustion.
- $T_f < T$ : C'est dans ce régime nous nous plaçons. La fonte du matériau est une condition nécessaire à la découpe. La pente de la courbe des gains diminue en raison d'apparition des phénomènes pouvant limiter la réaction d'oxydation comme :
    - La formation des couches d'oxydes dépassant 1µm limitant la diffusion de l'oxygène ou des atomes du métal à travers les couches d'oxydes [4]. Les oxydes métalliques possédants généralement des températures de fusion supérieures à celles du métal de base, il est dès lors nécessaire d'atteindre des températures de bain supérieures pour lesquels les oxydes sont en

phase liquide de façon à ne pas isoler le métal non-oxydé de la surface d'échange par une couche de métal oxydé solide. C'est une des conditions de la réalisation du procédé d'oxycoupage. Si une couche solide d'oxyde importante surnage en surface le procédé sera limité ou stoppé.

- La formation d'une couche de gaz protectrice suite à la réaction d'oxydation (exemple : décarburation) [5]. De la même façon que précédemment mais en considérant ici une isolation de la surface d'échange par une vaporisation importante de la surface, le jet d'oxygène doit exercer une pression de surface supérieure à celle du dégazage. Dans le cas contraire, le procédé présentera des instabilités, le temps du dégazage du volume de matière mis en jeu avant de reprendre.
- Lors de l'utilisation d'un gaz oxydant comme l'oxygène diatomique, la dissociation de la molécule du gaz oxydant peut également être un phénomène limitant l'oxydation [6]. Ce point est intrinsèque à la réaction chimique impliquée dans le procédé et peut difficilement être contourné par la paramétrie du procédé.

Sur la Figure 7 on identifie trois points présentant un équilibre entre les pertes et les gains. Les points $T_{oxid}$ (température d'oxydation), $T_f = T_{al}$ (température d'allumage) et $T_f$ (température de fusion ou de combustion) désignent les températures de passage d'un régime à l'autre. Si à la température $T_{oxid}$ un apport énergétique supplémentaire permet à nouveau de dépasser les pertes, le matériau entre dans la phase d'allumage. Un autre apport énergétique supplémentaire suffisant à partir de $T_{al}$ porte le matériau à la température $T_f$, puis à la combustion. Dans le cas contraire, le matériau revient à la température $T_{oxid}$ et la combustion ne se produit pas.

# 3 L'oxydation et la combustion des métaux

La réaction d'oxydation est une réaction exothermique qui a lieu dans la zone de contact entre le métal (combustible) et l'oxygène (comburant). Généralement, pour une grande partie des métaux la réaction d'oxydation se produit à température ambiante entre le métal et l'oxygène. Si l'apport énergétique généré par la réaction d'oxydation ou à l'aide d'une source externe (laser par exemple) est suffisant, il mène

le métal à l'allumage puis à la combustion. Les réactions chimiques susceptibles d'apparaitre lors de la combustion sont les suivants :

$$Fe + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow FeO \qquad \text{(wüstite)}$$

$$2FeO + \frac{1}{2} O2 \rightarrow Fe2O3 \qquad \text{(hématite)}$$

$$3\ Fe + 2\ O2 \rightarrow Fe3O4 \qquad \text{(magnétite)}$$

Les enthalpies de formation des diffèrents oxydes à différentes températures sont :

| *Température [K]* | FeO Enthalpie *[kJ/mol]* | $Fe_2O_3$ Enthalpie *[kJ/mol]* | $Fe_3O_4$ Enthalpie *[kJ/mol]* |
|---|---|---|---|
| *298K* | $\Delta H_{FeO}^{298K}$=-272 | $\Delta H_{Fe2O3}^{298K}$=-824,2 | $\Delta H_{Fe3O4}^{298K}$=-1118,4 |
| *1600K* | $\Delta H_{FeO}^{1600K}$=-352,6 | | |
| *1650K=fusion* | $\Delta H_{fus\ FeO}^{1650K}$=24,1 | | |
| *1812K=fusion* | | $\Delta H_{fus\ Fe2O3}^{1812K}$=87 | |
| *1870=fusion* | | | $\Delta H_{fus\ Fe3O4}^{1870K}$=138 |

Tableau 1 : Enthalpie de formation des différents oxydes [7]

La répartition des oxydes de différentes natures se fait suivant la température et le pourcentage d'oxygène en présence. L'apparition des différentes phases d'oxydes comme le wüstite, l'hématite et la magnétite sera détaillée sur le diagramme de phase fer-oxygène dans la partie 3.2.1.

Dans la partie suivante nous évoquerons le processus d'oxydation du métal et en particulier de l'acier avec l'oxygène, puis sur l'oxydation des métaux en phase solide et liquide.

## 3.1 Processus d'oxydation

L'oxygène dans l'environnement ou dans des bouteilles sous pression se trouve sous forme diatomique. La réaction d'oxydation se passe entre l'oxygène monoatomique et les atomes de fer. C'est pourquoi l'oxygène diatomique passe par processus de dissociation physico-chimique avant d'entrer en réaction avec les atomes métalliques. L'énergie de dissociation de la molécule de dioxygène est de *($\Delta H_{0=0}$=497*

*kJ/mol)*. Le processus d'oxydation se produit en deux étapes, l'adsorption physique puis l'adsorption chimique (Figure 8).

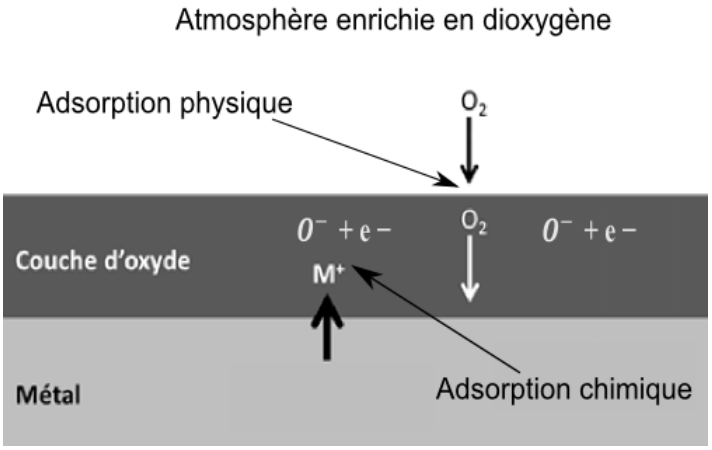



Figure 8 : Processus d'oxydation

- *Adsorption physique*

Dans un premier temps, l'oxygène diatomique est adsorbé physiquement à la surface du métal ou de l'oxyde sous l'effet de la pression du gaz Figure 8.

$$\frac{1}{2}O_2(\mathrm{g}) \rightarrow \frac{1}{2}O_2(\mathrm{ad})$$

- *Adsorption chimique*

Dans un deuxième temps l'oxygène diatomique se dissocie en oxygène atomique. En cédant des électrons les atomes d'oxygène ionisés seront chimiquement absorbés par la matrice métallique. Ce processus est nommée adsorption chimique ou chimisorption. En effet la couche d'oxyde métallique qui croit progressivement a la surface est du a la liaison chimique entre les ions d'oxygène et les ions métallique (Figure 8).

$$O(\mathrm{ad}) \rightarrow O^-(\mathrm{ch}) + \mathrm{e}-$$

Cette réaction d'oxydation en deux étapes d'adsorption : une fois physique et une fois chimique donne naissance à une couche d'oxyde qui croît progressivement dans une couche proche de la surface tant que les conditions physico-chimiques le permettent.

La réaction d'oxydation pourra avoir lieu soit à l'interface oxyde-métal dans le cas où l'oxygène diffuse plus vite que le métal, soit elle se passe à la surface de l'oxyde si les atomes de métal diffusent plus vite que l'oxygène.

## 3.2 Oxydation en phase solide

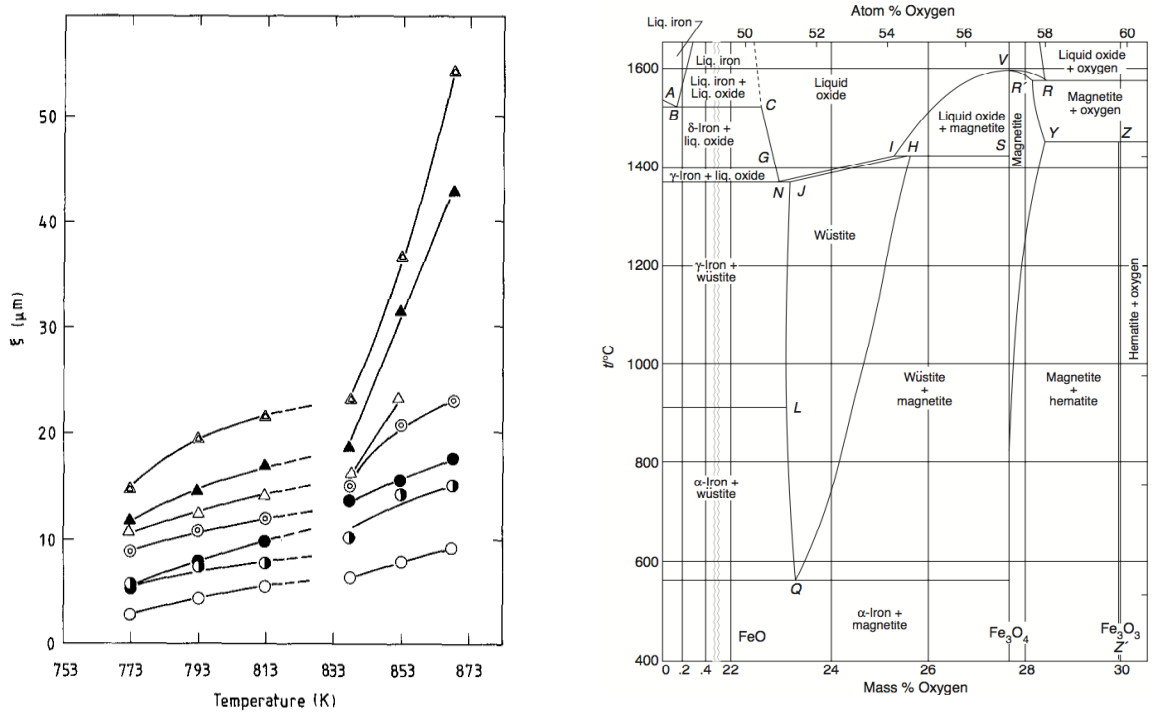
Précédemment, nous avons évoqué à plusieurs reprises que l'oxydation se passe même à température ambiante. L'augmentation de la température favorise le taux d'oxydation. Plusieurs recherches [7-11] que nous détaillerons dans la suite, ont montré qu'il existe une température critique permettant une augmentation brusque de l'oxydation. Nous appellerons la température correspondante, température d'inflammation. Dans cette partie nous allons identifier la température d'inflammation en phase solide du fer et nous les comparera à celle de l'acier.

### *3.2.1 Oxydation du fer*

Lors du processus d'oxydation du fer, trois phases sont susceptibles de se former : l'hématite $Fe_2O_3$, la magnétite $Fe_3O_4$ et la wüstite FeO.

Le déroulement de l'oxydation en phase solide a été décrit par plusieurs auteurs dans la littérature comme R.Y. Chen [8] et K. Gemma [9] [10][11][12]. La température d'inflammation dépend de la pression d'oxygène de l'atmosphère ambiante, du rapport volume/surface de contact avec l'atmosphère. En dessous de 840K, Figure 9, la couche d'oxyde créée comporte uniquement deux phases une couche extérieure d'hématite et une couche interne de magnétite. L'augmentation de la température reste lente et voire négligeable quand il s'agit de matériaux massifs. Ces températures sont données pour des matériaux massifs. Dans le cas de petites particules, la température d'inflammation sera inférieure de l'ordre de 590K.

A partir de la température de 840K une couche de wüstite intérieure [10] se forme et vient s'ajouter aux deux couches existantes d'hématite et de magnétite. Au-delà de cette température une augmentation du taux d'oxydation se produit.




*(a)* (b)

Figure 9 : (a) Épaisseur de la couche d'oxyde formée sur du fer pur dans la plage de température de 773 à 868 K pendant 1,5 (courbe inférieure) à 54 s (courbe supérieure)[9] ; (b) diagramme de phase fer-oxygène

Au-delà de 840K et jusqu'à 1 523 K, les trois phases d'oxydation restent présentes [10] : une couche extrêmement mince d'hématite développée à l'extrême surface, une couche intermédiaire mince de magnétite et une couche de FeO intérieure de plus en plus épaisse [13]. Cette proportion des phases d'oxyde reflète le fait que le coefficient de diffusion du fer dans FeO est plus grand que celui de la magnétite et que la diffusion de l'oxygène et du fer à travers la couche d'hématite est extrêmement lente. L'augmentation du taux d'oxydation se traduit bien évidement par une augmentation de température, générée par la réaction exothermique d'oxydation entre le fer et l'oxygène.

### *3.2.2 Oxydation de l'acier*

L'acier, appelé aussi acier doux d'utilisation courante dans le secteur industriel est constitué principalement de fer et d'une faible teneur de carbone variant entre 0,008% et 2% et d'autres additifs.

L'oxydation de l'acier est assez similaire à celle du fer, bien que présentant quelques particularités comme par exemple la décarburation de l'acier qui se met en place à une température d'environ 973K. La décarburation se manifeste par le dégagement de

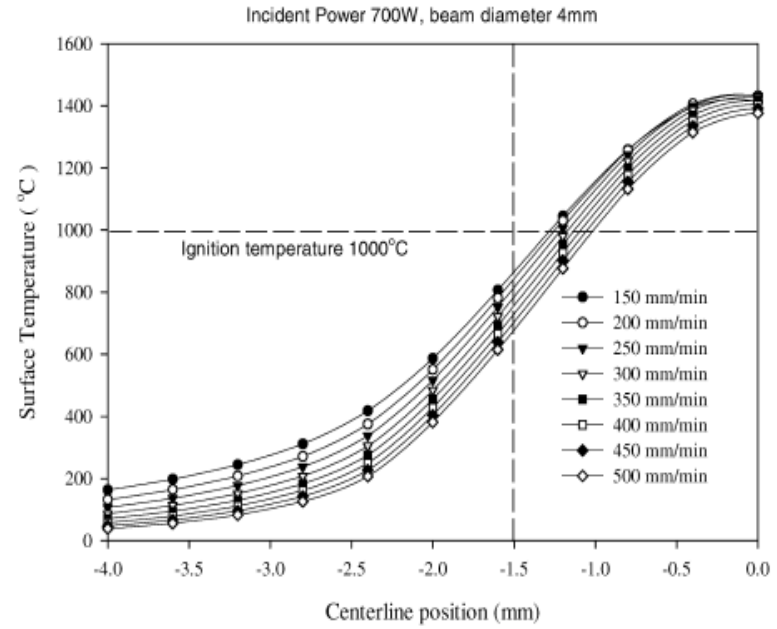
monoxyde de carbone de la zone d'interaction [10]. Des facteurs comme la température, le taux d'oxygène et la teneur en carbone peuvent avoir un rôle plus ou moins important sur la décarburation. Ce phénomène de décarburation peut avoir un rôle non négligeable sur l'oxydation :

1- en formant une couche gazeuse limitant ou isolant la surface de l'atmosphère environnante
2- en fissurant la couche d'oxyde par accumulation du monoxyde sous la surface au cours du dégazage du liquide.

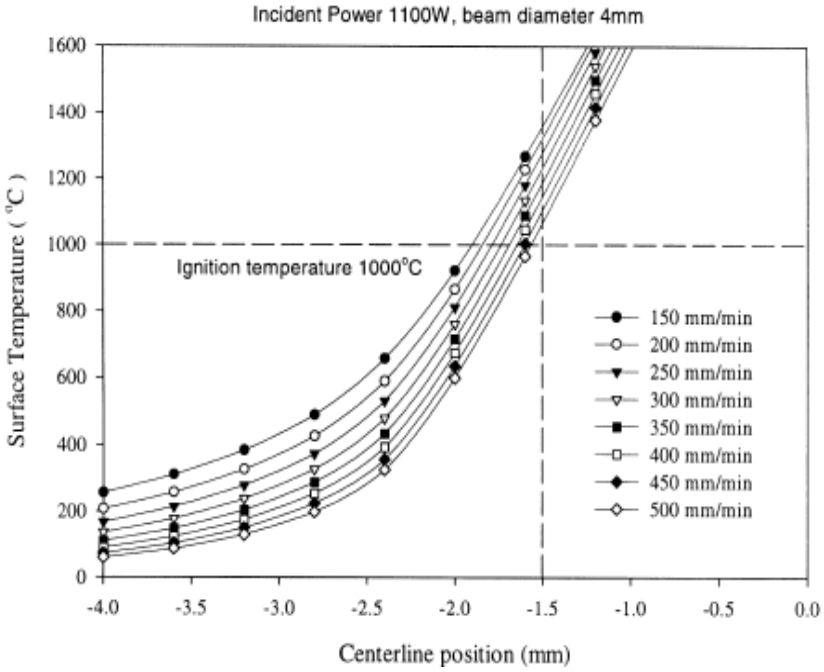
Le taux d'oxydation de l'acier à des températures entre 870K et 1070K, est légèrement plus faible que celui du fer [8]. Ce taux augmentent d'une manière importante à partir de 1120K [14] ce qui signifie que l'atteinte des conditions d'allumage et de combustion devient plus rapide.

## 3.3 Oxydation de l'acier en phase solide jusqu'à la liquéfaction (condition « Lasox »)

W. O'Neill et J.T. Gabzdyl [2] en 2000, ont réussi à obtenir une excellente qualité de coupe sur des structures atteignant jusqu'à 50mm d'épaisseur, en utilisant des puissances inférieures à 1 kW. Leur principal objectif était de minimiser la puissance laser fournie, c'est-à-dire de trouver la température la plus basse permettant d'amorcer la découpe par laser sous oxygène. Le diamètre du faisceau laser, utilisé dans leur étude est de 4mm à la surface de l'acier avec un jet d'oxygène de diamètre 3mm. Ils ont pu identifier une condition qu'ils ont appelée condition « Lasox » correspondant à la température d'initiation de la combustion de l'ordre de 1273K pour une pression de réservoir d'oxygène de 8 bars [2]. Lorsque la température de l'acier atteint 1273K en présence d'oxygène, la condition « Lasox » est atteinte et le rendement de la réaction d'oxydation devient très élevé ce qui provoque l'allumage de l'acier puis la combustion. Si la condition Lasox, la découpe n'est pas effective.




*(a)*




*(b)*

Figure 10 : Température en surface de l'acier de 20mm d'épaisseur en fonction de la vitesse (a) pour une puissance incidente de 700W, (b) pour une puissance incidente de 1100W[2].

On considère que le centre de la tache focale de 3mm est positionné en x=0. Les bords de la tache focale sont à x1=-1,5 et x2=+1,5. La tache focale remplit donc les conditions suivantes : x1= -1,5 < x=0 < x2=+1,5.

Les graphiques de la Figure 10 représentent la température en surface de l'acier pour différentes vitesses de déplacement. Le centre du faisceau laser est à x=0, les

valeurs négatives indiquant des déplacements dans le sens de la découpe. Le point d'allumage est représenté sur chaque graphique à 1000°C (1273K) de même que le bord de l'empreinte du jet de gaz ($x_1$=-1,5 mm). La Figure 10 (a) indique les températures en surface pour P=700W et pour des vitesses de découpe dans la plage de 150 à 500mm/min. Dans ce cas, on peut voir qu'au bord du jet de gaz, la surface n'a pas atteint le point d'allumage pour les vitesses choisies. La condition « Lasox » n'a pas été atteinte et le processus de découpe n'a pas démarré.

L'augmentation de la puissance à 1100W, comme le montre la figure 3, modifie considérablement les conditions. À 1100W, la condition « Lasox » est satisfaite pour toutes les vitesses, et la découpe de l'acier se produit.

Pour conclure sur ce paragraphe, W. O'Neill et J.T. Gabzdyl [2] ont conclu que la combustion peut démarrer en phase solide dans l'acier à partir d'une température de de surface de 1273K.

# 4 Mécanisme de l'oxycoupage

Le procédé d'oxycoupage consiste à préchauffer dans un premier temps la pièce métallique à découper en la portant jusqu'à la température d'allumage. Un jet d'oxygène sous pression coaxialement à la source de chaleur, est dirigée vers la zone chauffée. La température de la zone chauffée augmente principalement grâce l'apport d'énergie de la source jusqu'à ce que la combustion se mette en place. La quantité de chaleur générée par les réactions exothermiques contribue alors de façon majoritaire à la fonte du métal qui sera éjecté par le même écoulement d'oxygène, créant une saignée de découpe.

L'oxycoupage conventionnel utilise un chalumeau dont la flamme de chauffe (provenant de la combustion d'un mélange de gaz) localisée sur la surface du métal Figure 2.

L'oxycoupage par laser suit le même principe que l'oxycoupage conventionnel mais cette fois-ci la source de chaleur provient d'un faisceau laser focaliser à la surface du métal (Figure 11).

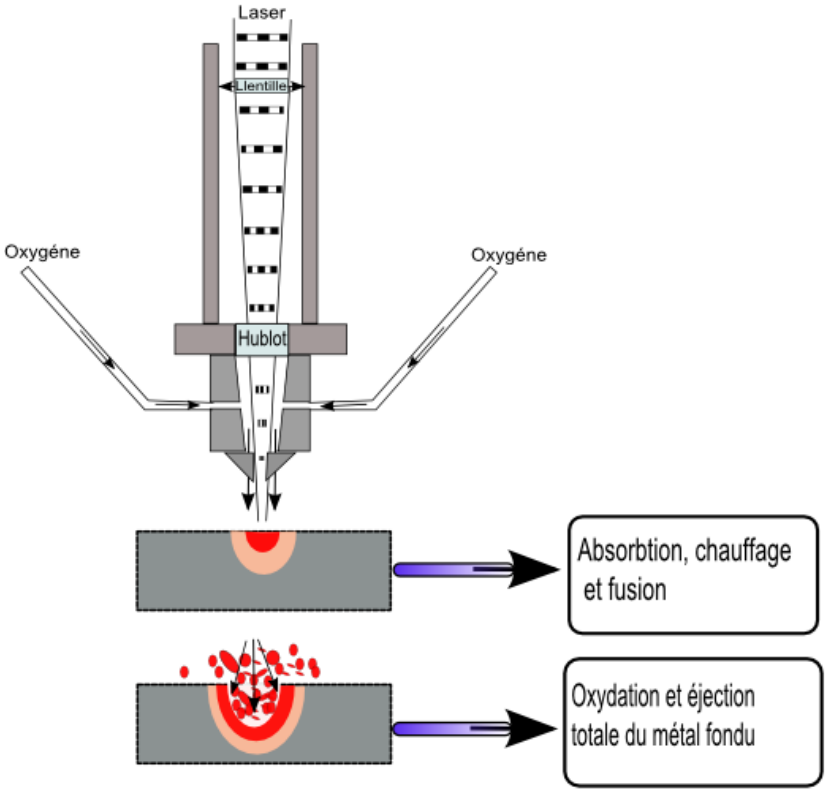



Figure 11 : Mécanisme d'oxycoupage et initiation de l'oxycoupage par laser

## 4.1 Oxydation de l'acier en phase liquide

Au fil de la découpe une couche d'oxyde liquide de quelques dizaines de microns se crée sur les faces extérieures de la saignée au-dessus de l'acier solide (voir Figure 12). L'oxygène se trouvant abondamment à la surface de l'oxyde liquide au niveau de l'interface 4 diffuse dans l'oxyde liquide saturé (FeO+O2=>phase L2) et réagit avec le fer au niveau de l'interface 3 (Fe+FeO→ phase L1) [15] (Figure 12).

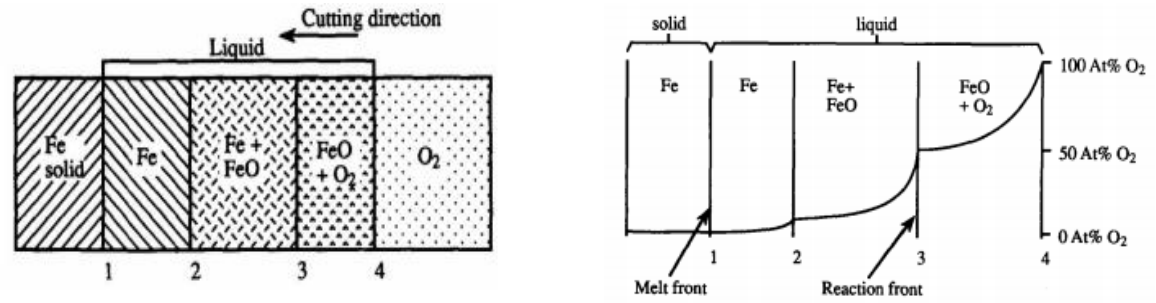


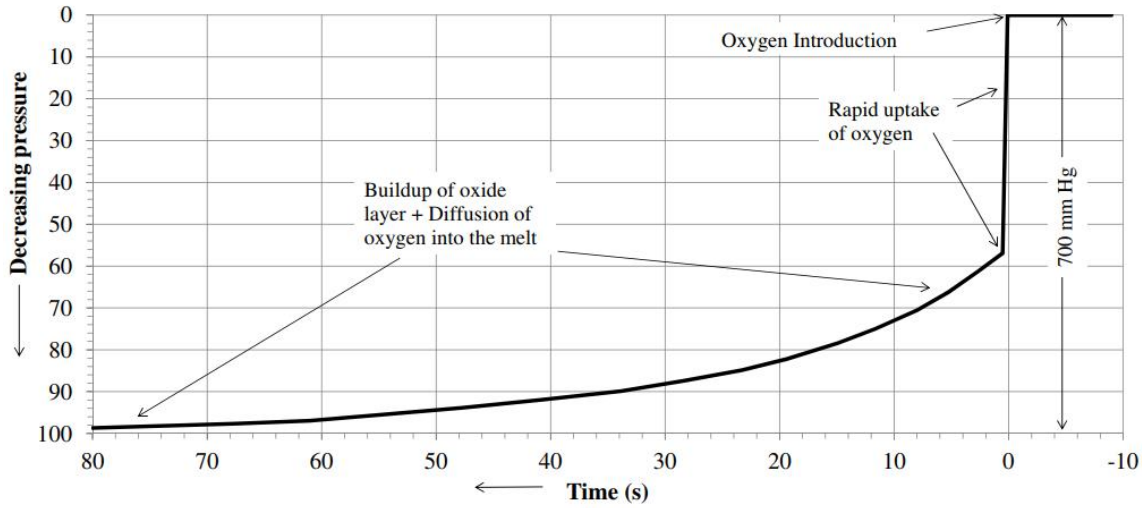

Figure 12 : Composition de la couche d'oxyde dans la saignée de découpe par laser et oxygène [15]

Le processus d'oxydation du fer et de l'acier en phase liquide a été abordée dans différents travaux dans la littérature. Plusieurs auteurs ont abordé la physique d'oxydation du fer et de l'acier en phase liquide, notamment dans [16-29] . Dans cette

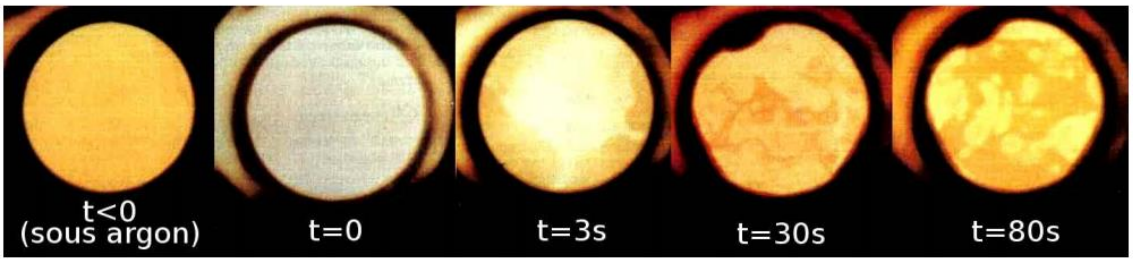
partie nous présentons d'une manière synthétique les différentes étapes de l'oxydation en phase liquide en se basant sur l'illustration de la Figure 12:

i. Arrivée de l'oxygène à la surface d'oxyde liquide au niveau de l'interface 4
ii. Adsorption de l'oxygène sous forme moléculaire à la surface du liquide, dans la couche entre les interfaces 3 et 4
iii. Rupture de la liaison de la molécule de dioxygène qui se transforme en oxygène monoatomique ionisé au niveau de l'interface 3)
iv. Diffusion de l'oxygène monoatomique ionisé à travers la couche d'oxyde $FeO+O_2$ vers l'interface 3
v. Incorporation de l'oxygène dans la phase Fe+FeO (entre l'interface 2 et 3) par réaction d'oxydation ayant lieu au niveau de l'interface 3.

Lorsque la réaction de combustion progresse, le liquide métallique contient de plus en plus de FeO liquide en surface. Différents travaux ont montré que l'adsorption dissociative aura lieu au niveau d'une surface de FeO liquide a des vitesses de réaction différentes. Emi et al [18] ont étudié le changement de la cinétique de l'adsorption dissociative de l'oxygène sur un morceau de fer en dessus de son point de fusion placé dans une enceinte sous argon. Une fois que le morceau de fer dépasse la température de fusion, l'argon est vidé de l'enceinte et sera remplacé rapidement par de l'oxygène. La diminution de la pression d'oxygène mesurée de 3 à 1,3 bar a été suivie durant les essais, et correspond à l'absorption de l'oxygène par le bain fondu durant la fusion. Durant les essais Emi et al [18] observent deux phases différentes d'adsorption de l'oxygène par le liquide. Sur une première période d'environ 15ms Figure 13 (a), l'absorption de l'oxygène par le liquide et très importante et ils remarquent que le volume de l'oxygène absorbée est proportionnel à la pression de l'oxygène et à la surface de l'interface métal/liquide. Durant ces 15ms, ils notent une augmentation d'une température d'environ 400K. Durant la deuxième phase, Figure 13 (a), (t >15ms) l'absorption de l'oxygène continue mais avec un taux plus faible proportionnel a $\sqrt{P_{O_2}}$. Emi et al expliquent que la diminution du taux d'absorption est due à la formation d'une couche d'oxyde de fer liquide qui couvre le métal et qui limite la diffusion de l'oxygène.




(a)




(b)

Figure 13 : (a) Cinétique d'absorption de l'oxygène par une surface de fer fondue ; (b) images correspondantes

Emi et al [18] ont observé par caméra rapide la formation de la couche d'oxyde en surface du bain liquide (Figure 13 (b)). Ils remarquent clairement que la vitesse d'absorption de l'oxygène au niveau de la surface de fer est beaucoup plus importante qu'au niveau de la surface FeO. Ils expliquent cela par le fait que l'absorption est limitée par l'adsorption dissociative et l'incorporation de l'oxygène à la surface de l'oxyde de fer liquide. Cette conclusion est en accord avec les travaux de Lange (1938) [19] et Fortunatov et Mikhailovskaya (1940) [20].

Nous concluons que le processus de combustion doit avoir un minimal d'apport d'oxygène pendant au moins 15ms afin de se mettre en place. Cela veut dire que même si on atteint la liquéfaction du métal dans un temps court de l'ordre inférieure à 15ms la combustion ne se met pas en place car il faut aussi assurer un temps d'oxygène d'au moins 15ms sur la surface liquide. Nous verrons dans le chapitre 4 que nous identifions un temps d'au moins 10ms en dessous duquel aucun paramètre permet de déclencher la combustion.

# 5 Température en oxycoupage

Les valeurs de température de surface du métal lors de l'oxycoupage sont mal connues. Il existe une grande dispersion dans les valeurs proposées dans la littérature. La température de la combustion de barreaux métalliques en acier sous oxygène a été mesurée par Wells en 1955 [21], qui a trouvé une température de surface d'environ 1900K. Wells a également réalisé des mesures de température sur un procédé de découpe par laser assisté par oxygène et trouve une température entre 1843K et 1903K. Des valeurs de température variant entre 1923K et 2423K, similaires à celles de Wells ont été identifiées en oxycoupage par Miyamoto et Maruo [22].

Miyamoto et Maruo [22] indiquent également que la température dépend de la vitesse de découpe, par exemple la température à une vitesse de 10m/min est de 2423K, tandis qu'elle chute à 1923K pour une vitesse de 2m/min. Tandis que dans notre cas qu'on le montrera dans le chapitre 3, on remarque un changement de régime de découpe (volume de saignée) en ayant une température constante de l'ordre de 2100K à différentes vitesses.

D'autres essais de mesure de température ont été réalisés par Grosse et Conway [23] lors de leurs travaux sur la combustion de l'acier évaluant la température de surface de 3273K à 1bar. Kurtz et al.[24], ont quant à eux trouvé une valeur de 4200K à 16bar d'oxygène, alors que Sun et al.[25], proposent une température de combustion de l'acier de 2285K. Steinberg et al.[26] trouvent des températures de 3400K, 4047K et 5021K à des pression de 1, 10 et 100bar respectivement.

## 5.1 Température à éviter en oxycoupage

L'oxyde de fer se liquéfie à $T_{fusion\ FeO}$ = 1600K, et ne possède pas de phase vapeur. La température d'évaporation du fer est de l'ordre de 3200K [27]. Si la température de l'oxyde de fer liquide continue à augmenter jusqu'à une température de 3660K à pression atmosphérique, ce dernier se dissocie en Fe et $O_2$. D'après Powell et Petring [27], lorsque cela se produit, l'énergie de la « réaction d'oxydation » ne peut pas être disponible comme un apport d'énergie à la zone de découpe, ce qui rend la découpe moins efficace. En effet, ce phénomène de dissociation entre alors en compétition avec le phénomène d'oxydation. Les deux réactions étant antagonistes et

consommant/fournissant la même quantité d'énergie, il apparaît clairement qu'il est contre-productif d'atteindre cette température. La température optimale se situe au-dessus de la température de fusion pour favoriser l'oxydation mais très en dessous de celle de dissociation.

# 6 Découpe laser assistée par oxygène

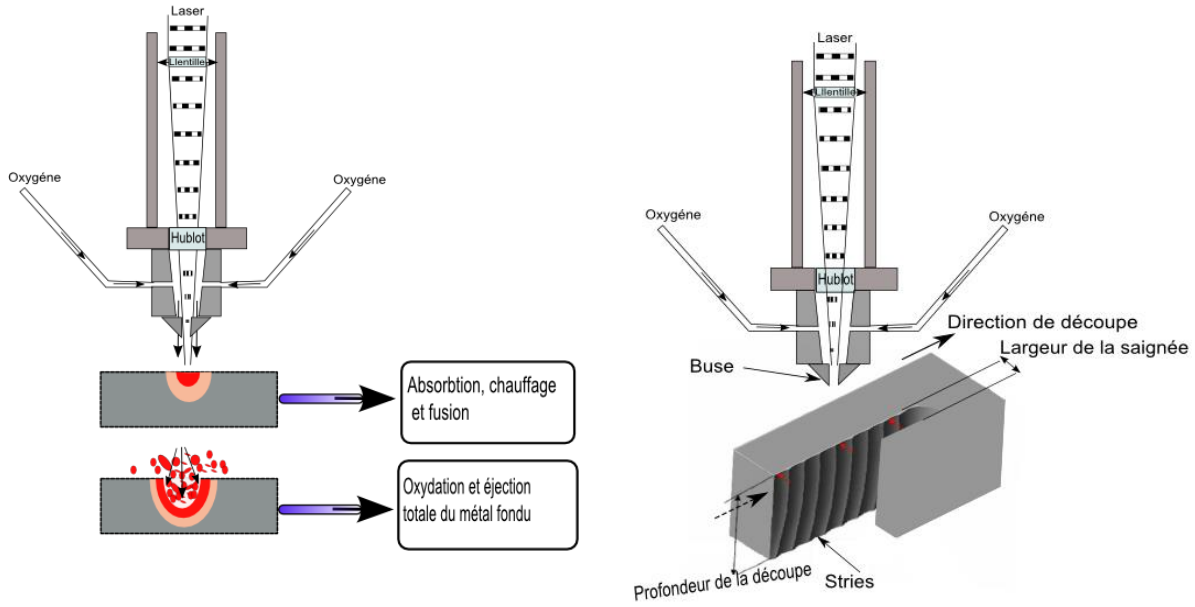
La découpe laser assistée par jet d'oxygène consiste à focaliser un faisceau laser sur la surface à découper en présence d'un jet de dioxygène coaxiale. La surface opaque soumise au faisceau incident absorbe, et réfléchit en partie le rayonnement. L'augmentation de température due à l'absorption du rayonnement par la surface irradiée, entraîne une augmentation locale de la température. La présence de dioxygène en contact avec la surface chauffée ou fondue induit la réaction d'oxydation suivante : $Fe + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow FeO$, libérant une enthalpie de $\Delta H_{FeO}^{298K}$=-272 kJ/mol, $\Delta H_{FeO}^{1600K}$=-352,6 kJ/mol et $\Delta H_{fus\ FeO}^{1650K}$=24,1 kJ/mol. Ainsi, l'énergie dégagée par la combustion s'ajoute à l'énergie apportée par le laser pour rendre la découpe plus efficace. Dans les découpes de qualité, l 'énergie de la combustion peut atteindre jusqu'à 60% de l'énergie utile pour la découpe sur les aciers et environ 90% pour les métaux réactifs comme le titane [28] [29]., tandis que dans notre cas en oxycoupage (saignée large ) l'énergie de combustion fournie environ 97% de l'énergie global du système. La valeur de 97% est obtenue en prenant en compte une saignée de largeur 7mm, longueur 20mm et épaisseur 20mm (comme dans notre cas) en utilisant uniquement 280J en énergie laser.

Dans notre cas la puissance nécessaire peut être calculée d'une manière approchée par la relation suivante :

$$\boldsymbol{P = \rho V S\left(C_p \Delta T + L_f\right)} \qquad \textit{Équation 27}$$

Avec *m[Kg]* : la masse du métal éjecté qui correspond au volume de la saignée, $C_p$ *[J.kg-1K-1]* la chaleur spécifique de l'acier, *ΔT [K]* : la différence de température entre l'ambiante et la température du procédé (mesuré en chapitre 3), $S$ : la section de la saignée, et $L_f[J/g]$*:* l'enthalpie de fusion, V la vitesse de découpe.

L'application numérique pour une section de 5x20mm, une vitesse de 1mm/s une température de 2000K est d'environ 500W. Dans cette configuration la répartition de la puissance fournie entre laser et oxydation est de 25/75%.




*(a)* (b)

Figure 14 : Découpe laser (a) initiation (b) découpe

Dans des conditions normales de découpe laser, l'épaisseurs atteinte est de 15mm d'acier pour 2kW [2]. Au-delà de 25 mm d'épaisseur, l'utilisation des lasers classiques est sévèrement restreinte. Dans le cas de certaines applications particulières (comme dans le cas de la démolition) les sections à découper peuvent notamment atteindre les 200mm dans les cuves des centrales thermique.

## 6.1 Intérêt de l'oxygène dans la découpe laser

L'apport d'oxygène associé à une source thermique (laser) à la surface du métal à découper permet d'induire une réaction exothermique de combustion de fer et d'améliorer l'efficacité de la découpe. La réaction se met en place dès l'interception du faisceau avec la surface de l'échantillon/tôle/plaque. L'efficacité est maximale à partir du moment où le point de fusion est atteint car la diffusion de l'oxygène dans le liquide est beaucoup plus élevée, et la combustion peut vraiment avoir lieu. Ainsi, un terme

source d'énergie supplémentaire est ajouté au bilan énergétique, comme le montre la formule suivante :

L'énergie globale du système sera exprimée sous forme suivante :

$$\boldsymbol{AP_L + P_R = \rho w d V (C_P \Delta T + L_m) + P_{loss}} \qquad \textbf{Équation 28}$$

Avec : A : l'absorptivité du matériau (sans dimension), $\lambda$ : longueur d'onde du rayon incident *[m],* $P_L$ : la puissance du laser*[W]*, $P_R$ : la puissance de la réaction d'oxydation exothermique du fer *[W],* $\rho$ : la masse volumique du matériau *[kg/m3],* $w$ : largeur de la saignée *[m],* $d$ : épaisseur de la pièce *[m],* $V$ : vitesse de découpe *[m/s],* $C_P$ : la chaleur spécifique du matériau *[J/kg.K],* $\Delta T$ : écart de température à la fusion *[K],* $L_m$ : chaleur latente de fusion *[J/kg]*, et $P_{loss}$ : puissance perdue dans le matériau par conduction *[W].*

Comme dans tous les systèmes thermiques, des pertes d'énergie apparaissent sous forme de convection (normale ou forcée), de conduction et de rayonnement. La conduction dans la plaque à découper est considérée comme la source de perte principale. Les pertes convectives et par rayonnement sont considérées négligeables du fait de l'épaisseur importante de métal à découper. Ainsi les pertes thermiques peuvent être évaluées par la formule suivante :

$$\boldsymbol{P_{loss} = 2\ (\rho\ C_P \Delta T_{loss} V L d)} \qquad \textbf{Équation 29}$$

où $P_{loss}$est l'énergie perdue par conduction, $d$ est l'épaisseur de la pièce, $V$ est la vitesse de découpe et $L$ la longueur de la fente.

L'ensemble de la surface sur laquelle se produit la réaction d'oxydation du fer génère une énergie $P_R$.

La réaction d'oxydation est la suivante : $Fe + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow FeO$.

La Figure 15 (a) [27] illustre le profil de température généré par le laser sur la plaque à découper. La Figure 15 (b) montre l'apport énergétique généré par la réaction d'oxydation.

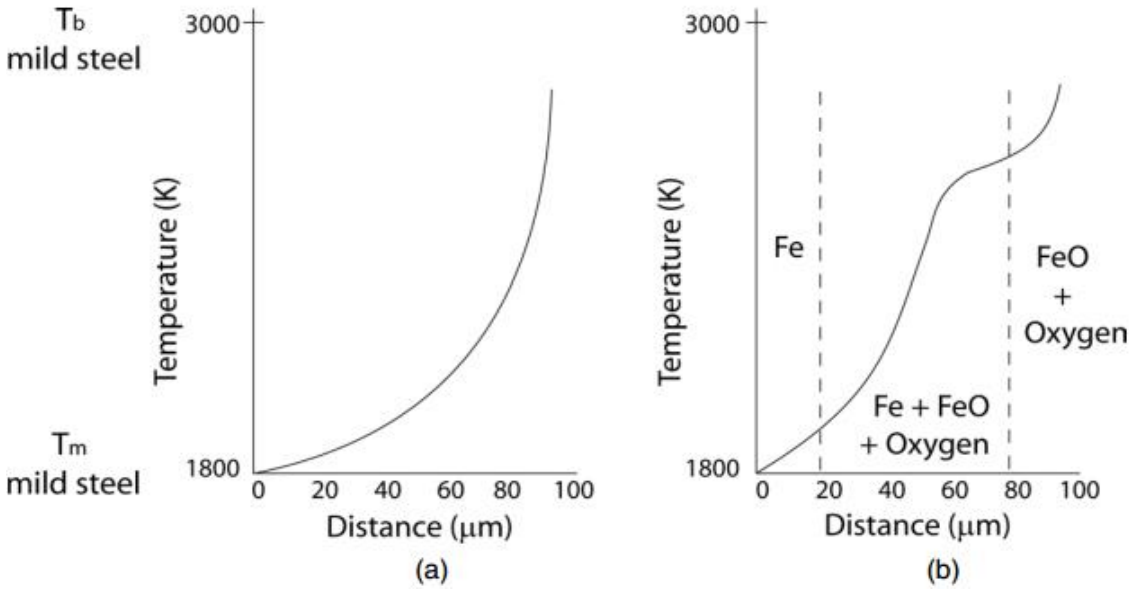



Figure 15 : Profil de température généré par le laser (a), profil de température générée par la réaction d'oxydation (b) [27]

L'énergie $P_R$ peut-être évaluée : soit en supposant que la quantité d'oxygène disponible dans la zone d'interaction Po2) réagit entièrement selon la réaction (Fe+O->FeO), soit en supposant que la totalité de la quantité de fer fondu $P_{Fe}$ réagit entièrement.

$$P_{O_2} = (\pi/4)\, w^2\, v_{O_2}\, \rho_{O_2}\, E_{ox}/\, m_{O_2} \qquad \textit{Équation 30}$$

$$P_{Fe} = \frac{1}{2}\,(w\, L\, V\, \rho\; E_{ox}/\, m_{Fe}) \qquad \textit{Équation 31}$$

Où $w$ est la largeur de la saignée *[m],* L est la longueur de la saignée *[m],* $v_{O_2}$ est la vitesse de l'oxygène *[m/s],* $\rho_{O_2}$ est la densité de l'oxygène en surface *[kg/m³],* $E_{ox}$ est l'énergie d'une seule réaction d'oxydation *[J/mol],* $m_{O_2}$ est la masse molaire de l'oxygène *[kg/mol],* $m_{Fe}$ est la masse molaire du Fer *[kg/mol].*

# 7 Classification des paramètres influents sur la découpe

Le nombre important des paramètres intervenants dans le procédé (donne un chiffre approximé ici) et leur influence, implique un grand nombre de configurations d'essais. Pour limiter ces configurations, nous utiliserons la simulation numérique. L'influence des paramètres opératoires sur le procédé est présentée ci-dessous :

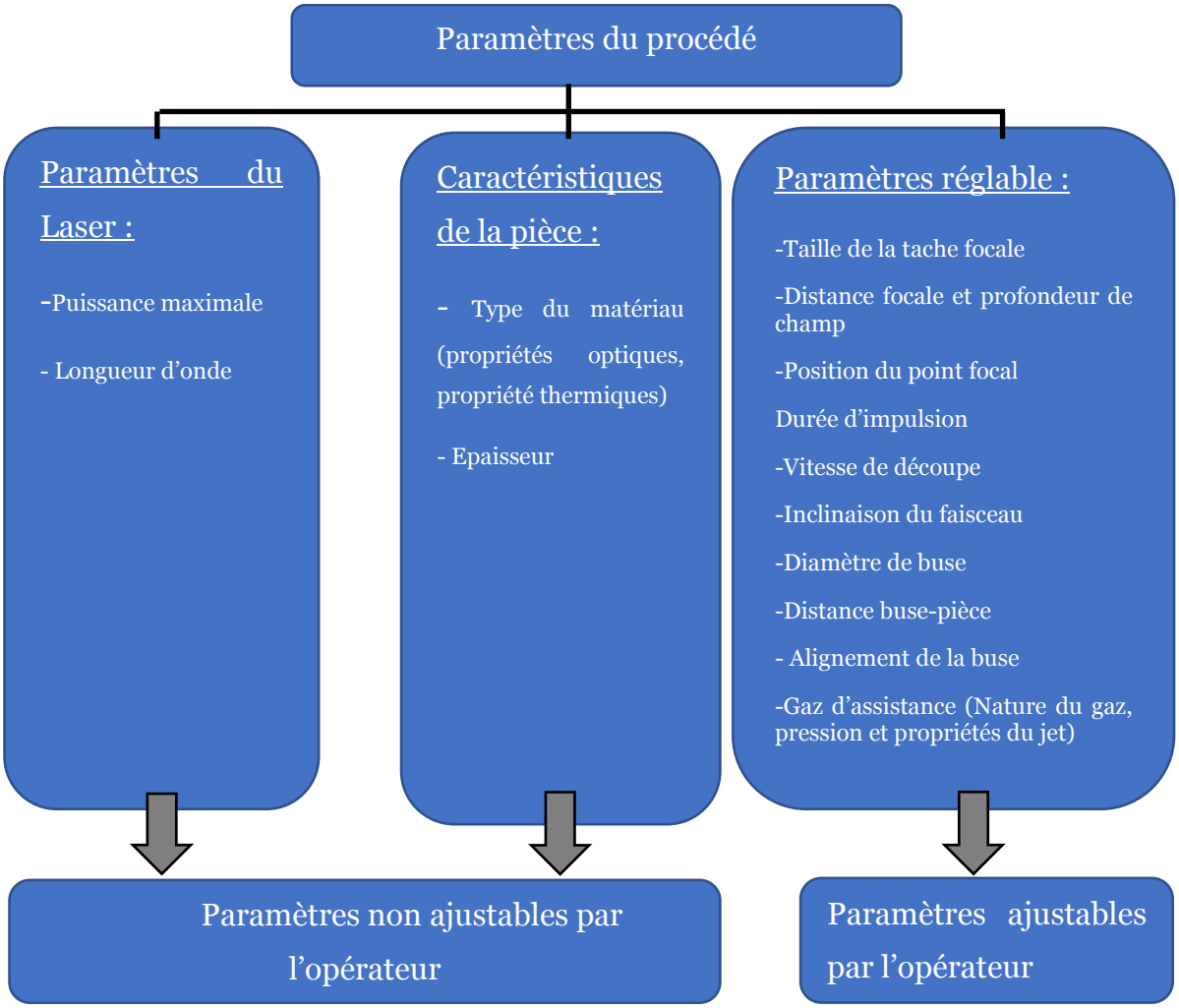



Figure 16 : Paramètres de découpe laser assisté par oxygène

Parmi ces paramètres, une première distinction peut être faite entre les paramètres ajustables par l'opérateur et ceux intrinsèques au procédé et au matériau. Certains ne sont pas ajustables par l'opérateur comme la qualité du faisceau et la longueur d'onde, la nature et l'épaisseur du matériau à découper et d'autres le sont comme les paramètres liés à la pièce et d'autre le sont comme la puissance laser, la vitesse de découpe, la distance focale, la position du point focal, le diamètre de la buse, la pression et le type de gaz.

