



HAL
open science

Panorama de la projection thermique en France

Barbara Savary

► **To cite this version:**

Barbara Savary. Panorama de la projection thermique en France. [Research Report] Notes scientifiques et techniques NS 326, Institut National de Recherche et de Sécurité (INRS). 2014, 77p. hal-01427513

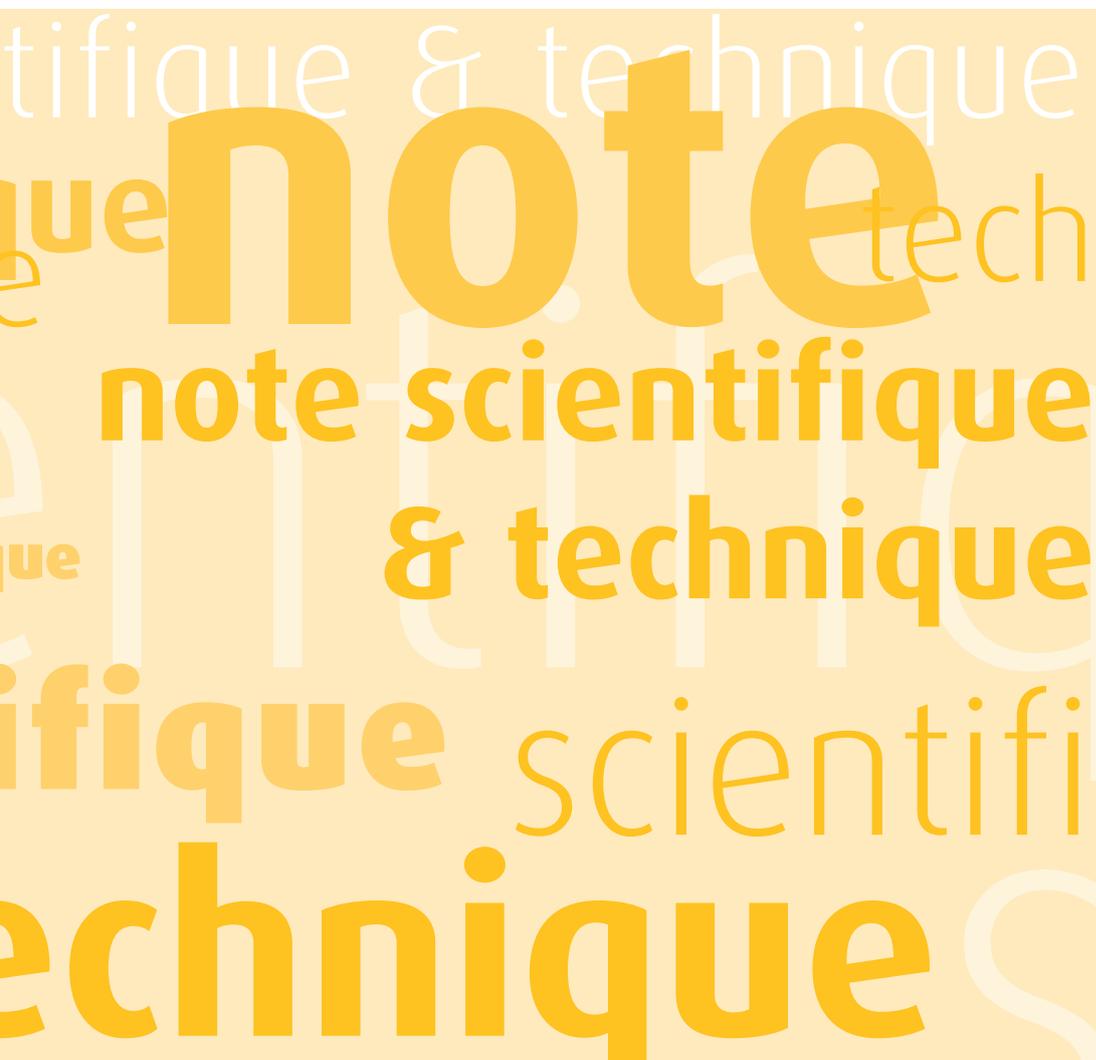
HAL Id: hal-01427513

<https://hal-lara.archives-ouvertes.fr/hal-01427513>

Submitted on 5 Jan 2017

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

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



**Panorama de la projection
thermique en France**
Résultats de l'enquête 2012

Panorama de la projection thermique en France

Résultats de l'enquête 2012

Barbara Savary
Département Métrologie des polluants

NS 326
septembre 2014

INSTITUT NATIONAL DE RECHERCHE ET DE SECURITE

DEPARTEMENT METROLOGIE DES POLLUANTS

Laboratoire **Caractérisation du Risque Chimique**

1, Rue du Morvan, CS 60027 -54519 VANDOEUVRE Cedex, France

Tél. 03.83.50.20.00 – Fax 03.83.50.20.60

Panorama de la projection thermique en France Résultats de l'enquête 2012

Barbara SAVARY

Document de travail N° L/MP/297.2014.082

février 2014

Diffusion extérieure : Aucune

Panorama de la projection thermique en France

Résultats de l'enquête 2012

Barbara Savary
Département Métrologie des polluants

NS 326
septembre 2014

TABLE DES MATIERES

Contexte	8
Traitement de surface	8
Projection thermique	8
Historique	8
Principe	9
Projection flamme.....	10
Projection par arc électrique.....	12
Projection par plasma.....	13
Projection cold spray	13
Installations de projection thermique	14
Matériaux projetés	15
Différentes formes des matériaux.....	16
Exposition des salariés.....	18
Méthodologie	21
Choix des procédés.....	21
Sélection des secteurs d'activité.....	21
Obtention des adresses.....	24
Création du questionnaire	25
Collecte et traitement des données	26
Résultats.....	28
Définitions des termes utilisés dans le rapport.....	28
Données générales	29
Caractéristiques des établissements faisant de la projection thermique.....	29
Procédés	31
Salariés travaillant dans les ateliers de projection thermique	32
Installations.....	32
Utilisation de la projection thermique	33
Sous-traitance.....	33
Appareils de protection respiratoire.....	35
Matériaux projetés en projection thermique	36
Propriétés recherchées avec la projection thermique.....	38
Préparation des pièces à traiter	38

Procédé par arc électrique	40
Procédé par flamme-fil	44
Procédé par flamme-poudre	49
Procédé par plasma	53
Procédé par HVOF	58
Secteur du traitement et du revêtement des métaux	62
Conclusion	73
Bibliographie	76

TABLE DES FIGURES