## 7.1 Paramètres du laser

Les paramètres liés au laser comme la puissance maximale fournie par le laser et la longueur d'onde sont des paramètres non réglables par l'opérateur.

### *7.1.1 La puissance maximale*

La puissance laser correspond à l'énergie du flux de photon émis par unité de temps.

On retrouve deux types d'émission laser : une émission continue et une émission pulsée. Généralement un laser est caractérisé par :

a) Sa puissance moyenne $P_m$ [W] : pour un laser impulsionnel, c'est l'énergie E[J] des photons émis dans une impulsion multipliée par la cadence des impulsions (ou la fréquence *« F» [Hz])*.

$$\boldsymbol{P_m = E.F} \qquad \textit{Équation 32}$$

b) Sa puissance crête "$P_{cret}$" : c'est l'énergie E [J] émise lors d'une impulsion divisée par sa durée *τ[s]* (ou temps d'éclairement)

$$\boldsymbol{P_{cret} = \frac{E}{\tau}} \qquad \textit{Équation 33}$$

c) La taille du faisceau : la taille du faisceau à la sortie de la fibre et caractéristique du laser utilisé.

d) L'intensité ou $I\,[MW.cm^{-2}]$: c'est l'énergie d'un flux de photons déposés par unité de surface :

$$\boldsymbol{I = \frac{4E}{\pi\,(\tau\, D^2)}} \qquad \textit{Équation 34}$$

D'une manière générale, l'augmentation de la puissance laser nous permet de couper plus vite et plus profondément car le flux de photons envoyé devient plus important.

## 7.2 Caractéristique de la pièce à découper

La nature des matériaux doit être prise en compte afin d'utiliser le laser adéquat. En effet la variation de l'interaction laser-matière d'un matériau à l'autre est due au fait que les propriétés optiques à une longueur d'onde donnée changent selon les matériaux (notamment l'absorptivité au rayonnement).

### *7.2.1 Nature des matériaux et propriétés optiques*

Le modèle de Drude permet de faire le lien entre le comportement des électrons en présence d'un faisceau laser et les coefficients dépendant de la longueur d'onde de réflexion, de transmission et d'absorption. Néanmoins d'autres éléments interviennent dans l'évolution de ces coefficients, comme : la température du matériau, la phase du matériau (liquide, solide, vapeur), ou la rugosité de surface.

La Figure 17 illustre la variation de la réflectivité de quatre matériaux différents : l'aluminium, le nickel, le cuivre et l'acier. On remarque que la réflectivité des quatre matériaux augmente avec la longueur d'onde (entre 0,2 et 10 µm) ce qui signifie qu'ils absorbent davantage les rayonnements à courte longueur d'onde que ceux aux longueurs d'onde plus élevées [29]

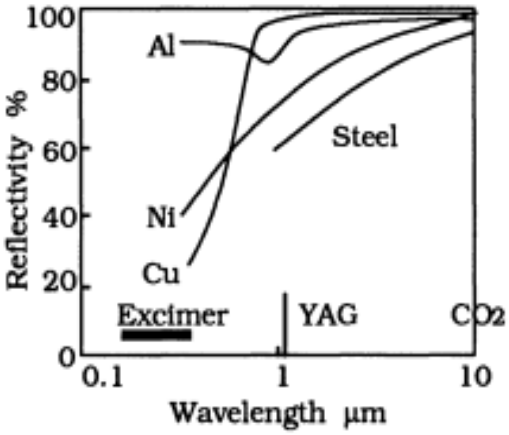



**Table 2.2.**

Complex refractive index and reflection coefficient for some materials to 1.06µm radiation (8).

| Material | k | n | R |
|---|---|---|---|
| Al | 8.50 | 1.75 | 0.91 |
| Cu | 6.93 | 0.15 | 0.99 |
| Fe | 4.44 | 3.81 | 0.64 |
| Mo | 3.55 | 3.83 | 0.57 |
| Ni | 5.26 | 2.62 | 0.74 |
| Pb | 5.40 | 1.41 | 0.84 |
| Sn | 1.60 | 4.70 | 0.46 |
| Ti | 4.0 | 3.8 | 0.63 |
| W | 3.52 | 3.04 | 0.58 |
| Zn | 3.48 | 2.88 | 0.58 |
| Glass | 0 | 1.5 | 0.04 |

Figure 17 : La variation de la réflectivité des matériaux en fonction de la longueur d'onde (M.Stenn W. , 1991)

Dans le cadre de la découpe laser, on préfèrera donc utiliser des lasers de forte puissance à longueur d'onde courte (augmentation de l'absorptivité) afin d'augmenter la quantité d'énergie effectivement transmise au métal[30]. Mais d'un point de vue sécurité il est souhaitable d'utiliser des grandes longueurs d'onde (Figure 3). Donc le choix d'une longueur d'onde d'un laser pour l'utilisation dans un milieu ouvert est un compromis entre courte longueur d'onde (plus absorbant par le métal et plus efficace) et grande longueur (plus sécurisé et facilement atténuable par l'environnement).

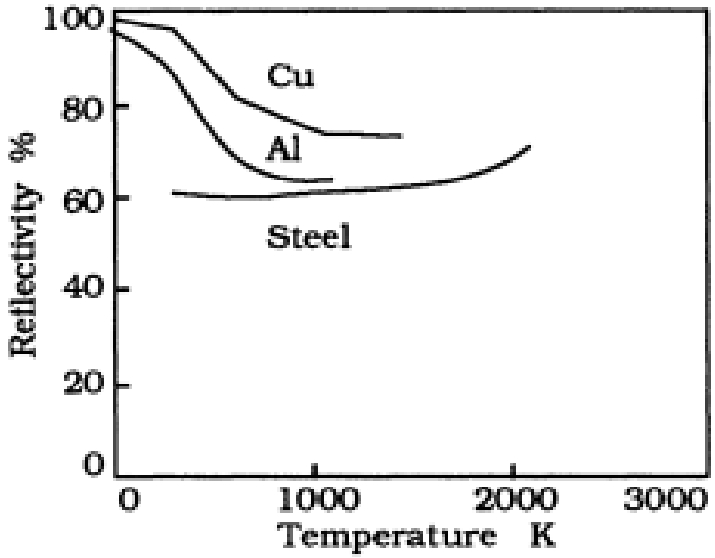



Figure 18 : Réflectivité en fonction de la température (longueur d'onde du faisceau incident de 1,06µm)[29]

L'absorptivité dépend également de la température du matériau[29]. La Figure 18 illustre la diminution de la réflectivité (réflectivité =1 - absorptivité) du cuivre, l'aluminium et de l'acier lorsque la température augmente. On remarque que la réflectivité du cuivre et de l'aluminium diminue quand la température augmente tandis que c'est l'inverse sur l'acier : plus la température de l'acier augmente durant la découpe moins il devient absorbant du faisceau laser.

### *7.2.2 Épaisseur de la pièce à découper*

L'épaisseur de la découpe résulte à la fois de la vitesse de découpe, de la puissance du laser et de l'oxydation, elle-même largement influencée par le gaz d'assistance (pureté, pression, vitesse…).

## 7.3 Paramètres du procédé

Les paramètres du procédé sont des paramètres que l'opérateur peut régler. La valeur optimale de ces paramètres doit être identifiée à travers de travaux expérimentaux et/ou de la simulation numérique si nécessaire.

### *7.3.1 Diamètre de la tache focale*

La réduction de la taille du faisceau augmente l'intensité déposée sur la surface mais réduit également la surface d'interaction avec l'oxygène. Les facteurs de la chaine

optique qui influent sur la taille de la tache focale sont le diamètre du faisceau à la sortie de la fibre, la lentille de collimation, la longueur focale de la lentille utilisée.

### *7.3.2 Distance focale et profondeur de champ*

La première caractéristique du système optique à prendre en compte lors du choix d'une longueur focale de l'objectif pour les applications découpe est la profondeur de champ. La profondeur de champ est définie par la distance à partir du point focal sur laquelle le faisceau conserve son intensité modulo un coefficient. Une coupe optimale est obtenue au niveau du point cible (point focal). La profondeur de champ permet de prévoir jusqu'à quelle distance du point de focalisation, le faisceau portera suffisamment de puissance pour découper (Energie du faisceau/surface de la section interceptée). Deux principaux facteurs doivent être pris en compte :

a) L'épaisseur de la matière à découper
b) Le positionnement vertical (la distance entre la lentille et la tôle à découper).

En résumé, la longueur focale d'une lentille utilisée dans un laser de découpe, doit fournir une profondeur de champ de l'ordre de grandeur de l'épaisseur de la pièce à découper, et doit prendre en compte la valeur de la fluctuation et la variation de la hauteur qui pourraient se produire lors du processus de découpe.

La tentation est de sélectionner une lentille de courte focale dans la découpe des matériaux minces.

### *7.3.3 Position du point focal*

Les meilleurs rendements de découpe sont obtenus en maintenant le point focal sur la surface de découpe. La largeur de la saignée dépend de la position du point focal dans la profondeur de la pièce à découper.

Les meilleures conditions de coupe afin de rester dans la plage des vitesses de coupe optimales et de minimiser la puissance laser utilisée sont obtenues en maintenant le point focal à la surface de la pièce. Bousseau [31] a montré que la largeur de la saignée dépend de la position du point focal. On remarque que dans certaines configurations, il peut être intéressant de placer le point focal à l'intérieur de la pièce, pour éliminer les scories adhérentes sous la pièce et obtenir une saignée plus large.

Pfeifer et al.[32] a étudié l'influence de la position du point focal sur la largeur de la saignée (voir Figure 19), en plaçant le point focal à trois profondeurs différentes .

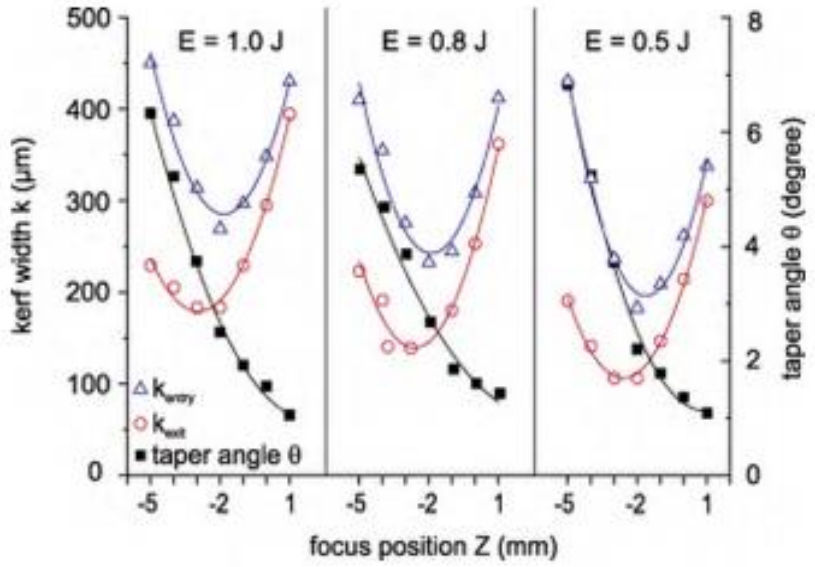



Figure 19 : Effet de la position du point focal sur la largeur de la saignée [32]

Ils ont constaté que la largeur de la saignée est minimale lorsque le point focal est placé à la surface du métal. Rothe et Sepold [33] suggèrent de positionner le point focal au premier tiers de la profondeur de la pièce à découper afin de réduire les nervures et d'avoir une découpe de qualité. Le fait de placer le point focal au cœur de l'épaisseur ne sera pas avantageux si l'on cherche à découper avec la puissance la plus faible possible car l'intensité à la surface (endroit de l'interaction) diminue .

### *7.3.4 Vitesse (maximale) de découpe*

La vitesse de découpe maximale est déterminée d'une part par la puissance et la qualité optique du faisceau et d'autre part par la qualité et la vitesse du jet de gaz. Sundar[34] et Kaplan [35] ont montré que l'augmentation de la vitesse de découpe réduit la zone affectée thermiquement (HAZ) et la largeur de la saignée car l'augmentation de la vitesse réduit le temps de chauffage de la surface et donc la zone de conduction thermique autour de la surface chauffée.

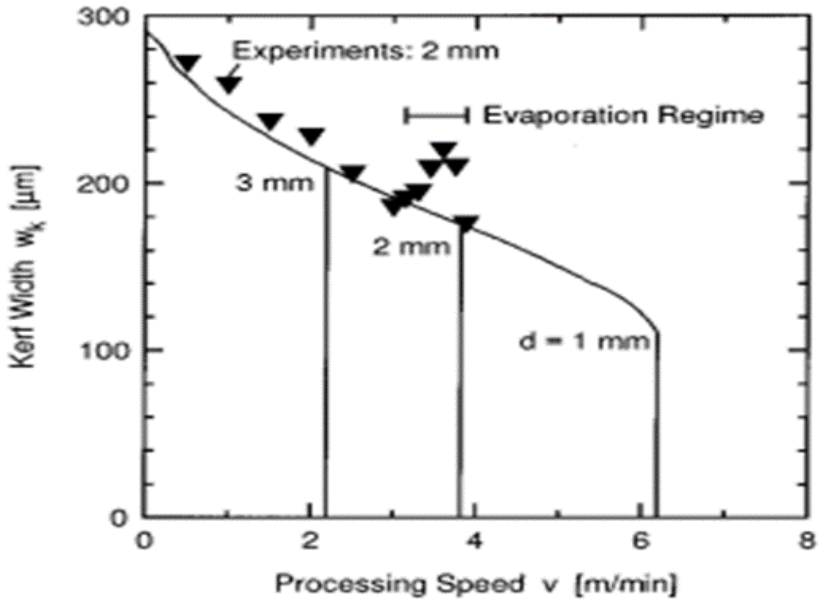
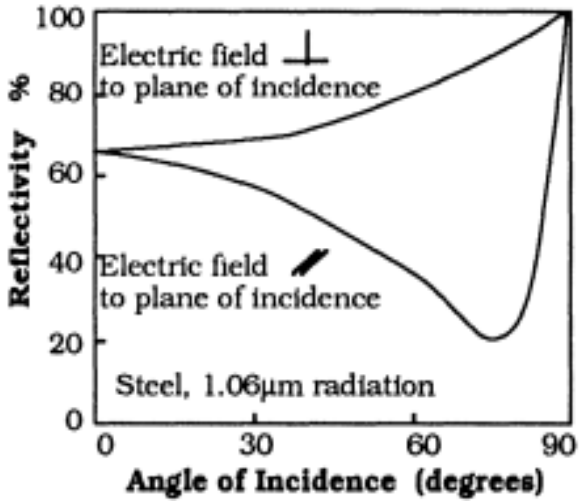



Figure 20 : Largeur de la saignée en fonction de la vitesse de découpe [36]

John Powell [36] a montré, par un calcul de bilan énergétique, que la vitesse maximale de coupe est réduite d'un facteur deux lorsque l'épaisseur à découper est doublée. Ceci n'est pas toujours vrai, en effet, pour les fortes épaisseurs les pertes d'énergie par conduction s'accroissent et les propriétés du jet de gaz sont modifiées. Cela provoque une limitation dans les découpes profondes.

### *7.3.5 Inclinaison du faisceau ou de la pièce (angle d'incidence)*

L'interaction du faisceau avec la surface est modifiée par son angle d'incidence. Plusieurs études ont montré que suivant l'angle d'incidence du faisceau laser, l'absorptivité peut croître, décroître, ou atteindre des absorptivités nulles. On remarque sur le graphique de la Figure 21 qu'il existe un angle d'incidence, maximisant l'absorptivité. Cet angle est appelé angle de Brewster, et dépend du matériau et de la longueur d'onde [29][37]




| Table 2.3. | Refractive Index and Brewster Angles for Various Materials | | |
|---|---|---|---|
| Material | Refractive Index (1μm radiation) k | n | Brewster Angle |
| Al | 8.5 | 1.75 | 60.2 |
| Fe | 4.49 | 3.81 | 75.2 |
| Tl | 3.48 | 2.88 | 70.8 |
| Glass | - | 1.5 | 56.3 |

Figure 21 : Réflectivité de l'acier en fonction de l'angle d'incidence d'un faisceau (longueur d'onde de 1.06μm)[29]

L'étude de Mahrle [38] a également montré que l'angle de Brewster dépend de la phase du matériau.

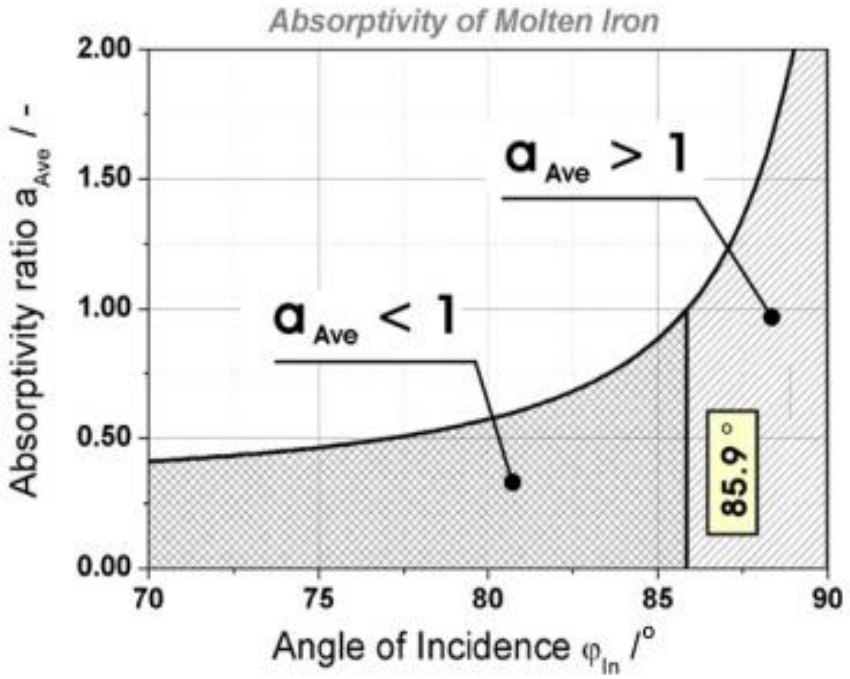



Figure 22 : Absorptivité de l'acier fondu

L'absorption maximale est obtenue pour l'angle de Brewster.

### *7.3.6 Type de buse*

Les buses les plus couramment utilisées sont les buses supersoniques ou subsoniques (voir Figure 23). Le calcul du nombre de Mach permet de déterminer le caractère supersonique ou subsonique de l'écoulement du fluide. Le nombre de Mach

est un nombre adimensionnel qui exprime le rapport de la vitesse d'un fluide ou d'un objet dans son environnement à la vitesse du son dans le même environnement.

Pour un nombre de « Mach » $M_a$<1, l'écoulement est dit subsonique, quand $M_a$=1, l'écoulement est sonique ou transsonique et pour $M_a$>1, l'écoulement est supersonique.

Du point de vue de la dynamique des gaz, ces buses sont très différentes. Le principal avantage des buses supersoniques est d'avoir une section divergente qui permet d'avoir une vitesse d'écoulement du gaz plus importante et une éjection plus rapide du métal fondu. Une des buses supersoniques les plus connues est la buse de Laval (une buse convergente-divergente), inventée par Gustav Patrick de Laval en 1888, et employée dans les machines à vapeur, qui, grâce à sa section divergente, produit un écoulement supersonique.




Figure 23 : Différents types de buses

Dans les applications de découpe laser, les buses supersoniques sont les buses les plus utilisées car elles permettent une meilleur éjection du métal fondu et elle permet de maintenir l'écoulement constant sur une grande distance en sortie de buse [39][40][41].

### *7.3.7 Distance buse-pièce (distance de travail)*

Man [42] a étudié l'effet de la distance du travail sur l'écoulement :

a) Pour un écoulement subsonique (buse convergente) : en prenant quatre positions différentes de la buse d=0mm, 1mm, 2mm et 3mm dans une saignée de largeur=0,7mm et d'épaisseur=10mm, il observe la disparition des ondes de chocs normales dans le cas d=0mm et un meilleur écoulement du flux subsonique. En pratique cette conclusion n'est pas applicable en raison du déplacement de la pièce ou de la tête de découpe ce qui entraine l'usure de la buse. Pour les positions de la buse à d=1mm, 2mm, 3mm, une grande partie du jet est intercepté par la partie supérieure de la saignée et on observe l'apparition

de chocs normaux et obliques entrainant une perte de pression dans la saignée. Cela explique le fait que dans la majorité des procédés de découpe par laser, la distance buse-pièce est fixée à 0,5mm (proche de zéro). Il a été montré [42]que la diminution de la largeur de la saignée de 0,7mm à 0,5 mm et l'augmentation de la profondeur de 10mm à 20mm induit une importante détérioration (perte de pression ) du jet de gaz car la partie du jet réfléchi à la surface devient de plus en plus importante et des chocs obliques sont générés. Les caractéristiques dynamiques de l'écoulement du gaz à l'intérieur la saignée de découpe sont fortement affectées et déstabilisés par l'augmentation de la distance buse-pièce, par l'épaisseur de la saignée et par la diminution de la largeur la saignée.

b) Pour un écoulement supersonique : pas d'effet remarquable pour de faibles variations de la distance entre la buse et la pièce avec un écoulement supersonique [42].

### *7.3.8 Alignement de la buse*

L'éjection du métal fondu est largement influencée par l'alignement de la buse. Plusieurs configurations sont possibles comme : l'alignement coaxial et l'alignement transversal (off-axial). On retrouve même des têtes de découpe à double buse montées parallèlement [43] au faisceau laser. Néanmoins, dans la majorité des applications de découpe laser, la buse est coaxiale au faisceau.

Aaron [44] montre dans son article que dans les configurations d'alignement transversal, La capacité maximale de découpe est atteinte pour un angle $\theta$=35 à 40°. Yoshiaki [45], Hsu [43] et Brandt [44] ont retrouvé le même ordre de grandeur d'un angle optimal de 40°.

Un autre paramètre à prendre en compte dans la configuration d'alignement transversal est la distance entre le point incident du faisceau et le point incident du jet [41].

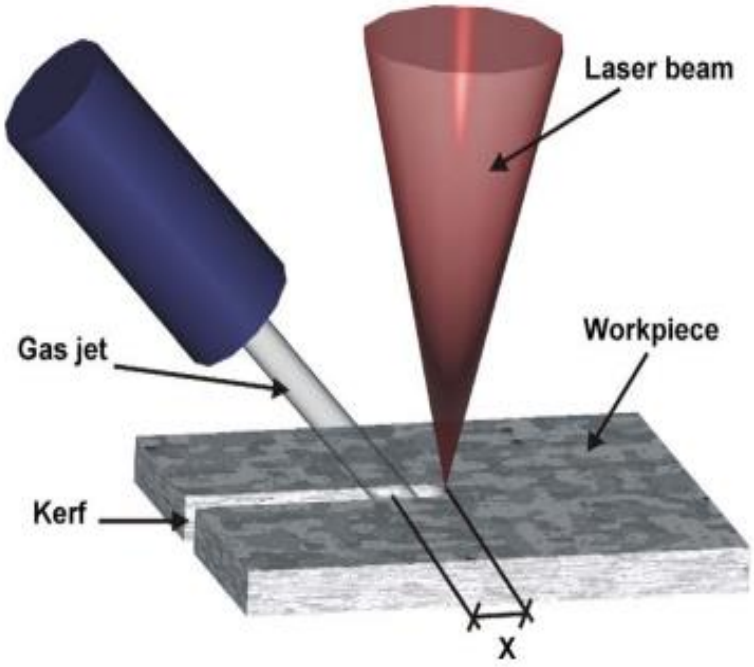



Figure 24 : Buse off-axiale [41]

Quintero [41] a étudié l'influence de la distance optimale entre le point d'impact du faisceau et le point d'impact du jet. Il a trouvé une valeur optimale de 3mm permettant d'obtenir un écoulement laminaire cisaillant sur les bords de la saignée.

### *7.3.9 Gaz d'assistance (Nature, Vitesse et pression)*

Le jet de gaz a deux fonctions principales :

1. Une action purement mécanique, permettant d'éjecter le métal fondu. Les deux principaux paramètres pilotant la vitesse du jet sont la différence de pression entre le réservoir et l'air ambiant. Une vitesse importante du jet est nécessaire pour une meilleure éjection du métal fondu. L'hydrodynamique du jet est modifié par la présence de la saignée de découpe (largeur et profondeur) et aussi par l'inclinaison de la surface d'incidence

2. Une action thermochimique d'oxydation lors de la découpe de l'acier sous un gaz réactif comme l'oxygène. La formation d'oxydes favorise le processus en augmentant la température du liquide métallique grâce à la réaction exothermique d'oxydation du métal fondu.

a) Nature et pureté du gaz

La nature du gaz conditionne la réaction d'oxydation du métal. Jusqu'à présent l'oxygène a montré une bonne contribution à l'énergie de découpe. L'avantage de l'utilisation de l'oxygène a été présenté en détail dans la page 45. La pureté de l'oxygène constitue un élément essentiel influant sur l'efficacité de la découpe [36][28]. Il a été montré qu'une faible variation de la pureté de l'ordre de 0,5% entraine une chute de la vitesse de 2m/min à 1m/min [36][28].

b) Vitesse du jet

Yilbas et Sahin [46] ont déduit que la contribution de l'énergie d'oxydation à l'énergie totale de la découpe augmentait avec l'augmentation de la vitesse du jet d'oxygène. A épaisseur fixe, une diminution de la vitesse du gaz nécessite une augmentation de la puissance du laser.

c) Pression

M.Sundar et K.Nath [34] ont montré qu'une augmentation de la pression de gaz de 6,0 à 7,0bar permet d'augmenter la largeur de la saignée de 4,505mm à 4,995mm soit 11%. L'augmentation de la largeur de la saignée possède un avantage dans le cas d'un écoulement supersonique car elle permet de garder l'efficacité du jet (H.C.Man, 1998). Dans les écoulements subsoniques et supersoniques, l'augmentation de la profondeur de saignée possède un effet défavorable sur l'écoulement du jet (H.C.Man, 1998).

# 8 Conclusion

L'étude bibliographique nous a permis de mieux comprendre les différents phénomènes d'oxydation, d'allumage et de combustion des métaux en phase solide et liquide présents lors d'un processus d'oxycoupage par laser. L'oxydation des métaux se produit même à température ambiante mais elle peut être considérée comme un phénomène lent. Le taux d'oxydation augmente avec la concentration d'oxygène et la température. Il existe une température critique et une surface d'interaction critique qui permettent de démarrer la combustion en phase solide que nous chercherons à l'identifier dans la suite. L'identification de la température critique et d'une surface critique chauffée indépendamment de la source laser, va nous permettre de connaitre

le besoin en puissance de n'importe quelle source laser en prenant juste en compte le coefficient d'absorption métal-laser correspondant.

Les valeurs de température de surface du métal lors de l'oxycoupage restent encore une question ouverte ; il existe une grande dispersion dans les valeurs proposées dans la littérature. Les températures de l'ordre de 3600K et plus sont à éviter lors de la découpe afin de bénéficier d'un meilleur apport énergétique fourni par la réaction d'oxydation.

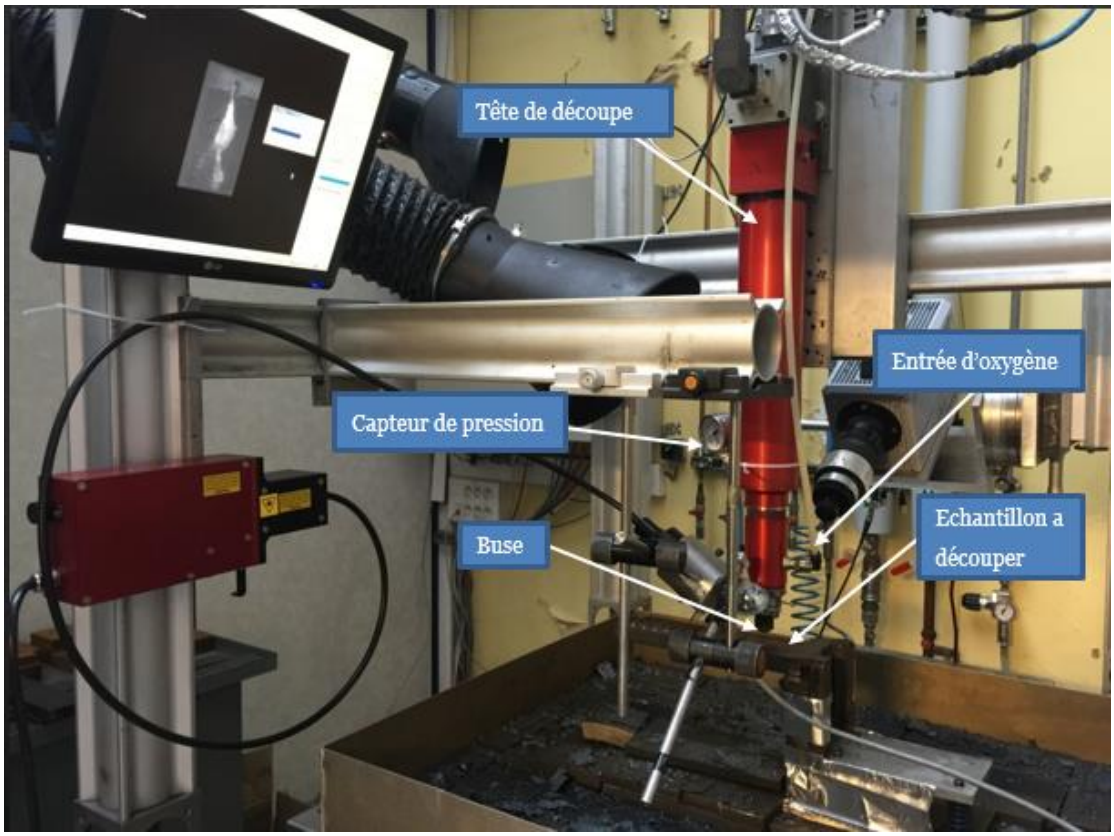
L'étude bibliographique nous a également permis d'identifier les différents paramètres influents sur la découpe et comment ces derniers influent sur la découpe. L'étude de l'influence de ces paramètres par différents auteurs nous a permis de déterminer les paramètres les plus important pour l'optimisation du procédé comme la taille de la tache focale, la longueur d'onde et la pression.

# Chapitre II  Essais et Résultats

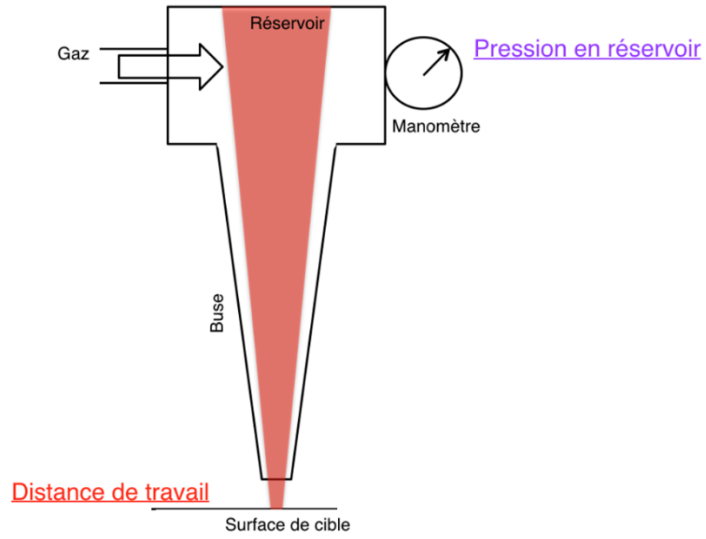
Dans ce chapitre nous allons détailler le montage expérimental utilisé et les résultats des essais de découpe réalisés. Le but de notre étude est dans un premier temps d'identifier le domaine de fonctionnement du procédé de découpe sans regarder la qualité et dans un second temps de bien comprendre le fonctionnement et les mécanismes physiques liés au procédé.

## 1 Montage expérimental

La photo du dispositif expérimental est représentée en Figure 25.a. Il est principalement constitué d'une tête de découpe couplée à une source laser YAG d'une longueur d'onde de 1,064 nm.




*(a)*




*(b)*

Figure 25 : (a) dispositif expérimental ;(b) schématisation du dispositif expérimental

Une entrée d'oxygène connectée à la tête de découpe passe à travers une buse convergente de diamètre de sortie 3mm. L'approvisionnement en oxygène provient d'un cadre comprenant 9 bouteilles sous une pression 200 bars initialement, et subit 2 détentes successives. Un capteur de pression est situé au niveau de la tête de découpe permet de contrôler la pression statique dans le réservoir de la tête juste en aval de la buse. Cette pression peut être ajustée par une vanne manuelle située sur le second détendeur et donc de contrôler le débit et la pression à la sortie de la buse. Une électrovanne permet de couper ou d'autoriser le flux d'oxygène.

L'échantillon à découper est mobile et situé à une distance de travail fixe de 5mm. La distance de travail est définie comme la distance entre la sortie de la buse et la surface de la pièce.

## 1.1 Caractérisation de la distribution spatiale du faisceau laser

Le diamètre de la fibre optique utilisée est de X µm. Le faisceau laser sortant de la fibre passe à travers une lentille de collimation et une lentille de focalisation de distances focales respectives 100 mm et 540 mm. Le grandissement obtenu de la tache focale a pour valeur $G = \frac{F2}{F1} = \frac{540}{100} = 5{,}4$. Le diamètre sur le plan focal est donc de X mm et le plan focal est confondu avec la surface de la pièce pour une distance de travail de 5 mm. La distance focale relativement longue de la lentille de focalisation a été choisie

de manière à avoir une profondeur de champ importante offrant une meilleure flexibilité dans le procédé de découpe.

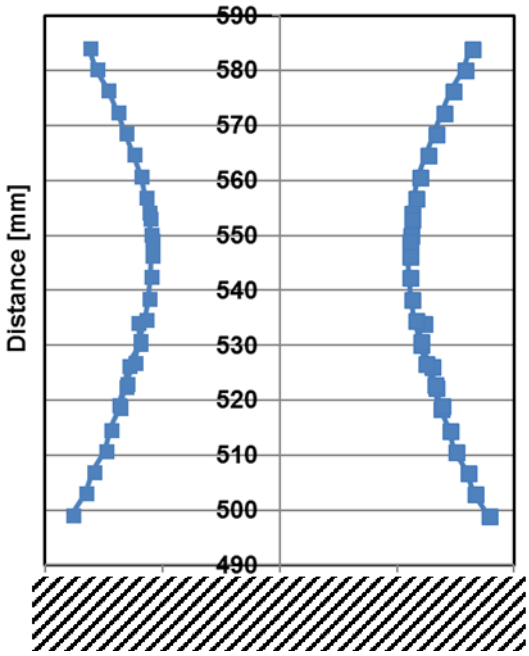



Figure 26 : distribution spatiale du faisceau laser avec un diamètre de fibre de X µm, une collimation de 100 mm et une lentille de 500 mm.

La Figure 26 représente la distribution spatiale du faisceau laser. La taille de la tache focale « D » minimale obtenue est de X mm. La tache laser est focalisée en surface de l'échantillon et non pas dans la profondeur afin de garantir un maximum d'intensité laser sur la surface d'échange avec l'oxygène.

## 2 Plan d'expérience

Dans le but de définir un ensemble de paramètres opérationnels du procédé de découpe par laser et oxygène, nous avons exploré l'influence de différents paramètres suivant :

- En mode pulsé et en continu :
  - La puissance crête, $P_c$: X, X, X, X, X et X W
  - Le rapport cyclique $R_c$: ½, 1/3, ¼, 1/5, 1/6, 1/7, 1/8, 1/9 et 1/10
  - La durée d'impulsion, $T_{on}$ : 1, 5, 10 et 20 ms
  - La vitesse de découpe, V : 300, 200 et 50 mm/min
  - La pression, p : 3,6 et 9 bar

## 2.1 Quantification des paramètres utilisés

Dans cette partie nous allons présenter un tableau explicatif (voir Figure 27) des quantifications des paramètres utilisés afin d'avoir une idée plus claire du déroulement de la procédure suivie durant les essais.

Des essais de découpe à des puissances allant de X jusqu'à X W ont été réalisés avec une vitesse notée *V,* de 300 mm/min sur des échantillons de 20 mm d'épaisseur. Les durées d'impulsion choisies sont de 1, 5, 10 et 20 ms. La Figure 27 représente une synthèse de la démarche des essais pour une durée d'impulsion de 1 ms. La démarche suivie est identique pour toutes les autres durées d'impulsion testées de 5, 10 et 20 ms.

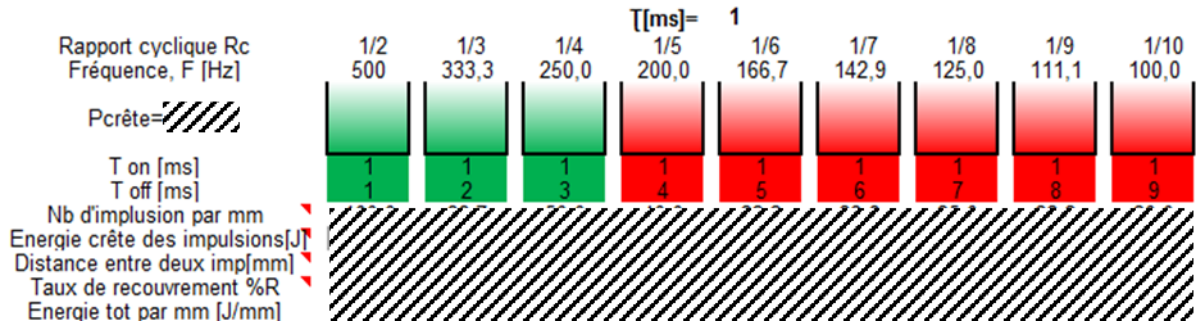



Figure 27 : Essais de découpe réalisés à X W, avec différents rapports cycliques et une durée d'impulsion de 1 ms et données calculées pour chaque paramètre utilisé ; carré vert : découpe valable ; carré rouge : découpe non valable.

Le tableau de la Figure 27 représente une série d'essais réalisés en faisant varier le rapport cyclique et en gardant la puissance crête fixe. En effet, comme nous l'avons vu au Chapitre 1, pour un diamètre de laser constant c'est la puissance crête qui est responsable de l'élévation de température du matériau (à travers l'intensité absorbée) et donc de l'amorçage du procédé ; c'est ce point que nous cherchons à identifier dans l'espace des paramètres procédé de façon à minimiser la puissance laser nécessaire. Pour ce faire nous identifions les paramètres procédés ci-dessous reliés entre eux par les équations de 1 à 8 :

*Rapport cyclique « Rc » :*

$$Rc = \frac{T_{on}}{T_{on} + T_{off}} = \frac{T_{on}}{T} \qquad \textbf{Équation 35}$$

*Fréquence « F » [Hz] :*

$$\boldsymbol{F = \frac{Rc}{T_{on}} * 1000} \qquad \textbf{Équation 36}$$

$T_{on}$ *[ms]:*

$$\boldsymbol{T_{on} = \frac{Rc}{F} * 1000} \qquad \textbf{Équation 37}$$

$T_{off}$ *[ms]* $$T_{off} = \frac{1 - F}{Rc} * 1000$$ ***Équation 38***

*Nombre d'impulsion/mm « N» :* $$N = \frac{1}{(T_{on} + T_{off}) * \frac{V}{60 * 1000}}$$ ***Équation 39***

*Energie par impulsion « E » [J] :* $$E = P_c * T_{on}$$ ***Équation 40***

*Distance entre deux impulsions « di » [mm] :* $$di = \frac{\left(\frac{V}{60}\right)}{F}$$ ***Équation 41***

*Taux de recouvrement %R :* $$\%R = \frac{D - di}{D}$$ ***Équation 42***

Avec *F*, la fréquence *[Hz]*, $T_{on}$ la durée de l'impulsion laser[ms], la durée $T_{off}$ durée sans irradiation laser *[ms]*, *T* est la période de répétition des impulsions $T = T_{on} + T_{off}$ *[s]* ), *N* le nombre d'impulsions reçues par la pièce sur un parcours d'1 mm, *E* énergie pour chaque impulsion *[J]*, *di* distance entre deux impulsions successive *[mm]*, *%R* le taux de recouvrement entre deux impulsions successives et l'énergie totale déposée par millimètre parcouru *[J/mm]*.

Dans le tableau Figure 27, la couleur des carrés sous les valeurs de rapports cycliques indique les résultats obtenus :

- Vert pour les cas où la découpe a abouti (la combustion a été initiée)
- Rouge lorsque la découpe n'a pas abouti (fusion de surface local à l'endroit de l'impulsion).

## 2.2 Domaine de fonctionnement : variation de la puissance, du rapport cyclique et de la durée d'impulsion

La variation des paramètres cités ci-dessus nous a permis d'identifier un ensemble de paramètres permettant de réaliser une découpe avec un minimum de puissance laser.

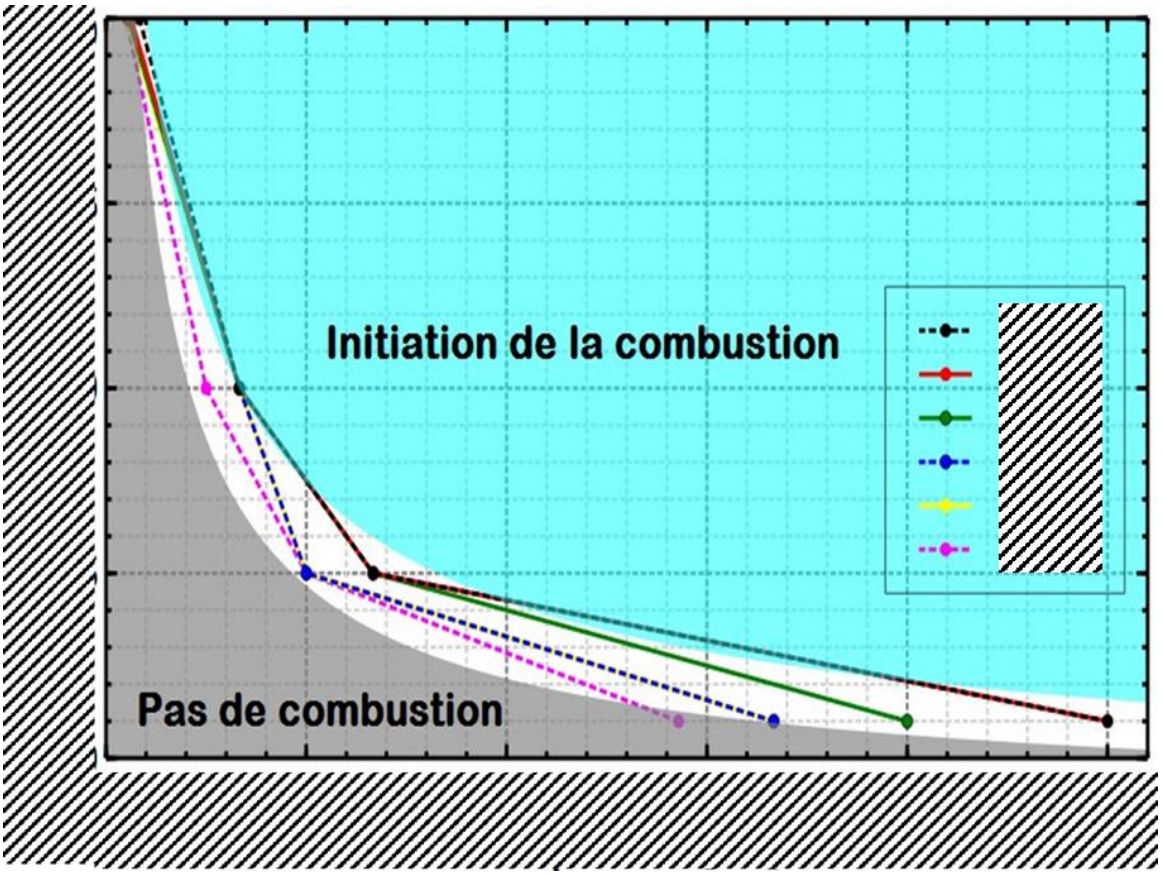



Figure 28 : Domaine d'initiation de la découpe à différentes puissances représentées en fonction de la durée d'impulsion et de la fréquence (rapport cyclique)

La Figure 28 illustre le domaine d'initiation de la découpe réalisée à différentes puissances en fonction de la durée d'impulsion et la fréquence. La partie supérieure située au-dessus des courbes Figure 28 constitue le domaine de fonctionnement de la découpe tandis que la partie inférieure représente les cas où l'initiation de la découpe n'a pas été réalisée. Pour les grandes durées d'impulsion (>20ms), l'augmentation de la puissance crête n'a pas d'effet sur la réduction de la fréquence de découpe. En effet plus les durées d'impulsion sont longues plus les effets thermiques à 2 dimensions ont le temps de se mettre en place et ne sont plus négligeables. Dans notre configuration ceux-ci interviennent dès $t_{2D}=R^2_L/4\kappa=2,8ms$. Les pertes des effets 2D diffusent l'énergie apportée par conduction au cœur du métal. Sur la Figure 28, la configuration d'une impulsion, de durée de 5ms à une fréquence de 40Hz correspond à un changement de pente de notre frontière de domaine d'initiation. En correspondance avec le $t_{2D}$ calculé, nous pouvons conclure qu'il s'agit de la limite entre un chauffage surfacique et un chauffage volumique. L'écart peut être dû à un effet de cumul temporel des impulsions qui n'est pas pris en compte dans le calcul de $t_{2D}$. Du fait que les pertes 2D deviennent de plus en plus prononcées dans la zone correspondant à des fréquences

supérieures à 40Hz, on remarque que dans cette zone la pente de la limite d'initiation devient moins accentuée. Le domaine de découpe ou d'initiation sur les durées d'impulsion plus courtes de l'ordre de 1ms est plus sensible à la variation de la puissance et de la fréquence. On remarque une divergence de la limite de découpe Figure 28 car cela est lié directement à l'atteinte des conditions critiques à la surface.

On peut donc en conclure que les deux principaux paramètres clefs qui permettent d'initier la découpe sont l'atteinte des conditions optimales de température et de taille de surface chauffé à la surface supérieure. Les conditions optimales de température et de taille de surface chauffée sont appelées conditions d'initiation de la combustion. Une fois les conditions d'initiation de la combustion sont assurées, tout autre apport énergétique provenant du laser sera inutile, car celle si sera perdue par diffusion de la chaleur dans l'échantillon. L'augmentation de la température dans le cœur de l'échantillon n'entraine pas un décalage du domaine d'initiation de la découpe, car le contact direct avec l'oxygène se fait uniquement au niveau de la surface supérieure. Pour cette raison on remarque sur la Figure 28 que la fréquence de découpe sur les grandes durées d'impulsion (plus d'énergie déposée), l'augmentation de la puissance de XW à XW ne change pas considérablement la limite du domaine de découpe.

## 2.3 Taux de recouvrement des impulsions en fonction de l'énergie nécessaire pour l'initiation

Après avoir défini les gammes de puissances, fréquences, durées d'impulsions permettant la découpe, l'étape suivante a consisté à identifier les paramètres d'énergie par impulsion nécessaires pour assurer l'initiation de la découpe tout en gardant les paramètres d'énergie par impulsion minimale.

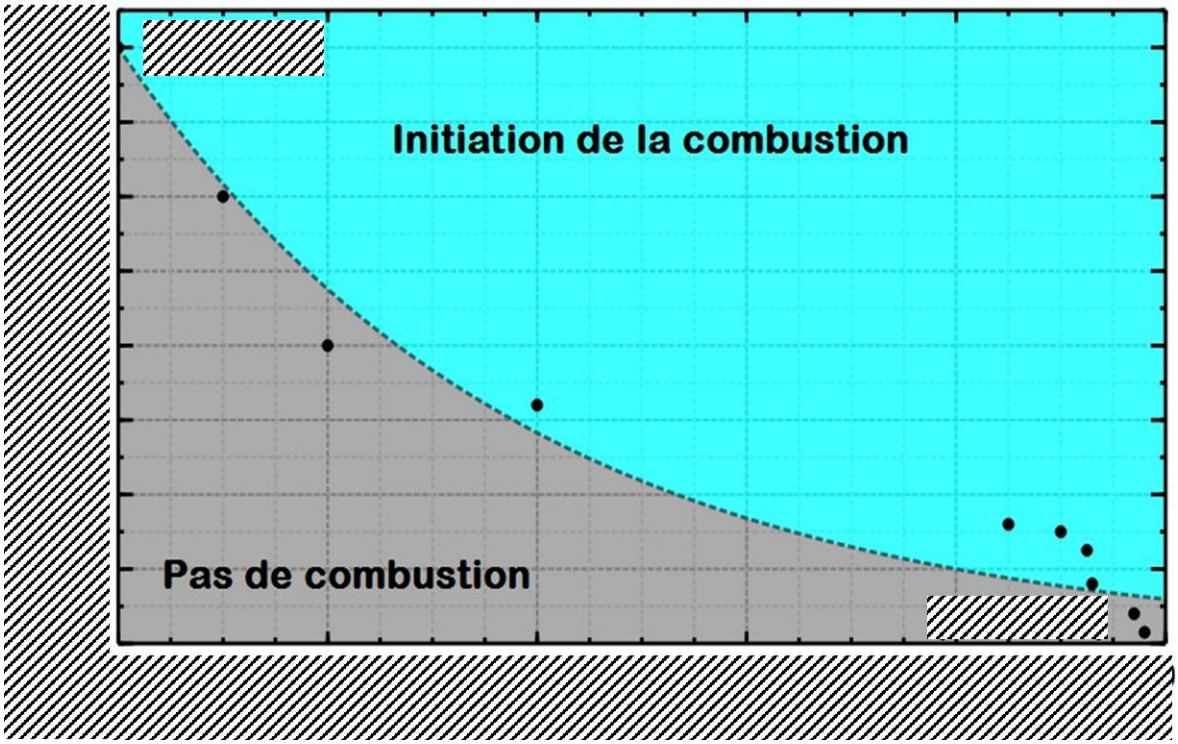



Figure 29 : Gammes de paramètres permettant l'initiation de la découpe en fonction de l'énergie par impulsion et du taux de recouvrement nécessaire.

La Figure 29 illustre le domaine d'initiation de découpe en fonction de l'énergie par impulsion et du taux de recouvrement nécessaire afin de déclencher la combustion. La partie au-dessus des courbes constitue les domaines ou la combustion se met en place tandis que la partie en dessous des courbes représente les cas où l'énergie choisie et le taux de recouvrement pour chaque durée d'impulsion (1, 5, 10 et 20 ms) ne permettent pas la combustion.

Pour 20 ms de durée d'impulsion : L'utilisation d'une seule impulsion de 20 ms avec une énergie de X J et un taux de recouvrement de X%, est suffisante pour déclencher la combustion. En réduisant cette énergie jusqu'à X J, le taux de recouvrement nécessaire pour assurer la combustion est alors de X%.

Pour 10 ms de durée d'impulsion : Sur les durées d'impulsion de 10 ms la combustion nécessite une des valeurs comprises entre X et XJ avec un taux de recouvrement respectivement de X et X%.

Pour 5 ms de durée d'impulsion : L'énergie de combustion nécessaire avec une durée d'impulsion de 5 ms est de X J avec un taux de recouvrement de X% tandis que l'utilisation d'une énergie de X J requiert un taux de recouvrement de X%.

Pour 1 ms de durée d'impulsion : Le seuil d'initiation de la combustion est atteint pour les configurations à (XJ ; X%) et (XJ ; X%).

Nous voyons ici que la découpe sous oxygène assistée par laser est effective pour des énergies très faibles, comparée à celles utilisées en découpe conventionnel par laser et oxygène. Quelques joules par impulsion et quelques centaines de hertz suffisent à obtenir des vitesses de découpes plus importantes que les procédés conventionnels.

## 2.4 Nombre d'impulsions et durée maximale entre deux impulsions successives

La connaissance des nombres d'impulsions correspondant à l'initiation n'est pas suffisante, car ces impulsions doivent être fournies dans un temps délimité, sans quoi la combustion ne se met pas en place malgré l'apport nécessaire en énergie.

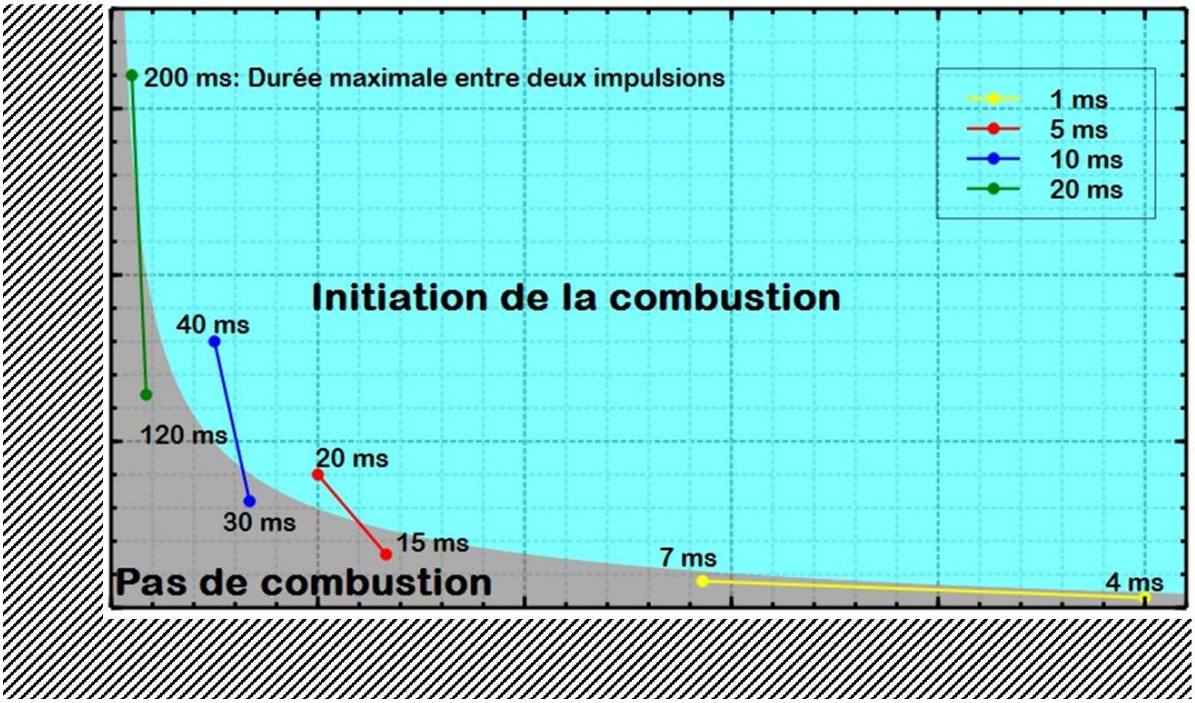



Figure 30 : Énergie nécessaire en fonction du nombre d'impulsions par mm parcouru et durée maximale correspondante entre deux impulsions successives.

La Figure 30 représente le nombre d'impulsions en fonction de l'énergie utilisée afin de déclencher la combustion puis la découpe. La vitesse de déplacement de l'échantillon utilisée de 300mm/min. On notera que pour chaque durée d'impulsion, il existe une durée seuil maximale entre les impulsions à ne pas dépasser pour

permettre l'initiation de la combustion. Par exemple, pour atteindre le profil de température seuil en surface correspondant à l'initiation de la combustion, l'utilisation des impulsions de 1 ms d'une énergie de X J nécessite X impulsions avec un taux de recouvrement d'au moins X%. Les X impulsions doivent être espacées d'un temps adapté pour démarrer la combustion, en utilisant des impulsions de XJ, le temps entre deux impulsions ne doit pas dépasser 4 ms afin d'atteindre les conditions d'initiation. L'augmentation de l'énergie jusqu'à X J avec la même durée d'impulsion permet d'augmenter ce temps d'espacement des impulsions jusqu'à 7 ms et en utilisant X impulsions seulement avec un taux de recouvrement de X%.

En utilisant une durée d'impulsion de 5 ms le nombre d'impulsions nécessaire diminue et la durée permise entre deux impulsions augmente, on passe de X impulsions à X J toutes les 15 ms avec un taux de recouvrement de X% à 10 impulsions à X J toutes les X ms avec un taux de recouvrement de X%.

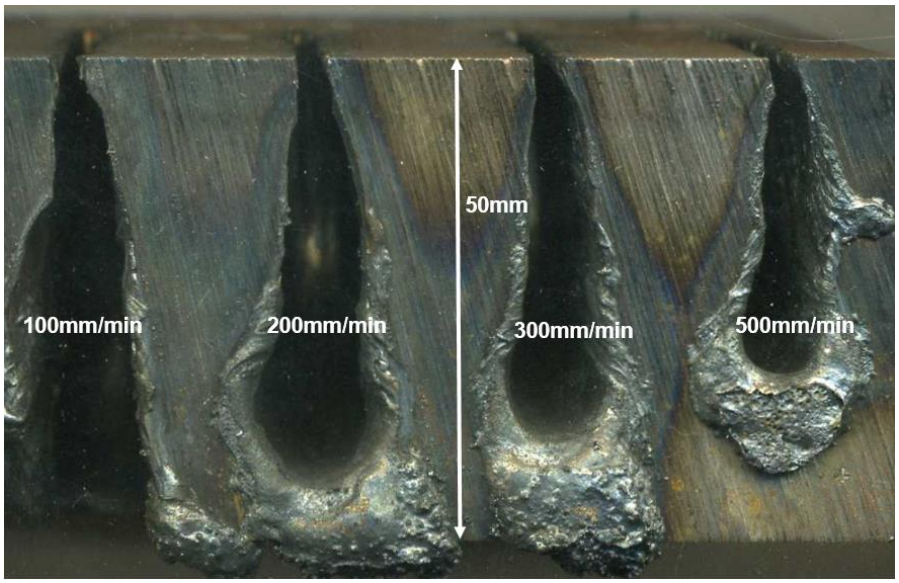
Pour une durée d'impulsion de 15 ms, X impulsions de X J espacées de 30 ms et un taux de recouvrement de X% sont nécessaires ; ce nombre tombe à 5 impulsions pour une énergie de X J lorsque les impulsions sont espacées jusqu'à 40ms dans le temps et X% en taux de recouvrement.

L'augmentation de la durée d'impulsions et de l'énergie permet de réduire considérablement le nombre d'impulsions nécessaires pour la combustion. On remarque aussi sur le graphique de la Figure 30 qu'une seule impulsion de X J avec une durée d'impulsion de 20 ms et un taux de recouvrement de X% permet d'assurer les conditions d'initiation de la combustion. Les conditions optimales de température et de surface nécessaires seront présentées dans le chapitre 4.

## 2.5 Epaisseur de découpe en fonction de la vitesse et la pression d'oxygène

Pour ces essais, l'énergie par impulsion est fixée à X J (correspondant à une puissance minimale de X W pour une durée d'impulsion de 1 ms). L'épaisseur de l'échantillon utilisée est de 50 mm. Les vitesses testées sont de 100, 200, 300 et 500mm/min avec un taux de recouvrement de 98%. Nous étudierons dans un premier temps l'influence de la pression. En effet, une fois la combustion initiée, le jet d'oxygène, en éjectant de la matière fondue (apport de métal frais) et en apportant le

comburant aura un rôle déterminant dans le maintien des conditions de combustion à l'intérieur de la saignée de découpe ou au contraire dans l'extinction.



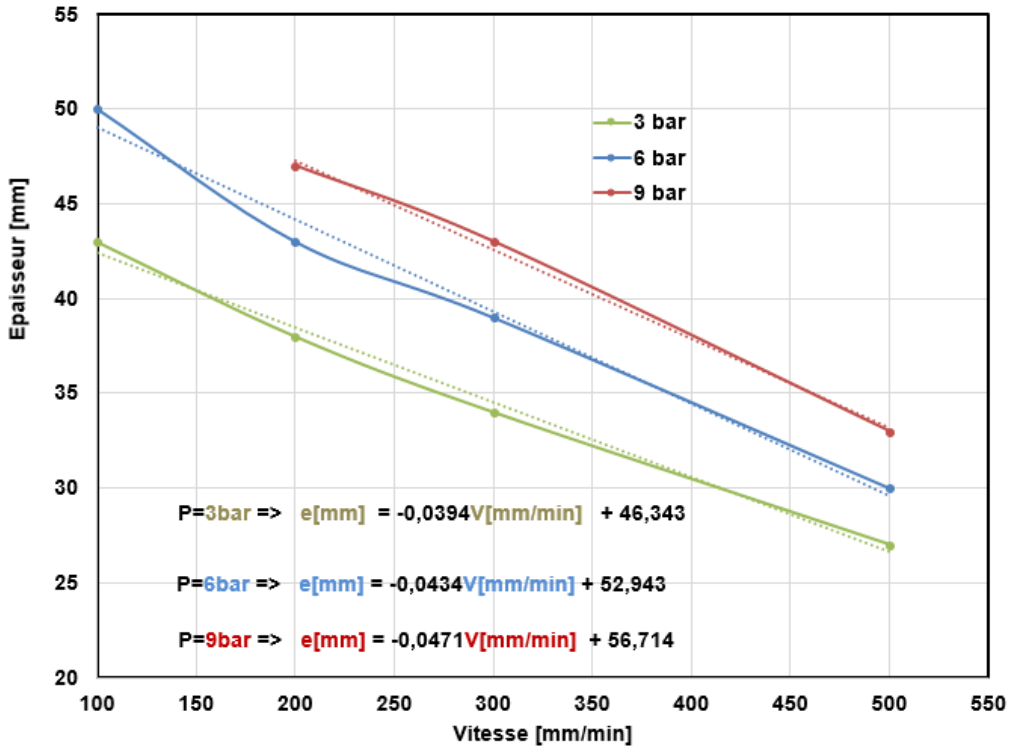




Figure 31 : Épaisseur de découpe sur une pièce d'épaisseur 50mm pour des pressions de 3, 6 et 9 bar et des vitesses de 100, 200, 300 et 500 mm/min (puissance de X W).

La Figure 31 montre la faisabilité de la découpe pour des pressions de 3, 6 et 9 bars et des vitesses de 500 à 300 à 200 et 100 mm/min. Les essais ont montré que la diminution de la vitesse de 500 à 300 mm/min permet d'augmenter d'environ 7 mm la profondeur de découpe. Les régressions linéaires des courbes montrent que, quelle

que soient la pression entre 3 et 9 bars, une réduction de vitesse de coupe de 100 mm/min permet d'augmenter la profondeur maximale découpée de 5 mm.

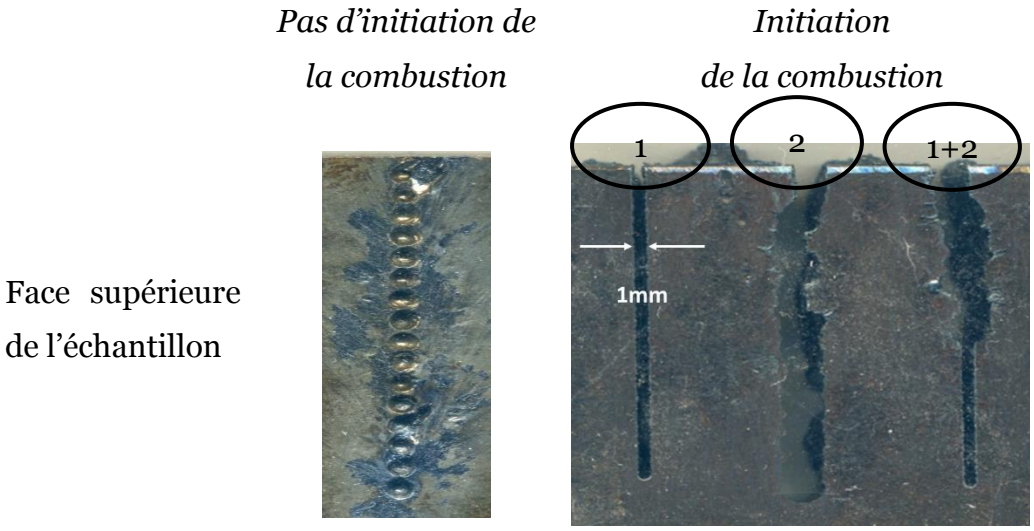
L'augmentation de la pression a également un rôle important sur l'augmentation de la profondeur de découpe. Les essais réalisés montrent qu'une augmentation de la pression de l'ordre de 3 bars permet d'augmenter d'environ 3 à 4 mm la profondeur de découpe maximale, soit environ 1mm/bar supplémentaire.

# 3 Observations et interprétations

La minimisation de l'énergie laser utilisée durant les essais de découpe est la raison principale pour laquelle les essais ont été réalisés en mode pulsé, et en réduisant au maximum le rapport cyclique.

## 3.1 Variation du rapport cyclique et résultats de découpe

Des essais ont été réalisés en réduisant successivement le rapport cyclique de ½ jusqu'à 1/10. Les résultats montrent que 3 régimes hydrodynamiques peuvent s'établir en fonction des configurations choisis. La Figure 32 présente l'aspect typique en vue de dessus et en vue de dessous des échantillons après découpe dans les différents cas de figures observées.



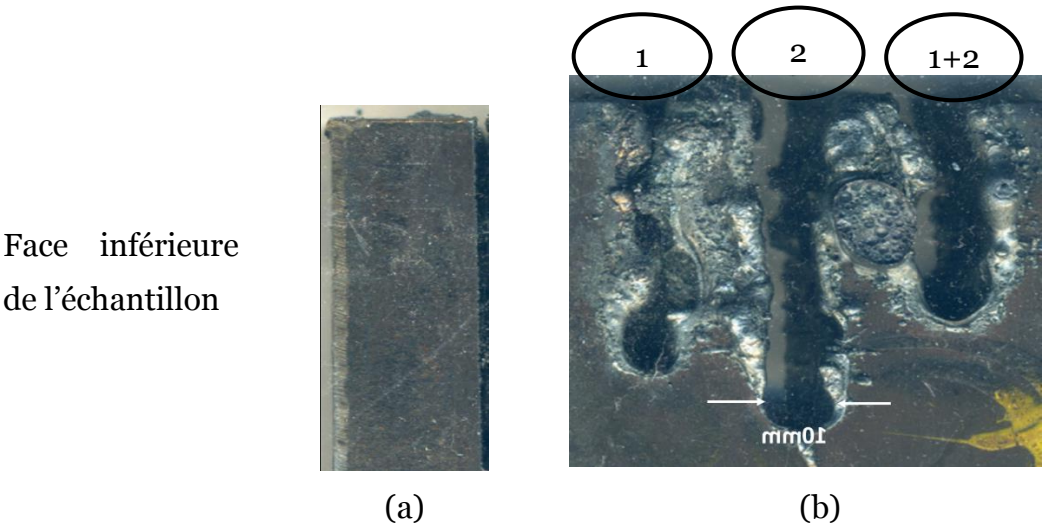



Figure 32 : Les différents régimes de découpe observés sur une pièce découpée ; (a) pas d'initiation de la découpe ; (b) initiation de la découpe.

On remarque sur la Figure 32 deux types de découpe différentes :

I. Premier cas (voir Figure 32 (a)) : le couple de paramètres durée d'impulsion, fréquence n'est pas suffisant pour initier le procédé, dans ce cas on observe uniquement de petites zones fondues plus ou moins espacées (selon la fréquence choisie) à la surface de la pièce.

II. Deuxième cas (voir Figure 32 (b)) : les paramètres de durée d'impulsion et de fréquence permettent d'initier la découpe. Trois régimes de découpe différents peuvent s'établir suivant les cas. On les désignera par la suite comme régime 1, 2 et 1+2.

### *3.1.1 Caractéristiques du régime 1*

***Régime 1***

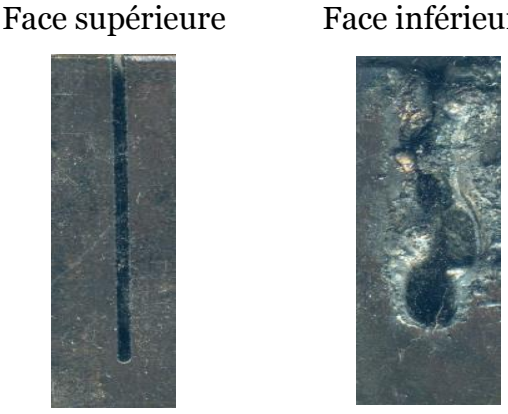



Figure 33 : Image des faces supérieure et inférieure dans le cas du régime 1

Le régime 1 (voir Figure 33) est un régime caractérisé par une largeur fine en entrée de la saignée d'une taille de l'ordre de 1 mm, correspondant à la taille de la tache

focale du faisceau à la surface de l'échantillon. Cette saignée fine en entrée indique que la fusion du métal est limitée à la taille du faisceau. Ce régime s'établit pour les paramètres laser utilisés les plus importants (paragraphe 3.1.4). Le niveau du cycle utile, de puissance et de durée d'impulsion permettant d'obtenir le régime 1 ; les paramètres correspondants sont présentés dans le paragraphe 3.1.4. Dans ces conditions, l'irradiation engendre une évaporation en surface et la formation d'un capillaire peut profond limitant la surface d'échange avec l'oxygène. Le modèle de thermique 1D permet d'estimer la température de surface autour de celle d'évaporation $T_{surf}=Ir_L/K=3000K$ valable sur 3 ms au début de l'interaction. C'est au sein du capillaire que l'oxygène pénétrant augmente le chargement énergétique et élargit la saignée. Ce phénomène peut avoir lieu uniquement si le flux d'évaporation du matériau est faible devant le flux d'oxygène. Dans le cas contraire, le flux d'évaporation chasserait le flux d'oxygène et la réaction de combustion au sein du liquide ne pourrait avoir lieu.

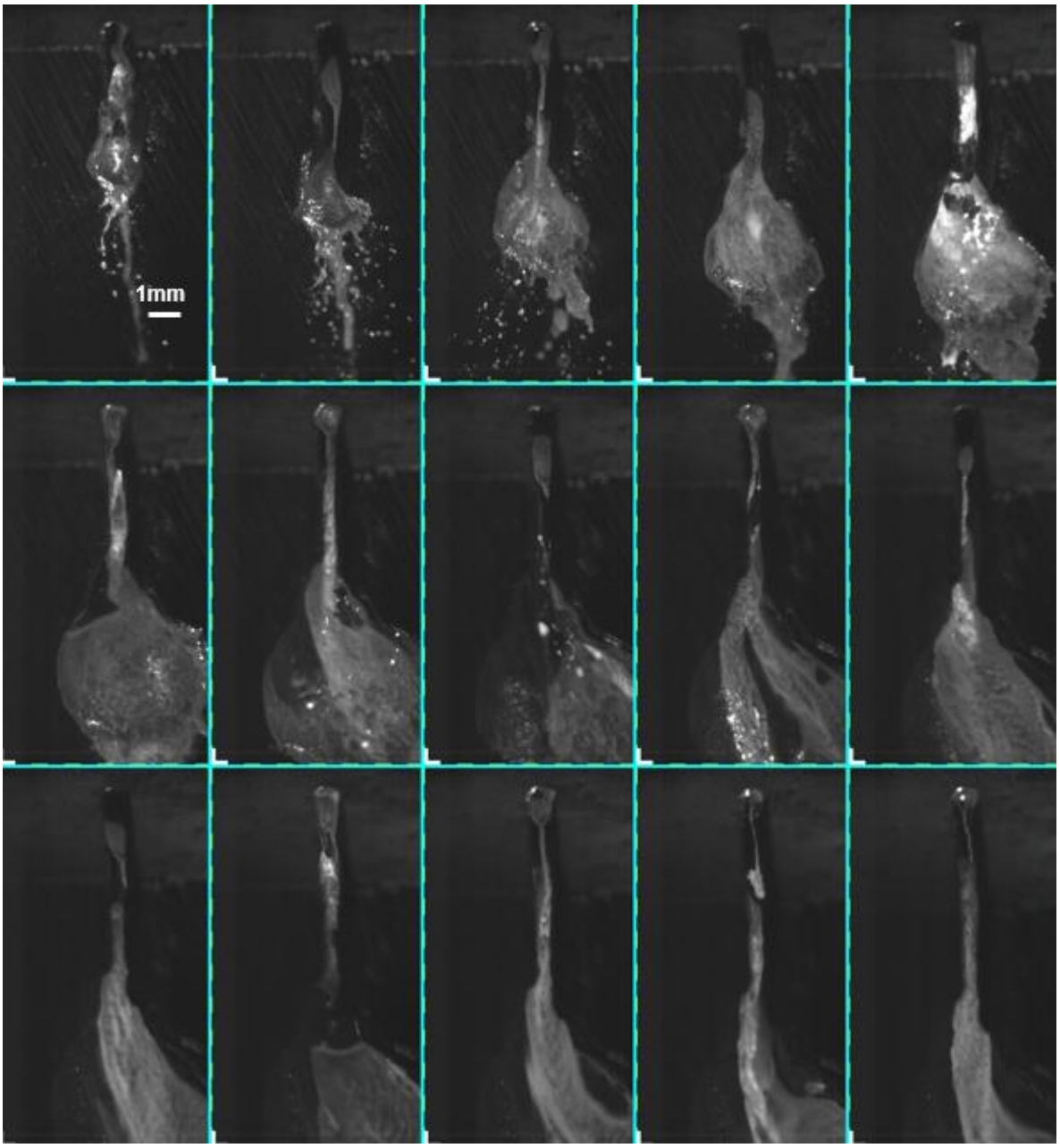



Figure 34 : Hydrodynamique du régime 1 (image prise toute les 0,5s/échelle : la largeur de la saignée en face supérieure est de 1mm)

La Figure 34 illustre des images de l'hydrodynamique en régime 1 prises toutes les 0,5s. Les images montrent un écoulement très faiblement agité du métal fondu et quasi-laminaire sur le long de la saignée. La pression du gaz d'oxygène en surface du métal liquide est limitée par la faible ouverture de la saignée en régime 1. Pour le gaz ce passage étroit limite l'efficacité du procédé et le couplage gaz d'oxygène-oxydation-éjection du liquide.

Au niveau de la face inférieure de l'échantillon, le métal liquide n'est pas éjecté efficacement et des zones de soudure dues à la re-solidification du métal liquide non éjecté peuvent se former.

### *3.1.2 Caractéristiques du régime 2*

***Régime 2***

Face supérieure Face inférieure



Figure 35 : Image des faces supérieure et inférieure dans le cas du régime 2

Les paramètres permettant d'obtenir le régime 2 sont présentés dans le paragraphe 3.1.4. Le régime 2 (voir Figure 35) est caractérisé par une largeur en entrée de saignée de 7 à 8 mm et pouvant atteindre dans certains cas jusqu'à 10 mm de largeur. La largeur de saignée en sortie est du même ordre de grandeur tout en étant un peu plus large. Ce régime s'établit pour les paramètres laser les plus faibles (paragraphe 3.1.4). La surface sous l'irradiation s'échauffe et fond. La partie fondue de métal frais entre en contact avec l'oxygène et une réaction de combustion du liquide se met en place. L'apport d'énergie dû à l'oxydation du métal contribue à l'élargissement de la zone augmentant ainsi le combustible disponible et la surface d'échange, jusqu'à ce que le liquide soit éjecté par la pression exercée par le gaz.

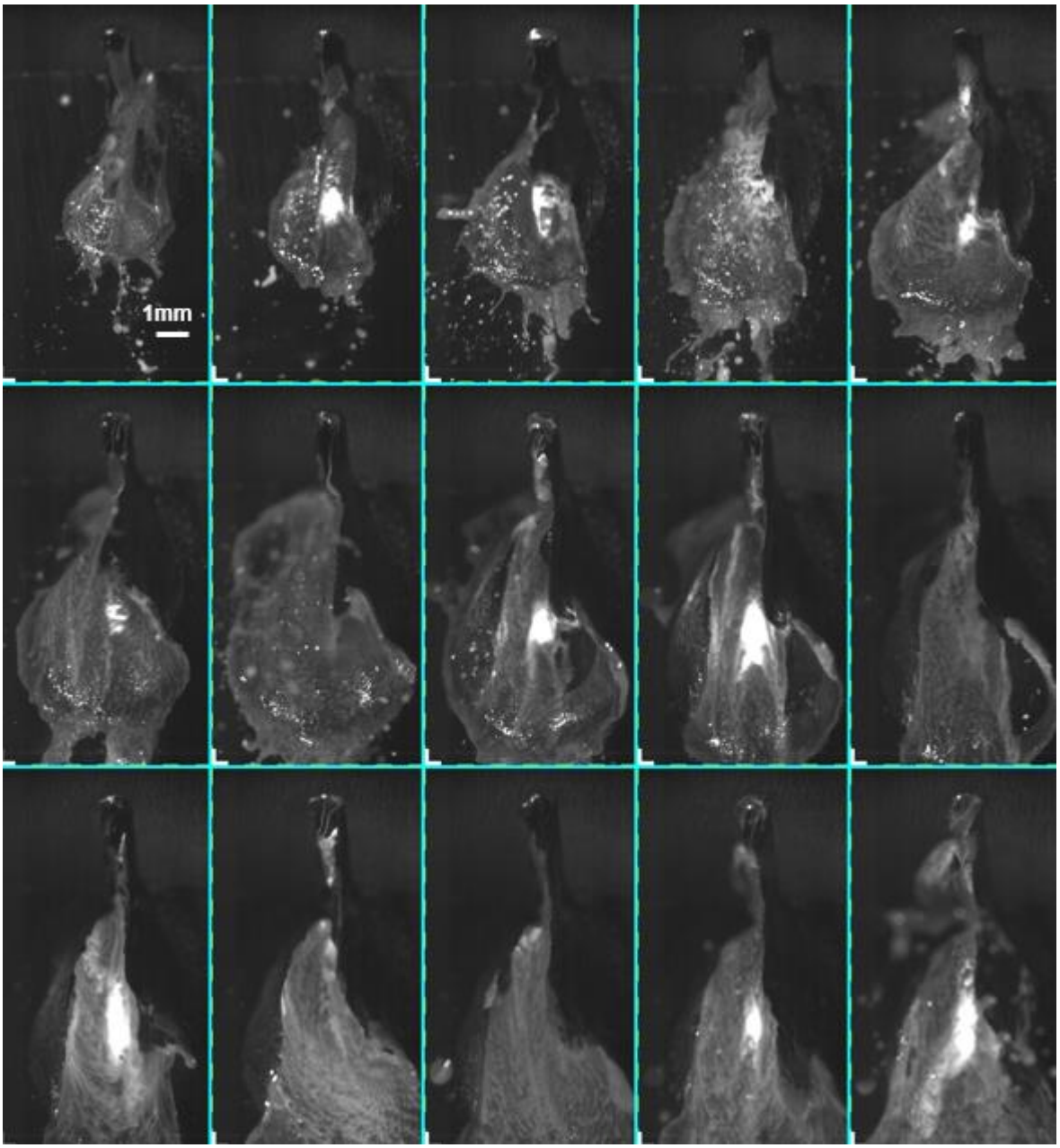



Figure 36 : Hydrodynamique du régime 2(image prise toute les 0,5s/échelle : la largeur de la saignée en face supérieure est de 1mm)

La Figure 36 est un tableau d'images espacées de 0,5s représentant l'hydrodynamique en régime 2. Les images montrent un écoulement agité et turbulant qui va permettre de d'élargir la saigné. Cet élargissement permets :

- d'augmenter la quantité d'oxygène pénétrant dans la saignée. Couplée avec l'écoulement devenu turbulent, ces deux éléments participent à l'augmentation de l'oxydation du métal liquide et au bilan énergétique,
- d'améliorer l'efficacité de l'éjection métallique.

Le régime 2 présente plusieurs avantages : du fait de la large saignée, il existe d'une part une séparation nette entre les bords de la découpe et d'autre part, la longueur de la saignée au niveau de la face inférieure est la même qu'en face supérieure indiquant que l'écoulement dans la saignée est vertical. En effet, une large saignée favorise la pénétration du jet d'oxygène et l'établissement d'une pression suffisante pour assurer un front de découpe vertical.

### *3.1.3 Caractéristiques du régime 1+2*

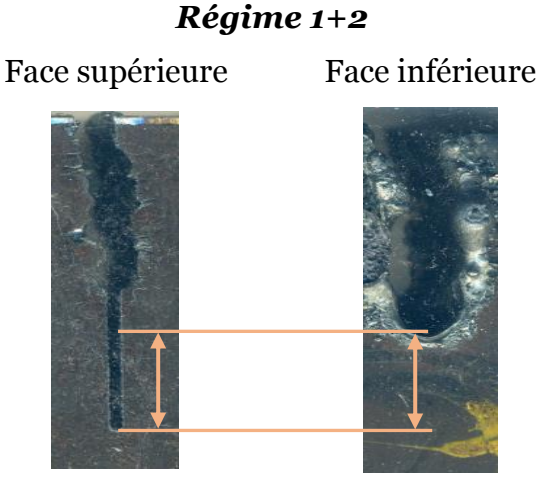



Figure 37 : Image des faces supérieure et inférieure dans le cas du régime 1+2

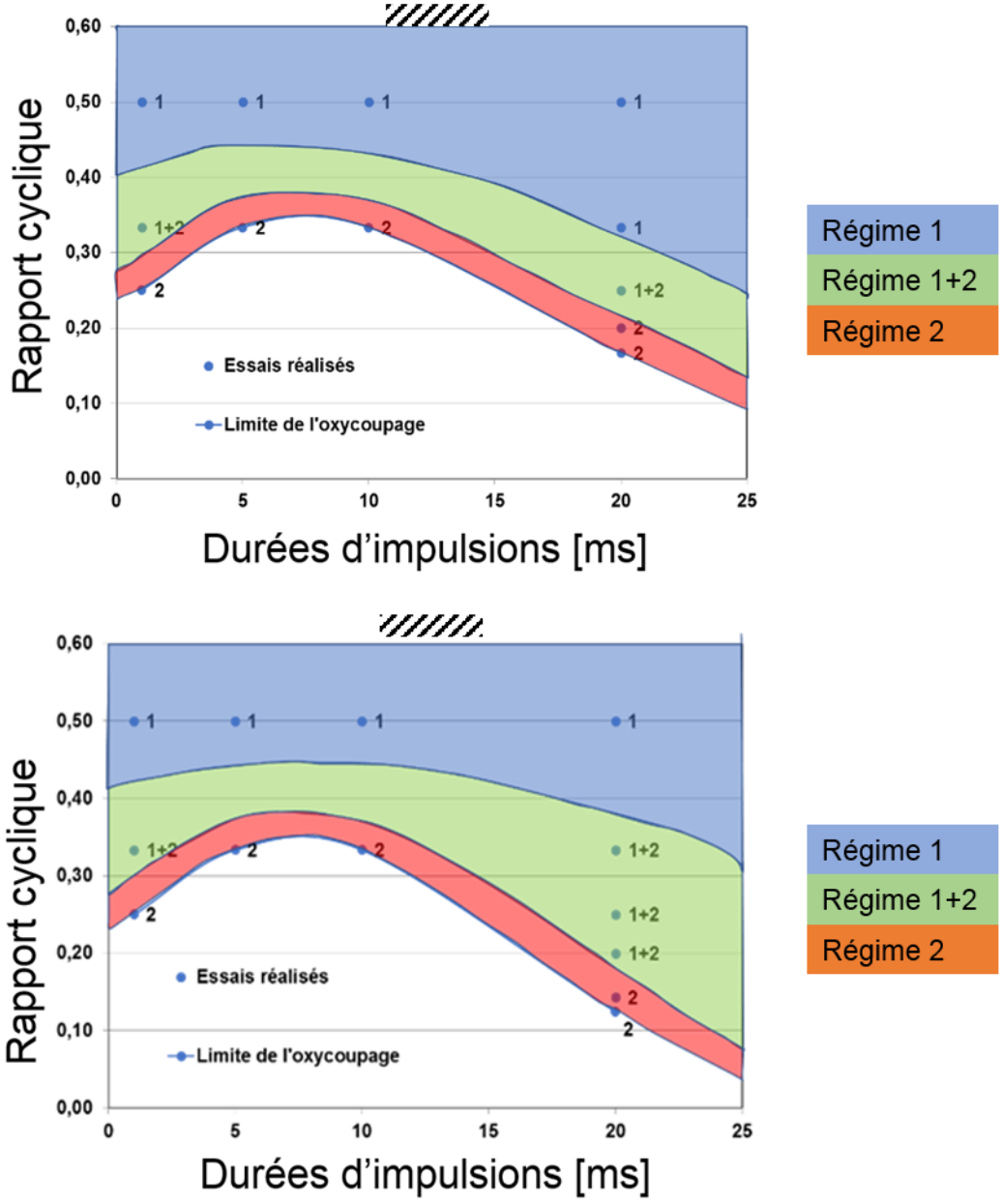
Un troisième régime appelé régime mixte 1+2 apparait durant les essais de découpe. Les paramètres permettant d'obtenir le régime mixte 1+2 sont aussi présenté dans le paragraphe 3.1.4. Le régime mixte 1+2 (voir Figure 37) au cours duquel la forme de la saignée en entrée oscille entre celles des régimes 1 et 2. En sortie, il apparaît sur la Figure 37 que dans la phase correspondant au régime 1 la saignée n'est alors pas débouchant. Ce régime est donc un régime transitoire entre les régimes 1 et 2.

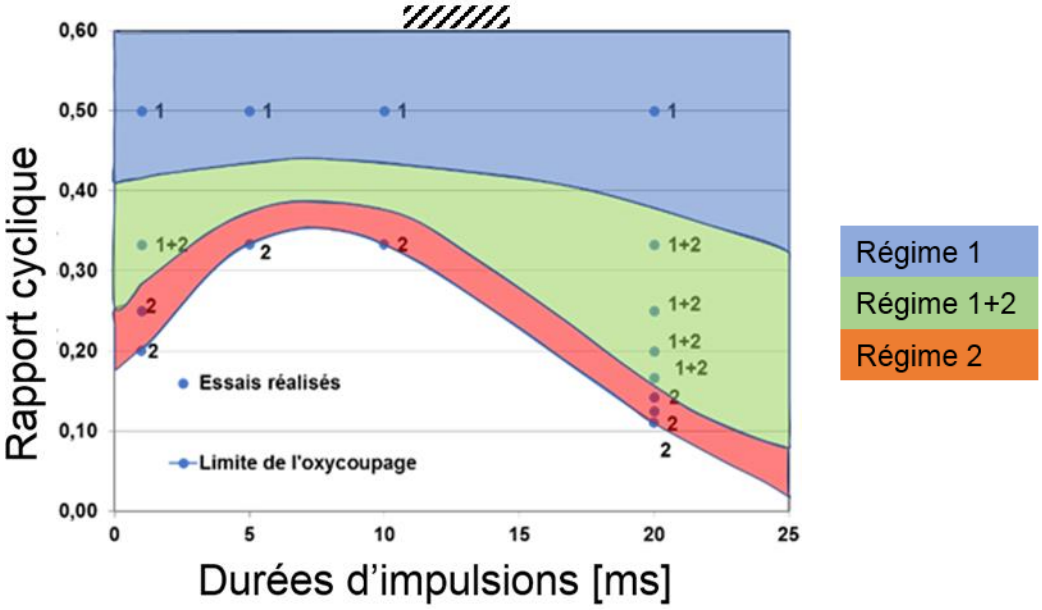
On rappelle ici que lors d'une découpe conventionnelle par laser, l'objectif est de réaliser une découpe de qualité présentant d'une part une saignée fine et dont les parois présentent le moins de stries possible. Dans le cas qui nous intéresse, l'objectif est d'obtenir une découpe présentant la saignée la plus large possible, de façon à bénéficier de la meilleure contribution du gaz d'oxygène au cours du procédé et ce en utilisant une puissance laser minimale.

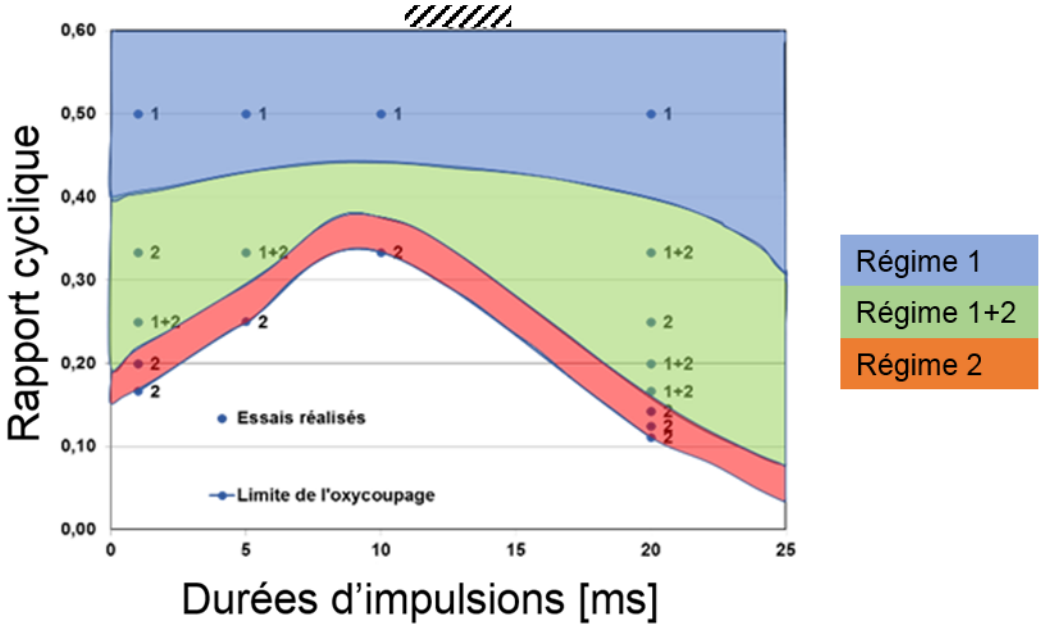
### *3.1.4 Niveau d'apparition des différents régimes*

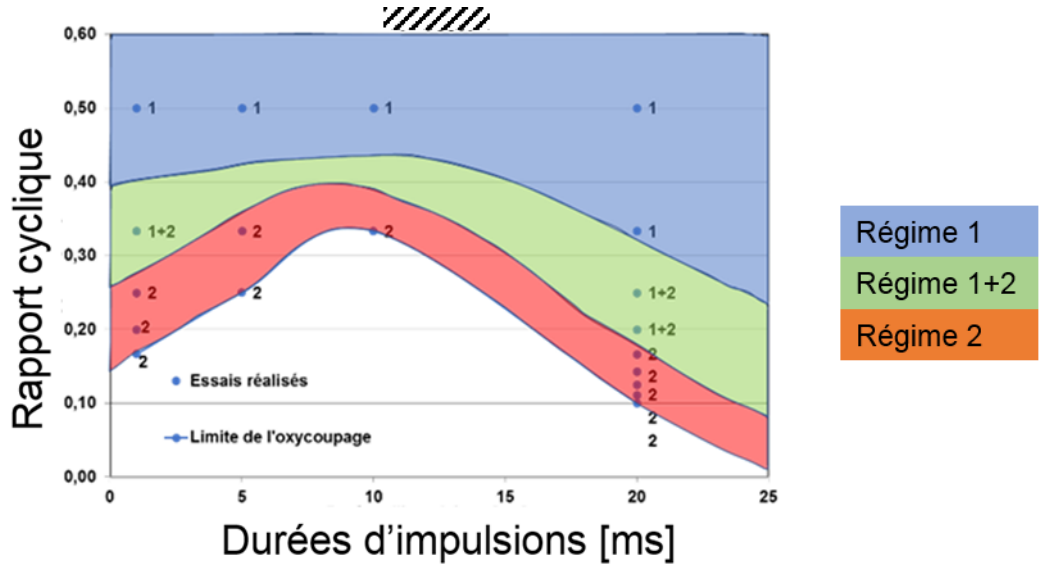
Etant donné les caractéristiques des différents régimes évoqués ci-dessus, le régime 2 est le régime que nous recherchons dans le cadre de notre application ; on

tendra donc à se placer dans les configurations permettant d'atteindre ce régime durant la découpe.