Figure 1 : Schéma simplifié du principe de projection thermique [2].....	9
Figure 2 : Principe de la projection flamme [4]	10
Figure 3 : Principe de la projection par canon à détonation [2].....	11
Figure 4 : Principe de la projection selon le procédé HVOF [4]	12
Figure 5 : Principe de la projection par arc électrique [4].....	12
Figure 6 : Principe de la projection par plasma [4]	13
Figure 7 : Principe de la projection par Cold Spray [2]	14
Figure 8 : Schéma d'une installation de projection thermique par flamme ou arc électrique [4]	15
Figure 9 : Les différentes familles de matériaux utilisés en projection thermique [2].....	15
Figure 10 : Répartition des établissements faisant de la projection thermique en fonction de l'activité	29
Figure 11 : Répartition des établissements faisant de la projection thermique par rapport aux établissements de chaque secteur	30
Figure 12 : Répartition des établissements faisant de la projection thermique en fonction de l'effectif	30
Figure 13 : Répartition géographique des établissements faisant de la projection thermique.....	31
Figure 14 : Répartition des établissements en fonction du nombre de procédés de projection thermique dans l'établissement	31
Figure 15 : Répartition des procédés	32
Figure 16 : Répartition des installations de projection thermique.....	33
Figure 17 : Fréquence d'utilisation des procédés de projection thermique	33
Figure 18 : Répartition des établissements faisant de la sous-traitance en fonction de leur activité	34
Figure 19 : Fréquence de déplacement des établissements faisant de la sous-traitance	34
Figure 20 : Répartition des secteurs faisant appel à la sous-traitance en fonction de leur activité	35
Figure 21 : Répartition des appareils de protection respiratoire	35
Figure 22 : Répartition des matériaux quel que soit le procédé.....	37
Figure 23 : Répartition des différentes propriétés recherchées lors de la mise en œuvre de la projection thermique.....	38
Figure 24 : Les différents modes de préparation des supports à traiter	39
Figure 25 : Les différents modes de nettoyage des zones de travail.....	39
Figure 26 : Répartition des établissements faisant de la projection thermique par arc électrique en fonction de leur taille.....	40
Figure 27 : Répartition géographique des établissements faisant de la projection thermique par arc électrique	41
Figure 28 : Répartition des établissements faisant de la projection thermique par arc électrique en fonction de l'activité	41
Figure 29 : Répartition des installations de projection par arc électrique en fonction de leur configuration	42
Figure 30 : Répartition des matériaux projetés par le procédé par arc électrique	42

Figure 31 : Propriétés recherchées lors de la mise en œuvre de la projection thermique par arc électrique	43
Figure 32 : Appareils de protection respiratoire en fonction du type d'installations pour le procédé arc électrique	43
Figure 33 : Activités faisant appel aux prestataires de projection thermique par arc électrique	44
Figure 34 : Répartition des établissements faisant de la projection thermique par flamme-fil en fonction de leur taille	45
Figure 35 : Répartition géographique des établissements faisant de la projection thermique par flamme-fil	45
Figure 36 : Répartition des établissements faisant de la projection thermique par flamme-fil en fonction de l'activité	46
Figure 37 : Répartition des installations de projection par flamme-fil en fonction de leur configuration	46
Figure 38 : Répartition des matériaux projetés par le procédé par flamme-fil	47
Figure 39 : Propriétés recherchées lors de la mise en œuvre de la projection thermique par flamme-fil	47
Figure 40 : Appareils de protection respiratoire en fonction du type d'installations pour le procédé flamme-fil	48
Figure 41 : Activité faisant appel aux prestataires de projection thermique par flamme-fil	48
Figure 42 : Répartition des établissements faisant de la projection thermique par flamme-poudre en fonction de leur taille	49
Figure 43 : Répartition géographique des établissements faisant de la projection thermique par flamme-poudre	50
Figure 44 : Répartition des établissements faisant de la projection thermique par flamme-poudre en fonction de leur activité	50
Figure 45 : Répartition des installations de projection par flamme-poudre en fonction de leur configuration	51
Figure 46 : Répartition des matériaux projetés par le procédé par flamme-poudre	51
Figure 47 : Propriétés recherchées lors de la mise en œuvre de la projection thermique par flamme-poudre	52
Figure 48 : Appareils de protection respiratoire en fonction du type d'installations pour le procédé flamme-poudre	52
Figure 49 : Activités faisant appel aux prestataires de projection thermique par flamme-poudre	53
Figure 51 : Répartition des établissements faisant de la projection thermique par plasma en fonction de leur taille	54
Figure 52 : Répartition géographique des établissements faisant de la projection thermique par plasma	54
Figure 53 : Répartition des établissements faisant de la projection thermique par plasma en fonction de l'activité	55
Figure 54 : Répartition des installations de projection par plasma en fonction de leur configuration	55
Figure 55 : Répartition des matériaux projetés par le procédé par plasma	56
Figure 56 : Propriétés recherchées lors de la mise en œuvre de la projection thermique par plasma	57