Rapport cyclique
Durées d'impulsions [ms]
Essais réalisés
Limite de l'oxycoupage
Régime 1
Régime 1+2
Régime 2


Rapport cyclique
Durées d'impulsions [ms]
Essais réalisés
Limite de l'oxycoupage
Régime 1
Régime 1+2
Régime 2


Rapport cyclique
Durées d'impulsions [ms]
Essais réalisés
Limite de l'oxycoupage
Régime 1
Régime 1+2
Régime 2

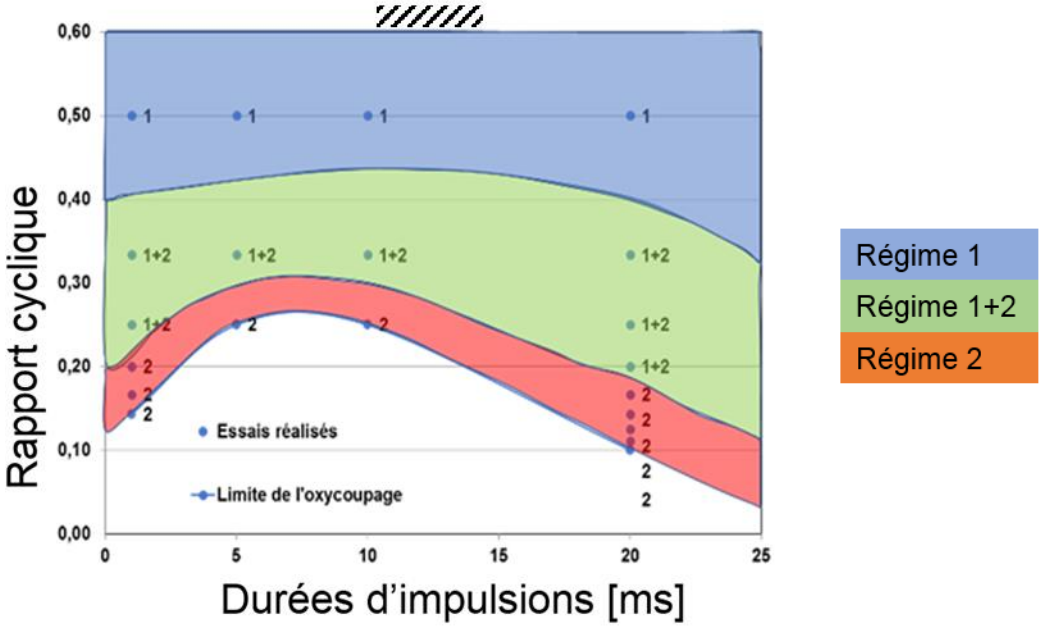



Figure 38 : Niveau de l'apparition des différents régimes de découpe en fonction du rapport cyclique

La Figure 38 met en évidence les différents régimes correspondant aux différentes valeurs de la puissance et du rapport cyclique. On remarque qu'au-delà d'un rapport cyclique de ½ le régime hydrodynamique qui apparaît est le régime 1 ; en effet, jusqu'à un rapport cyclique de ½, l'énergie laser déposée en surface est encore importante pour maintenir les conditions de découpe et non pas de l'oxycoupage Lorsqu'on réduit le rapport cyclique an dessous de 1/3, le régime 2 commence à apparaître pour se rajouter au régime 1 et, dans la majorité des cas, le régime mixte 1+2 apparaît. Ce régime ne convient pas à notre application car l'efficacité de la découpe y est instable. Lorsque le rapport cyclique diminue et se rapproche du seuil limite permettant la découpe, c'est toujours le régime 2 qui s'établit, et ce malgré la réduction de l'énergie moyenne apportée. Il semble en effet que dans ces conditions, le régime d'oxycoupage assisté par laser est atteint et ainsi, que l'énergie mise en jeu dans la découpe ne dépend plus majoritairement des paramètres laser mais du dégagement de chaleur lié à la combustion du métal fondu.

## 3.2 Influence du jet d'oxygène sur la largeur de la saignée en régime 2

On a remarqué que dans le régime 2 la largeur de la saignée ne change pas, quels que soient la puissance laser, le rapport cyclique et la pression d'oxygène.

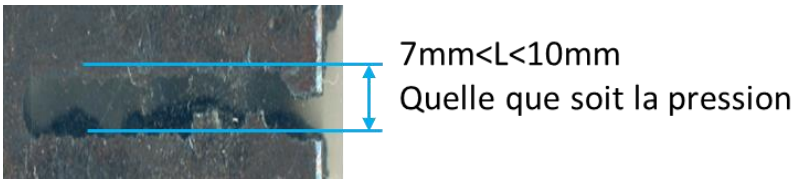



Figure 39 : Largeur de la saignée en régime 2

On suppose dans ce cas que la largeur de la saignée (voir Figure 39) est directement influencée par la structure du jet d'oxygène reçu par la pièce. Dans cet optique, nous avons envisagé de modéliser le jet d'oxygène en sortie de buse afin de connaitre le profil de pression et la structure du jet (présence d'éventuelles ondes de chocs en contact avec la surface) au niveau de la zone d'interaction entre le métal chauffé et la surface.

## 3.3 Théorie et simulation du jet (ANSYS Workbench 14.5)

Dans un premier temps, nous rappellerons brièvement certains aspects théoriques des écoulements subsonique, sonique et supersonique, puis nous présenterons les résultats de simulation obtenus grâce à une modélisation numérique des écoulements à l'aide du logiciel ANSYS Workbench 14.5.

### *3.3.1 Théorie sur l'écoulement à travers une buse convergente*

On se place dans l'hypothèse d'un écoulement d'oxygène incompressible dans la buse.

Le débit massique par unité de section s'exprime sous la forme :

$$\dot{m} = \rho V A \qquad \textit{Équation 43}$$

Avec : ρ la masse volumique, V la vitesse et, A la section.

Considérons le cas d'un gaz parfait. Nous avons :

$$\frac{\dot{m}}{A} = \rho V = \frac{P}{RT} a M_a = \frac{P}{P_0}\frac{P_0}{RT}\sqrt{\gamma RT} M_a \qquad \textit{Équation 44}$$

Avec : $a = \sqrt{\gamma RT}$ : La vitesse du son, $P_0$ : La pression stagnante, T : La température, R : constante des gaz parfaits, $\gamma$ : le coefficient adiabatique.

$$\frac{\dot{m}}{A} = \frac{P}{P_0}\sqrt{\frac{\gamma}{R}}\frac{P_0}{\sqrt{T_0}}\sqrt{\frac{T_0}{T}} M_a = \sqrt{\frac{\gamma}{R}}\frac{P_0}{\sqrt{T_0}}\frac{P}{P_0}\sqrt{\frac{T_0}{T}} M_a \qquad \textit{Équation 45}$$

La pression et la température locale en tout point s'exprime en fonction des conditions stagnantes comme suit :

$$\frac{P_0}{P} = \left(1 + \frac{\gamma - 1}{2} {M_a}^2\right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \qquad \textit{Équation 46}$$

$$\frac{T_0}{T} = 1 + \frac{\gamma - 1}{2} {M_a}^2 \qquad \textit{Équation 47}$$

Donc :

$$\frac{\dot{m}}{A} = \sqrt{\frac{\gamma}{R}} \frac{P_0}{\sqrt{T_0}} M_a \left(1 + \frac{\gamma - 1}{2} {M_a}^2\right)^{\frac{-\gamma}{\gamma-1}} \left(1 + \frac{\gamma - 1}{2} {M_a}^2\right)^{\frac{1}{2}} \qquad \textit{Équation 48}$$

$$\frac{\dot{m}}{A} = \sqrt{\frac{\gamma}{R}} \frac{P_0}{\sqrt{T_0}} \frac{M_a}{\left(1 + \frac{\gamma - 1}{2} {M_a}^2\right)^{\frac{\gamma+1}{2(\gamma-1)}}} \qquad \textit{Équation 49}$$

La valeur maximale du débit par unité de section est obtenue en dérivant la fonction $\frac{\dot{m}}{A}$ par rapport au nombre de Mach $M_a$, les autres paramètres étant indépendant du nombre de Mach (constantes représentant les propriétés du gaz et les conditions stagnantes du réservoir).

$$\frac{d\left(\frac{\dot{m}}{A}\right)}{d(M_a)} = \sqrt{\frac{\gamma}{R}} \frac{P_0}{\sqrt{T_0}} \frac{1}{\left(1 + \frac{\gamma - 1}{2} {M_a}^2\right)^{\frac{\gamma+1}{2(\gamma-1)}}} \left(1 - \frac{{M_a}^2(\gamma + 1)}{2\left(1 + \frac{\gamma - 1}{2} {M_a}^2\right)}\right) \qquad \textit{Équation 50}$$

La dérivée s'annule à la condition suivante :

$$1 - \frac{{M_a}^2(\gamma + 1)}{2\left(1 + \frac{\gamma - 1}{2} {M_a}^2\right)} = 0 \qquad \textit{Équation 51}$$

C'est-à-dire pour $M_a$=1.

Le débit par unité de section atteint une valeur maximale quand la vitesse de l'écoulement devient égale à la vitesse du son ($M_a$=1). R et $\gamma$ étant des constantes, le débit ne dépend que de la pression et de la température. On retrouve ici le résultat bien connu : la vitesse de l'écoulement au col ne dépassera jamais la vitesse du son, quelle que soit la pression en amont. Ce résultat est confirmé entre autre par l'étude de C.Man (C.Man, 1997) (voir Figure 40).

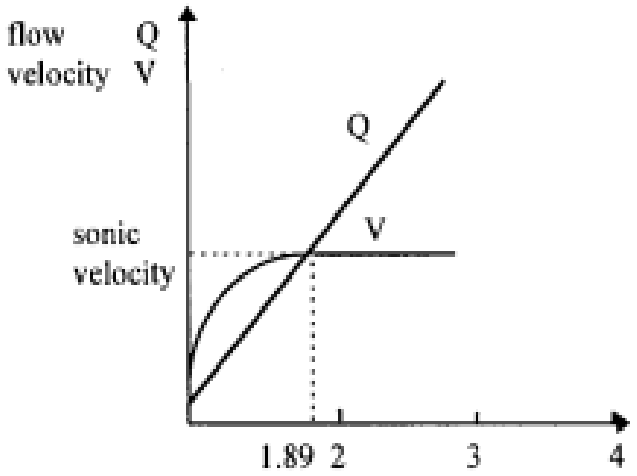



Figure 40 : Vitesse en sortie de buse du gaz en fonction de la pression stagnante (C.Man, 1997).

Quand un nombre de Mach de l'écoulement atteint $M_a$=1, la pression $P_c$, la température $T_c$ et la masse volumique $\rho_c$ au col atteint des valeurs appelées valeurs critiques notées $P^*$ , $T^*$, $\rho^*$en sortie de buse :

$$\boldsymbol{P_c = \frac{P^*}{P_0} = \left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}} \qquad \textit{Équation 52}$$

$$\boldsymbol{T_c = \frac{T^*}{T_0} = \frac{2}{\gamma+1}} \qquad \textit{Équation 53}$$

$$\boldsymbol{\rho_c = \frac{\rho^*}{\rho_0} = \left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}} \qquad \textit{Équation 54}$$

Considérons le dioxygène comme un gaz parfait avec $\gamma = 1{,}4$ , il vient :

$$\boldsymbol{P^* = P_c = 0.5282 P_0} \qquad \textit{Équation 55}$$

$$\boldsymbol{T^* = T_c = 0.8333 T_0} \qquad \textit{Équation 56}$$

$$\boldsymbol{\rho^* = \rho_c = 0.8333 \rho_0} \qquad \textit{Équation 57}$$

### *3.3.2 Buse convergent-divergent (buse de Laval)*

Dans la buse convergente-divergente ou buse de Laval, les mêmes équations sont valables. La pression P, la température locale T et la masse volumique locale ρ, peuvent être exprimées en fonction des conditions initiales et du nombre de Mach.

$$\frac{P_0}{P} = \left(1 + \frac{\gamma - 1}{2} {M_a}^2\right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \qquad \textit{Équation 58}$$

$$\frac{T_0}{T} = 1 + \frac{\gamma - 1}{2} {M_a}^2 \qquad \textit{Équation 59}$$

$$\frac{T_0}{T} = \left(1 + \frac{\gamma - 1}{2} {M_a}^2\right)^{\frac{1}{\gamma-1}} \qquad \textit{Équation 60}$$

La relation qui décrit l'écoulement en fonction de la section est représenté dans l' *Équation 61* :

$$\frac{A}{A^*} = \frac{1}{M_a}\left[\left(\frac{2}{\gamma + 1}\right)\left(1 + \frac{\gamma - 1}{2} {M_a}^2\right)\right]^{\frac{\gamma+1}{2\gamma-1}} \qquad \textit{Équation 61}$$

### *3.3.3 Ondes de choc dans une buse convergente*

A l'entrée de la buse $P_0$ et $T_0$ sont des constantes. La pression au niveau du plan de sortie de la buse est désignée par $P_e$ et la contre-pression est $P_b$ qui peut être modifiée par l'ouverture ou la fermeture de la valve. À la condition $P_0 = P_e = P_b$ il n'y aura pas d'écoulement à travers la buse.

A l'état initial, la pression $P_0$ règne dans tout le système. Quand on diminue progressivement $P_b$, le débit augmente. La pression diminue dans la direction de l'écoulement comme l'indique la condition (a) de la Figure 41. La pression $P_e$ en sortie de la buse reste égale à $P_b$ tant que l'état de décharge maximale n'est pas atteint. La condition (c) de la Figure 41 illustre la répartition de la pression dans le cas de la décharge maximale.

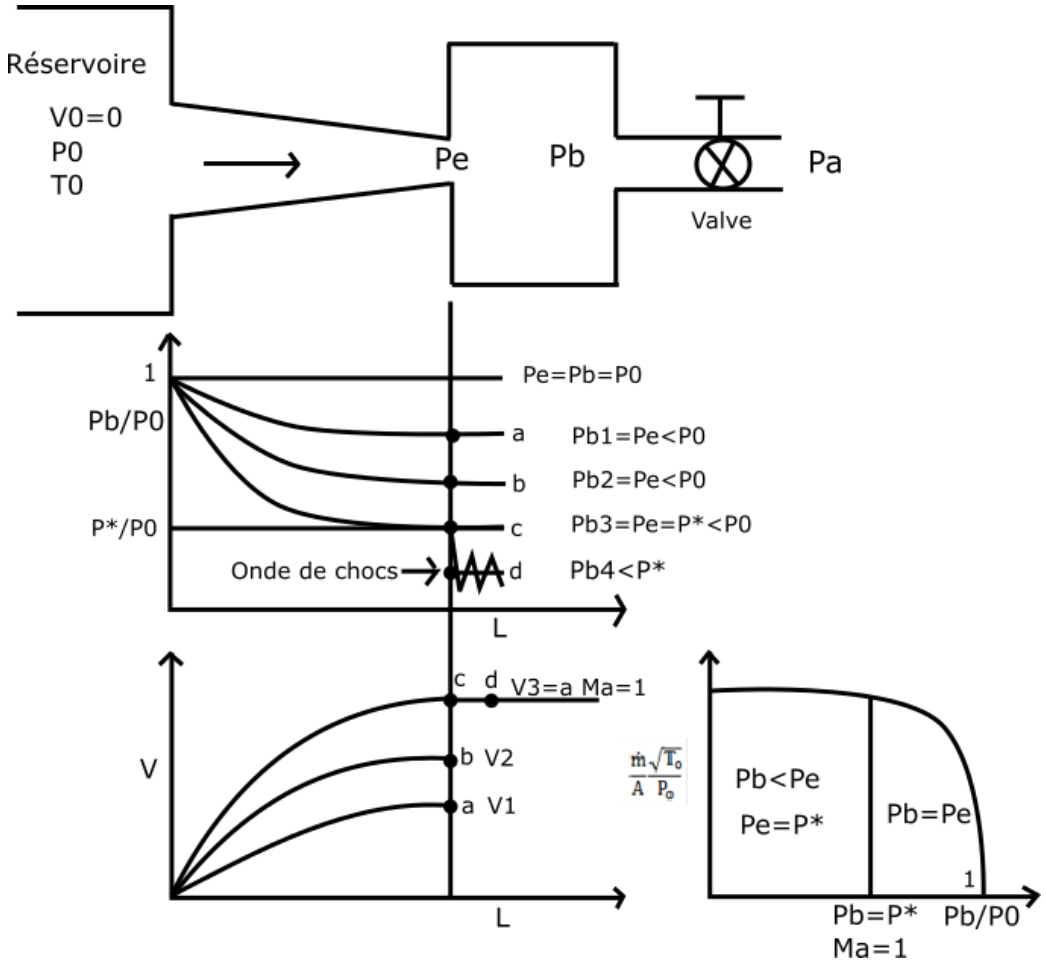



Figure 41 : Écoulement et ondes de choc dans une buse convergente

Lorsque le ratio $\frac{\dot{m}}{A}$ atteint sa valeur maximale pour une vitesse de sortie égale à la vitesse du son, $M_a$=1 dans l'*Équation 46*, la pression $P_e$ devient égal à $P^*$(point c Figure 41) *Équation 52*. Comme la buse n'a pas de section divergente, une réduction supplémentaire de la contre-pression $P_b$ ne permettra pas d'accélérer l'écoulement à l'état supersonique. Par conséquence, la pression $P_e$ de sortie doit continuer à rester à la pression $P^*$ même si nous réduisons encore plus $P_b$ et nous augmentons $P_0$.

Pour une buse convergente donnée, le débit ne peut pas être augmenté davantage. Ainsi, ni la pression de sortie de la buse $P_e$, ni le débit massique sont affectés par l'abaissement de $P_b$ au-dessous de $P^*$.

Toutefois, pour une valeur de $P_b$ inférieure à $P^*$ (point d), la section du flux sortant de la buse doit s'élargir en fonction de la contre-pression, comme illustré par la condition (point d) en Figure 41. Ce processus d'expansion est en trois dimensions et la répartition de pression ne peut pas être prédite par la théorie unidimensionnelle.

Dans ces conditions les jets de gaz sont définis comme étant des jets supersoniques sous-détendus présentant une ou plusieurs onde de choc statique dans l'écoulement [40][39][42] .

### *3.3.4 Ondes de choc dans une buse convergente-divergente*

Du fait de la partie convergente commune des deux buses, toutes deux présentent des ondes de choc en sortie.

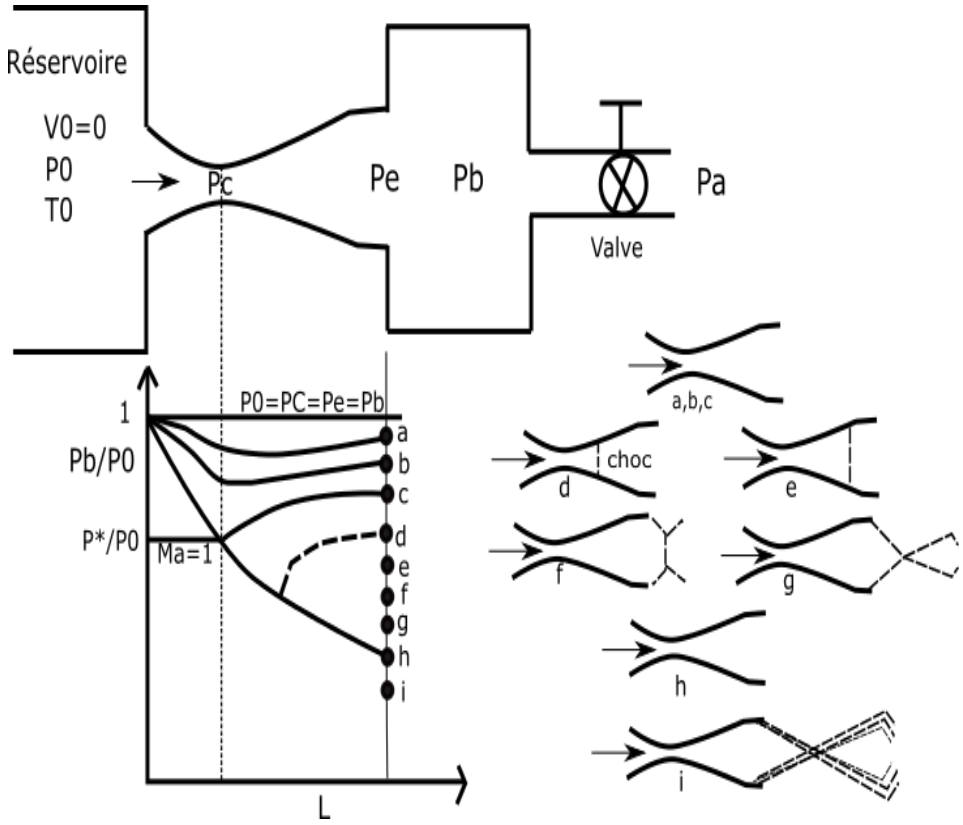



Figure 42 : Ondes de choc dans une buse convergente-divergente

La Figure 42 montre qu'on atteint la vitesse du son au col ($M_a$=1) en réduisant le rapport de pression $P_b/P_0$ jusqu'à obtenir les conditions d'écoulement critique au col. Dans ce cas Les ondes de choc commencent alors à apparaître dans l'écoulement (mêmes formules que pour la buse convergente). Les premières ondes de chocs qui apparaissent en réduisant la pression $P_b < P^*$ sont les ondes de choc planes (les points « d » et « e » du graphique de la Figure 42). Plus on réduit la pression $P_b$ ou augmente la pression $P_0$, plus les ondes de chocs deviennent obliques (les points « f » et « g » du graphique de la Figure 42). En disposant un divergent en aval du col, il est possible d'adapter la pression de sorti de la tuyère à la pression ambiante. Dans c'est conditions les ondes choc disparaissent dans l'écoulement (point « h » de la Figure 42). Dans une application de découpe par laser, l'écoulement obtenu au niveau du point h est celui

qui permet d'obtenir la profondeur de jet maximale et l'éjection de métal fondu la plus rapide. En dessous de la valeur optimale de pression (point « i » du graphique de la Figure 42), les ondes de chocs apparaissent à nouveau sous forme de chocs multiples obliques

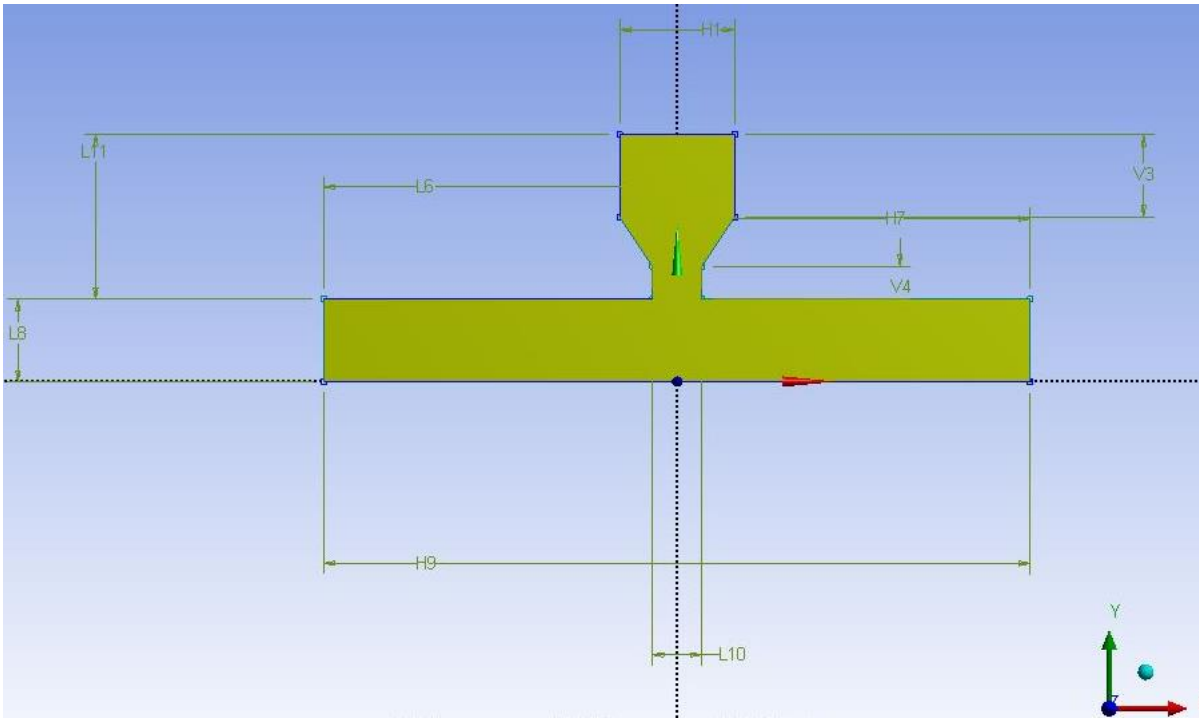
### *3.3.5 Simulation du jet à travers une buse convergente*

L'écoulement à modéliser est supersonique dans la quasi-totalité des cas, même dans les configurations présentant une faible différence de pression entre la pression stagnante $P_0$ et la pression atmosphérique $P_b$ en sortie de buse (il suffit que $P_0/P_b$ dépasse 2 pour que le jet en sortie de buse soit supersonique).

Afin de mieux simuler l'écoulement en sortie de buse et à la surface de l'échantillon à découper, le modèle a été réalisé sous Fluent dans Ansys Workbench 14.5.

#### 3.3.5.1 Géométrie et maillage

La buse utilisée dans les essais est une buse convergente de diamètre au col de 3 mm à sortie parallèle. La buse est placée à une distance buse-pièce de 5 mm de l'échantillon à découper.



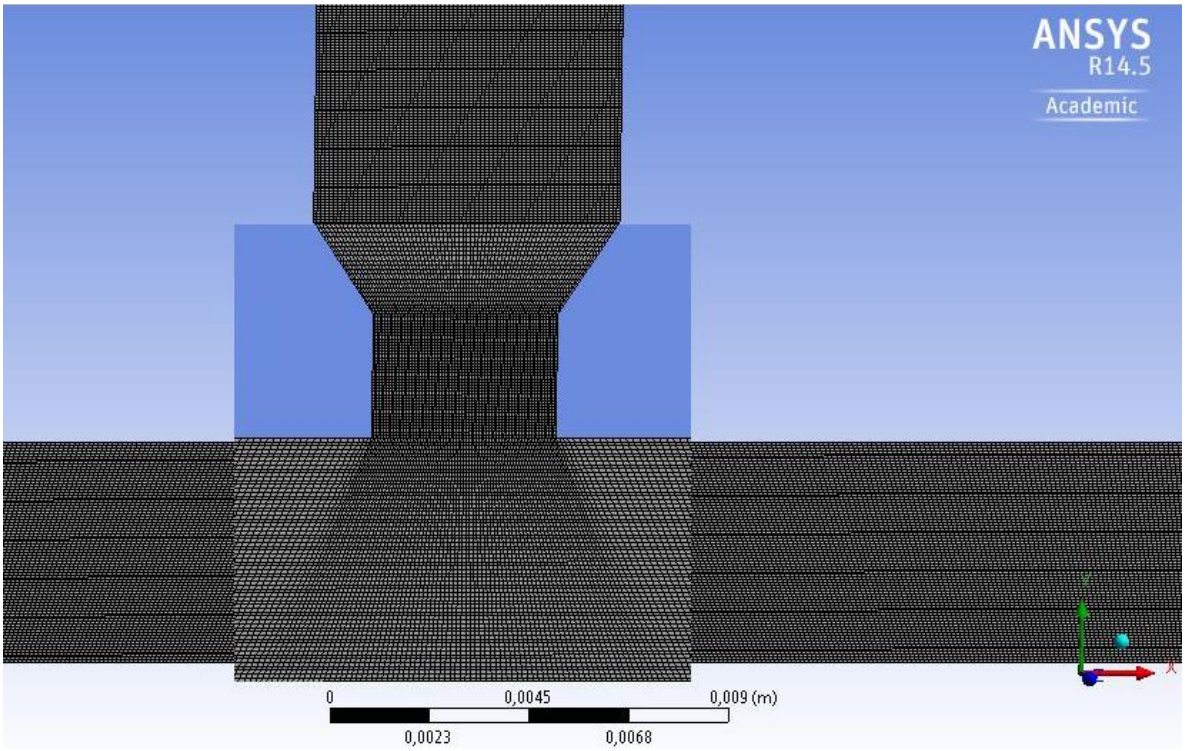
| Dimensions: 9 | |
|---|---|
| H1 | 7 mm |
| H7 | 20 mm |
| H9 | 43 mm |
| L10 | 3 mm |
| L11 | 10 mm |
| L6 | 20 mm |
| L8 | 5 mm |
| V3 | 5 mm |
| V4 | 2 mm |

Figure 43 : Géométrie du modèle utilisé sous ANSYS Workbench 14.5 (buse/air/surface de l'échantillon)

La Figure 43 illustre la géométrie représentant notre configuration buse-pièce et du domaine air qui sépare les deux. L'entrée de buse de diamètre H1 et hauteur V3 en entrée correspond à la taille l'endroit où la pression stagnante est mesurée (pression du réservoir). La section convergente de la buse est de longueur 3 mm (L11 -V3-V4). La section parallèle en sortie de buse (après le col) est de longueur « V4 » de 2 mm. La surface de l'échantillon « H9 » est de 43 mm².

### 3.3.5.2 Maillage

Le maillage utilisé est un maillage quadrangle choisi afin de garder une répartition uniforme et de limiter les erreurs ou imprécisions liées à l'hétérogénéité du maillage.



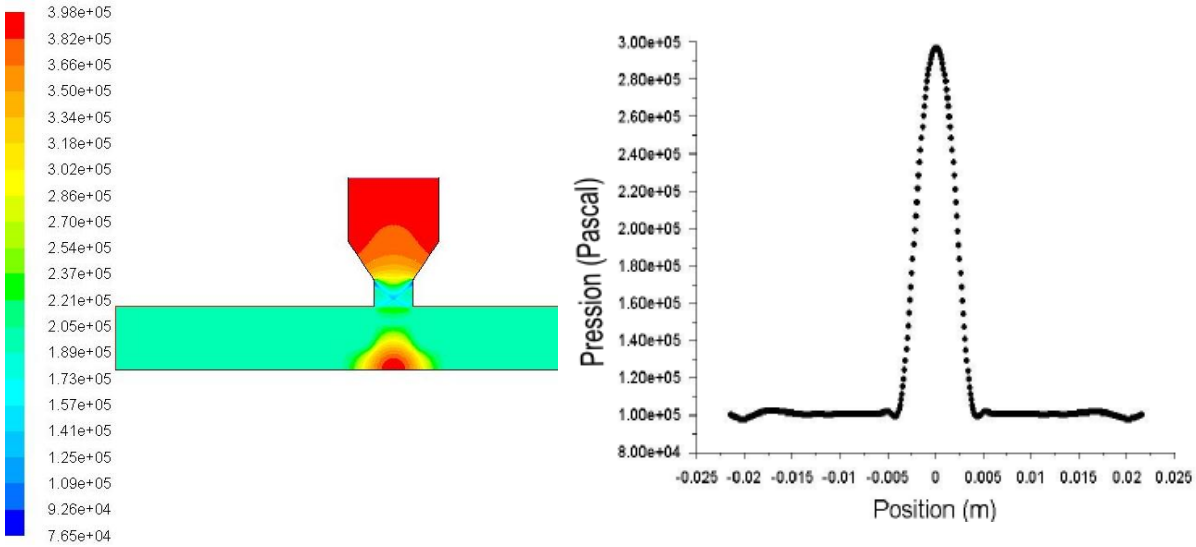
| | |
|---|---|
| Span Angle Center | Fine |
| Curvature Normal A... | Default (18,0 °) |
| Min Size | Default (2,2699e-005 m) |
| Max Face Size | Default (2,2699e-003 m) |
| Max Size | Default (4,5399e-003 m) |
| Growth Rate | Default (1,20 ) |
| Minimum Edge Length | 2,e-003 m |

Figure 44 : Maillage du modèle sous ANSYS Workbench 14.5

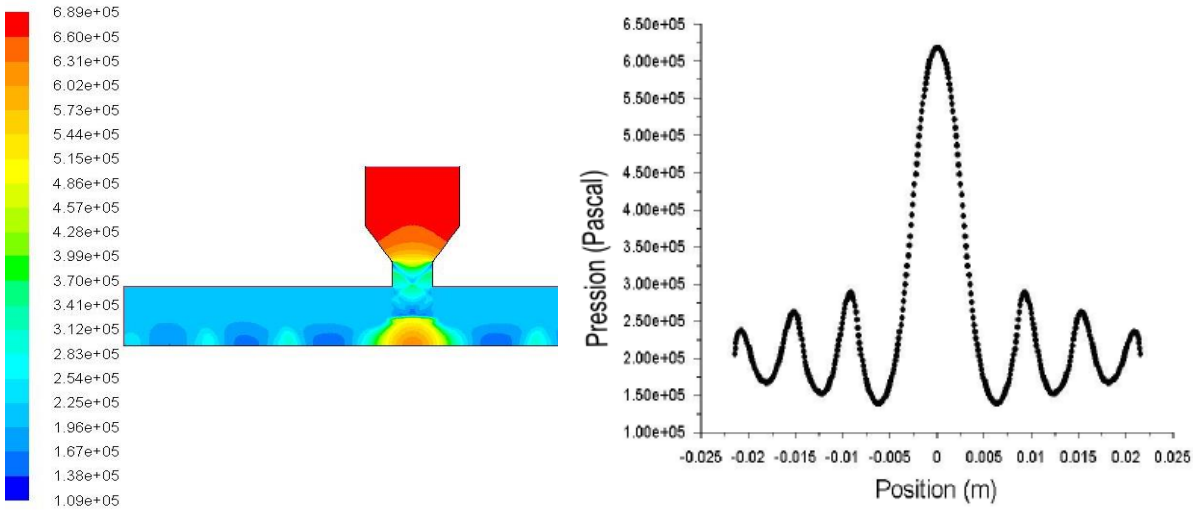
Le maillage a été raffiné jusqu'à 2,2699 x $10^{-5}$ m tout en conservant un nombre d'itération raisonnable pour le calcul (environ 2000 itérations). Le maillage a été raffiné d'un facteur deux dans la zone entre le col et la surface de l'échantillon (voir Figure 44) constituant la zone d'intérêt principale qui nous permet de bien modéliser le jet et de visualiser les éventuelles ondes de chocs.

### 3.3.5.3 Profil de pression

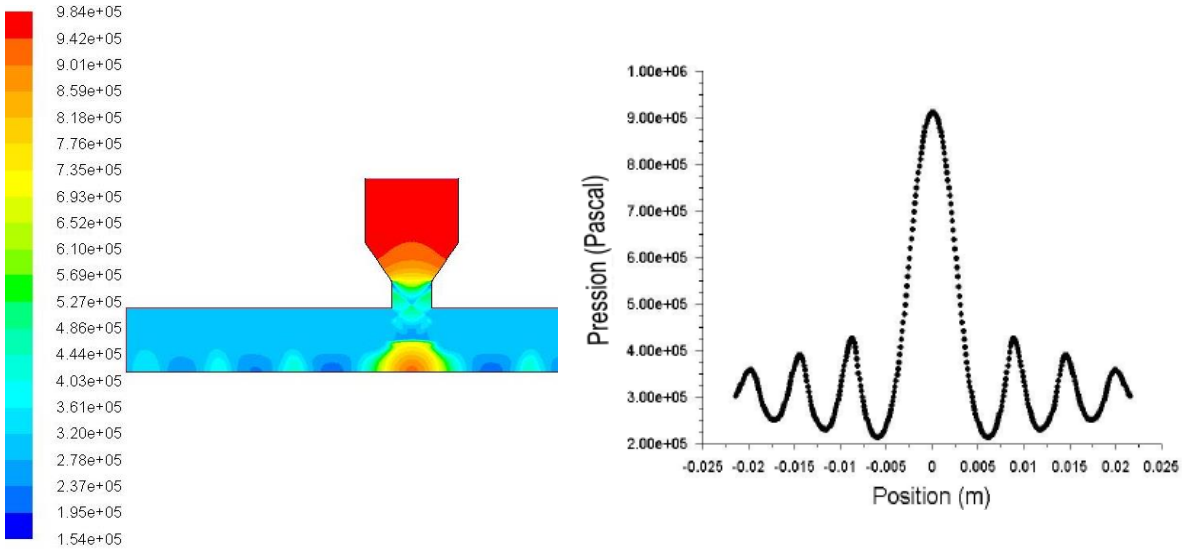
Le résultat de simulation sur Fluent montre bien l'apparition d'ondes de chocs à partir de 2 bars de pression stagnante ce qui est cohérent avec la théorie. La connaissance du profil de pression sur la surface à découper est d'une importance majeure pour comprendre la cause de l'élargissement de la saignée. En effet, on rappelle ici qu'il a été remarqué que la largeur de la saignée était indépendante des paramètres procédés.




*(a)*




*(b)*




*(c)*

Figure 45 : Profil de pression en sortie de buse et jusqu'à la surface de l'échantillon (a) 3 bar (b) 6 bar (c) 9 bar

La Figure 45 montre les différents profils de pression en sortie de buse jusqu'à la surface de la pièce. Trois pressions ont été testées : 3, 6 et 9 bar (voir respectivement Figure 19 (a), (b) et (c)). Le rapport de la pression stagnante à la pression atmosphérique étant supérieur à deux, les trois profils de pression présentent des ondes de choc.

En utilisant une pression stagnante de 3 bars, une seule onde de choc apparait à une distance d'environ 1 mm du col. La pression reçue par la pièce prend une forme gaussienne centrée dans l'axe du laser avec un pic de 3,9 bars. On note ici que la largeur de la gaussienne et d'environ 10mm. Le profil de pression sur le reste de la pièce reste constant et de l'ordre de 1 bar.

Pour une pression de 6 bars, plusieurs ondes de chocs apparaissent sur une distance de 4 mm à partir du col. Le profil au niveau du point d'incidence est aussi une gaussienne avec un pic de pression de 5,8 bars d'une largeur d'environ 10 mm. On remarque aussi l'apparition de turbulences sur le reste de la pièce mais sans influence sur la zone d'interaction.

Les résultats obtenus avec une pression de 9 bars sont très similaires à ceux obtenus avec une pression de 6 bars du point de vue des ondes de chocs et des turbulences créées de part et d'autre de la gaussienne de pression. La largeur de la gaussienne est d'environ 10 mm avec un pic à 8,2 bar au niveau du point d'incidence.

On remarque sur toutes les pressions utilisées que la largeur de la gaussienne de pression est de 10 mm. Cette valeur est liée directement à la largeur de la buse utilisée et à la distance buse-pièce adoptée dans nos essais. Dans le cas où le régime 2 se met en place, et lorsque les conditions de température en extrême surface le permettent (chapitre 4), la combustion se met en place sur toute la zone où l'oxygène est en contact avec la surface. Pour cette raison, on a remarqué que la variation des paramètres laser et de la pression n'ont pas d'influence sur la largeur de la saignée, et en aucun cas la largeur de la saignée ne dépasse les 10 mm.

L'augmentation de la pression augmente l'apport d'oxygène sur la surface du métal liquide et son oxydation. La présence d'onde de choc dans l'écoulement et situé non loin de la surface favoriseront un écoulement turbulent qui est également favorable au procédé en augmentant les échanges chimiques oxygène/métal liquide. L'étude numérique de leur existence et de leur position nous permet d'identifier des configurations de paramétrie de gaz favorable à la découpe en régime 2.

# 4 Conclusion

Dans ce chapitre la variation des paramètres procédés dans les essais de découpe nous ont permis :

- d'identifier un domaine de fonctionnement sûr de notre procédé. Ce domaine de fonctionnement permet à l'utilisateur de choisir une durée d'impulsion convenable associée à une fréquence pour chaque puissance pour la découpe.

- de quantifier les données d'énergie, de nombre d'impulsion, de taux de recouvrement nécessaires à l'initiation de la découpe ; cette démarche a permis d'identifier des critères seuils correspondant à l'initiation de la découpe.

- de minimiser l'énergie de découpe jusqu'à X J conformément à notre l'objectif de réduire les distances de sécurité

- d'établir l'influence de la vitesse et de la pression sur la profondeur maximale de découpe atteignable

- de déterminer un régime de découpe efficace minimisant l'énergie laser nécessaire tout en répondant au mieux à nos besoins

- de connaître l'influence du jet d'oxygène sur la largeur de la saignée.

# Chapitre III Pyrométrie UV et IR, mesure de la température et détermination de l'émissivité

## 1 Introduction

La mesure de température du procédé de découpe par laser et oxygène est d'une importance majeure dans le cadre de notre étude pour des nombreuses raisons :

Premièrement, le procédé de découpe par laser assisté par oxygène est un procédé qui engendre des températures élevées proches de la température de fusion. Comme nous l'avons vu dans l'étude bibliographique (chapitre 1, section 5), très peu de travaux ont été menés pour estimer les températures atteintes lors de ce procédé [22][23][24][25][26]. De plus les valeurs de température rapportées sont très dispersées. Elles peuvent varier de 1900 K à 5000K. Ces différentes études, utilisent la technique de mesure par pyrométrie infrarouge qui permet entre autres d'obtenir des champs de température dans la zone d'interaction laser matière. Comme nous le verrons plus loin, les températures mesurées par pyrométrie infrarouge sont très sensibles au facteur d'émission de la surface. De plus ce facteur dépend fortement des propriétés physiques de la surface observée : température, angle d'incidence, changement de phase, l'état d'oxydation… ceci permet sans doute d'expliquer les dispersions importantes que l'on trouve dans la littérature. Il semble donc important de développer un système de mesure thermique permettant de s'affranchir du facteur d'émission.

Deuxièmement, lors du procédé de découpe la température doit se située entre une température critique associée au seuil de combustion du métal en présence d'oxygène et une température maximale de l'ordre de 3500K correspondant à la température limite de dissociation de FeO en Fe et $O_2$. En effet la réaction de

combustion est exothermique alors que la réaction de dissociation est endothermique et conduit donc à une perte d'efficacité du procédé. Comme nous l'avons vu dans la partie bibliographique, le seuil de combustion est très mal défini. Une mesure précise de la température du seuil de combustion semble donc primordiale pour mieux contrôler le procédé et par exemple optimiser les paramètres laser pour obtenir lors du procédé une température la plus proche possible du seuil de combustion.

L'objectif de ce chapitre est donc d'estimer précisément la température ce qui est nécessaire pour mieux comprendre et optimiser le procédé. Les mesures infrarouges réalisée auparavant (domaine spectrale compris entre 780 nm 820nm dans le cas du dispositif de M. Muller et R. Fabro [47][48] ont l'avantage de donner des champs de température mais elles sont dépendantes du facteur d'émission. L'objectif est donc de développer un dispositif qui permettent de s'affranchir du facteur d'émission et qui permettent d'obtenir également des cartographies du champ de température. Le dimensionnement d'un système pyrométrique passe en général par le choix d'une longueur d'onde. Plus cette longueur d'onde sera courte plus l'effet du facteur d'émission de la surface sera faible. Dans ce chapitre, nous proposons de développer en parallèle du dispositif de mesure du champ de température dans l'infrarouge couplé à un dispositif de mesure à plus courte longueur d'onde notamment dans le domaine de l'ultraviolet. Cette mesure ponctuelle supposée indépendante du facteur d'émission, nous permettra de recaler les mesures infrarouges en estimant le facteur d'émission dans le domaine infrarouge.

Dans cette étude nous allons montrer dans un premier temps les aspects théoriques sur le rayonnement des matériaux à l'état solide et liquide qui est la base du fonctionnement des techniques pyrométriques. Dans un deuxième temps, nous présenterons le dispositif expérimental de découpe laser instrumenté par un système de mesure de température pyrométrique. Et nous détaillerons l'optimisation du système courte longueur d'onde dans le domaine de l'ultraviolet. Nous finirons par présenter le principe de dépouillement et nous présenterons quelques résultats obtenus.

# 2 Aspects théoriques sur le rayonnement des matériaux à l'état solide et liquide

La pyrométrie utilise le rayonnement d'une surface pour en déduire sa température. Elle nécessite de bien caractériser la relation entre l'énergie rayonnée et la température de la surface. Dans cette partie nous allons présenter des rappels théoriques sur le rayonnement émis par un corps noir (décrite par la loi de Planck) et d'un corps réel et sur la notion de facteur d'émission qui caractérise un corps réel par rapport à un corps noir. Ces rappels nous permettrons de choisir et d'optimiser notre système pyrométrique.

## 2.1 Puissance rayonnée par une surface corps noir

Par définition, le corps noir est un corps idéal capable d'absorber puis de réémettre la totalité du rayonnement qu'il reçoit. Par conséquent le corps noir est une surface opaque non réfléchissante. L'intérêt du corps est qu'il est possible d'estimer simplement la luminance spectrale $L_{\lambda}^{0}$(puissance émise par unité de surface, d'angle solide et plage de longueur d'onde) qu'il émet à l'ai de la loi de Planck :

$$L_{\lambda}^{0} = \frac{2hc^{2}}{\lambda^{5}} \frac{1}{e^{\frac{hc}{k_b \lambda T}} - 1} \qquad \textit{Équation 62}$$

Avec :

$c$ : vitesse de la lumière (3.108 m.s-1)

$h$ : constante de Planck (6,625.10-34 J.s)

$k_b$ : constante de Boltzmann (1,38.10-23 J.K-1)

$T$ : température du corps noir en Kelvin

Pour des raisons pratiques on définit les constantes de radiation $C_1 = 2hc^2$=1.44.$10^{-2}$J.m².$s^{-1}$ et $C_2 = \frac{hc^2}{k}$ =1.19112. $10^{-16}$m².$s^{-1}K^{-1}$. Avec ces définitions la loi de Planck devient ainsi :

$$L_{\lambda}^{0} = \frac{C_1 \lambda^{-5}}{e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1} \qquad \textit{Équation 63}$$

La Figure 46 donne l'évolution de la luminance du corps noir en fonction de la longueur d'onde pour différentes températures classiquement obtenues lors d'un procédé de découpe laser.

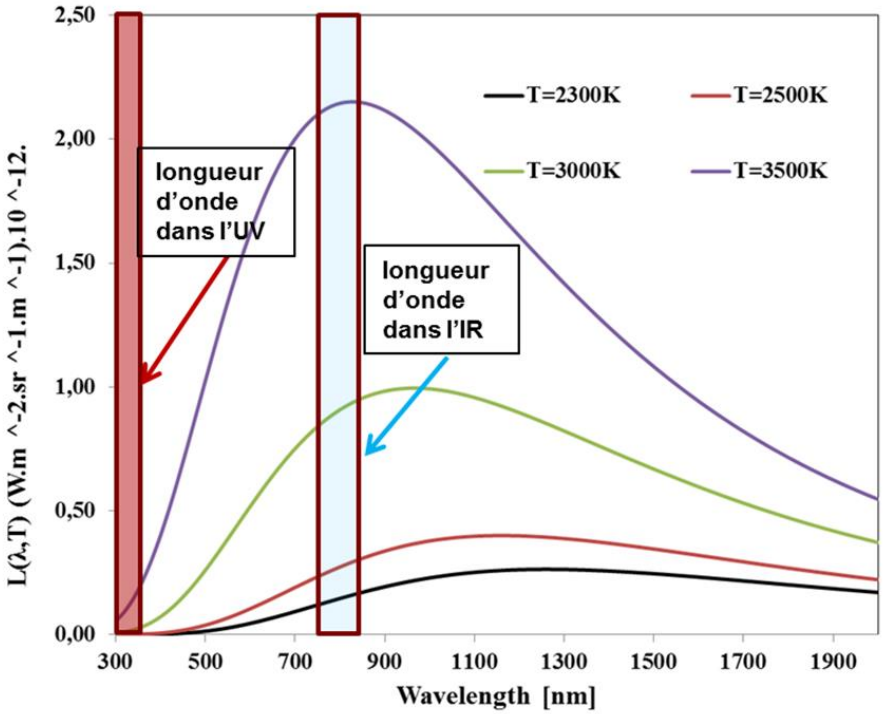



Figure 46 : Emission d'un corps noir en fonction de la température et la longueur d'onde

Cette courbe d'évolution montre qu'il existe un maximum d'émission pour une longueur d'onde $\lambda_{max}$ donnée par la loi de déplacement de Wien :

$$\lambda_{max} = \frac{hc}{4,965.kT} = \frac{2,898.10^{-3}}{T} \qquad \textit{Équation 64}$$

D'après cette relation on remarque aussi que plus la température du corps noir augmente, plus le maximum d'émission se déplace vers les courtes longueurs d'onde.

Par exemple, pour la température que l'on atteint en découpe laser (environ 2300K), on trouve un lambda max de 1,26µm dans le domaine proche infrarouge. Une

mesure pyrométrique dans ce domaine permet d'avoir un signal élevé et de diminuer les tailles de capteur afin de faire facilement des mesures de champ de température.

Au contraire, pour les courtes longueurs d'onde la puissance émise devient très faible plus la longueur d'onde diminue. Par exemple pour une température de 3500K, la puissance spectrale émise dans l'ultraviolet à 360nm est 8 fois plus faible que celle mesurée dans l'infrarouge à 800nm. Pour les courtes longueurs d'onde la puissance émise étant très faible, et l'énergie d'un photon étant plus élevée, la détection du rayonnement se fait plutôt par comptage de photon d'où l'utilisation de photomultiplicateurs.

## 2.2 Puissance rayonnée par une surface réelle

### *2.2.1 Notion de facteur d'émission*

Le rayonnement d'une surface réelle est plus complexe que celle du corps noir. Elle dépend notamment des propriétés physiques de la surface : température, état de surface (rugosité dans le cas des solides), angle d'incidence, nature de la surface (liquide ou solide) …

Il est d'usage d'estimer la luminance d'une surface réelle en la comparant à un corps noir à la même température. Ceci amène à définir le facteur d'émission spectral donné par la relation suivante

$$\boldsymbol{L_\lambda(T) = \varepsilon(\lambda,T) L_\lambda^0(T)} \qquad \textbf{\textit{Équation 65}}$$

Avec : $L_\lambda(\lambda, T)$ la luminance du corp réel, $\varepsilon(\lambda, T)$ facteur d'émission du corp réel et $L_\lambda^0(\lambda, T)$ la luminance du corps noire.

Ce facteur d'émission est souvent méconnu notamment pour les matériaux utilisés en découpe sur chantier et peut varier fortement pendant un processus de découpe. Il semble donc nécessaire de le mesurer en temps réel pour affiner les mesures de température par pyrométrie IR.

### *2.2.2 Effet du facteur d'émission en pyrométrie*

Un paramètre important qui caractérise la qualité d'un pyromètre est sa sensibilité relative para rapport à la température. Cette grandeur notée $\frac{1}{L_\lambda^0}\frac{dL_\lambda^0}{dT}$ s'exprime:

$$\frac{1}{L_\lambda^0}\frac{dL_\lambda^0}{dT} = \frac{hc}{\lambda KT^2}\frac{e^{\frac{hc}{(\lambda KT)}}}{e^{\frac{hc}{(\lambda KT)}} - 1} \qquad \textit{Équation 66}$$

La figure 7 montre la relation entre la sensibilité relative et la longueur d'onde.

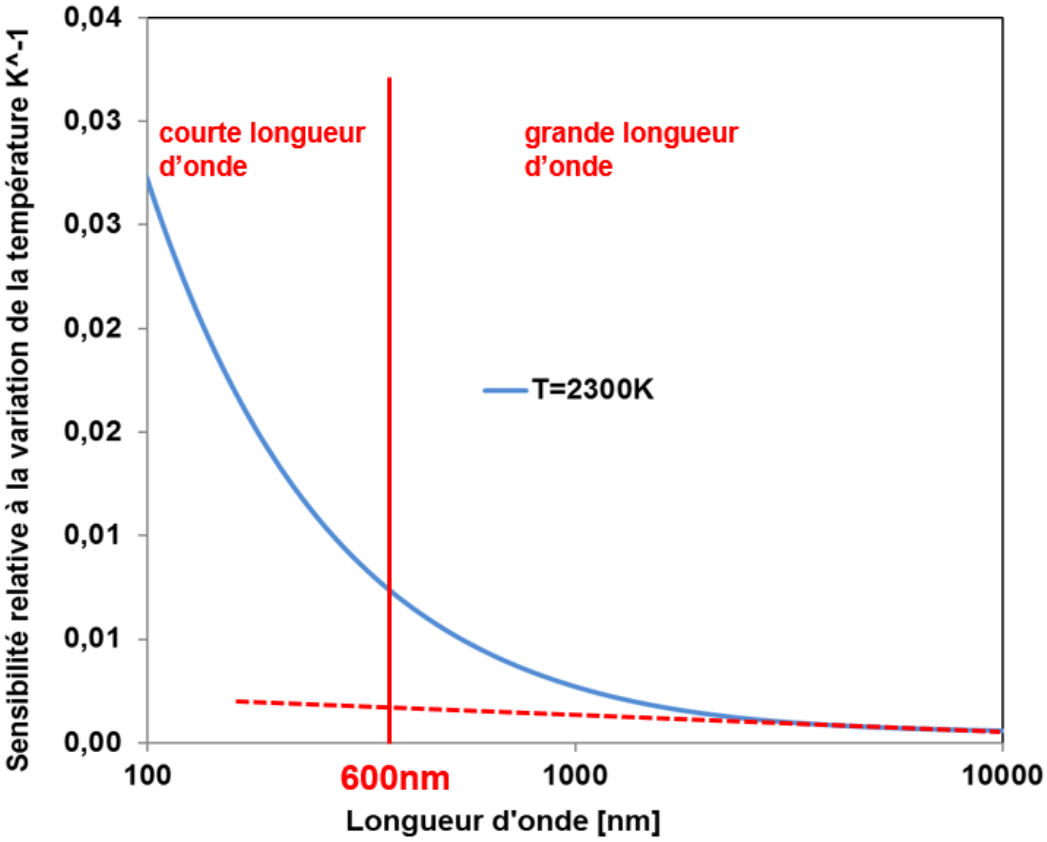



Figure 47 : Sensibilité relative à la variation de la température

La forme de la courbe Figure 47 montre que nous pouvons identifier deux différents domaines. Le premier domaine correspondant aux courtes longueurs d'onde allant jusqu'à environ 600 nm montre que la sensibilité relative à la variation de la température est élevée alors qu'à une plus grande longueur d'onde la sensibilité relative devient faible. Par conséquent la conception d'un pyromètre consistera à choisir une longueur d'onde la plus petite possible afin de maximiser sa sensibilité. Cependant, pour de courtes longueurs d'onde, le signal émis par la surface devient très faible

comme le montre la Figure 46. Le choix de la longueur d'onde sera donc un compromis entre une sensibilité élevée et une puissance émise suffisante pour être détectée.

### *2.2.3 Effet du facteur d'émission sur la mesure de la température par pyrométrie*

Si l'on suppose une surface réelle à une température notée T. La puissance émise par cette surface est proportionnelle à la luminance $L_\lambda(T,\lambda)$. Le détecteur du pyromètre permet de quantifier cette puissance. Pour en déduire la température de la surface, il est nécessaire de faire une hypothèse sur son facteur d'émission. Dans le cas monochromatique à la longueur d'onde λ, si l'on note epsilon $\varepsilon_1$ cette valeur, nous avons la relation :

$$\boldsymbol{L_\lambda(T) = \varepsilon_1 L_\lambda^0(T_{mes1}^{\varepsilon_1})} \qquad \textbf{\textit{Équation 67}}$$

avec $T_{\text{mes1}}^{\varepsilon_1}$ la température mesurée en supposant un facteur d'émission $\varepsilon_1$.

En réalité, la valeur du facteur d'émission n'est pas bien connue et si l'on suppose une autre valeur $\varepsilon_2$ on obtiendra une température mesurée différente $T_{\text{mes2}}^{\varepsilon_2}$ vérifiant l'équation :

$$\boldsymbol{L_\lambda(T) = \varepsilon_2 L_\lambda^0(T_{mes2}^{\varepsilon_2})} \qquad \textbf{\textit{Équation 68}}$$

En combinant les relations précédentes on obtient dans le cadre de l'approximation de Wien :

$$\boldsymbol{\frac{T_2 - T_1}{T_1} = \frac{\lambda T_2}{C_2} ln\left(\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2}\right) = \frac{\lambda T_2}{C_2} ln(1 + \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_2})} \qquad \textbf{\textit{Équation 69}}$$

D'après cette relation, l'erreur sur la température dépend de l'erreur relative sur le facteur d'émission. Cependant cette erreur en température est proportionnelle à la longueur d'onde d'où l'intérêt de se placer à courte longueur d'onde.

Pendant le processus de coupe, le facteur d'émission de la surface évolue en raison de l'apparition de différentes phases fondues L1 et L2 et aussi avec la variation de la température.

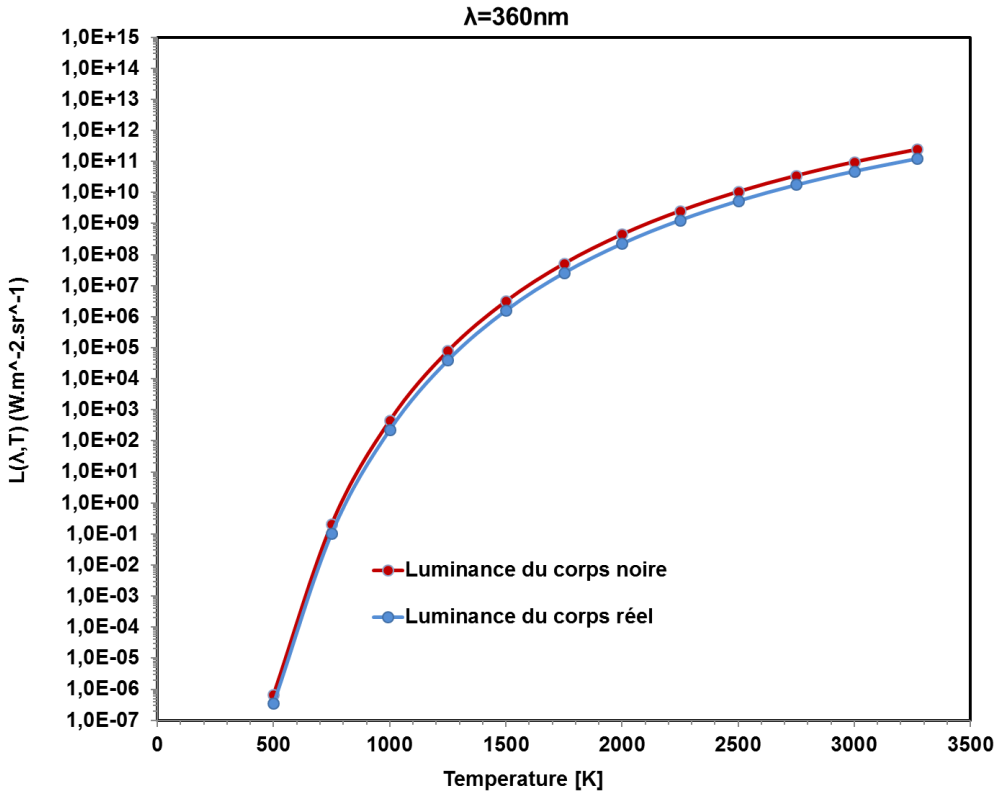



Figure 48 : Luminance du corps noire (émissivité ε = 1) et du corps réel (émissivité ε = 0,5) en fonction de la température

La Figure 48 montre la variation de la luminance en fonction de la température en utilisant deux valeurs d'émissivité, la première valeur est ε = 1 pour un corps noir et la seconde valeur est ε = 0,5 pour l'acier fondu.

Le choix de ε = 0,5 se réfère à la valeur extrême de l'émissivité de l'acier dans l'infrarouge trouvée dans la littérature estimé entre 0,5 à 750K et se stabilise à 0,7 à partir de 1150K [49]. Nous pouvons voir que l'erreur reste très faible malgré la grande différence entre les facteurs d'émission et augmente légèrement avec la température. Typiquement, l'erreur obtenue à 3000K est d'environ 3% en utilisant une longueur d'onde de 360 nm. Si l'on avait choisi une longueur d'onde de 800nm dans le proche infrarouge l'erreur serait de 12%.

## 2.3 Conclusion

Cet aspect théorique justifie notre choix de dispositif expérimental de mesure de température composé d'un pyromètre ponctuel à courte longueur d'onde dans le domaine ultraviolet couplé par à caméra proche infrarouge permettant d'avoir une cartographie 2D du champ de température. L'estimation de la température par la caméra thermique se fera après recalage du niveau de température en prenant en compte la mesure ponctuelle dans le domaine UV.

# 3 Montage expérimental

Le dispositif expérimental de découpe laser présenté dans la section 1 du chapitre 2 précédent a donc été instrumenté (voir Figure 49 ) pour mesurer l'évolution de la température dans la saignée. La Figure 49 montre une vue schématique de l'ensemble du dispositif composé du pyromètre ultraviolet et du pyromètre infrarouge.

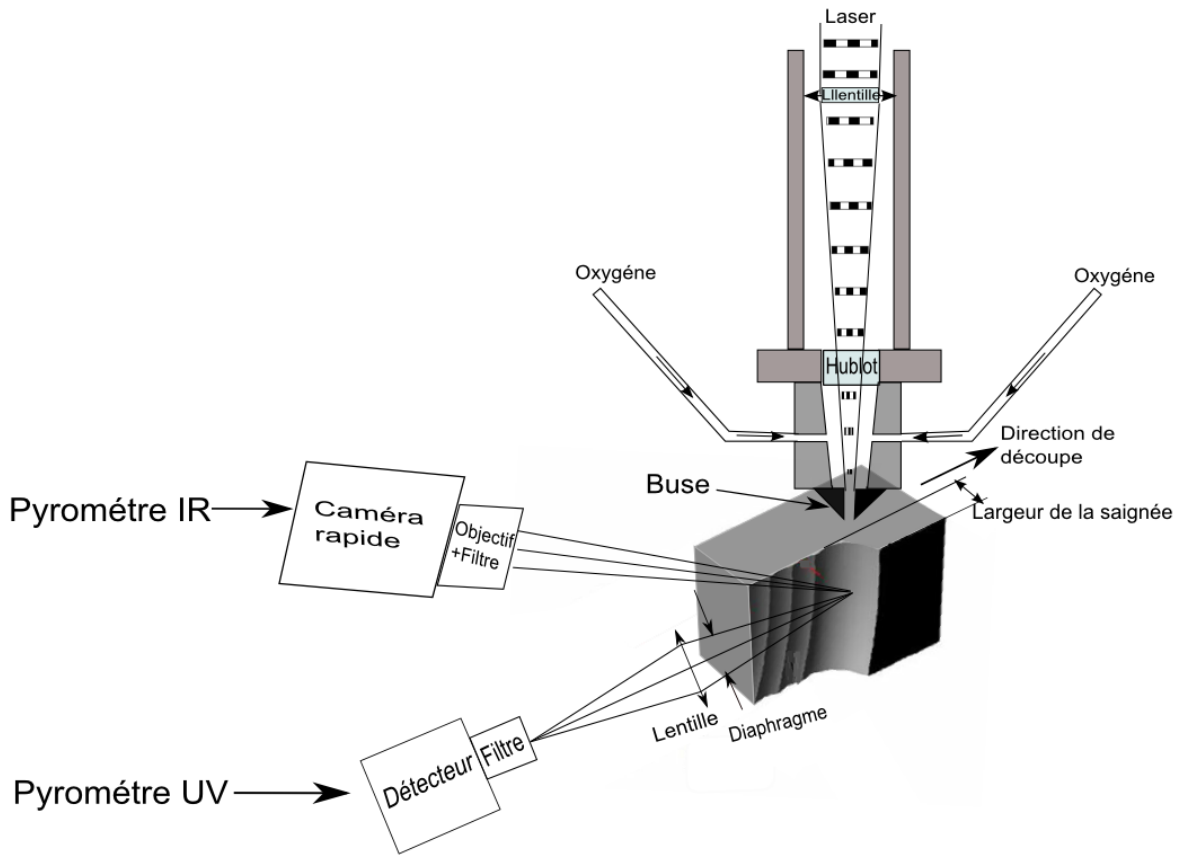



Figure 49 : Dispositif expérimental et installation des pyromètres.

## 3.1 Pyromètre UV

Le pyromètre UV est constitué d'un diaphragme, d'une lentille et d'un photomultiplicateur. Le rôle de la lentille est de focaliser l'énergie émise par la surface sur le détecteur. La lentille en verre de silice spéciale UV utilisée a une longueur focale de 150mm et un diamètre de 50mm (référence LA4904-UV de thorlabs). Elle est placée à 300mm (2 fois la longueur focale) de la surface à observer afin d'obtenir un grandissement unitaire. Un diaphragme permet de fermer l'ouverture de cette lentille et de limiter les aberrations géométriques et de contrôler la puissance focalisée sur le détecteur.

La puissance focalisée est détectée par un photomultiplicateur de marque hamamatsu H9305-03SEL qui permet de détecter les photons avec un temps de réponse de 1,4ns. La taille de la fenêtre du détecteur est de 3,7 x 13mm. Le détecteur est relié à une unité de comptage de photons de marque hamamatsu C9744. Le temps d'intégration de l'unité de comptage est de 25ns.

Comme le grandissement du système optique est égale à 1, le diamètre de la zone visée sera également de diamètre 1mm.

Le filtre placé devant le détecteur est de 360nm, cela a été choisi parmi des filtre de 200, 240, 300 et 360nm. Nous montrerons dans la suite du chapitre les différentes démarches qui nous ont permis de sélectionner le filtre de 360nm.

## 3.2 Pyromètre IR

Le pyrométrie IR est constituée principalement d'une caméra rapide (Figure 49) de référence APX RS 3000. La résolution de la caméra est de 1024 x 1024 pixels avec une vitesse de 3000 i/s. En réduisant la fenêtre d'acquisition à 512 x 512 pixels la vitesse s'élève à 10000i/s. La vitesse maximale atteinte par la caméra est de 250000 i/s. La mémoire de la caméra peut enregistrer une séquence d'images a une vitesse de 10000i/s pendant une durée de 6s. Le temps d'intégration est de 2µs. La caméra fournie une cartographie du profil de la thermique à observer en niveaux de gris $N_g$.

Un objectif avec une longueur focale de 50mm est placé à l'entrée de la caméra. Un filtre passe bande dans la gamme de 780-820nm est placé à l'entrée de l'objectif.

# 4 Dimensionnement et optimisation du pyromètre UV

Après avoir montré le montage expérimental, nous expliquerons dans cette partie son mode de fonctionnement, les principaux avantages et inconvénients de cette technique, ces limitations et son dimensionnement. Nous terminerons cette partie par l'identification des paramètres de calibration qui vont nous permettre de réaliser les mesures de températures.

Le choix de la longueur d'onde du pyromètre UV est un compromis entre une sensibilité élevée et un signal suffisant pouvant être détecté. Dans notre cas, nous visons des températures qui peuvent atteindre les 3000K et nous avons choisi une longueur d'onde dans l'ultraviolet. Pour ces courtes longueurs d'ondes, l'énergie moyenne émise est plus faible et l'énergie individuelle d'un photon est plus élevée ($E = h * \frac{c}{\lambda}$). Pour avoir une limite de détection la plus faible possible, nous utilisons un photomultiplicateur en mode comptage de photons pour mesurer le signal émis par la surface.

## 4.1 Limite de détection et de saturation du photomultiplicateur (courte longueur d'onde)

Le photomultiplicateur utilisé dans notre expérience est couplé donc à un système de comptage capable de détecter des photons espacés d'au moins 25 secondes, ce qui limite à 4 millions le nombre de photons détectés pour un temps d'intégration de 100 ms. En réalité, pour avoir une bonne détection de tous les photons, nous limitons le taux de comptage à 3 millions de photons par 100ms ce qui correspond à la limite de saturation réelle du photomultiplicatuer. A des températures plus basses, le nombre de photons est faible et nous fixons une limite de détection à 50 photons pendant le temps d'acquisition soit une erreur de 2% qui définit la limite de détection. On peut également noter que les photons provenant du bruit de l'environnement peuvent avoir un effet sur la précision de la mesure de la température dans la limite de détection mais ceci n'a pas d'incidence sur la mesure des hautes températures.

### *4.1.1 Estimation du nombre de photon détectés par le capteur*

Une étape importante dans la détermination des limites de notre pyromètre est de calculer le nombre de photons détectés par le photomultiplicateur. Le nombre total de photons émis par unité de surface et de bande spectrale en fonction de la température et de la longueur d'onde peut être calculé à partir de la luminance du corps noir et de l'énergie d'un photon :

$$N(\lambda, T) = \frac{L_\lambda^0(\lambda, T)}{\frac{hc}{\lambda}} \qquad \textit{Équation 70}$$

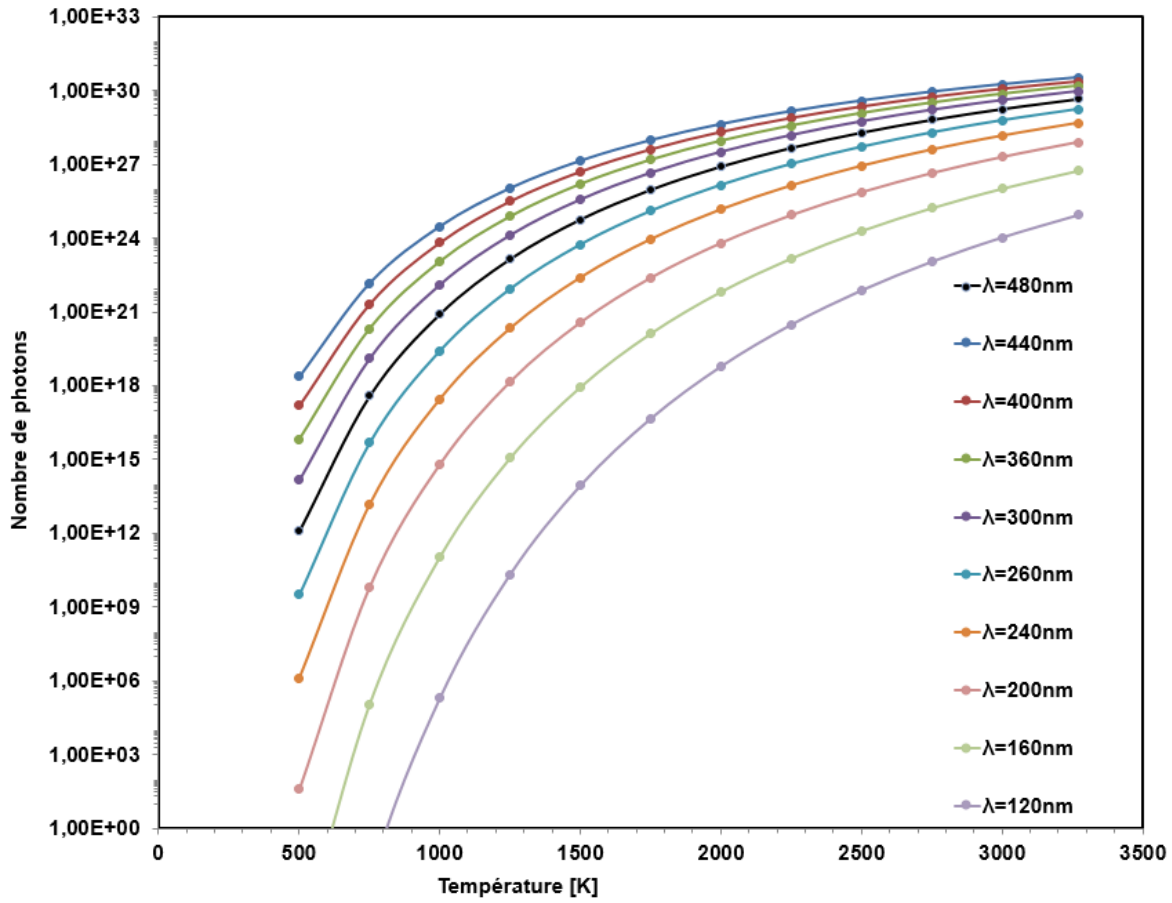



Figure 50 : Evolution d'un nombre de photon émis par un corps noir en fonction de la température à différente longueur d'onde

La Figure 50 représente ce nombre de photon par seconde pour différentes longueurs d'ondes. Par exemple le nombre de photons émis à une longueur d'onde de 360nm à une température de 2500K et une surface, une longueur de bande et un angle solide unitaires est de l'ordre de $10^{21}$. Cependant en réalité les paramètres

géométriques et technologiques du pyromètre (angle solide du système optique, taille de l'ouverture du capteur, diamètre du diaphragme, rendement du capteur, transmission des filtres…) entrainent une modification du nombre de photons réellement détectés par le capteur. Ce nombre de photons noté *N* peut être calculé par la relation suivante :

$$N_r = N(\lambda, T).\Delta s.\Omega.\Delta\lambda.\eta.C, \qquad \textit{Équation 71}$$

avec $\Delta s$ La zone observée par le capteur, $\Delta\Omega$ L'angle solide associé au montage optique, $\Delta\lambda$ largeur de bande du filtre, $\eta$ rendement du capteur, $C$ le facteur de transmission du filtre.

L'équation 64 montre d'une part qu'un changement de longueur d'onde influera sur le nombre de photons détectés via le nombre de photon total émis et le rendement du photomultiplicateur à la longueur d'onde choisie. Dans le domaine UV (100nm-300nm), le rendement du photomultiplicateur est en général considéré comme constant. D'autre part une ouverture ou une fermeture du diaphragme du système optique modifiera également le nombre de photon détecté via l'angle solide du montage optique. Si le nombre de photons estimé est trop élevées et dépasse la capacité d'acquisition du capteur on pourra envisager de choisir une longueur d'onde plus courte ou de fermer encore plus le diaphragme placé devant la lentille.

Ayant une estimation précise des paramètres géométriques du système optique et du capteur, l'équation 64 permet de calculer le nombre de photons détectés par le photomultiplicateur. Cette approche permet de faire un premier dimensionnement du système mais elle reste assez approximative pour optimiser la longueur d'onde du filtre ainsi que l'ouverture du diaphragme.

Afin de choisir la longueur d'onde du filtre passe bande, nous allons plutôt utiliser une méthode expérimentale pour déterminer directement le facteur $K$=$\Delta s.\Omega.\Delta\lambda.\eta(\lambda).C.\frac{\lambda}{hc}$ qui permet de lier le nombre de photon détecté et la luminance de la surface observée :

$$N = KL_\lambda^0 \qquad \textit{Équation 72}$$

Pour estimer expérimentalement le facteur, nous allons utiliser une calibration du système pyrométrique.

### *4.1.2 Calibration du pyromètre UV*

La calibration du pyromètre UV a été effectuée sur deux étapes. La première étape été d'étalonner le pyromètre UV à l'aide d'un corps noir sur des températures allant de 727K jusqu'à 1327K (température maximale du corps noir du laboratoire). Sachant que la température de notre procédé dépasse la température de fusion du métal (1800K), il a fallu dans un deuxième temps, étalonner notre système sur des transitions liquide solide de différents métaux purs.

Pour couvrir une plage de température allant jusqu'à 3300K, nous avons utilisé trois métaux purs le Tantale , le Niobium et le Vanadium ayant des températures de fusion respectives de 3270 K, 2749 K et 2199 K [50][51][52][53] .

Pour atteindre la fusion de ces trois matériaux, nous utilisons un chauffage laser. La figure 50 donne une vue schématique du dispositif. Un faisceau laser de diamètre 1mm est envoyé sur les sommets les barreaux de métaux purs avec une puissance capable de dépasser la température de fusion. Le diamètre des barreaux métallique est d'environ 3mm. Un flux d'argon qui enveloppe le barreau métallique est envoyé en parallèle du processus de fusion afin d'éviter l'oxydation.

Les paramètres de puissance et de durée d'impulsion sont les suivants :

- une puissance laser de 1000W pendant 2s pour le tantale,
- une puissance Laser de 2000W pendant 2s pour le nobium,
- une puissance Laser de 1200W pendant 2s pour le vanadium

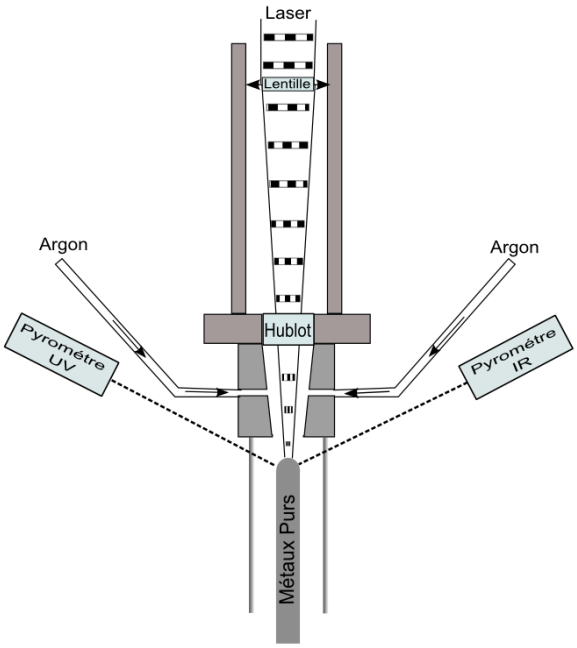
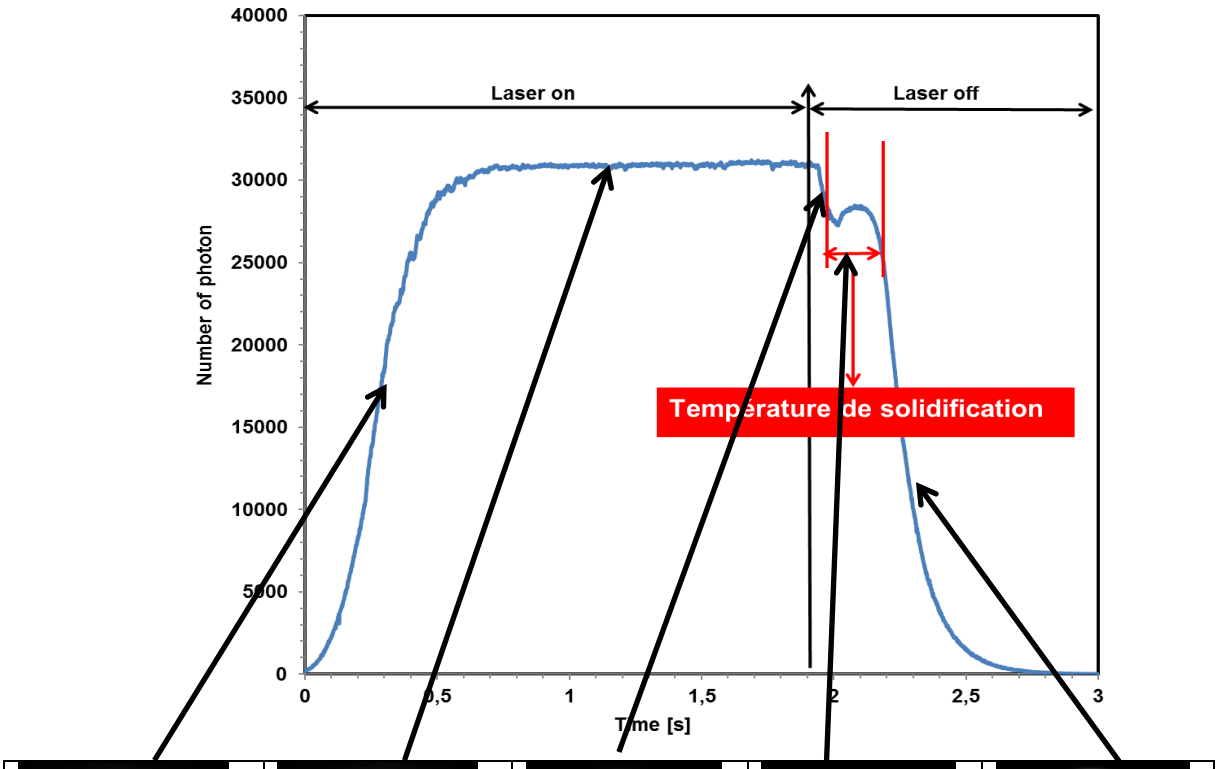



Figure 51 : dispositif de calibration

Pendant le processus de chauffage et de refroidissement en dessous de la température de fusion, le nombre de photons est mesuré avec un temps d'intégration de 10ms, dix fois plus faible a celui qui sera utilisé en oxycoupage. La Figure 52 représente l'évolution de ce nombre de photons. En parallèle, la zone de fusion est observée avec la caméra infrarouge. Elle permet de suivre l'état de fusion de la surface. L'évolution du nombre de photon présente initialement une augmentation jusqu'à atteindre un plateau situé à environ 32000 photons dans le cas du tantale. Dès que le laser en coupé (cas b), la température du liquide et donc le nombre de photons détectés diminuent. La transition liquide solide s'opérant à température constante, le nombre de photons est alors constant soit dans le cas du nobium, 29700 photons et correspond de manière très précise à la température de fusion du nobium donnée à 2749K.




| | | | |
|---|---|---|---|
| *a) Laser on/ fusion du barreau métallique* | b) laser off / refroidissement | c) Laser off/ plateau de solidification | d) Laser Off/ solidification et refroidissement total |

Figure 52 : Nombre de photon durant le processus de fusion des barreaux métalliques

La même, procédure a été réalisée sur les trois métaux purs. Les résultats sont donnés dans le Tableau 2. Dans ce même tableau, le nombre de photons détectés dans le cas de l'utilisation du corps a également été reporté pour des températures de 1400K à 1600K.

| T [°c] | T [K] | N | $K_{UV}$ $[W^{-1}m^2sr]$ | $L_\lambda^0$ | Méthode de mesure |
|---|---|---|---|---|---|
| 1400 | 1673 | 49 | $3{,}13.10^{-5}$ | $830.10^3$ | corps noir |
| 1500 | 1773 | 123 | $3{,}12.10^{-5}$ | $319.10^4$ | corps noir |
| 1600 | 1873 | 356 | $3{,}10.10^{-5}$ | $106.10^5$ | corps noir |
| 1926 | 2199 | 8500 | $3{,}36.10^{-5}$ | $251.10^6$ | V |
| 2476 | 2749 | 297800 | $3{,}11.10^{-5}$ | $955.10^7$ | Nb |
| 2997 | 3270 | 2940500 | $3{,}03.10^{-5}$ | 9,6899E+10 | Ta |

Tableau 2 : Identification de « N » et calcul de « $K_{UV}$ » temps d'ouverture de 100ms et un filtre passe bande à 360nm.

Pour chaque température de référence, le facteur $K_{UV}$ est calculé à partir de la luminance du corps noir et du nombre de photons détectés. Les résultats pour un temps d'ouverture de 100ms et un filtre passe bande de 360nm avec une bande passante de 10nm sont reportés dans le Tableau 2. Nous constatons que la valeur du facteur $K_{UV}$ reste quasiment constant conformément à la théorie. Par la suite nous utiliserons la valeur moyenne de $3{,}15.10^{-5} W^{-1} m^2 sr$.

Une fois le facteur $K_{UV}$ identifié, il est possible d'en déduire la relation donnant la température en fonction du nombre de photons :

$$T = \frac{C_1}{\lambda_0 ln\left(\frac{K * C_2}{\lambda_0^5 * N} + 1\right)} \qquad \textit{Équation 73}$$

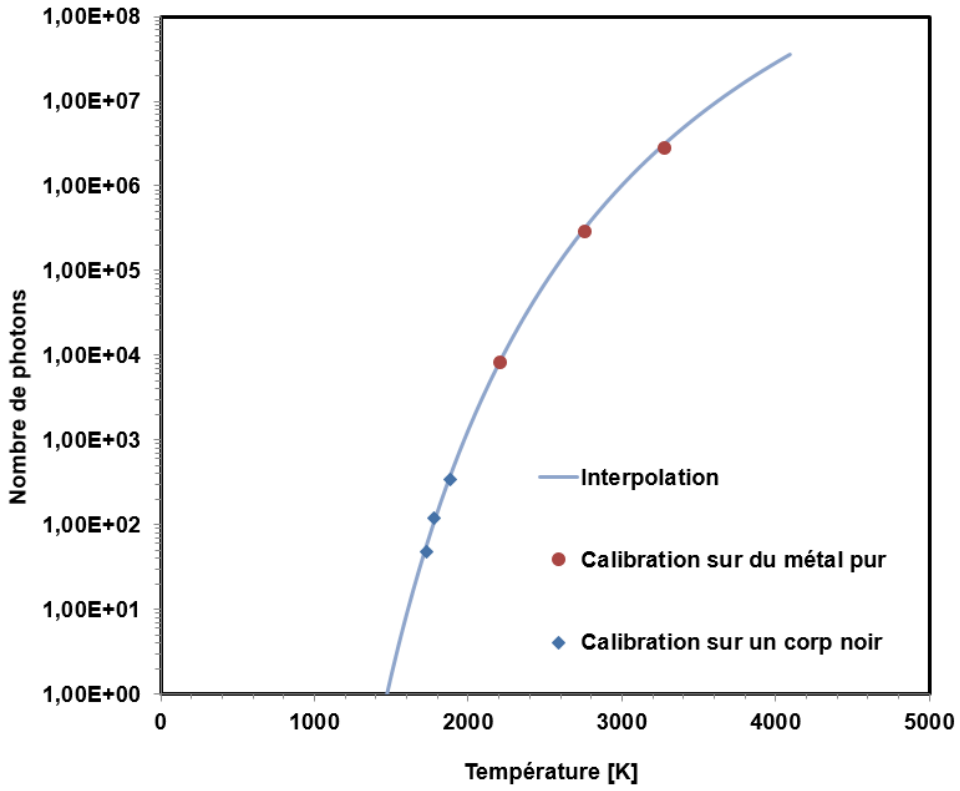



Figure 53 : Interpolation du nombre de pontons en fonction de la température.

La Figure 53 illustre l'évolution du nombre de photons en fonction de la température donnée par l'équation 71 après indentification de $K_{UV}$. Les points expérimentaux y sont également reportés. On remarque que quel que soit la méthode de calibration, les points expérimentaux sont très proches de la courbe interpolée.

### *4.1.3 Optimisation de la longueur d'onde et de l'ouverture du diaphragme*

Le choix de la longueur d'onde et de l'ouverture du diaphragme conditionne les limites de détection et de saturation du système pyrométrique. L'effet de la longueur d'onde vient essentiellement de dépendance de la luminance avec la longueur d'onde. Cet effet est illustré sur la Figure 54. On constate effectivement une croissance exponentielle de la luminance avec la longueur d'onde.

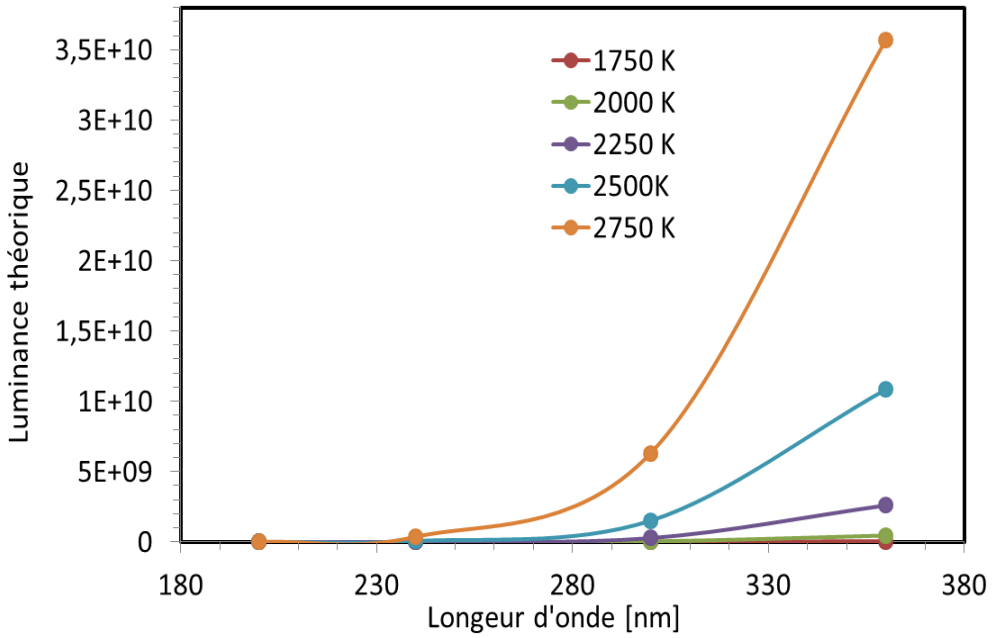



Figure 54 : Luminance d'un corps noir en fonction de la longueur d'onde

Le diaphragme modifie seulement l'ouverture du système optique et a donc un effet moindre sur le nombre de photons. Pour optimiser notre système, nous jouerons donc plutôt sur le paramètre longueur d'onde. Comme nous l'avons vu dans la section sur les rappels théoriques, pour maximiser la sensibilité relative à une variation de température, il faut se placer à une longueur d'onde la plus courte possible en ayant suffisamment de photons détectés.

La Figure 54 montre l'évolution du nombre de photons en fonction de la température de la surface observée pour 3 longueurs d'ondes différentes. Pour tracer cette courbe, on utilise trois filtres de même largeur spectrale (10nm) centrés sur les longueurs d'onde de 240nm, 360nm et 500nm. Pour chaque configuration on trace une courbe de calibration, on identifie un facteur $K_{UV}$ et l'on trace sur la Figure 55 l'évolution interpolée du nombre de photons en fonction de la température.

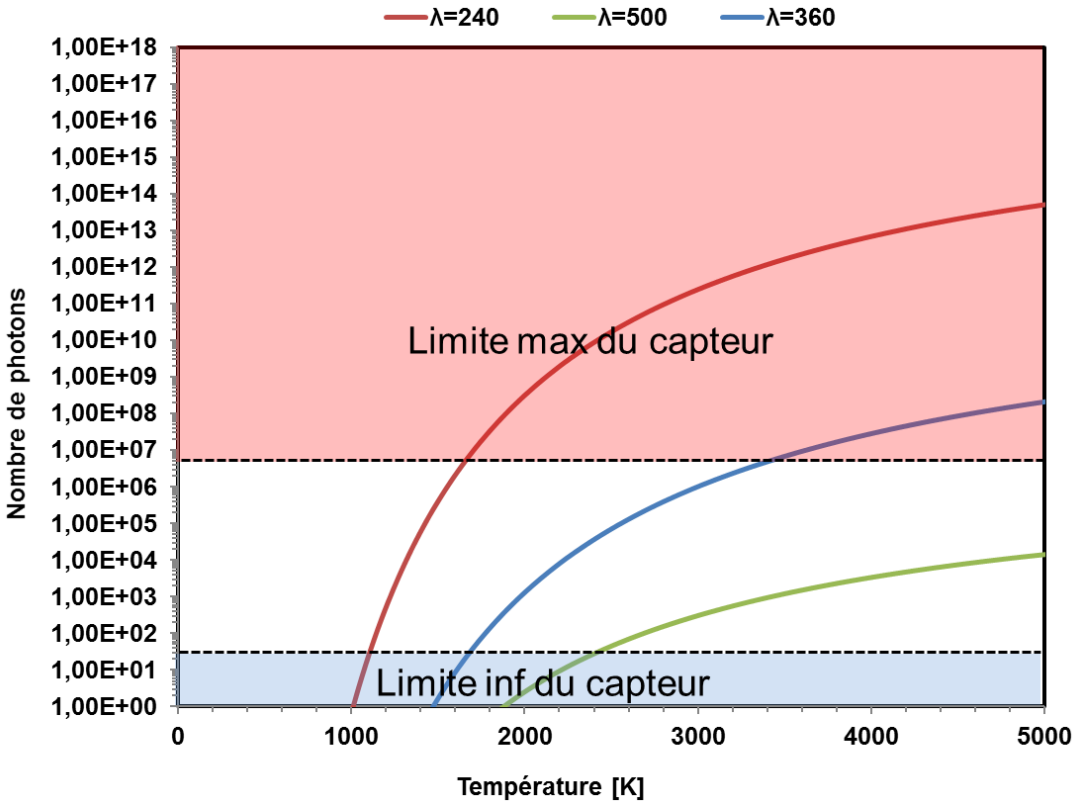



Figure 55 : Nombre de photons en fonction de la température pour trois longueurs d'onde différentes 240nm, 360nm et 500nm.

Sur la figure 53 on a également placé la limite de saturation à $3.10^6$ et la limite de détection fixée à environ 50 photons. Pour chaque l'longueur d'onde il est alors possible de déterminer la plage de température de fonctionnement. Nous trouvons 1000K – 1500K, 1600K – 3300K et supérieur à 2600K respectivement pour les longueurs d'onde de 240nm, 360nm, et 500 nm.

Lors d'une découpe laser la plage de température est de l'ordre de 1600K – 3300K ce qui justifie le choix de la longueur d'onde de 360nm.