Figure 57 : Appareils de protection respiratoire en fonction du type d'installation pour le procédé plasma	57
Figure 57 : Activités faisant appel aux prestataires de projection thermique par plasma	58
Figure 58 : Répartition des établissements faisant de la projection thermique par HVOF en fonction de leur taille	59
Figure 59 : Répartition géographique des établissements faisant de la projection thermique par HVOF	59
Figure 60 : Répartition des établissements faisant de la projection thermique par HVOF en fonction de l'activité.....	60
Figure 61 : Répartition des installations de projection par HVOF en fonction de leur configuration	60
Figure 62 : Répartition des matériaux projetés par le procédé par HVOF	60
Figure 63 : Propriétés recherchées lors de la mise en œuvre de la projection thermique par HVOF	61
Figure 64 : Appareils de protection respiratoire en fonction du type d'installations pour le procédé HVOF.....	61
Figure 65 : Activités faisant appel aux prestataires de projection thermique par HVOF.....	62
Figure 66 : Répartition des établissements faisant de la projection thermique dans le secteur du revêtement des métaux en fonction de leur taille.....	63
Figure 67 : Répartition géographique des établissements faisant de la projection thermique dans le secteur du revêtement des métaux	64
Figure 68 : Nombre de procédés présents dans les établissements du secteur 2561Z	64
Figure 69 : Représentativité des 5 procédés dans le secteur 2561Z	65
Figure 70 : Répartition des installations en fonction des procédés dans le secteur 2561Z ...	65
Figure 71 : Appareils de protection respiratoire en fonction des installations pour chaque procédé.....	66
Figure 72 : Répartition des matériaux projetés dans le secteur 2561Z.....	67
Figure 73 : Répartition des matériaux projetés avec le procédé par arc électrique dans le secteur 2561Z.....	68
Figure 74 : Répartition des matériaux projetés avec le procédé par flamme-fil dans le secteur 2561Z.....	68
Figure 75 : Répartition des matériaux projetés avec le procédé par flamme-poudre dans le secteur 2561Z.....	69
Figure 76 : Répartition des matériaux projetés avec le procédé par plasma dans le secteur 2561Z.....	69
Figure 77 : Répartition des matériaux projetés avec le procédé par HVOF dans le secteur 2561Z.....	70
Figure 78 : Propriétés recherchées lors de la projection thermique dans le secteur 2561Z..	70
Figure 79 : Propriétés recherchées lors de la projection thermique par arc électrique dans le secteur 2561Z	71
Figure 80 : Propriétés recherchées lors de la projection thermique par flamme-fil dans le secteur 2561Z.....	71
Figure 81 : Propriétés recherchées lors de la projection thermique par flamme-poudre dans le secteur 2561Z	71
Figure 82 : Propriétés recherchées lors de la projection thermique par plasma dans le secteur 2561Z.....	72

Figure 83 : Propriétés recherchées lors de la projection thermique par HVOF dans le secteur 2561Z..... 72

TABLE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Caractéristiques des différents procédés de projection thermique [3].....	10
Tableau 2 : Exemples de matériaux se présentant sous forme de fil, de cordon souple ou de poudre [4].....	16
Tableau 3 : Choix du matériau en fonction du procédé de projection thermique [3]	17
Tableau 4 : Choix du matériau en fonction du type d'utilisation [3].....	18
Tableau 5 : Mesures d'exposition lors de la conduite d'installation de projection thermique.....	20
Tableau 6 : Mesures de concentration ambiante lors de la conduite d'installation de projection thermique	21
Tableau 7 : Liste des 56 secteurs d'activité interrogés	23
Tableau 8 : Regroupement des secteurs d'activité et taux de sondage par activité.....	25
Tableau 9 : Définitions des termes utilisés dans le rapport.....	28
Tableau 10 : Répartition des salariés dans les ateliers de projection thermique en fonction du procédé	32
Tableau 11 : Synthèse des caractéristiques des différents procédés	74

CONTEXTE

Pour mieux comprendre les phénomènes de variabilité d'exposition en fonction du procédé de projection thermique mis en œuvre et du métal projeté, l'INRS a initié une étude afin de fournir les données nécessaires à l'évaluation des exposition et d'établir les bases d'une stratégie de surveillance biologique de l'exposition aux métaux adaptée et utilisable par les médecins du travail.

Afin de prioriser les actions en terme de prévention, la première partie de l'étude a consisté à établir une cartographie des installations de projection thermique et des métaux d'apport en fonction des secteurs d'activité. A la suite d'une étude bibliographique permettant d'identifier les utilisations de la projection thermique, les secteurs d'activité dans lesquels les établissements possèdent un atelier intégré (utilisation de la projection thermique dans la chaîne de production ou en maintenant de l'outil industriel) ont été identifiés. La quasi-totalité des établissements de ces secteurs a été interrogée sur la présence ou non d'installations de projection thermique, ainsi que sur les matériaux utilisés et les moyens de prévention présents.