# 5 Pyrométrie IR

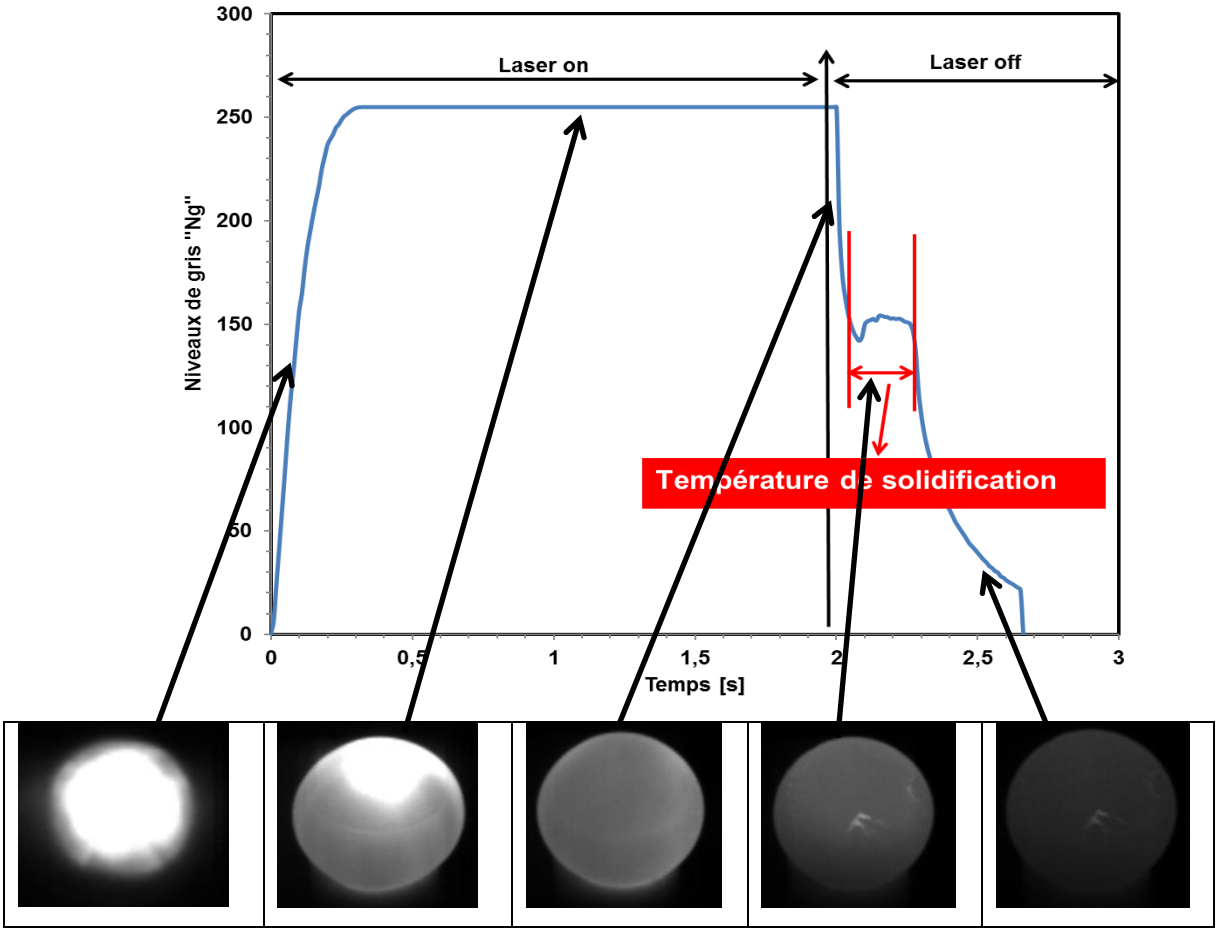
La technique de mesure de température par pyrométrie IR a été développée précédemment au laboratoire par M. Muller et R. Fabbro [48]. L'estimation de la température à partir du niveau de gris de la caméra nécessite un certain nombre d'étapes préalables :

- Calibration sur la transition liquide solide de métaux purs

- Identification d'un facteur de calibration reliant le niveau de gris à la luminance.
- Interpolation de la courbe de niveaux de gris en fonction de la température
- Prise en compte du facteur d'émission de la surface observée

## 5.1 Calibration du système pyrométrique infrarouge

Le principe de calibration et la configuration expérimentale est similaire à celle utilisée pour le pyromètre UV. La caméra IR est placée avec un angle de 45° par rapport à l'axe horizontal du barreau métallique et a une distance de 40cm de ce dernier. La caméra IR filme la fusion du sommet du barreau métallique avec une fréquence d'acquisition de 1000 images par seconde. Les données fournies par la caméra sont une cartographie 2D niveaux de gris du processus de fusion sous forme de différents $N_{gris}$. Après que l'on ait filmé tout le processus de transition liquide solide. La Figure 56 représente l'évolution du niveau de gris en fonction du temps sur une surface de diamètre 1mm située au centre de la zone observée par la caméra. Comme dans le cas de l'UV, cette courbe présente un plateau correspondant à la transition liquide solide défini par un niveau de gris.



| | | | |
|---|---|---|---|
| *a) Laser on/ fusion du barreau métallique* | b) laser off / refroidissement | c) Laser off/ plateau de solidification | d) Laser Off/ solidification et refroidissement total |

Figure 56 : Niveaux de gris durant le processus de fusion des barreaux métalliques

Comme nous l'avons vu en début de ce chapitre, dans le domaine de l'infrarouge, la connaissance de l'émissivité est d'une importance majeure car elle influe fortement la précision de mesure de la température. Il est donc nécessaire de connaitre l'émissivité des matériaux utilisés pour l'étalonnage et d'utiliser ces données pour interpréter les résultats.

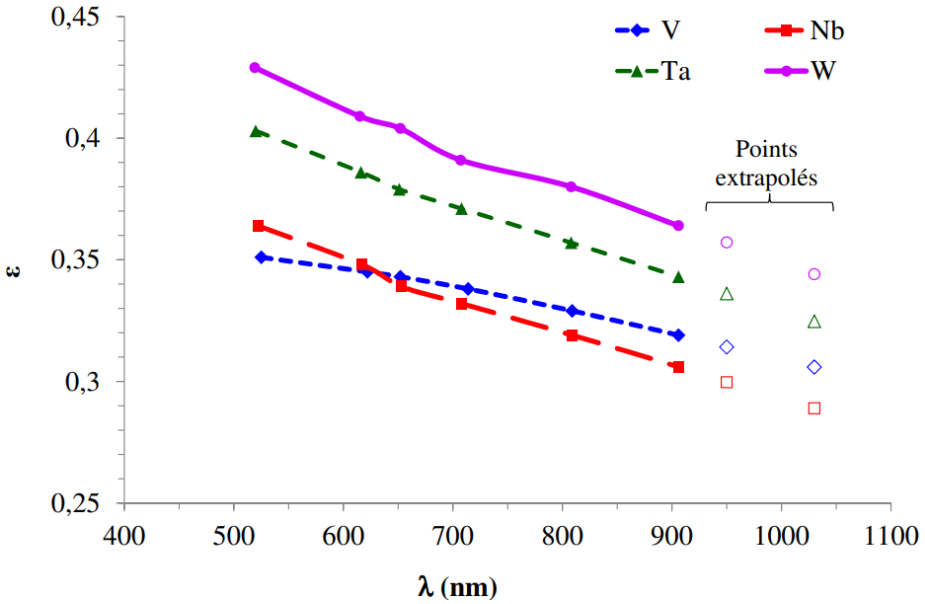



Figure 57 : Émissivité de V, Nb, Ta et W au point de fusion, en fonction de la longueur d'onde [54][55][56][53][48]

L'émissivité d'un matériau pur à sa température de fusion dépend de la longueur d'onde. La Figure 57 présentée dans la thèse de M. Muller [48] rapporte différentes valeurs de l'émissivité des matériaux purs utilisés aux points de fusion des métaux purs. Les valeurs d'émissivité qui nous intéressent sont celles situées entre 780 et 820nm correspondant à la bande spectrale du pyromètre IR.

De manière analogue à la calibration du pyromètre UV, un facteur de calibration est estimé en faisant le rapport du niveau de gris sur la luminance au centre de la bande spectrale de la caméra (produit de l'émissivité du matériau pur par la luminance du corps noir à la température de la surface).

On écrit donc :

$$N_{gris} = k_{IR}\varepsilon L_{\lambda}^{0} = k_{IR}L_{\lambda} \qquad \textit{Équation 74}$$

Pour prendre en compte le temps d'intégration τ, on définit un nouveau facteur $K_{IR}$ tel que :

$$K_{IR} = \tau k_{IR} \qquad \textit{Équation 75}$$

| Matériaux | Température de fusion [K] | Emissivité moyenne en IR | Durée d'obturation (τ) | $k_{IR}$ | $N_{gris}$ |
|---|---|---|---|---|---|
| W | 3695 | 0,373 | $4{,}95.10^{-6}$ | 0,20 | **234** |
| W | 3695 | 0,373 | $4{,}08.10^{-6}$ | 0,17 | **200** |
| Ta | 3270 | 0,35 | $1{,}00.10^{-5}$ | 0,20 | **214** |
| Ta | 3270 | 0,35 | $6{,}71.10^{-6}$ | 0,14 | **153** |
| Nb | 2749 | 0,313 | $3{,}33.10^{-5}$ | 0,21 | **226** |
| Nb | 2749 | 0,313 | $2{,}00.10^{-5}$ | 0,13 | **125** |
| Nb | 2749 | 0,313 | $1{,}25.10^{-5}$ | 0,08 | **89** |
| Nb | 2749 | 0,313 | $6{,}71.10^{-6}$ | 0,04 | **52** |
| V | 2199 | 0,325 | $1{,}00.10^{-4}$ | 0,13 | **145** |
| V | 2199 | 0,325 | $5{,}00.10^{-5}$ | 0,06 | **75** |
| V | 2199 | 0,325 | $3{,}33.10^{-5}$ | 0,04 | **50** |

Tableau 3 : niveau de gris $N_{gris}$ des métaux purs correspondant a la température de fusion

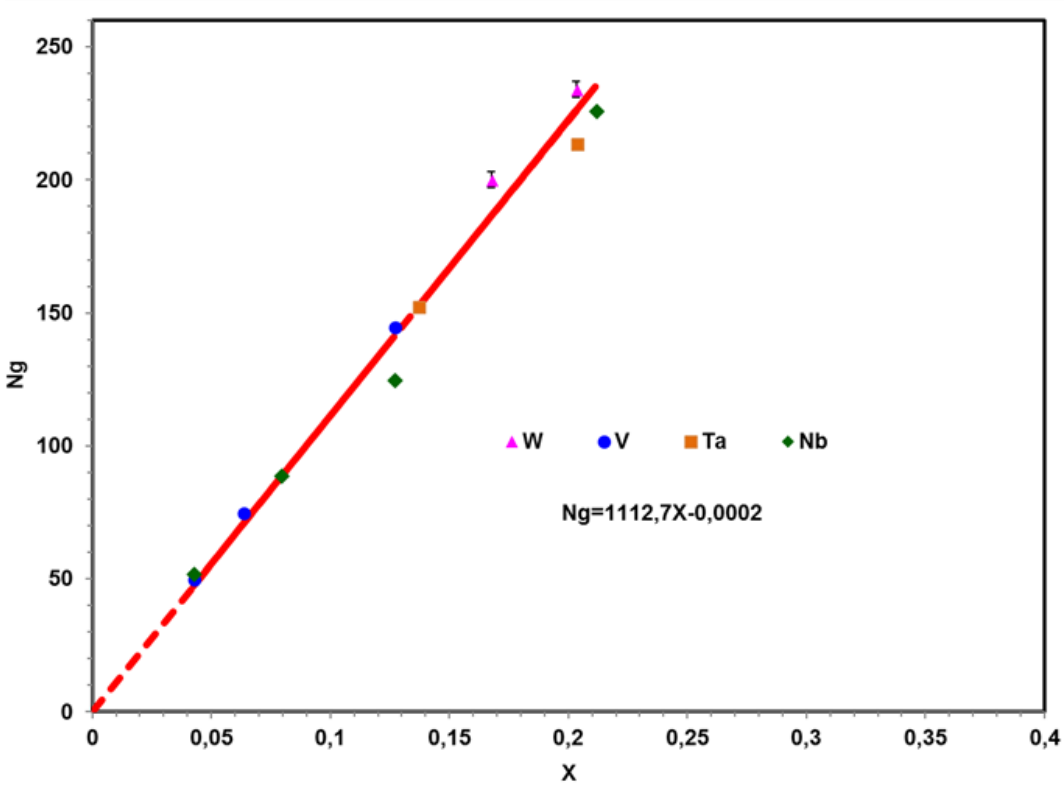



Figure 58 : Courbe d'étalonnage du pyromètre IR en établissant la relation entre le niveau de gris « $N_{gris}$ » et la variable « $k_{IR}$»

Le Tableau 3 récapitule l'ensemble des essais de calibration réalisés et donne la valeur de $k_{IR}$dans chacun des cas. Cet aspect est également illustré sur la Figure 59 où l'on met en évidence une relation linéaire entre le niveau de gris et la luminance.

Dans le cas de la mesure de température en oxycoupage, il est nécessaire de connaitre la valeur du facteur d'émission de la surface observée noté epsilon afin d'en déduire sa température à l'aide de la relation

$$\boldsymbol{T = \frac{C_2}{\lambda_0 ln\left(\frac{C_1 \varepsilon \tau k_{ir}}{\lambda_0^5 N_{gris}} + 1\right)}} \qquad \textit{Équation 76}$$

Avec $\lambda_0 = \frac{\lambda_{min}+\lambda_{max}}{2}$, $\lambda_{min} = 780nm$ et $\lambda_{max} = 820nm$

# 6 Résultats des mesures de température en oxycoupage laser

Les mesures de température réalisées ont trois buts principaux :

- Premièrement : estimer précisément la température atteinte lors d'un procédé d'oxycoupage sachant que dans la littérature il existe une énorme dispersion des valeurs trouvées.
- Deuxièmement : identifier la température atteinte lors des différents régimes de découpe et éventuellement déterminer si l'élargissement de la saignée est lié à l'augmentation de la température
- Troisièmement : vérifier qu'on ne dépasse pas la température de 3000K afin d'éviter toute perte d'énergie lié à la dissociation de l'oxyde de fer FeO

## 6.1 Recalage des mesures UV et IR et identification de l'émissivité.

La zone de mesure par la pyrométrie IR et UV est illustrée dans la Figure 59.

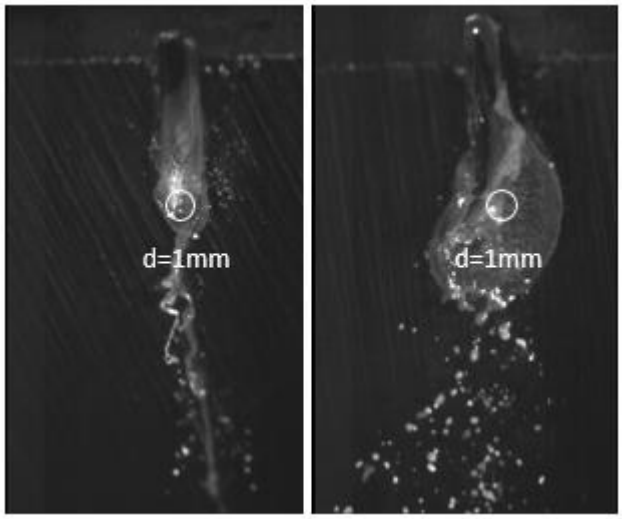
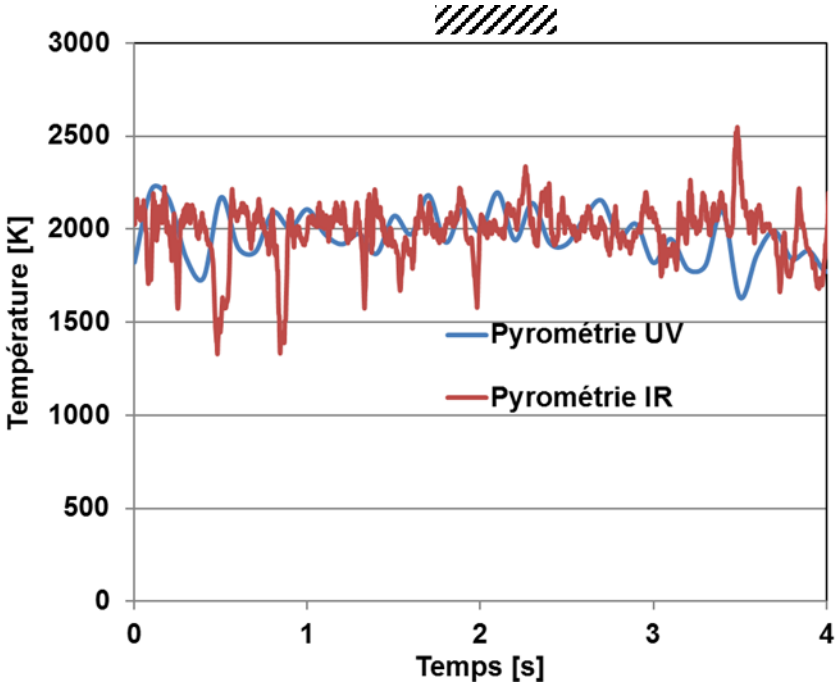
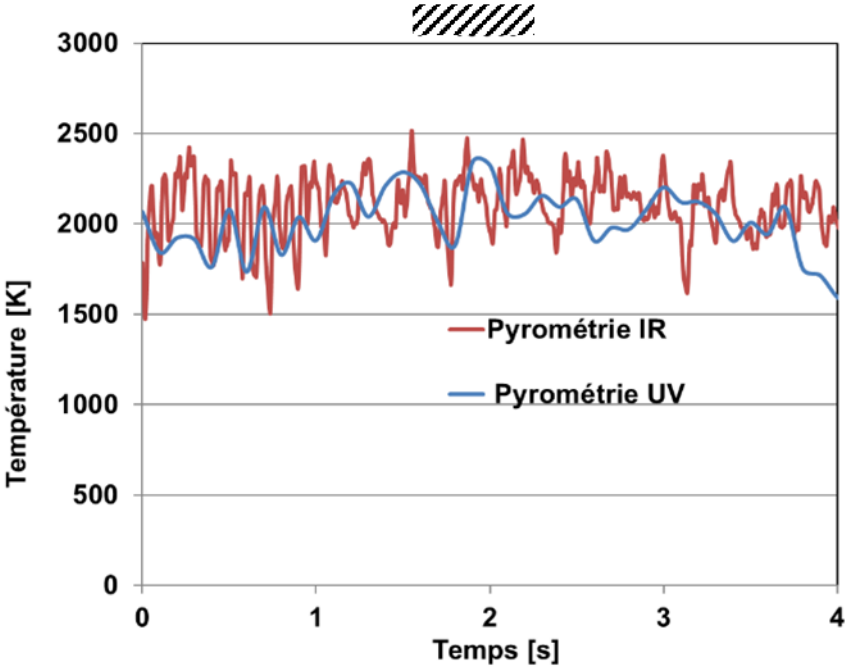



Figure 59 : Zone de mesure moyennée sur une surface de diamètre 1mm.

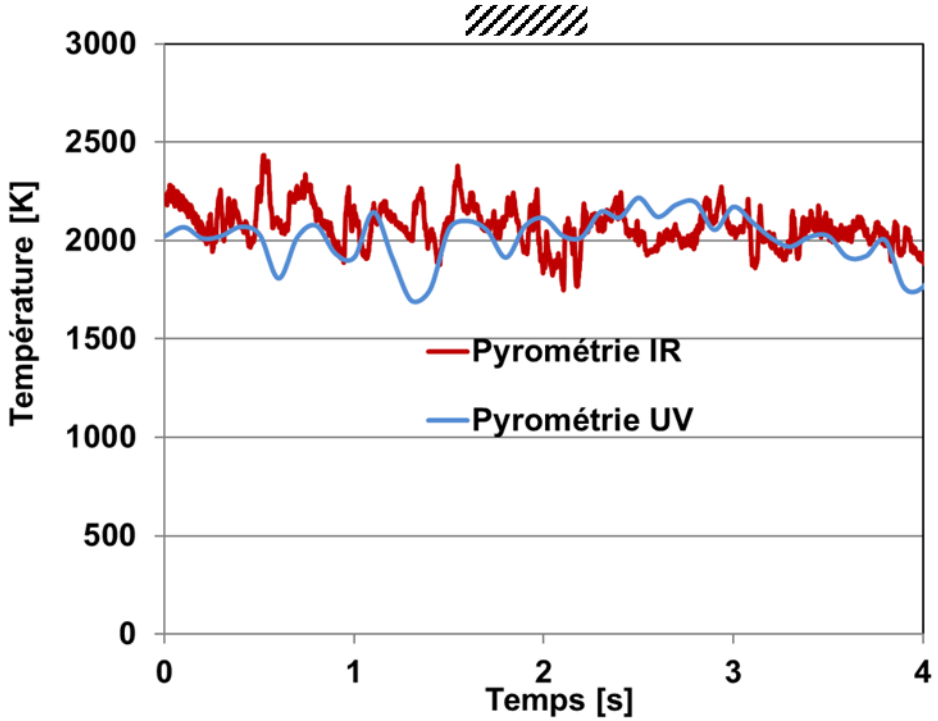
Les mesures de température par IR nécessitent la connaissance de la valeur de l'émissivité. La mesure de température avec le pyromètre UV (peu dépendant du facteur d'émission) va donc être utilisée dans notre étude pour estimer ce facteur d'émission dans l'IR (dépendante du facteur d'émission) et recaler les mesures de température. Le recalage a été réalisé pour trois différentes puissance X, X et XW.


3000
2500
2000
1500
1000
500
0
Température [K]
0
1
2
3
4
Temps [s]
Pyrométrie UV
Pyrométrie IR

*(a)*


3000
2500
2000
1500
1000
500
0
Température [K]
0
1
2
3
4
Temps [s]
Pyrométrie IR
Pyrométrie UV

*(b)*




*(c)*

Figure 60 : Mesure de température par pyrométrie IR sur des essais de découpe à ; (a) XW ;(b) XW et (c) XW.

La Figure 64 illustre les résultats des mesures de température obtenue à l'aide la technique de pyrométrie IR (en rouge) et la technique de pyrométrie UV (en bleu). La mesure de la température à l'aide du pyromètre IR est moyennée sur un disque de 1mm de diamètre correspondant à la zone visée par le pyromètre UV (Figure 59). Le facteur d'émission dans la gamme de longueur d'onde entre 780 et 820nm qui a permis de mieux superposer les mesures sur les trois puissances laser est la valeur de 0,7. En utilisant cette valeur on remarque que les mesures de température par pyrométrie IR sont très similaires aux mesures réalisées par pyrométrie UV.

## 6.2 Lien entre régime de découpe et température de découpe

On a déjà vu dans le deuxième chapitre l'apparition de différents régimes de découpe notés régime 1 et régime 2 lors du processus d'oxycoupage. Dans cette partie nous allons tenter de répondre à la question suivante : y'a-t-il un lien entre le niveau de température atteint et l'apparition des différents régimes ?

Afin de répondre à cette question nous avons réalisé des mesures de températures dans une saignée de découpe en lors de la transition d'un régime à l'autre.

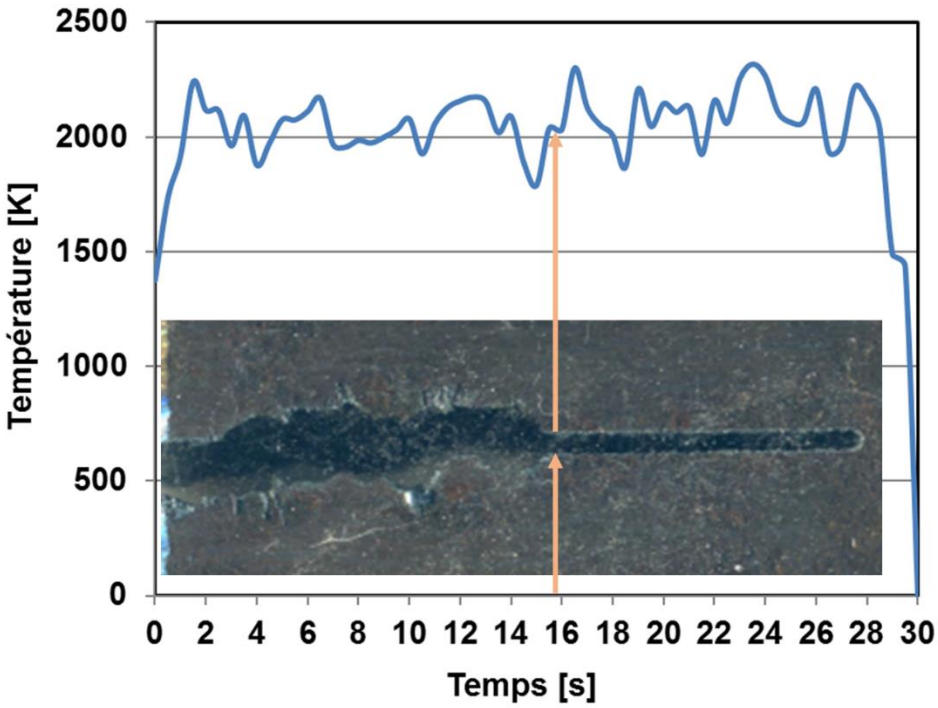


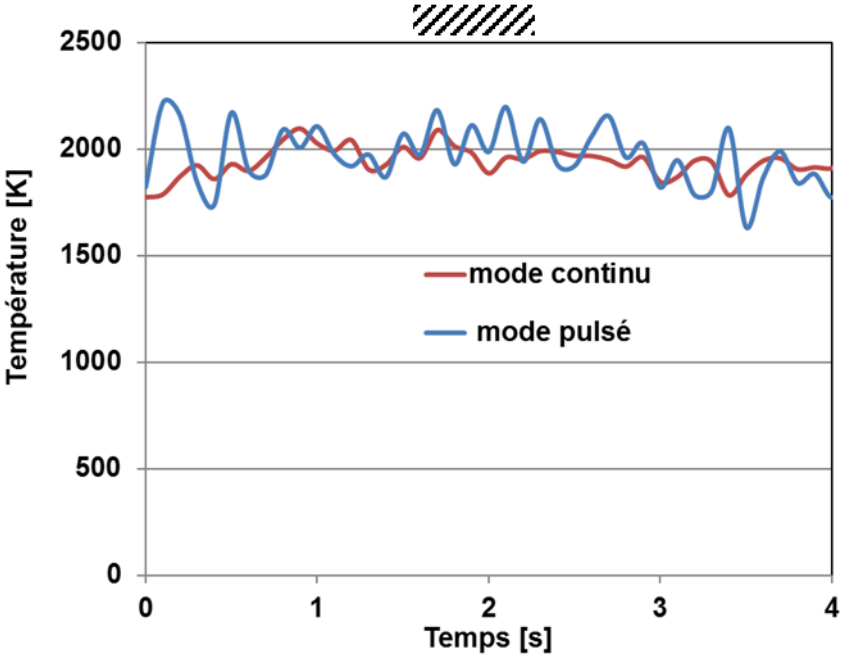

Figure 61 : Mesure de température dans le régime mixte 1+2

La Figure 61 représente la mesure de température par pyrométrie UV effectuée sur une saignée de découpe qui représente le passage de régime 2 au régime 1. La puissance de découpe utilisée est de XW avec un rapport cyclique de 1/3 et une durée d'impulsion de 20ms. Le passage du régime 2 au régime 1 se fait après environ 16 secondes du début de la découpe. On remarque que le niveau de température oscille autour de 2050K et garde le même niveau entre le régime 2 et le régime 1. Plusieurs essais de mesure de température ont été réalisés avec différents paramètres permettant d'obtenir une transition de régime. Les résultats de ces essais complémentaires ont toujours montré le même résultat à savoir que le niveau de température est indépendant des régimes de découpe. Le passage d'un régime à l'autre n'a donc pas d'origine thermique.

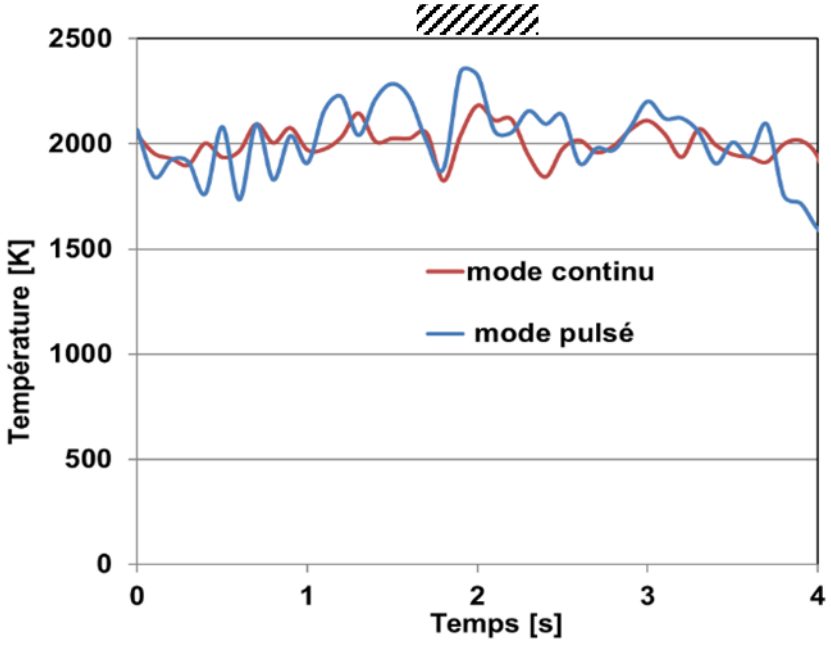
## 6.3 Effet de la puissance en mode continue et pulsée sur la température de découpe

Après avoir vérifié que dans un sens le niveau de température dans différents régimes n'a pas d'influence sur l'apparition des différents régimes et dans l'autre sens l'apparition de différents régimes n'entraine pas un changement de la température du

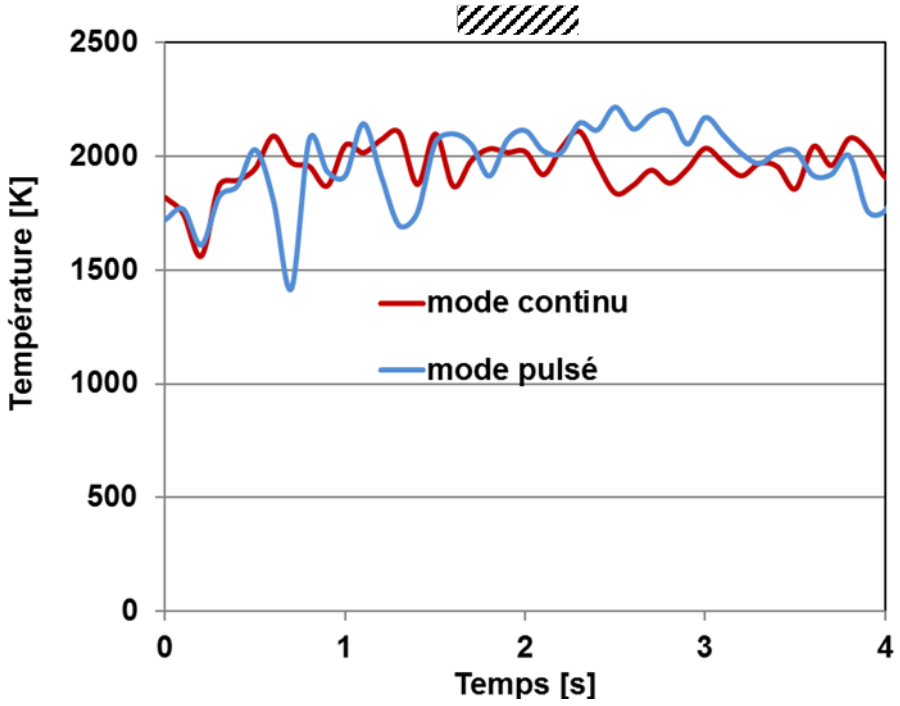
procédé, nous avons décidé d'étudier l'influence du changement de puissance et du mode de découpe (continu et pulsé) sur les mesures de température.




*(a)*




*(b)*




*(c)*

Figure 62 : Mesure de température par pyrométrie UV sur des essais de découpe à ; (a)XW ;(b) XW et (c) XW.

La Figure 62 montre la mesure de température avec trois différentes puissances de X, X et X W en mode pulsé et continu. Le mode pulsé utilisé se situe sur la limite du fonctionnement du procédé pour un cycle utile de 1/3, 1/4, 1/5 avec des puissances respectivement égales à X, X et XW. On remarque que le niveau de température du procédé est assez similaire entre 2000 et 2300 K malgré le changement de la puissance et le passage entre mode pulsé et mode continue. La température du procédé est légèrement au dessus de la température de fusion de l'acier estimée à 1800K. Les résultats de mesure de température nous permettent de conclure que le processus est mené par le régime d'oxycoupage et la puissance laser est uniquement un facteur déclencheur du processus.

Dans toutes les mesures de température, une oscillation de la température d'une amplitude comprise entre 30 et 300 K apparaît avec le temps. La petite oscillation d'environ 30 à 60 K peut provenir de la variation d'émission entre les deux phases de métal L1 et L2 fondus à l'intérieur de la saignée. Les oscillations plus prononcées comme celles de 60K viennent probablement d'un phénomène d'extinction et d'allumage qui devient de plus en plus prononcé en utilisant le mode pulsé.

## 6.4 Mesure de température par pyrométrie UV à différents paramètres de découpe

Jusqu'à présent les mesures de températures réalisées par pyrométrie UV ont montré une indépendance vis-à-vis des régimes de découpe, du mode de découpe et de la puissance de découpe. Cette independence signifie qu'on se situe le processus d'oxycoupage assisté par laser et non pas de découpe laser.

Afin de s'assurer de cette hypothèse nous avons réalisé des mesures de températures sur différents essais de découpe

| **Puissance [W]** | X | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Cycle utile** | 1/2 | 1/3 | 1/4 | 1/5 | 1/6 | 1/7 | 1/8 | 1/9 | 1/10 |
| **Fréquence [Hz] for T=1ms** | 500 | 333 | 250 | 200 | 167 | 143 | 125 | 111 | 100 |
| **T moyene [K]** | 2120 | 2050 | 2070 | 2000 | 2030 | 2100 | 1980 | 2030 | 2060 |
| **Fréquence [Hz] for T=5ms** | 100 | 66 | 50 | 40 | 33 | 28 | 25 | 22 | 20 |
| **T moyene [K]** | 2060 | 2080 | 2030 | 2100 | 1980 | 2030 | 2020 | 2050 | 2020 |
| **Fréquence [Hz] for T=10ms** | 50 | 33 | 25 | 20 | 16 | 14 | 13 | 11 | 10 |
| **T moyene [K]** | 2100 | 2010 | 2050 | 2070 | 2040 | 2080 | 2000 | 2030 | 2020 |
| **Fréquence [Hz] for T=20ms** | 25 | 17 | 13 | 10 | 8 | 7 | 6 | 5.5 | 5 |
| **T average [K]** | 2080 | 2070 | 2030 | 2070 | 2040 | 2040 | 2080 | 2020 | 1990 |

(a)

| **Puissance [W]** | X |
|---|---|
| **ΔT moyene [K]** | ±20 |

(b)

| **Puissance [W]** | X |
|---|---|
| **ΔT moyene [K]** | ±30 |

(c)

Tableau 4 : Résultats des mesures de température par pyrométrie UV avec les différents paramètres de découpe utilisés ; (a) XW ; (b) XW et (c) XW.

La Tableau 4 résume les mesures de température obtenues en variant la puissance, le cycle utile et la durée d'impulsion. On ne remarque pas de changement significatif du niveau de température d'un essai à l'autre, cela prouve qu'on est dans un régime d'oxycoupage pure assisté laser. On en déduit aussi que la température de l'oxycoupage est en accord avec les résultats de mesure de température de la combustion de barreaux métalliques en acier sous oxygène mesurée par Wells [21] et du procédé de découpe par laser assisté par oxygène et trouve une température entre 1843K et 1903K. les valeurs de température similaires à ce qu'on a trouvé durant nos essais ont été identifiées par Miyamoto et Maruo [22]. Les valeurs de température entre 3000K et 4000K identifiées par différents auteurs dans la littérature comme Grosse et Conway [23] , Kurtz et al.[24], et Steinberg et al.[26] sont des températures surestimées.

# 7 Conclusion

Le travail réalisé dans ce chapitre nous a permis :

- d'implémenter et dimensionner deux différentes techniques de mesure des hautes températures. Les deux techniques sont la pyrométrie UV basée sur les courtes longueurs d'onde et la pyrométrie IR basée sur les grandes longueurs d'ondes. Le dimensionnement et l'optimisation des deux techniques ont également été présentées.

- de réaliser des mesures de température par pyrométrie UV sans avoir besoin de connaitre l'émissivité du métal à découper tout en balayant une large fenêtre de mesure.

- de connaitre la température de fonctionnement du procédé de découpe par laser et oxygène en fonction des paramètres utilisés.

- de vérifier que les températures de combustion du métal sont comprises entre 1900 et 2100 K. Ces mesures sont en accord avec une certains auteurs comme Wells [21], Miyamoto et Maruo [22] et en désaccord avec Grosse et Conway [23] , Kurtz *et al.* [24], et Steinberg *et al.* [26].

- de confirmer l'indépendance de l'apparition des différents régimes de découpes avec le niveau de température mesuré.

- de prouver que la paramétrie utilisée dans nos essais de découpe nous place dans un régime d'oxycoupage pure assisté par laser, du fait de l'indépendance de la température des différents modes et paramètres de découpe.

# Chapitre IV Température, temps et surface seuil nécessaire pour l'initiation de la combustion

## 1 Introduction

Déclencher une réaction de combustion sous oxygène, nécessite initialement une surface chauffée caractérisée par un diamètre, une température et un temps d'opération. Dans un procédé d'oxycoupage par laser, ces grandeurs vont dépendre de l'intensité laser de la taille du faisceau et de la puissance mise en jeu.

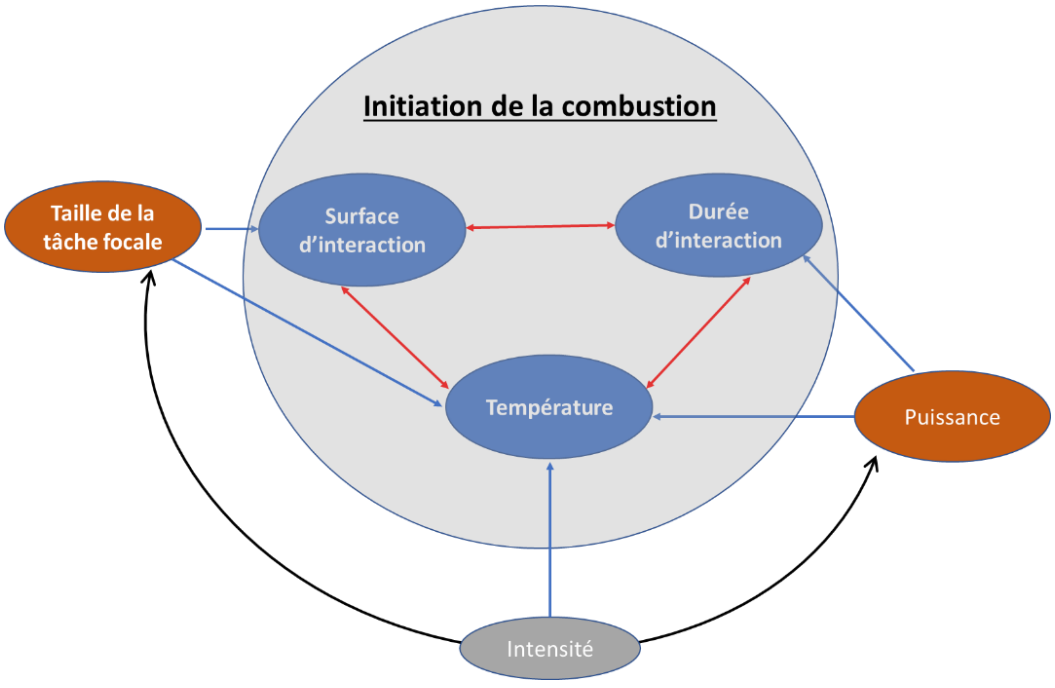



Figure 63 : Les principaux éléments entrant en jeux dans l'initiation de la combustion

La Figure 63 illustre les principaux éléments qui rentrent en jeux dans l'initiation de la combustion du métal. On remarque que tous les éléments sont liés entre eux et agissent entre eux de la manière suivante :

- La surface d'interaction avec l'oxygène est définie par la taille de la tache focale. Plus la taille de la tache focale augmente, plus la surface d'interaction augmente.

- La température dépend de l'intensité qui est la relation entre la puissance utilisée et la taille de la tâche focale. Pour une même puissance laser, la diminution de la tâche focale engendre une augmentation de la température mais aussi une diminution de la surface d'interaction.

- La duré d'interaction correspondant à l'initiation de la combustion et le temps nécessaire entre le début de l'irradiation laser et l'amorçage de la combustion. Comme nous le verrons plus bas, elle dépend principalement de la puissance et de la taille de la tâche focale.

Premièrement, dans ce chapitre nous allons identifier la relation entre les différents éléments et leurs influences sur l'initiation de la combustion. La détermination de la relation entre les différents éléments Figure 63 nous permettra aussi d'optimiser la puissance d'initiation de la combustion et donc de la découpe. L'optimisation de la puissance d'initiation de combustion est l'un des paramètres clefs du sujet car la réduction de la puissance de découpe permet de réduire les distances de sécurité pour l'utilisation du laser.

On montrera dans un premier temps, le plan d'expérience réalisé afin d'identifier la relation entre les différents éléments. Ensuite, dans un second temps nous allons réaliser un modèle numérique sous COMSOL qui permet d'identifier les profils thermiques optimaux permettant d'initier la combustion.

# 2 Plan d'expérience

Le but de ce plan est d'identifier les domaines de combustion du métal optimales dans le domaine : surface, temps et température. Nous avons réalisé un plan d'expérience en faisant des tirs uniques en statique sur des échantillons en acier. Durant les essais, nous avons fait varier la puissance, la taille de la tâche focale, la durée d'impulsion et la pression du gaz d'oxygène.

- La puissance influe au premier ordre sur la température de la zone d'interaction,
- La taille de la tâche focale est directement reliée à la taille de la surface d'interaction,
- La durée d'impulsion correspond au temps nécessaire de présence de l'oxygène sur la zone d'interaction afin d'initier la combustion.

## 2.1 Essais réalisés

Les puissances de tirs utilisées couvrent une plage de XW à XW. Les essais ont été réalisés avec un incrément de 20W. Le balayage de la durée d'impulsion est comprise entre 10ms et 2000ms, avec un pas de 10ms. Quatre tailles de tâche focale ont été utilisées X, X, X et Xmm. Les essais sont représentés dans le Tableau 5 et représentent un ensemble de 440 essais.

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| *Tâche focale [mm]* | X | X | X | X |
| *Puissance [W]* | X | [20] | | X |
| *Durée d'impulsion [ms]* | 10 | [10] | | 2000 |

Tableau 5 : Les essais réalisés avec différentes tailles de tâche focale, différentes puissances et différentes durées d'impulsion

A titre d'exemple pour une seule tache focale et une seule pression la matrice d'essais réalisé et représenté dans le Tableau 6:

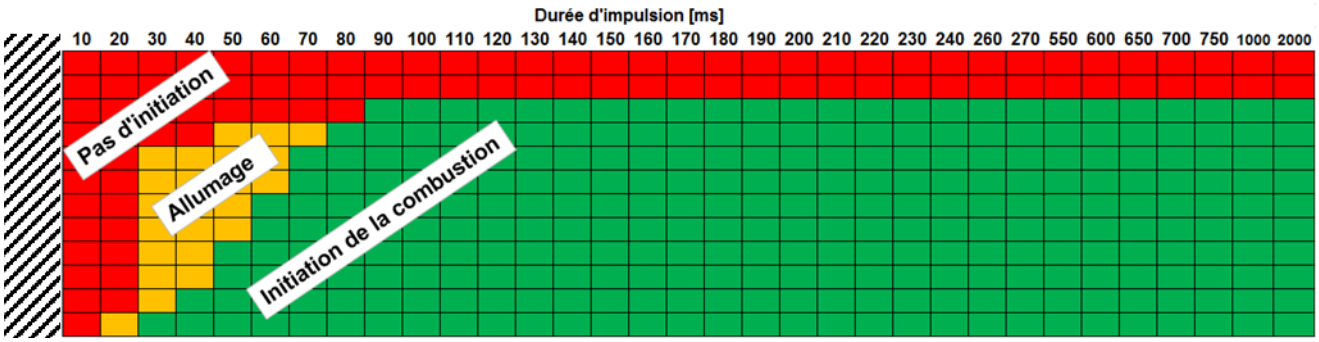



Tableau 6 : Matrice d'essais pour une seule taille de tâche focale (Xmm) et une seule pression (3bar).

La zone rouge de la matrice d'essai signifie qu'aucune initiation ne s'est mise en place. La zone orange qui sépare la zone rouge de la zone verte indique qu'il y a eu un allumage qui s'est éteint après un laps de temps sans donner suite à une combustion. La zone verte est la zone qui correspond à l'initiation de la combustion et l'autoentretiens de la combustion tant que l'oxygène est présent.

La même démarche a été effectuée pour les quatre différentes diamètres tailles de tâche focale X, X, X et Xmm.

# 3 Résultats

Les tirs uniques en position statique de la pièce qui correspondent aux paramètres de durée d'impulsion et de puissance convenable à l'initiation de la combustion, sont représentés dans la Figure 64.

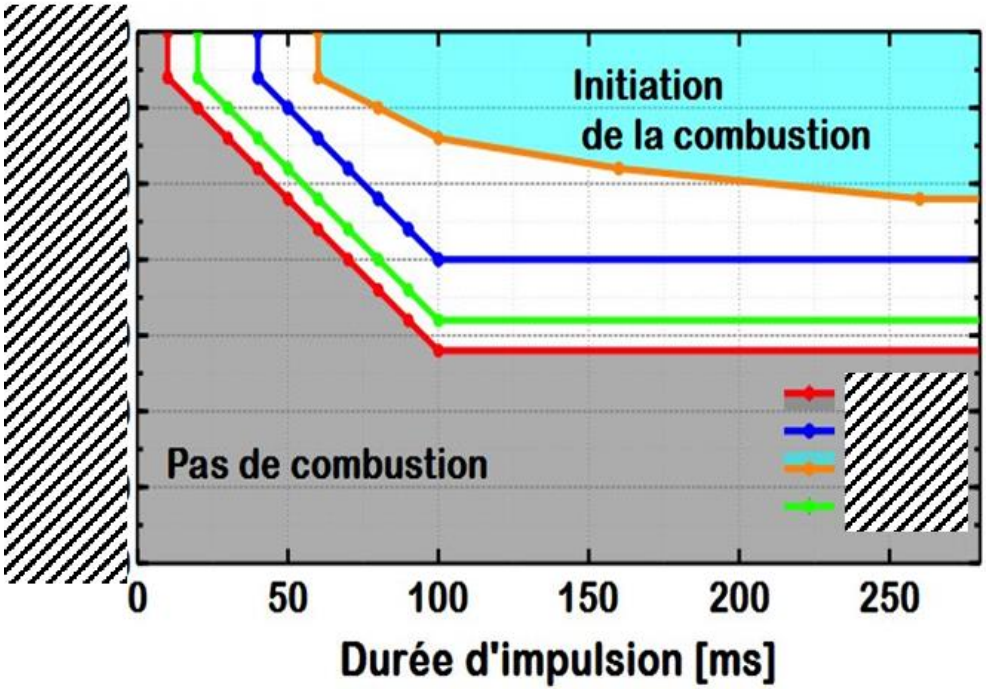



Figure 64 : Initiation de la combustion en fonction de la puissance et la durée d'impulsion pour différentes tailles de tache focale.

La Figure 64 représente les essais à une pression de 5 bars pour 4 différentes tailles de tâche focale X, X, X, et Xmm. Pour chaque taille de tâche choisie, nous avons commencé par fixer une puissance XW, ensuite de réaliser un premier tir avec une durée d'impulsion de 10ms. Dans le cas où ce premier tir n'entraine pas une initiation de la combustion, nous augmentons la durée d'impulsion d'une valeur de 10ms supplémentaire au fur et à mesure jusqu'à arriver à 2000ms. Une fois réalisé le balayage de toutes les durées d'impulsion à une même puissance, l'étape suivantes consiste à augmenter la puissance de 20W et faire les mêmes balayages sur toutes les durées d'impulsion.

La Figure 64 illustre le domaine d'initiation de la combustion en tir statique unique. Le domaine en dessus de chaque courbe correspond au domaine d'initiation de la combustion. Sur la Figure 64 nous distinguerons deux allures différentes de courbe. Les essais réalisés avec une tâche focale de tache de X, X et Xmm présente une allure très linéaire tandis que les essais réalisés avec une tâche focale plus grosse de diamètre Xmm présente un changement de pente pour un temps d'impulsion de 100ms.

On rappelle ici que le but des essais dans ce chapitre est de définir les critères seuils de température, de taille de surface chauffée et de durée d'impulsion qui

permettent de déclencher l'initiation de la combustion tout en utilisant la puissance la plus faible afin de réduire les distances de sécurité. Il s'agit donc de trouver l'intensité nécessaire à la mise en œuvre (l'intensité de l'initiation de la combustion), la plus faible dans nos essais. La synthèse des essais réalisés correspondant à l'initiation de la combustion est présentée sur la Figure 65 sous forme d'un courbe décrivant la puissance nécessaire pour l'initiation en fonction de la taille de la tache focale.

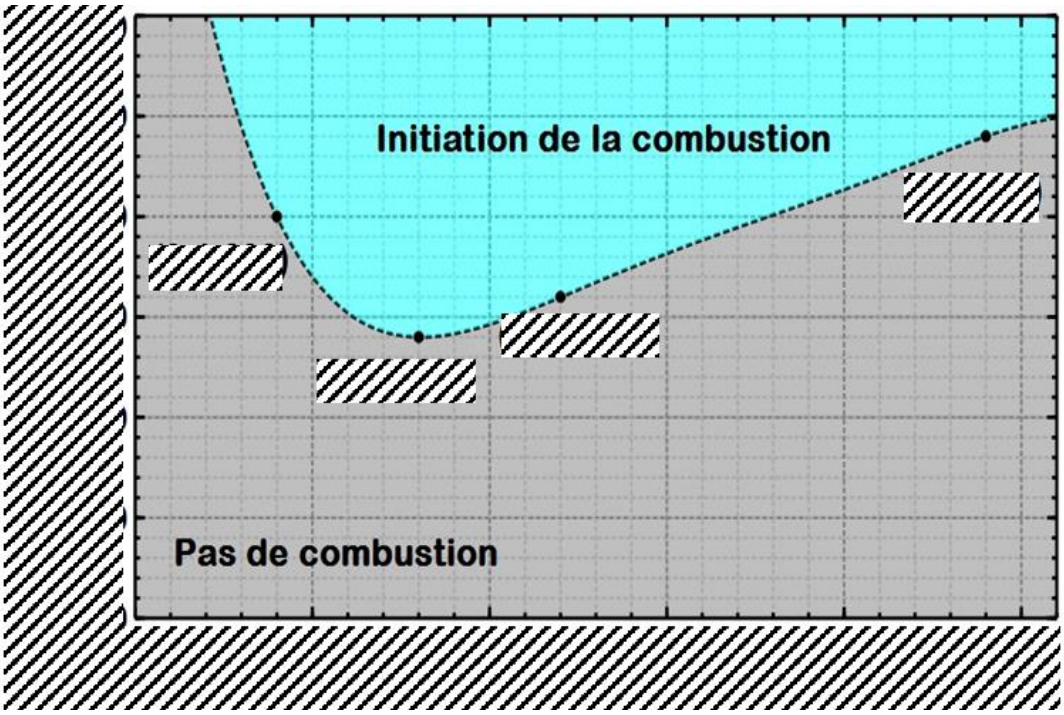



Figure 65 : Puissance minimale obtenue pour l'initiation de la combustion en fonction du diamètre de la tache focale (durée d'impulsion 100ms).

La Figure 65 montre un optimum situé entre X et Xmm pour une puissance de XW soit une intensité d'environ XkW.cm$^{-2}$.

La réduction du diamètre de la tâche focale à une valeur de Xmm entraine une augmentation de la puissance nécessaire à l'obtention d'une combustion stable jusqu'à XW tout en gardant une durée d'impulsion de 100ms. Ceci est dû à la compétition entre la réduction de la surface d'échange et l'augmentation des cinétiques de réaction avec la température.

Nous voyons également qu'une augmentation du diamètre nécessite une puissance supérieure : XW pour Xmm et XW pour Xmm. Là encore, c'est un équilibre entre température, surface d'échange avec la même durée d'impulsion de 100ms.

En conclusion, le choix d'un diamètre de tache focale entre X et Xmm nous permet de limiter de 40% la puissance laser utilisée par rapport à une tâche de diamètre Xmm ou de diamètre Xmm.

# 4 Interprétation et discussion

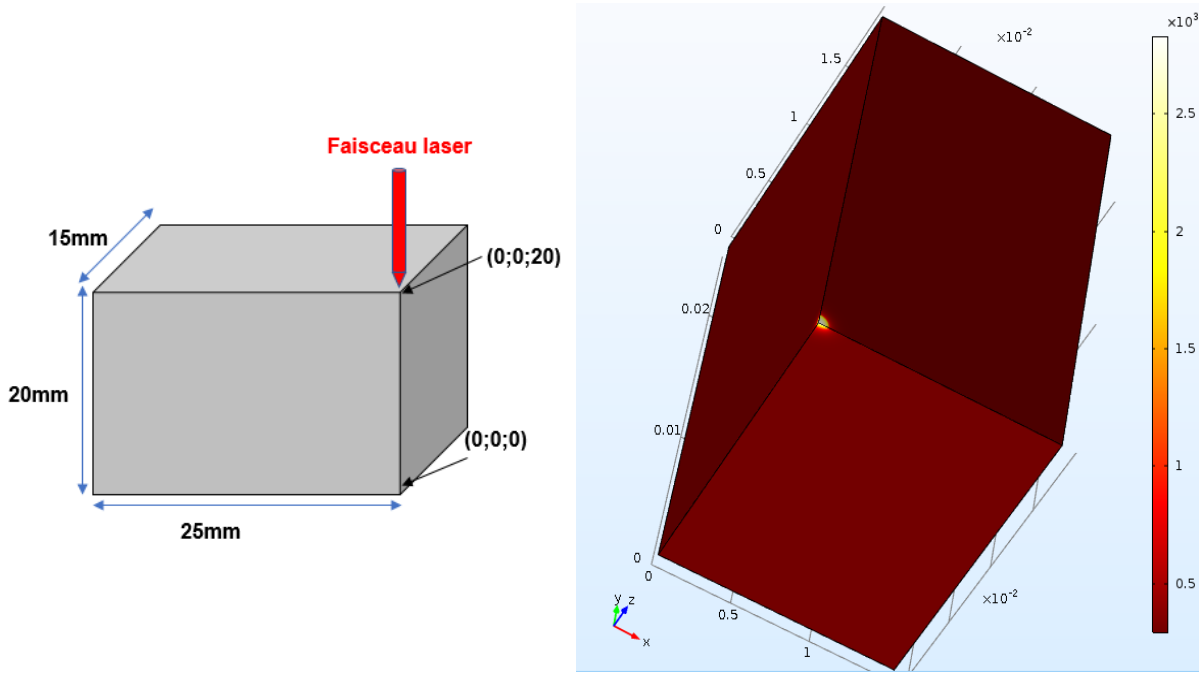
D'après les essais d'initiation réalisés à différentes puissances, durée d'impulsion et taille de tache focale, nous constatons que l'initiation de la combustion est un compromis entre la surface d'interaction, la puissance et la durée d'interaction. Afin de bien déterminer les paramètres de surface chauffée et de température optimale et de durée d'interaction, il a fallu modéliser le processus de chauffage laser sous COMSOL. Cet outil numérique permet de simuler les essais réalisés, et de comparer les résultats avec les mesures de température par pyrométrie IR afin de vérifier la cohérence avec la simulation.

## 4.1 Géométrie

La géométrie utilisée est un parallélépipède qui représente un volume de métal d'une épaisseur de 20mm, de largeur 15mm et d'une longueur de 25mm. Nous avons positionné le coin de la face inférieure de l'échantillon au point x=0, y=0 et z=0 Figure 66.

Dans le modèle COMSOL on modélise uniquement le ¼ de la pièce avec le faisceau laser focalisé sur le coin de la face supérieure de l'échantillon car les conditions aux limites et les résultats sont symétriques (Figure 66).

Nous avons pu se contenter d'un échantillon beaucoup plus petit car les gradients thermiques sont présents uniquement dans une petite zone très localisée près de l'impact laser, mais le faite que le maillage est raffiné uniquement sur la zone de chargement thermique et devient de plus en plus grossier en s'éloignant de cette dernière, le temps de calcul reste petit (15 à 20 min par simulation).



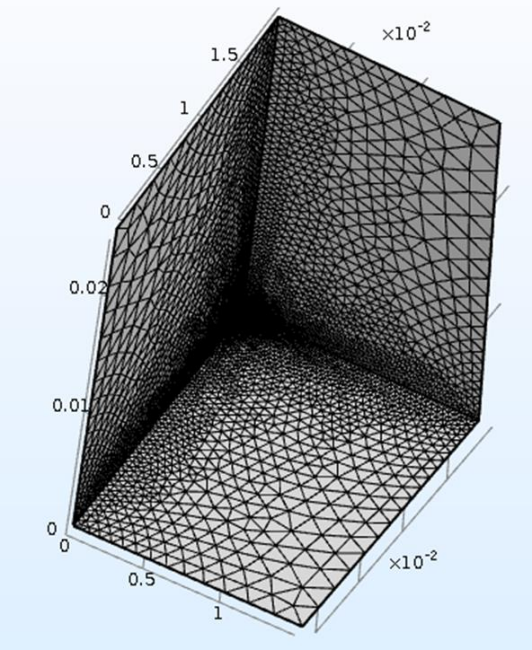

*(a)* (b)

Figure 66 : Géométrie utilisé (a) les dimensions de la géométrie ; (b) endroit de la focalisation laser sur l'échantillon.

La Figure 66 (a) illustre les dimensions de l'échantillon utilisées avec une épaisseur de 20mm, une largeur de 15mm et une longueur de 25mm. Le faisceau laser intercepte l'échantillon sur le coin de la face supérieure au point $x_0$=0 et $y_0$=0 et $z_0$=0,02 Figure 66 (b).

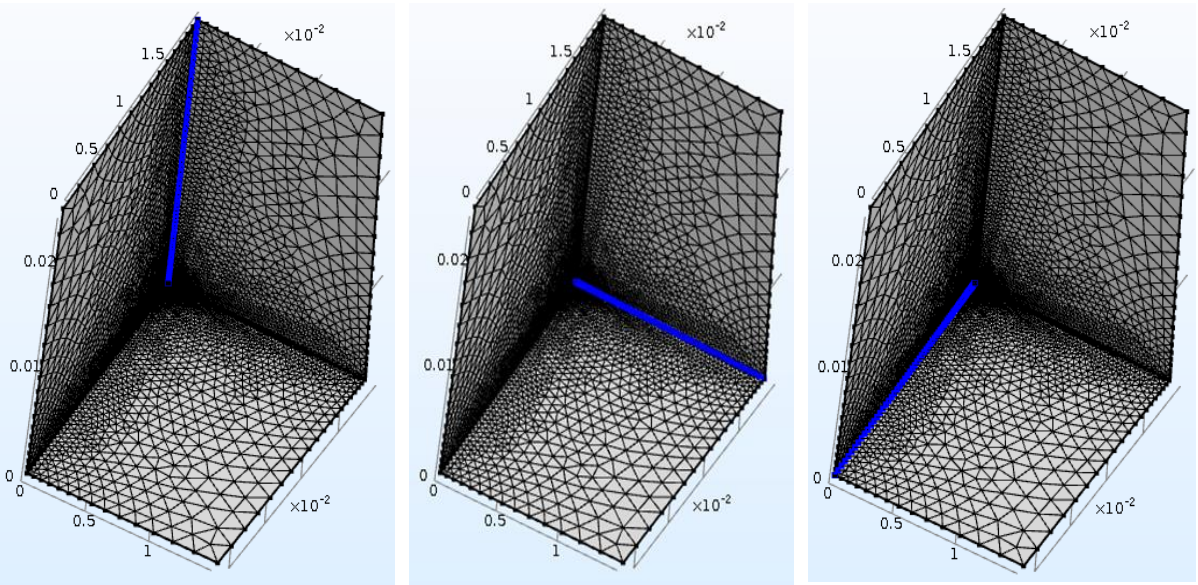
## 4.2 Maillage

Le maillage utilisé sur l'échantillon est un maillage tétrahydrique. La taille du maillage global a été fixé entre un minimum de 0,9 mm et une taille maximale de 5mm Figure 67 (a). Le taux de croissance des éléments du maillage et fixé à 1,1 avec un facteur de courbure de 0,6.




Taille d'élément maximale:
0.005 m
Taille d'élément minimale:
9E-4 m
Taux de croissance maximum des éléments:
1.1
Facteur de courbure:
0.6
Résolution des régions minces:
0.5

*(a)*




Distribution
Propriétés de la distribution:
Distribution prédéfinie
Nombre d'éléments:
70
Rapport d'aspect des éléments:
30
Méthode de distribution:
Séquence arithmétique
Distribution symétrique
Direction inverse

Distribution
Propriétés de la distribution:
Distribution prédéfinie
Nombre d'éléments:
70
Rapport d'aspect des éléments:
10
Méthode de distribution:
Séquence arithmétique
Distribution symétrique
Direction inverse

Distribution
Propriétés de la distribution:
Distribution prédéfinie
Nombre d'éléments:
70
Rapport d'aspect des éléments:
10
Méthode de distribution:
Séquence arithmétique
Distribution symétrique
Direction inverse

*(b)*

Figure 67 : (a) maillage global ; (b) raffinement du maillage sur la zone d'intérêt.

La zone d'intérêt du profil de température et sa distribution se situe au coin supérieur de l'échantillon. Vu que les tailles de tache focale utilisées sont relativement petites et afin d'avoir une bonne précision des mesures, on a raffiné les éléments du maillage sur les arrêts en les décomposant à 70 éléments Figure 67 (b) en plus des éléments existants.

Par souci de reproductibilité des résultats nous fournissons ici les valeurs des grandeurs thermo-physiques utilisées dans le modèle en fonction de la température.

## 4.3 Conductivité thermique de l'échantillon en acier en fonction de la température (paramètre d'entrée du modèle)

La conductivité thermique est une grandeur physique qui caractérise la capacité d'un matériau à transférer la chaleur par conduction. Plus la conductivité thermique d'un matériau est élevée, plus le matériau est conducteur de la chaleur. Cette grandeur physique est l'une des propriétés thermiques essentielles d'un matériau, qui dépend de la température et s'exprime en *[W/(m.K)]*.

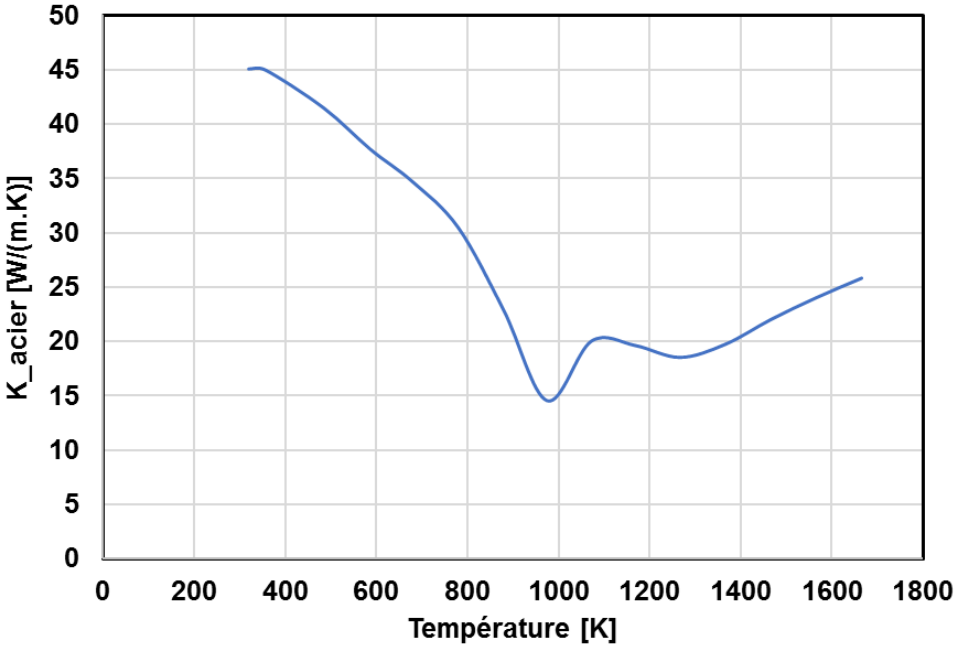



Figure 68 : Conductivité thermique de l'acier en fonction de la température [57], utilisé dans le modèle COMSOL

La Figure 68 illustre l'évolution de la conductivité thermique de l'acier en fonction de la température. Les mesures de conductivité thermique couvrent la gamme de température entre 200 et 1700K. Concernant les valeurs de la conductivité

thermique inférieure à 300K ou supérieure à 1700K, le modèle COMSOL prend en compte comme approximation linéaire la première et dernière valeur connue renseignée soit respectivement 45 et 26 *W/(m.K)*.

## 4.4 Capacité calorifique de l'échantillon en acier en fonction de la température (paramètre d'entrée du modèle)

La capacité calorifique est une grandeur physique qui caractérise la capacité d'un matériau à accumuler de l'énergie thermique pour une masse donnée lors de l'augmentation de sa température. Plus la capacité calorifique augmente, plus le matériau est capable de stocker de l'énergie thermique en entrainant une augmentation relativement faible de sa température. La capacité calorifique fait partie des grandeurs thermiques essentielles qui doivent être connues afin de mieux simuler le chauffage d'un matériau. La capacité calorifique s'exprime en *[J/(kg.K)]*.

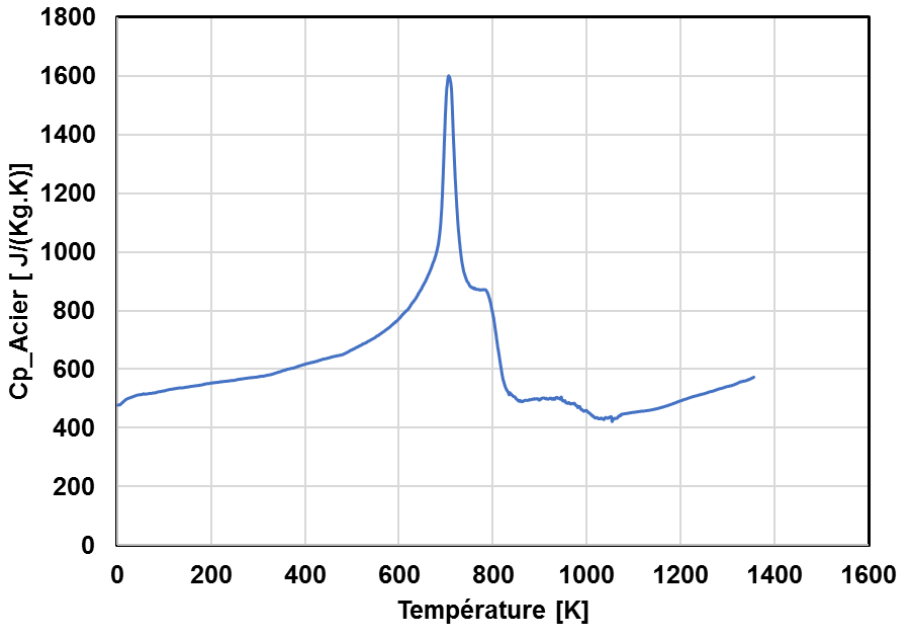



Figure 69 : Capacité calorifique de l'acier en fonction de la température [57], utilisé dans le modèle COMSOL

La Figure 69 représente la capacité calorifique de l'acier en fonction de la température. Les mesures de conductivité thermique couvrent la gamme de température à partir de 0K jusqu'à 1380 K. Les valeurs de la capacité calorifique pour des températures supérieures à 1380K sont considérées comme constantes égales à la dernière valeur atteinte connue à 1380K qui est de 580 *J/(kg.K)*.

On remarque sur la Figure 69 que l'augmentation de la température de l'acier jusqu'à 700K entraine une augmentation de la conductivité calorifique de l'acier pour atteindre une valeur maximale d'environ 1600 *J/(kg.K)*. A partir de 700K, la capacité calorifique de l'acier chute jusqu'à atteindre une valeur de 580 *J/(kg.K)* à 1380K. Ce qui signifie que pendant le chauffage de l'échantillon, ce dernier passe par une phase également, une première en dessous de 700K où il cumul de l'énergie thermique sans avoir une augmentation importante de la température, ensuite une deuxième phase avec le cas contraire à partir de 700K.

## 4.5 Prise en compte de l'évaporation du métal

Nous avons déjà montré dans le modèle de Drude que l'énergie du faisceau laser déposée sur un solide est absorbée par les électrons de conduction du solide. L'agitation des électrons de conduction provoque une élévation de la température. L'agitation thermique au-delà d'une certaine température est supérieure à l'énergie de liaison des atomes et ceux-ci peuvent s'évaporer. Cette courte explication sur le changement d'état permet de relier le comportement atomique avec la pression de saturation Psat(Tvap)=1 bar. Les particules qui quittent la surface constituent la partie évaporée du métal orientées normalement à la surface d'évaporation.

On définit la pression de vapeur saturante comme étant la pression du gaz quand le liquide et le gaz coexistent. La pression saturante est décrite par l'équation de Clausius-Clapeyron. Après simplification, elle s'écrit sous la forme suivante :

$$P_{sat}(T) = P_0 exp^{\frac{ML_v}{R}\left(\frac{1}{T_v}-\frac{1}{T}\right)}$$ ***Figure 70***

$L_v$: chaleur latente de vaporisation du métal

$P_0$[bar]: la pression ambiante

$T_v$[K] : la température de vaporisation du matériau 2770K

R : constante des gaz parfaits

T[K] : la température locale

Une fois la pression saturante est définie, on est capable de définir le flux massique qui s'évapore par l'équation de Samokhin sous la forme suivante.

$$\dot{M} = \sqrt{\frac{M}{2\pi R}} \frac{P_{sat}(T)}{\sqrt{T}} (1 - \beta_r) \qquad \textit{Figure 71}$$

$\dot{M}$ : le flux de masse net évaporé $[kg.m^{-2}.s^{-1}]$

M : Masse molaire

$\beta_r$ : est appelé coefficient de rétrodiffusion, il traduit l'intensitée du phénomène d'évaporation. Dans le cas d'une évaporation faible, le coefficient $\beta_r$ tend vers 1 tandis que si l'évaporation est très intense ce coefficient tends vers 0. Il est calculé à partir des équations de conservation à travers la couche de Knudsen. En ce qui concerne la découpe laser, l'utilisation d'une valeur comprise entre 0,9 et 1bar semble être adaptée à notre processus de découpe laser et oxygène.

Les équations 8 et 9 ont été intégrées dans le modèle COMSOL afin de prendre en compte le phénomène d'évaporation. Ce phénomène aura une influence prédominante pour des températures supérieures à la température de vaporisation. Pour des températures inférieures, nous trouvons que son influence est négligeable sur des temps de simulation de 100ms.

## 4.6 Taille de faisceau et température nécessaire.

Dans cette partie, nous comparons les résultats expérimentaux obtenus à différentes puissances, différentes durées d'impulsion et différentes tailles de tâche focale sur le modèle COMSOL présenté ci-dessus. Le but principal de cette modélisation et d'identifier les températures d'initiation de la combustion associées à une distribution spatial de la température pour chaque taille de tâche focale (XW, XW, XW, XW pour des diamètres de taches focales respectivement de X, X, X et Xmm et une durée d'interaction de Xms).

La maitrise du profil de température du métal exposé au rayonnement laser YAG est un point clés dans l'identification du seuil de combustion car en connaissant

exactement ce profil, on pourra transposer ce résultat à n'importe quelle autre longueur d'onde en prenant en compte le coefficient d'absorption convenable.

### *4.6.1 Profil thermique D=Xmm*

La Figure 72 illustre les résultats du calcul d'initiation de la combustion réalisé avec un diamètre de tache focale de Xmm. La puissance d'initiation la plus faible atteinte est de XW avec une durée d'impulsion de 100ms. Toutes les autres puissances testées supérieures à XW et jusqu'à XW permettent l'initiation de la combustion avec une diminution d'environ 10ms du temps d'impulsion à chaque augmentation de 20W de la puissance.

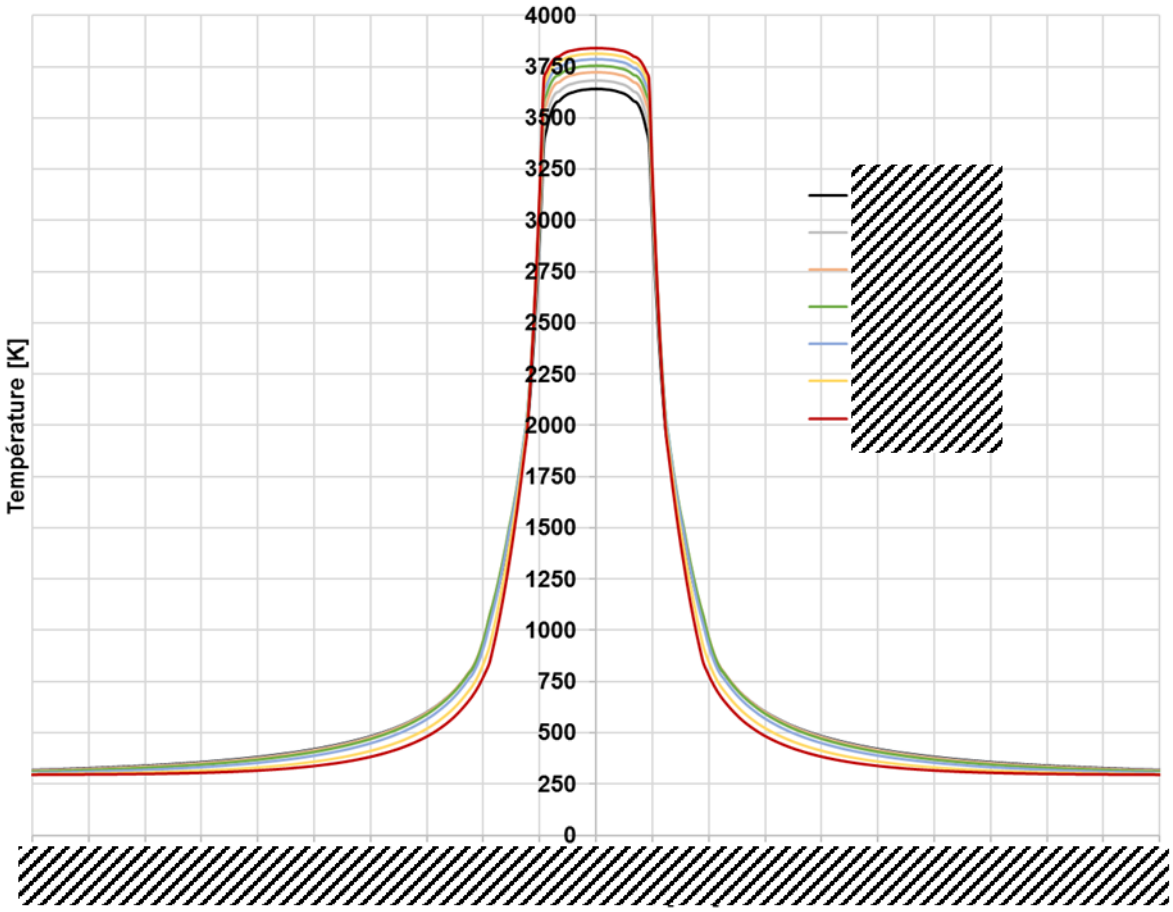



Figure 72 : Essais d'initiation de la combustion à différentes puissances et différentes durées d'impulsion avec un diamètre de tache focale de Xmm.

Les essais d'initiation Figure 72 montrent qu'avec une puissance de XW et une durée d'impulsion de Xms nous obtenons un profil spatial de température sous forme d'une gaussienne d'une largeur à mi-hauteur de Xmm avec une température au centre qui est de l'ordre de 3642K. Les profils de température qui ont permis l'initiation de la

combustion, correspondent à des profils supérieurs en termes de largeur de gaussienne et en terme de température maximale que ceux obtenus à XW de puissance et Xms de durée d'impulsion. D'après les valeurs de température obtenues, on note que durant ces essais la température dépasse la température de vaporisation du métal, et qu'une phase liquide existe sur un diamètre de Xmm avant l'initiation de la combustion.

Les configurations des essais réalisés avec une taille focale de diamètre 0,4mm, sont résumés dans le tableau suivant Tableau 8

| *Puissance [W]* | Durée d'interaction [ms] | Température [K] | Surface chauffée >1000K [mm²] |
|---|---|---|---|
| *X* | X | 3642 | 0,5 |
| *X* | X | 3684 | 0,5 |
| *X* | X | 3722 | 0,5 |
| *X* | X | 3757 | 0,5 |
| *X* | X | 3788 | 0,5 |
| *X* | X | 3815 | 0,5 |
| *X* | X | 3840 | 0,5 |

Tableau 7 : Paramètres nécessaire pour l'initiation de la combustion en utilisant une tâche focale de diamètre 0,4mm

### *4.6.2 Profil thermique D-Xmm*

Les essais d'initiation de la combustion réalisés avec un diamètre de tache focale de X mm sont représentés sur la Figure 73. La puissance d'initiation la plus faible atteinte est de XW avec une durée d'impulsion de 100ms. Toutes les autres puissances testées supérieures à XW jusqu'à XW permettent l'initiation de la combustion avec une diminution d'environ 10ms de durée d'impulsion à chaque augmentation de 20W de la puissance.

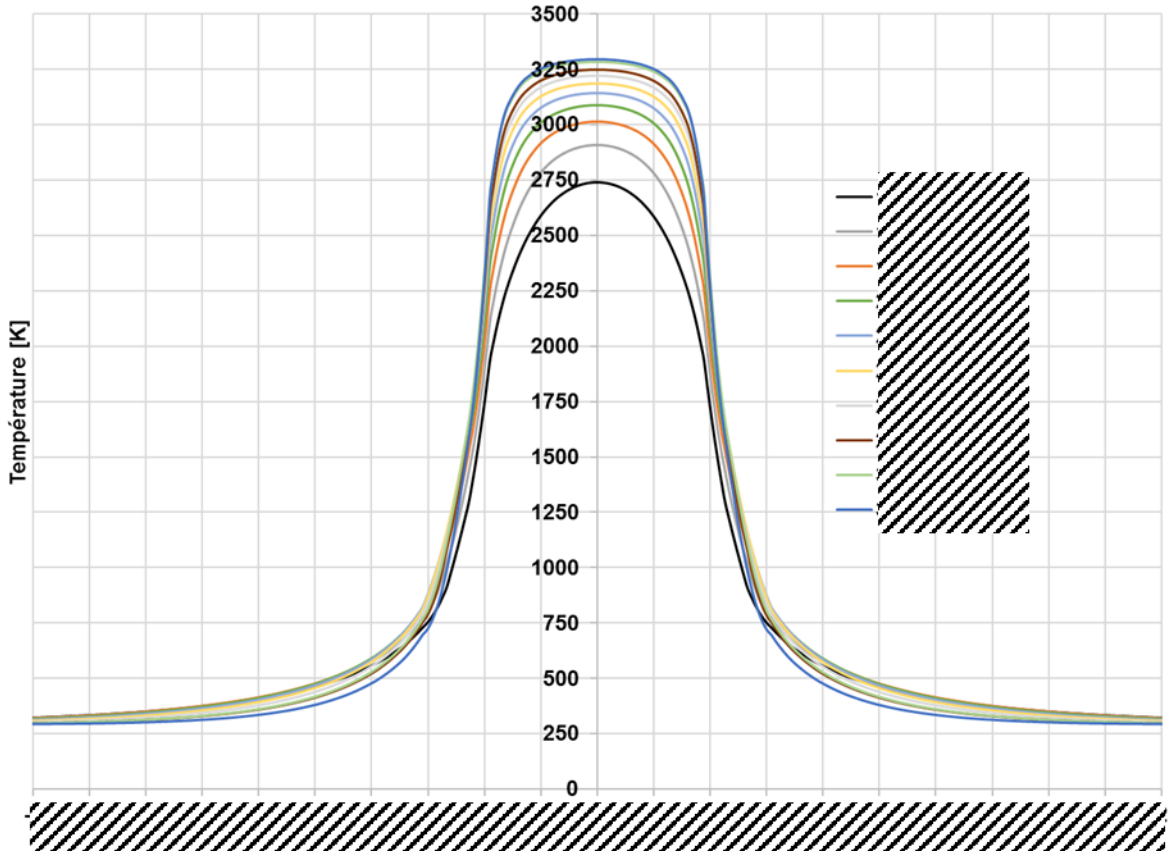



Figure 73 : Essais d'initiation de la combustion à différentes puissances et différentes durées d'impulsion avec un diamètre de tache focale de Xmm.

La Figure 73 montre qu'avec une puissance de XW et une durée d'impulsion de Xms nous obtenons un profil spatial de température sous forme d'une gaussienne d'une largeur de Xmm avec une température au centre qui est de 2780K. Toutes les autres puissances qui ont permis l'initiation de la combustion, correspondent à des profils supérieurs en termes de largeur de gaussienne et en termes de température maximale que celle obtenue à XW de puissance et Xms de durée d'impulsion. Nous remarquons que plus la puissance laser augmente et la durée d'impulsion diminue, plus la largeur de la gaussienne se réduit (surface d'interaction plus petite entraine un retard dans l'initiation de la combustion) et plus la température au centre de la gaussienne augmente (favorise l'initiation de la combustion). On note que durant ces essais on atteint la phase liquide de diamètre Xmm avant l'initiation de la combustion.

On a remarqué aussi que chaque profil de température doit être obtenu dans une durée bien définie qui correspond au temps nécessaire d'interaction du laser et l'oxygène avec la surface. Les configurations numériques des essais réalisés avec un diamètre de Xmm sont résumées dans le tableau suivant Tableau 8

| *Puissance [W]* | Durée d'interaction [ms] | Température [K] | Surface chauffée >1000K [mm²] |
|---|---|---|---|
| *X* | X | 2742 | 1,05 |
| *X* | X | 2909 | 1,05 |
| *X* | X | 3014 | 1,05 |
| *X* | X | 3087 | 1,05 |
| *X* | X | 3142 | 1,05 |
| *X* | X | 3186 | 1,05 |
| *X* | X | 3221 | 1,05 |
| *X* | X | 3247 | 1,05 |
| *X* | X | 3283 | 1,05 |
| *X* | X | 3297 | 1,05 |

Tableau 8 : Paramètres nécessaires pour l'initiation de la combustion en utilisant une tâche focale de diamètre Xmm.

### *4.6.3 Profil thermique D=Xmm*

Les essais d'initiation de la combustion réalisés avec une diamètre de tache focale de X mm sont représentés sur la Figure 74. La puissance d'initiation la plus faible est de XW avec une durée d'impulsion de 100ms. Toutes les autres puissances testées supérieures à XW et jusqu'à XW permettent l'initiation de la combustion avec une diminution d'environ Xms de durée d'impulsion à chaque augmentation de 20W de la puissance. Ce résultat est assez similaire à celui observé en utilisant une tâche focale de diamètre Xmm.

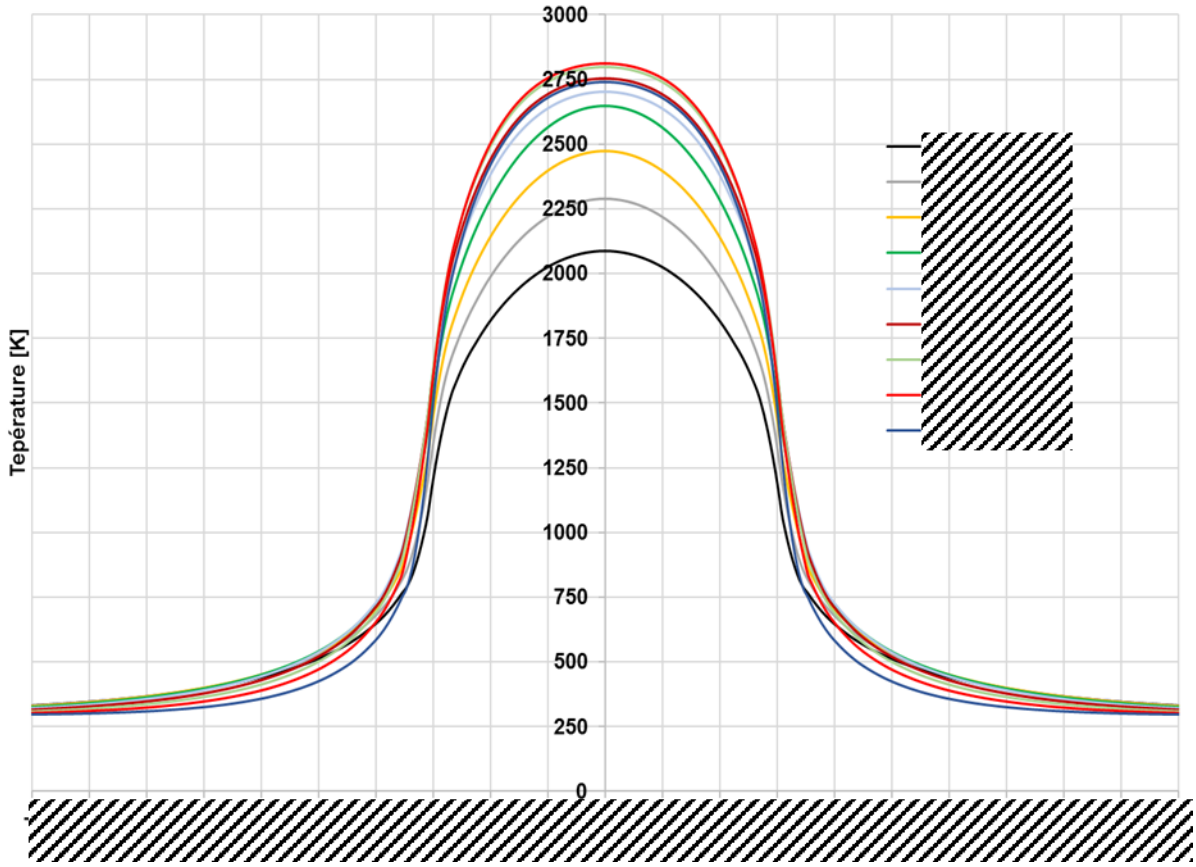



Figure 74 : Essais d'initiation de la combustion à différentes puissances et différentes durées d'impulsion avec un diamètre de tache focale de Xmm.

La Figure 74 montre qu'avec une puissance de XW et une durée d'impulsion de Xms nous obtenons un profil spatial de température sous forme d'une gaussienne d'une largeur de Xmm avec une température au centre de 2088K. Les paramètres d'initiation de la combustion sont obtenus en augmentant la puissance de 20w à partir de XW et en diminuant la durée d'impulsion de 10ms à partir de 100ms au fur et à mesure. La même observation concernant la diminution de la largeur à mi-hauteur de la gaussienne en augmentant la puissance et en diminuant la durée d'impulsion est valable aussi sur les essais réalisés en utilisant la tache focale de diamètre Xmm.

La température de surface atteinte durant la période d'initiation indique l'atteinte de la phase liquide de l'acier de diamètre de Xmm avant de rentrer dans la combustion.

L'atteinte d'un profil de température donné correspondant à l'initiation de la combustion n'est pas suffisant car il doit être toujours fourni dans un temps caractéristique associé à chaque puissance. Les configurations des essais réalisés avec une taille focale de diamètre X mm sont résumés dans le tableau suivant Tableau 9.

| *Puissance [W]* | Durée d'interaction [ms] | Température [K] | Surface chauffée >1000K [mm²] |
|---|---|---|---|
| *X* | X | 2088 | 1,32 |
| *X* | X | 2288 | 1,32 |
| *X* | X | 2474 | 1,32 |
| *X* | X | 2645 | 1,32 |
| *X* | X | 2796 | 1,32 |
| *X* | X | 2886 | 1,32 |
| *X* | X | 2957 | 1,32 |
| *X* | X | 2960 | 1,32 |
| *X* | X | 2831 | 1,32 |

Tableau 9 : Paramètres nécessaire pour l'initiation de la combustion en utilisant une tache focale de diamètre Xmm.

### *4.6.4 Profil thermique D=X mm*

Jusqu'à présent l'utilisation des tâches focale de X, X et Xmm ont montré que la phase liquide de l'acier est atteinte systématiquement avant de rentrer dans la combustion. Dans la littérature la plupart des travaux (chapitre 1) ont montré que la combustion démarre après l'apparition de la phase liquide. L'originalité de l'information retrouvée durant nos essais réalisés avec une tâche focale de diamètre Xmm montre que l'initiation de la combustion peut démarrer dans la phase solide. Cela appui l'hypothèses évoquée par des auteurs qui estiment que l'initiation de la combustion peut démarrer à partir de la phase solide. A titre d'exemple W. O'Neill et J.T. Gabzdyl [2] ont pu identifier une condition qu'ils ont appelée condition « Lasox » correspondant à la température d'initiation de la combustion de l'ordre de 1273K soit dans le domaine de solide. D'autres revues qui détaillent les procédés d'oxycoupage [58] évoquent des températures d'initiation de la combustion en phase solide.

Les essais d'initiation de la combustion réalisés avec un diamètre de tache focale de Xmm sont représentés sur la Figure 75. La puissance d'initiation la plus faible atteinte est de XWavec une durée d'impulsion de Xms. Toutes les autres puissances testées à partir de XW jusqu'à XW permettent l'initiation de la combustion avec une diminution de successivement X, X, X et Xms à chaque augmentation respective de X, X, X et XW de la puissance.

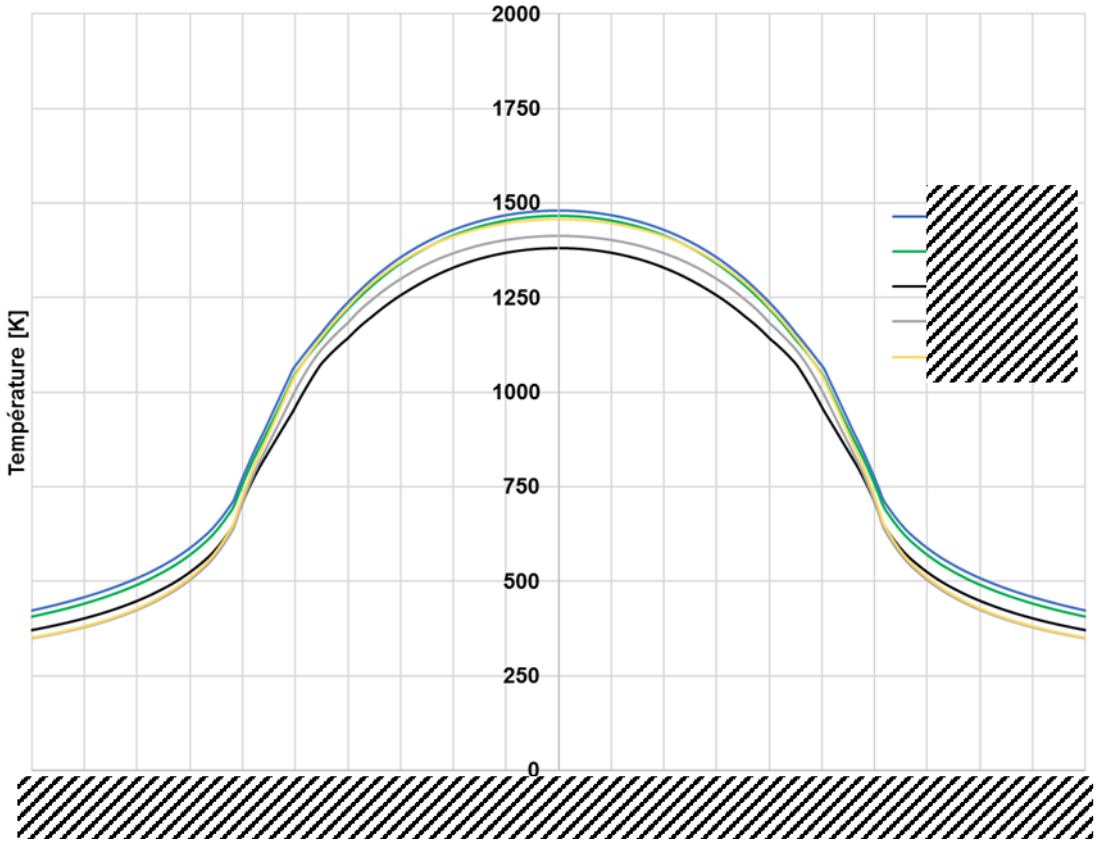



Figure 75 : Essais d'initiation de la combustion à différentes puissances et différentes durées d'impulsion avec un diamètre de tache focale de Xmm.

La Figure 75 montre qu'avec une puissance de XW (la plus faible) et une durée d'impulsion de Xms nous obtenons un profil spatial de température sous forme d'une gaussienne d'une largeur de Xmm avec une température au centre qui est de l'ordre de 1481K. La puissance qui a permis d'initier la combustion en solide avec une température encore plus faible est de XW avec une durée d'impulsion de 100ms et une température de 1380K.

Tous les paramètres testés avec une tache focale de diamètre Xmm montrent que l'initiation de la combustion démarre dans la phase solide sans l'apparition d'aucun volume liquide en surface. Les mesures de température en IR et l'observation vidéo vont permettre dans la suite d'appuyer ou de contredire l'information tirée de la simulation.

On résume dans le Tableau 10 les paramètres de puissance et de durée d'impulsion qui ont entrainé l'initiation de la combustion en phase solide en utilisant une tache focale de diamètre Xmm

| *Puissance [W]* | Durée d'interaction [ms] | Température [K] | Surface chauffée >1000K [mm²] |
|---|---|---|---|
| *X* | X | 1481 | 3,14 |
| *X* | X | 1466 | 3,14 |
| *X* | X | 1380 | 3,14 |
| *X* | X | 1414 | 3,14 |
| *X* | X | 1456 | 3,14 |

Tableau 10 : Paramètres nécessaires pour l'initiation de la combustion en utilisant une tache focale de diamètre Xmm.

### *4.6.5 Comparaison des différentes distributions spatiales de la température permettant l'initiation en utilisant différentes tailles de tache focale.*

Pour chaque taille de tache focale, il existe un profil spatial de température avec un niveau de température minimale qui doit être obtenue en surface du métal afin d'initier la combustion.

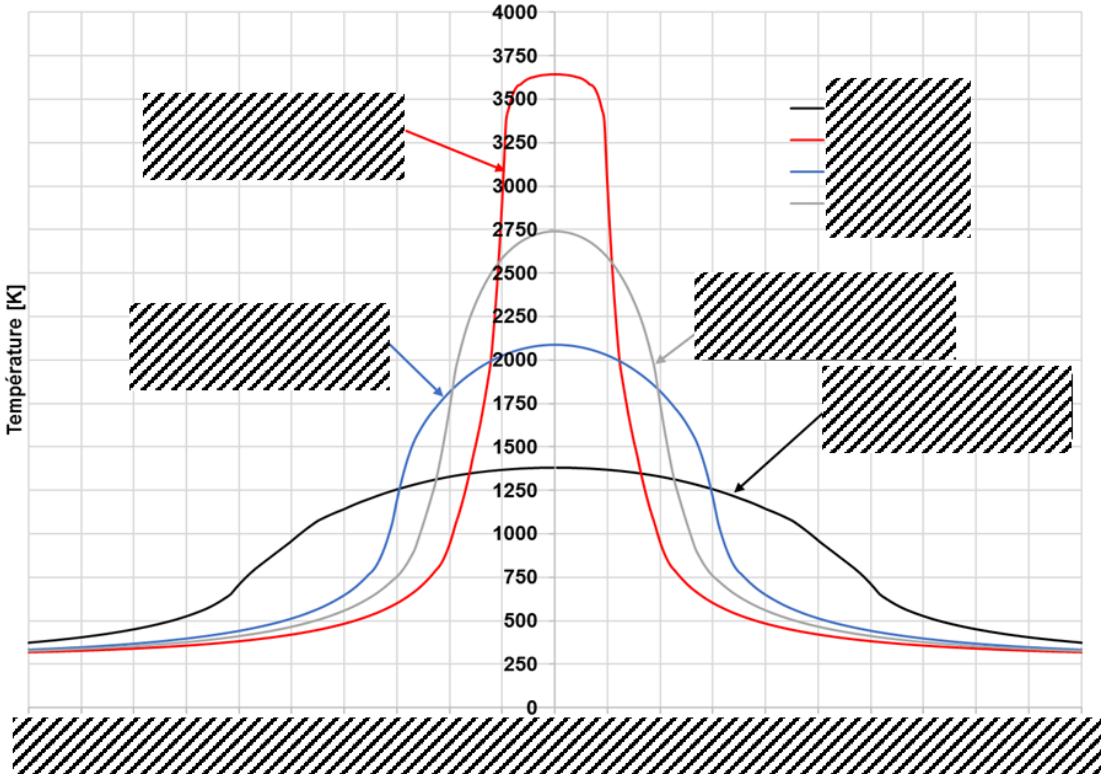



Figure 76 : Distribution spatial de température nécessaire pour l'initiation de la combustion en utilisant trois différentes taille de tache focale (diamètre X, X et Xmm).

La Figure 76 illustre trois différentes distributions de température correspondant à chacune des taches focales. La courbe en rouge représente le profil nécessaire pour initier la combustion en utilisant une tache focale de diamètre Xmm.

La courbe en bleu représente la distribution de température nécessaire pour initier la combustion avec une tache focale de diamètre Xmm et la courbe en noir correspond à la distribution pour un diamètre de Xmm. Nous remarquons que plus la surface d'interaction augmente plus le niveau de température nécessaire pour l'initiation est faible. En utilisant les taches focales de X et X mm, l'initiation ne se met en place qu'après avoir dépassé la température de fusion et la création d'un petit volume liquide à la surface. L'utilisation d'une tâche focale de Xmm ne permet pas de dépasser la température de fusion en surface mais il suffit d'atteindre une température 1380K en ayant une surface d'interaction avec l'oxygène plus importante Figure 76.

En termes de puissance, le profil de température minimal en utilisant une tache focale de diamètre Xmm est assuré avec uniquement XW de puissance. L'utilisation d'une tache focale de Xmm nécessite un profil de température obtenu avec plus de puissance, soit environ XW. Le profil optimal de température en utilisant une tache focale de taille Xmm est assuré avec une puissance relativement élevée de l'ordre de XW.

On conclut que de point de vue optimisation de la puissance laser :

1/ le choix d'une taille de tache focale d'un diamètre d'environ Xmm nous a permis d'initier la combustion avec la plus faible puissance possible qui est de XW.

2/ Après avoir tenté d'optimiser la puissance d'initiation en variant différents paramètres réglables du procédé de découpe par laser et oxygène (Chapitre I, Figure 16), seul l'optimisation des paramètres temps, surface et température permettent l'optimisation de la puissance afin de réaliser une découpe à faible puissance.

## 4.7 Bilan : Température et surface chauffée nécessaire pour l'initiation de la combustion

Dans cette partie nous allons synthétiser les essais avec différentes tailles de tâche focale afin d'établir une loi qui relie la température que l'on doit atteindre et la taille de la surface chauffée à une température supérieure à 1000K au bord avec une durée qui ne dépasse pas les Xms afin d'initier la combustion du métal.

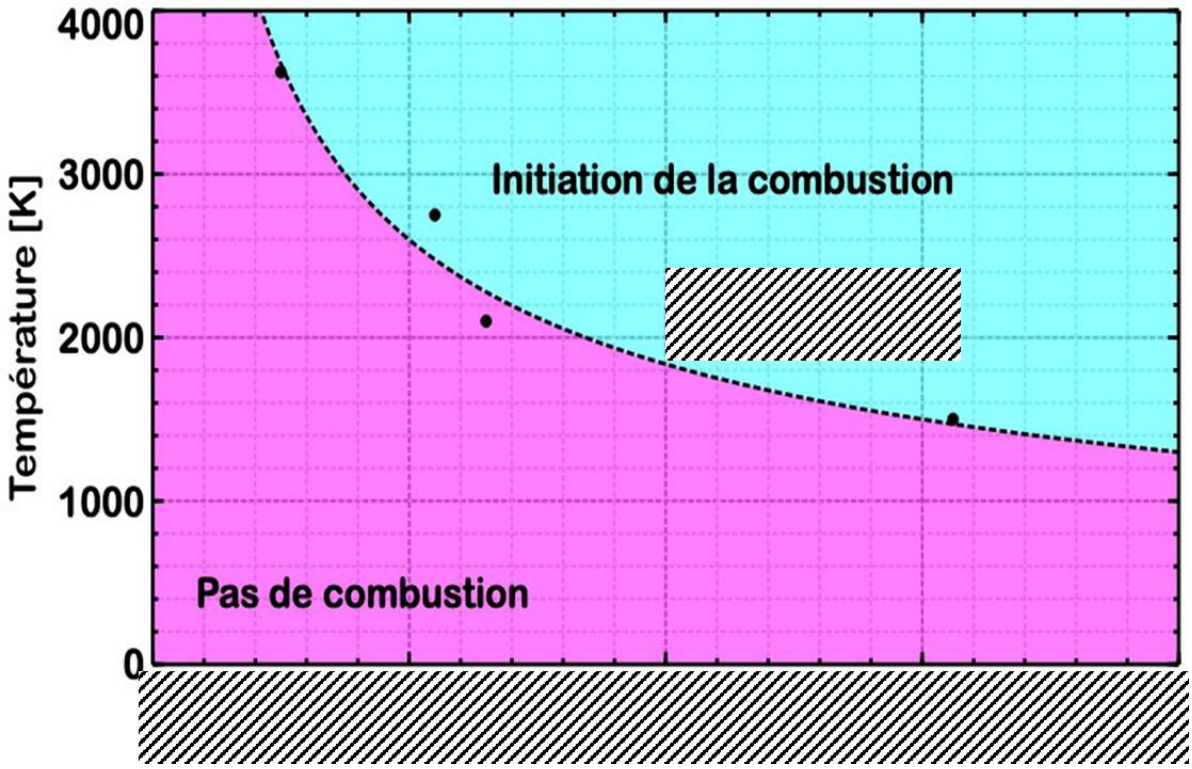



Figure 77 : Relation entre la température minimale au centre en fonction de la taille de la surface chauffé (au dessus de 1000K au bord) permettant l'initiation de la combustion

La Figure 77 montre une loi résultante des différents essais réalisé avec les paramètres de puissance, de surface et de durée d'interaction nécessaire pour l'initiation de la combustion (XW, XW,XW,XW pour des diamètres de taches focales respectivement de X, X, X et Xmm et une durée d'interaction de Xms). La loi montre une relation inversement proportionnelle entre la température et la racine carré de la surface chauffée. Cette relation est limitée par une température minimale de 1480K, en dessous de cette valeur les conditions en température ne permettent pas de déclencher l'initiation malgré l'élargissement de la zone d'interaction.

## 4.8 Mesure de température avant initiation de la combustion

Dans cette partie nous détaillerons les mesures de température sur deux essais différents afin de valider les résultats de la simulation. Les mesures de températures sont réalisées par caméra IR car cela nous permet de visualiser la zone d'interaction en même temps que les mesures de température. Les mesures de température par IR nécessitent la connaissance de l'émissivité. Elle a été estimée par deux séries de mesures indépendantes dans les domaines IR et UV (Chapitre III), et prise égale à 0,7.

### *4.8.1 Initiation de la combustion après formation de la phase liquide*

L'observation par caméra rapide avec une fréquence d'acquisition de 1000 img/sec nous permet de visualiser l'évolution et le comportement de la surface au cours de l'envoie de l'impulsion laser. Durant l'acquisition nous avons réduit la durée d'obturation a une valeur entre 1/5000s et 1/35000s dans le but de détecter le temps zéro qui correspondant au début de l'irradiation à la surface de l'échantillon.

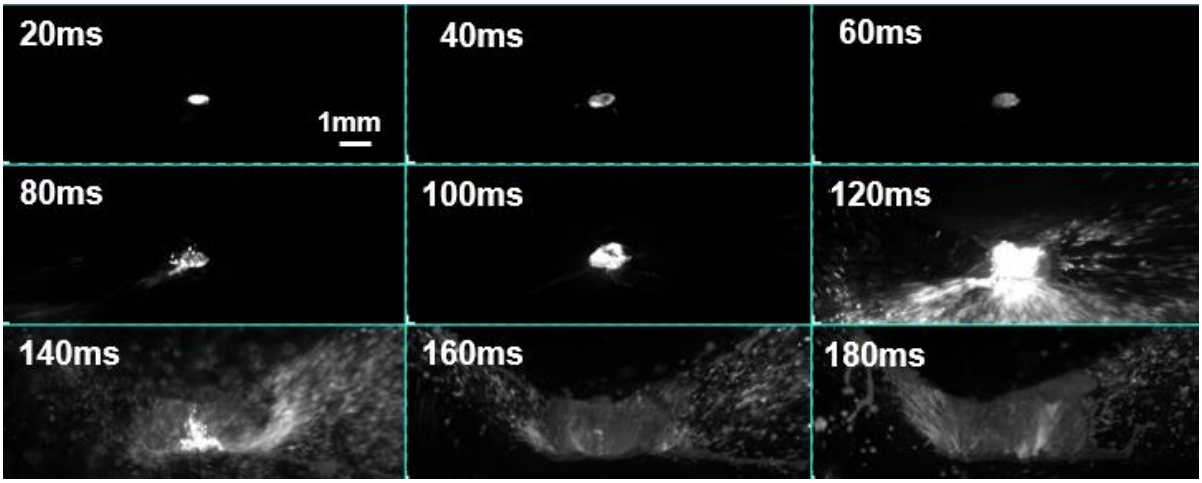



Tableau 11 : Images de l'évolution de la surface de l'échantillon au moment de la réception du rayonnement laser jusqu'à l'initiation de la combustion en utilisant une tache focale de diamètre xmm. La puissance utilisée est de XW avec une durée d'impulsion de Xms (images prises toutes les 20ms).

Le Tableau 11 montre des images de la surface de l'échantillon à l'endroit où le faisceau laser arrive. La puissance laser utilisée est de XW avec une durée d'impulsion de Xms. Sur les deux premières images, nous notons une légère apparition d'un volume liquide instable pendant une durée de Xms. Au bout de Xms (3éme image ce volume disparait), il est éjecté par le jet d'oxygène. Le volume liquide réapparaît et croit de plus en plus jusqu'à arriver à l'initiation de la combustion au bout de Xms (image 6).

Les mesures de température en IR réalisées sur la zone d'interaction sont représentées dans la Figure 78. La durée d'obturation utilisée au cours de l'acquisition est de 1/35000s, car cette valeur est suffisante pour détecter le début de l'irradiation.

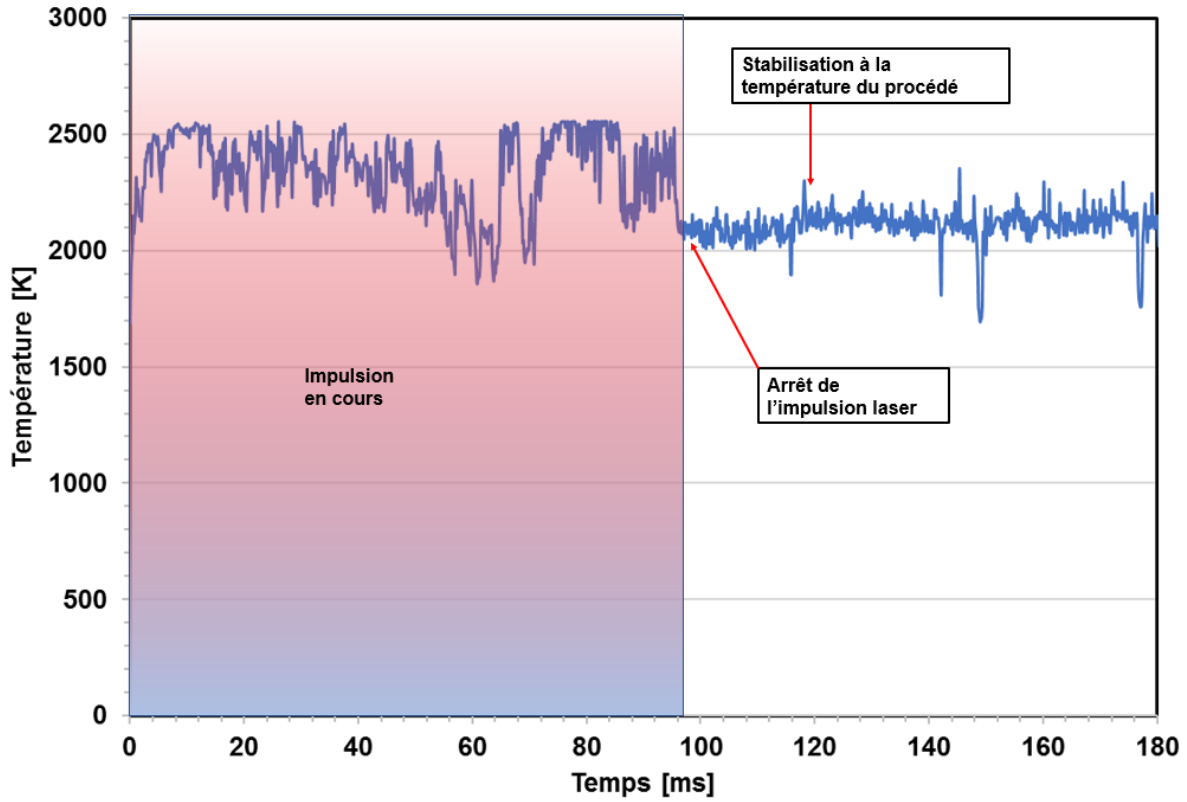



Figure 78 : Mesure de température par IR sur la surface d'interaction en utilisant une tâche focale de diamètre Xmm, une puissance de XW et une durée d'impulsion de Xms.

La Figure 78 représente les mesures de température (T moyenne sur une zone de 1mm) en début d'irradiation jusqu'à la combustion. Nous remarquons une augmentation rapide de la température jusqu'à l'obtention d'une température de 2500K au bout de Xms. Cela indique la formation d'un volume liquide à l'extrême surface que l'on voit apparaitre sur les images obtenues avec la caméra IR. Ensuite la température se stabilise pendant les premières Xms. A Xms on note une diminution de la température d'une valeur de 500K. La chute de la température est dû à la disparition du volume liquide en surface (image 3 Tableau 11) qui a été éjectée par le jet d'oxygène. Le bain liquide se reforme au-delà de Xms et devient de plus en plus important en cours du chauffage. A Xms les conditions d'initiation sont assurées et le métal rentre en combustion malgré l'arrêt de l'impulsion laser. Après l'arrêt du laser, la température baisse pour se stabiliser à environ 2150K qui est la température du procédé (chapitre 3).

En conclusion, les résultats numériques et expérimentaux montrent l'existence de la phase liquide avant l'initiation de la combustion. Cette phase sera donc présente pour des faisceaux de plus petits diamètres {X ; X} à même puissance ; l'intensité et les cinétiques thermiques et chimiques augmentant.

Pour conclure, d'après l'observation de l'évolution de la surface de l'échantillon et les mesures de température on constante que l'initiation de la combustion se met en place soit après le passage en phase liquide soit en phase solide si on augmente la surface d'interaction.

Afin de justifier cette conclusion nous avons réalisé des mesures de température par pyrométrie IR. Les mesures de températures ont été réalisées uniquement sur les deux tailles de tâche focale Xmm et Xmm, car si on vérifie l'apparition d'une phase liquide sur la surface avant la combustion en utilisant une tâche focale de diamètre Xmm, cela signifie que la phase liquide sera présente aussi avec l'utilisation des tâches focale de taille inférieure à Xmm (en restant dans la même gamme de puissance et de durée d'impulsion). Ensuite nous réaliserons les essais sur la plus grande taille de tâche focale utilisée durant nos essais de Xmm.

### *4.8.2 Initiation de la combustion en phase solide*

La même position et les même paramètres caméra ont été utilisé pour visualiser le comportement de la surface d'interaction en utilisant une tache focale de diamètre Xmm. Le seul paramètre changé est la durée d'obturation qui a été réduite à 1/5000s. La réduction à 1/5000s entraine une saturation de la luminosité de la surface après l'initiation de la combustion mais nous permet de visualiser la scène d'interaction dès les premiers instants. L'objectif de cet essai est d'obtenir la température de surface avant la combustion (au moment de l'arrivée du faisceau laser), et cela ne peut être déterminé qu'après l'importante diminution de la durée d'obturation.

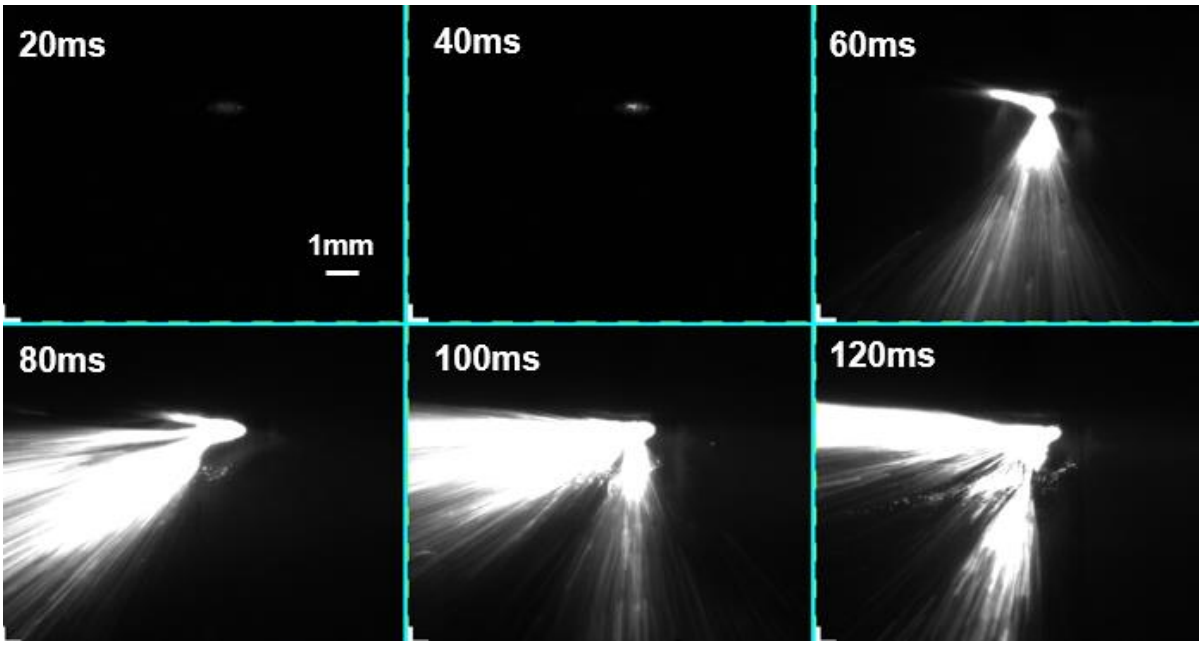



Tableau 12 : Images de l'évolution de la surface de l'échantillon au moment de la réception du rayonnement laser jusqu'à l'initiation de la combustion. La puissance utilisée est de XW avec une durée d'impulsion de Xms (images prises toutes les 20ms).

Le Tableau 12 illustre les images de la surface de l'échantillon à l'endroit où le faisceau laser arrive. La puissance laser utilisée est de XW avec une durée d'impulsion de Xms. On remarque sur les deux premières images que la surface d'interaction apparait à peine malgré l'importante réduction de la durée d'obturation. Pendant les premières Xms la surface d'interaction commence à chauffer sans noter aucune apparition du volume liquide jusqu'à avoir une combustion brusque qui se met en place.

Les mesures de température sur l'essai représenté dans le Tableau 12 ont été réalisées en IR de la même manière que précédemment afin de connaitre l'évolution de la température à la surface.

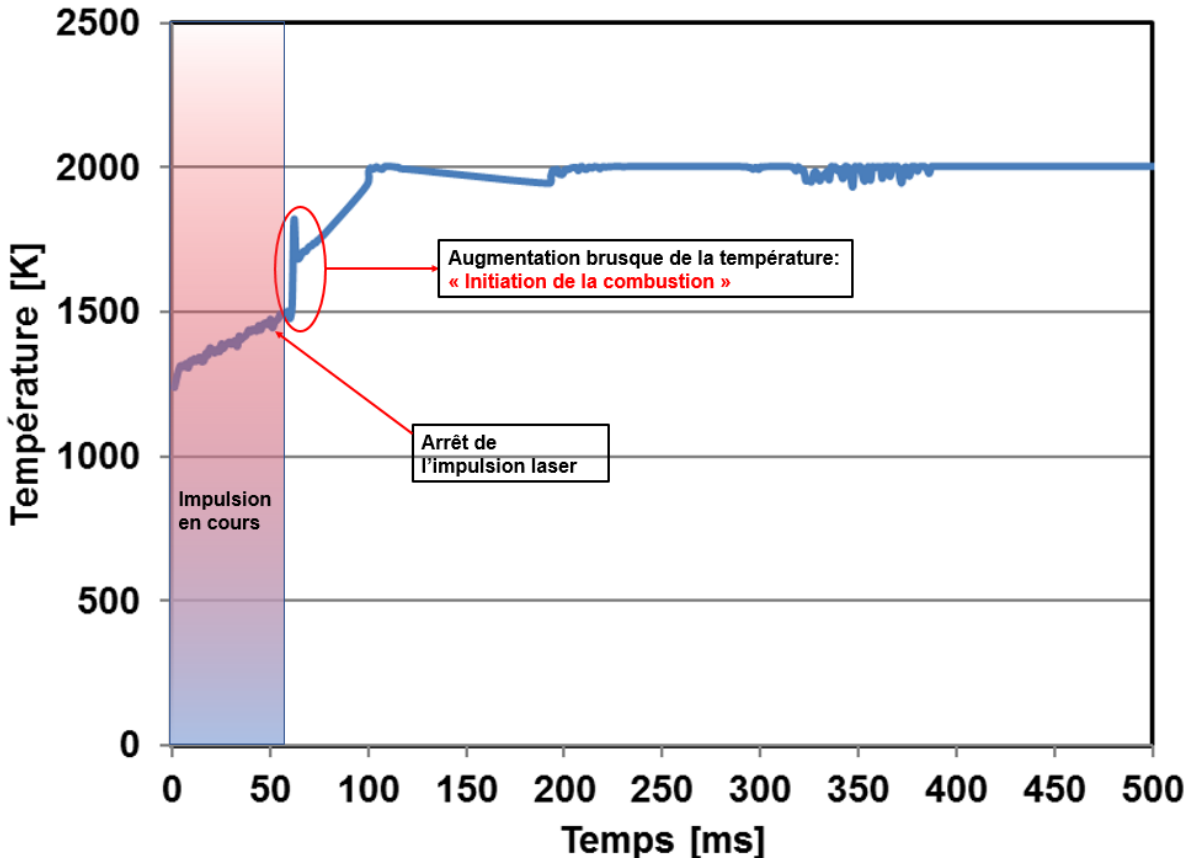



Figure 79 : Mesure de température par IR sur la surface d'interaction en utilisant une tâche focale de diamètre Xmm, une puissance de XW et une durée d'impulsion de Xms.

Les mesure de température sur la surface d'interaction en utilisant une tâche focale de diamètre Xmm sont représentées sur la Figure 79. Nous remarquons que dès l'interception du faisceau laser avec la surface, la température commence à augmenter jusqu'à atteindre une température d'environ 1500K en fin d'impulsion. A la fin de l'impulsion (Xms) il apparait un saut de température qui amène le métal jusqu'à la combustion. Contrairement à ce que nous avons vu dans le cas précédent, l'initiation de la combustion démarre à l'état solide sans avoir besoin d'un volume liquide en surface. On note aussi que les valeurs de température mesurées valident les valeurs trouvées par simulation qui prédisent l'initiation de la combustion dans une plage de température entre 1380K et 1500K (phase solide) en utilisant une tache focale de Xmm.

L'initiation en phase solide en utilisant une tache focale de diamètre Xmm peut être expliquée par le mécanisme suivant. La montée en température de la surface augmente la cinétique d'oxydation de surface. Cette réaction exothermique entraine un apport supplémentaire d'énergie qui augmente la température et accélère la réaction d'oxydation par l'activation d'un processus d'allumage ensuite la combustion.

Les mesures de température à partir de Xms ne sont plus exploitables à cause de la saturation de la caméra. La vraie température du procédé est de l'ordre de 2150K (chapitre 3).

Pour conclure, les résultats détaillés dans ce paragraphe ont pu montrer que l'initiation de la combustion peut être initiée en phase solide si la surface d'interaction entre la surface chauffée et l'oxygène est d'au moins de 3,14mm². Ce résultat inattendu à priori a été validé en recoupant les données expérimentales et numériques et en complétant la bibliographie initiale.

# 5 Conclusion

Le travail réalisé dans ce chapitre en partant des essais d'initiation avec différentes tailles de tache focale, puissance laser et durées d'impulsion ont permis de déterminer précisément les températures et les surfaces d'interaction nécessaires pour l'initiation de la combustion. Ce chapitre a permis:

- de sélectionner la taille de la tâche focale convenable pour le procédé d'oxycoupage assisté par laser
- d'ptimiser la puissance d'initiation et de réduire cette dernière jusqu'à 140W.
- de déterminer les différents profils de distribution spatial de température et son amplitude afin d'assurer l'initiation de la combustion dans le métal pour différente taille de tache focale.
- de prouver que l'initiation de la combustion démarre en phase solide si les conditions de surface chauffée d'au moins 3,14mm² et température d'environ d'au moins 1380K sont assurées.

# Conclusion générale

L'objectif de cette étude était d'aboutir à un système d'oxycoupage assisté par laser destiné au secteur de démantèlement. La principale contrainte sur le produit final est une utilisation en milieu ouvert en respectant les contraintes de sécurités initialement imposées sur la réalisation de la découpe et de la mise en œuvre d'un laser. Jusqu'à présent la découpe par laser et oxygène se déroule dans des milieux fermés et contrôlés. Son emploi en dehors de ce cadre impose de respecter une distance de sécurité directement liée à la puissance du laser employé. Le procédé d'oxycoupage assisté par laser minimise la puissance nécessaire et rend compatible les distances de sécurité optiques et les périmètres de sécurité liés à la chute des objets à découper. Dans ce contexte le système d'oxycoupage assisté par laser est un bon candidat pour remplacer des techniques de découpe actuellement utilisées dans le secteur de démantèlement comme la découpe par pince mécanique et par chalumeau.

Pour ce faire l'étude est passée par différentes étapes commençant par une étude bibliographique permettent de comprendre l'interaction oxygène - laser - métal entraînant le chauffage et la fonte de ce dernier. L'étude bibliographique nous a permis de mieux comprendre les différents phénomènes d'oxydation, d'allumage et de combustion subis par un métal en cours de chauffage dans un milieu enrichi en oxygène. Les expériences ont également mis en évidence que l'oxydation des métaux se produit même à température ambiante avec des cinétiques lentes, mais surtout que le procédé de découpe peut s'amorcer sans présence de métal fondu. Le taux d'oxydation augmente avec la concentration d'oxygène et la température. Il existe une température et une surface d'interaction critiques qui permettent de démarrer la combustion en phase liquide ou solide.

L'étape suivante de ce travail a été d'identifier les paramètres influents et d'établir leurs conséquences sur les régimes thermohydrodynamiques du procédé. De ce constat une optimisation du procédé a été faite sur : le diamètre de la tache focale, la longueur d'onde et la pression en ayant toujours comme objectif principal l'emploi d'une puissance laser faible.

La variation des paramètres procédés dans les essais de découpe nous a permis d'identifier un domaine de fonctionnement robuste de notre procédé. Ce domaine de fonctionnement permet à l'utilisateur de choisir un couple duré d'impulsion - fréquence adapté pour chaque puissance. La quantification des données d'énergie, de nombre d'impulsions, de taux de recouvrement nécessaires à l'initiation de la découpe a aussi été réalisée ce qui a permis d'identifier des critères seuils correspondant à l'initiation de la découpe. De même nous avons pu faire réaliser ce procédé en minimisant l'énergie de découpe jusqu'à X J pour une épaisseur de 5 cm à une vitesse de 10 à 20cm/min ; conformément à notre objectif de réduire les distances de sécurité.

Les 3 régimes thermohydrodynamiques identifiés dans le chapitre 2 présentent des caractéristiques spécifiques. Le régime 1 caractérisé par une largeur fine en entrée de la saignée d'une taille de l'ordre de Xmm, correspondant à la taille de la tache focale du faisceau à la surface de l'échantillon indiquant que la fusion du métal est limitée par la taille de la tache focale. Dans ce cas, la saignée prend la forme d'un capillaire fin limitant l'entré d'oxygène, ce qui entraine une réduction de la combustion au sein de la saignée et une faible éjection du métal fondue. Le régime 2 est caractérisé par une largeur en entrée de saignée de 7 à 8 mm et pouvant atteindre dans certain cas jusqu'à 10 mm de largeur. L'augmentation de la largeur en entrée de saignée dans le régime 2 entraine une importante pénétration d'oxygène, ce qui contribue premièrement à son élargissement en augmentant le combustible disponible et également la surface d'échange. Deuxièmement d'améliorer l'efficacité de l'éjection métallique. Un troisième régime appelé régime 1+2 qui est un régime mixte apparait durant les essais de découpe.

Enfin une étude sur l'influence de la pression du gaz a été réalisée et a montré que si l'amorce du procédé et son entretien sont fortement dépendants des paramètres laser, la profondeur de découpe et la vitesse dépendent exclusivement de la pression du gaz. L'étude sur le profil d'écoulement du jet d'oxygène en sortie de buse et son influence sur la largeur de la saignée a été expliquée.

Les valeurs de température de surface du métal lors de l'oxycoupage étaient une question ouverte, car il existe une grande dispersion dans les valeurs proposées dans la littérature. Dans cette étude nous avons déterminé la température du procédé d'oxycoupage assisté par laser. De plus, deux dispositifs complémentaires de

pyrométrie optique ultraviolet et infra-rouge ont été mis en place, étalonnés, et utilisés, afin de :

- Suivre l'évolution de la température dans la saignée.
- Déterminer la valeur du facteur d'émission du métal par recalage des mesures de température réalisé dans l'IR (dépendant du facteur d'émission) qui permet de mesurer la température à partir des images obtenues pas caméra rapide et dans l'UV (moins dépendant du facteur d'émission) par comptage de photons.

La valeur du facteur d'émission a été utilisée pour prouver que l'initiation de la combustion démarre en phase solide si la surface chauffée est d'au moins 3,14mm² et la température d'au moins 1380K sont atteintes.

Finalement, les essais réalisés sur l'initiation de la combustion avec différents paramètres de taille de tache focale, différentes puissances et différentes durées d'impulsion ont permis :

- L'identification de la température critique et d'une surface critique chauffée correspondante à l'initiation de la combustion.
- De déterminer le besoin en puissance indépendamment de la source laser en prenant juste en compte le coefficient d'absorption métal-laser correspondant.

# Perspectives

L'étude des différents aspects scientifiques de ce travail a été réalisée avec un laser YAG. L'un des points essentiels et important de ce travail est que les données correspondant à l'initiation et au fonctionnement du procédé, à savoir le profil spatial de la température et la durée d'impulsion, ont été définis et identifiés indépendamment de la source laser. De ce fait, la transposition de ces données est parfaitement applicable à n'importe quelle autre longueur d'onde en prenant en considération l'absorptivité du métal vis-à-vis de la nouvelle longueur d'onde de façon à pouvoir retrouver les régimes thermohydrodynamiques du procédé en fonction de la paramétrie laser.

À la suite des résultats obtenus, nous avons testé la fiabilité et la faisabilité de la transposition des données trouvées vers une longueur d'onde plus grande. Un prototype de laboratoire d'une tête de découpe a été conçu et testé. Toutefois il reste encore une part importante de conception et d'intégration à réaliser sur ce lot de travail. Cette partie sera à mener pour une bonne intégration de la technologie sur les chantiers d'application.

Scientifiquement, il nous reste à développer la modélisation thermique et hydrodynamique du procédé de façon à pouvoir en extraire des règles métiers facilement utilisables par les ingénieurs et opérateurs reliant la paramétrie du procédé aux configurations de découpe.

D'un point de vue technologique, le résultat obtenu peut être exploité afin d'ouvrir la porte à l'utilisation de la découpe laser dans un milieu ouvert, en réduisant les distances de sécurité à une dizaine de mètres. La prochaine étape sera de fabriquer un prototype pour démonstration sur chantier en prenant en compte un cahier des charges industriels.

# Références


[1] V.Rybakov, “Le soudage et le coupage des métaux,” 1980.

[2] W. O’Neill and J. T. Gabzdyl, “New developments in laser-assisted oxygen cutting,” *Opt. Lasers Eng.*, vol. 34, no. 4–6, pp. 355–367, 2000.

[3] A. M. MELLOR, “Heterogeneous ignition of metals : Model and experiment. Rapport technique, NASA,” pp. 28, 31, 32, 44, 91, 1967.

[4] C. WAGNER, “Beitrag zur theorie des anlaufvorgangs. Zeitshrift für Physik B21, 25,” 1933.

[5] W. C. REYNOLDS, “Investigation of ignition temperature of solid metals. Rapport technique TN-D-182, NASA,” pp. 9, 11, 30, 32, 44, 45, 63, 97, 1959.

[6] N. BIRKS, G. MEIER, and F. PETTIT, “Introduction to the High-temperature Oxidation of Metals.,” 2006.

[7] Haynes, “Handbook of Chemistry and Physics,” 2015.

[8] R. Y. Chen and W. Y. D. Yuen, “Review of the High-Temperature Oxidation of Iron and Carbon Steels in Air or Oxygen. Oxidation of Metals, 59 Issue 5-6:433–468.,” 2002.

[9] M. T. K. GEMMA, M. KAWAKAMI, C. KOBAYASHI, N. ITOH, “Kinetics of oxidation of pure iron near the eutectoid temperature of WListite,” 1990.

[10] O. KUBASCHEWSKI and B. . HOPKINS, “Oxidation of Metals and Alloys,” 1962.

[11] J. PAÏDASSI, “Acta Metallurg,” 1958.

[12] K. HAUFFE, “Oxidation of Metals,” 1965.

[13] M. H. DAVIES and C. E. BIRCHENALL, “Journal of Metals N.Y,” 1951.

[14] A. U. MALIK and D. . WHITTLE, “Oxid. Met,” 1981.

[15] A. Ivarson, J. Powell, J. Kamalu, and C. Magnusson, “The oxidation dynamics of laser cutting of mild steel and the generation of striations on the cut edge,” *J. Mater. Process. Tech.*, vol. 40, no. 3–4, pp. 359–374, 1994.

[16] R. J. KEE, M. . COLTRIN, and P. GLARBORG, “Chemically Reacting Flow - Theory and Practice. John Wiley & Sons, 2003.,” 2003.

[17] K. CHEN, Y. . YAO, and V. MODI, “Numerical simulation of oxidation effects in the laser cutting process. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 15 Issue 11:835–842,” 1999.

[18] T. EMI, W. M. BOORSTEI, and R. D. PEHLKE, “Absorption of gaseous oxygen by liquid-iron. Metallurgical Transactions, 5 Issue 9:1959–1966.,” 1974.

[19] W. LANGE, “Zeits. Metallkunde,” 1938.

[20] N. S. FORTUNATOV and V. I. MIKHAILOVSKAYA, “Memoirs of the Inst. of Chemistry, Acad. Sci. Ukrain S. S. R.,” 1940.

[21] A. WELLS, “Oxygen cutting. Welding Research - BWRA Report, pages 86–92.,” 1995.

[22] I. MIYAMOTO and H. MARUO, “The mechanics of laser cutting. Welding in the World, Le Soudage Dans Le Monde A., 29 issue 9–10,” 1991.

[23] A. . GROSSE and J. . CONWAY, “Combustion of metals in oxygen. Industrial and Engineering Chemistry,” 1958.

[24] J. KURTZ, T. VULCAN, and T. A. STEINBERG, “Emission spectra of burning iron in high-pressure oxygen. Combustion and Flame, 104 Issue 4,” 1996.

[25] T. HIRANO, J. SUN, and R. DOBASHI, “Combustion behavior of iron particles suspended in air. Combustion Science and Technology, 150 Issue 1-6,” 2000.

[26] T.A. STEINBERG et F.J.BENZ, “Iron combustion in microgravity. Flamm. and Sens. of Mat. in Ox. Atm., 1111,” 1991.

[27] Powell, “Laser–oxygen cutting of mild steel the thermodynamics of the oxidation reaction, 2008.,” 2008.

[28] S. Chen, “The effects of gas composition on the CO 2 laser cutting of mild steel,” vol. 73, pp. 147–159, 1998.

[29] W. Steen, “Laser Material Processing,” 1991.

[30] L. Sona, “Metallic Materials Processing: Cutting and Drilling,” 1987.

[31] M. Bousseau and J. . Signamarcheix, “Application du faisceau laser au découpage des matériaux métalliques,” 1985.

[32] R. Pfeifer, D. Herzog, M. Hustedt, and S. Barcikowski, “Pulsed Nd:YAG laser cutting of NiTi shape memory alloys—Influence of process parameters,” *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 210, no. 14, pp. 1918–1925, 2010.

[33] R. Rothe, G. Sepold -Proc, and Osaka, “Important Requirements on Laserbeam-Cutting-Systems for Cutting Thick Plates,” 1987.

[34] M. Sundar, A. K. Nath, D. K. Bandyopadhyay, S. P. Chaudhuri, P. K. Dey, and D. Misra, “Effect of process parameters on the cutting quality in lasox cutting of mild steel,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 40, no. 9–10, pp. 865–874, 2009.

[35] A. F. H. Kaplan, “An analytical model of metal cutting with a laser beam,” *J. Appl. Phys.*, vol. 79, no. 5, pp. 2198–2208, 1996.

[36] J. Powell, “CO2 Laser Cutting, 2nd Edition,” 1998.

[37] J. Dowden and P. Kapadia, “A mathematical investigation of the penetration depth in keyhole welding with continuous c02 lasers,” *J. Phys. D. Appl. Phys.*, vol. 28, no. 11, pp. 2252–2261, 1995.

[38] A. Mahrle and E. Beyer, “Theoretical aspects of fibre laser cutting,” *J. Phys. D. Appl. Phys.*, vol. 42, no. 17, 2009.

[39] C. Tseng, C. Chen, and C. Wang, “A visual observation of the air fl ow pattern for the high speed nozzle applicable to high power laser cutting and welding ☆,” *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, vol. 49, pp. 49–54, 2013.

[40] H. C. Man, J. Duan, and T. M. Yue, “Design and characteristic analysis of supersonic nozzles for high gas pressure laser cutting,” *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 63, no. 1–3, pp. 217–222, 1997.

[41] F. Quintero *et al.*, “Optimization of an off-axis nozzle for assist gas injection in laser

fusion cutting," *Opt. Lasers Eng.*, vol. 44, no. 11, pp. 1158–1171, 2006.

[42] H. C. Man, J. Duan, and T. M. Yue, "Dynamic characteristics of gas jets from subsonic and supersonic nozzles for high pressure gas laser cutting," *Opt. Laser Technol.*, vol. 30, no. 8, pp. 497–509, 1998.

[43] M. J. Hsu and P. A. Molian, "No TitleOff-Axial, Gas-Jet-Assisted, Laser Cutting of 6.35-mm Thick Stainless Steel," 1995.

[44] A. D. Brandt and G. S. Settles, "Effect of nozzle orientation on the gas dynamics of inert-gas laser cutting of mild steel," *J. Laser Appl.*, vol. 9, no. 6, pp. 269–277, 1997.

[45] "[Yoshiaki 1981]Quality in Laser Gas Cutting Stainless Steel and its Improvement (off axial nozzle).pdf." .

[46] B. . Yilbas and A. . Sahin, "Oxygen assisted laser cutting mechanism a laminar boundary layer approach including the combustion process," 1995.

[47] M. Muller and R. Fabro, "Mesure de température par pyrométrie 2D monobande et par pyrométrie spectrale de métaux chauffés par laser dans un environnement fortmenet oxydant," 2012.

[48] M. MULLER, "ÉTUDE DU PROCESSUS D'INITIATION PAR LASER DE LA COMBUSTION D'UN ALLIAGE MÉTALLIQUE SOUS ATMOSPHÈRE D'OXYGÈNE," 2006.

[49] Y. F. Liu, Z. L. Hu, D. H. Shi, and K. Yu, "Experimental Investigation of Emissivity of Steel," 2013.

[50] A. Cerzairliyan, "Radiance temperatures ( in the wavelength range 520-906nm) of tungsten at its melting point by a pulse-heating technique, Hight Temperatures-High pressures," 1993.

[51] A. Cerzairliyan, "Radiance temperatures ( in the wavelength range 520-906nm) of niobium at its melting point by a pulse-heating technique, Hight Temperatures-High pressures," 1992.

[52] A. Cezairliyan, "Radiance temperatures ( in the wavelength range 520-906nm) of vanadium at its melting point by a pulse-heating technique, Hight Temperatures-High pressures," 1997.

[53] A. Cezairliyan, "Radiance temperatures ( in the wavelength range 520-906nm) of tantalum at its melting point by a pulse-heating technique, Hight Temperatures-High pressures," 1993.

[54] J. L. MCCLURE and A. CEZAIRLIYAN, "Radiance temperatures (in the wavelength range 525 to 906 nm) of vanadium at its melting point by a pulse-heating technique. International Journal of Thermophysics," 1997.

[55] A. CEZAIRLIYAN and A. P. MIILLER, "Radiance temperatures (in the wavelength range 522-906nm) of niobium at its melting-point by a pulse-heating technique. 2nd Workshop On Subsecond Thermophysics (Cnr, Ist Metrol Gustavo Colonnetti, Torino, Italy)," 1992.

[56] A. P. MIILLER and A. CEZAIRLIYAN, "Radiance temperatures (in the wavelength range 519-906 nm) of tungsten at its melting-point by a pulse-heating technique. International Journal of Thermophysics," 1993.

[57] C. M. Kenneth, "recommended values of thermophysical properties for selected commercial alloys," 2002.

[58] A. Althouse, C. Turnquist, W. Bowditch, K. Bowditch, and M. Bowditch, "Procédés

spéciaux de soudage et de coupage," 2004.

**RESUME :**

La découpe par laser assisté par oxygène est une opération largement utilisée dans le milieu industriel. Elle est connue par sa rapidité des opérations de découpe, par son efficacité et par sa bonne qualité de coupe. Mais nécessite actuellement d'être réalisée dans des milieux fermés et bien sécurisé. Le secteur de démolition s'intéresse cette technique conventionnelle de découpe pour remplacer la découpe par pince mécanique ou par chalumeau suivant les configurations de chantier de déconstruction. Au regard des besoins opérationnels et à la faisabilité du procédé une fenêtre technologique est accessible nécessitant peu de puissance laser et limitant de dispositif de sécurité associé. Cette thèse a pour objectif d'établir les configurations minimums correspondant à l'initiation de la découpe, de dresser une cartographie du procédé en termes de régime thermohydrodynamique, et de comprendre quels sont les mécanismes qui pilotent le procédé. Grâce à ces travaux il a été montré notamment que la combustion peut s'amorcer en phase solide, et que la température de surface de la phase liquide est constante au cours du procédé vers 2100K.

**Mots clés :** Oxycoupage, laser, hydrodynamique, pression, température, initiation, combustion.

**ABSTRACT :**

Oxygen-assisted laser cutting is a widely used processed. It is well-known for its high efficiency in both the cutting speed and quality. Nonetheless, this technique requires highly secured closed environments. Currently, the dismantling industry sees this process as a way to replace more traditional cutting techniques such as blowtorches or pliers. However, to be used in such fields, the security setup needs to be less constraining, hence the energy source power is limited. This study aims at efficiently reducing the energy requirements through a better understanding of thermodynamics phenomenon as well as a deeper comprehension of the physical phenomenon driving the process. This work showed that the combustion can be initiated in solid phase and the temperature of the liquid phase during cutting process is about 2100K.

**Keywords** : Oxy-cutting, laser, hydrodynamic, pressure, temperature, initiation, combustion.



ARTS ET MÉTIERS ParisTech

ParisTech
INSTITUT DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES
PARIS INSTITUTE OF TECHNOLOGY