TRAITEMENT DE SURFACE

La projection thermique fait partie de la famille des traitements de surface parmi lesquels se trouvent [1] :

- Les procédés de transformation structurale tels que la fusion, la trempe superficielle, les traitements mécaniques, les procédés de diffusion de métaux ou de métalloïdes ;
- Les procédés de conversion tels que l'oxydation anodique, la sulfuration ou la phosphatation ;
- les procédés par voie sèche tels que la peinture, les dépôts électrolytiques, chimiques ou par immersion dans un métal fondu ;
- Les procédés par voie humide tels que le placage, le rechargement par soudure, les dépôts chimiques ou physiques en phase vapeur (CVD ou PVD) et **la projection thermique**.

PROJECTION THERMIQUE

HISTORIQUE

Le Docteur Max Ulrich Schoop inventa le procédé de projection thermique, appelé shoopage (du nom de son inventeur) au début du 20^e siècle. Les premiers systèmes étaient composés de creusets dans lesquels le métal était maintenu à l'état liquide par chauffage et de système de projection à l'air réchauffé. Il améliora le procédé en remplaçant le métal liquide par de la poudre métallique qui était mise en fusion en traversant un chalumeau oxy-acétylénique. La métallisation n'était cependant pas parfaite. Shoop remplaça alors la poudre par un fil métallique, améliorant ainsi la qualité des dépôts. Il remplaça également le chalumeau par

un arc électrique. Depuis cette période, les procédés ont évolué pour aboutir aux techniques actuelles.

Jusqu'aux années 60, le procédé de projection à partir d'un fil était appelé « Shoopage » et le procédé de projection de poudre était appelé « Schori » du nom du chercheur qui a fait évoluer le procédé [1].

PRINCIPE

Le principe consiste à projeter à l'aide d'un gaz vecteur un matériau dit d'apport chauffé à haute température sur un matériau support pour en modifier ses propriétés (Figure 1). En s'agglomérant, les particules forment le revêtement. Les liaisons sont purement mécaniques. L'épaisseur du revêtement est comprise entre 50 microns et quelques millimètres.

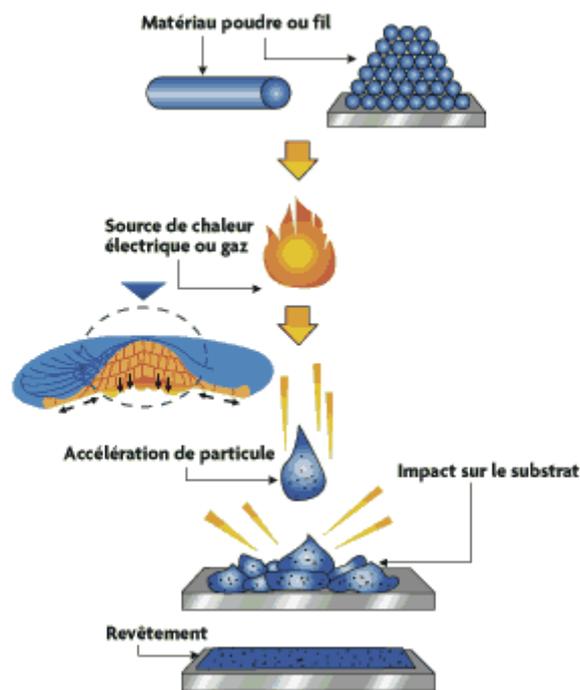


Figure 1 : Schéma simplifié du principe de projection thermique [2]

Les procédés de projection thermique peuvent être classés en 2 catégories :

- Les procédés dont la source de chaleur est un chalumeau oxy-acétylénique : procédé flamme-poudre (FP), procédé flamme-fil ou cordon (FF), procédé HVOF (HV) et procédé par canon à détonation (CD) ;
- Les procédés dont la source de chaleur est un arc électrique : procédé à l'arc électrique (AE) et procédé plasma (PS).

Le Tableau 1 synthétise les différentes caractéristiques de la projection thermique [3].

Tableau 1 : Caractéristiques des différents procédés de projection thermique [3]

Caractéristiques	Projection Flamme poudre	Projection flamme fil	Projection HVOF	Projection par canon à détonation	Projection arc électrique	Projection plasma
Source de chaleur	Flamme oxy-acétylénique	Flamme oxy-acétylénique	Flamme oxy-acétylénique	Flamme oxy-acétylénique	Arc électrique	Plasma
Température de flamme (°C)	3 000	3 000	3 000	3 000	6 000	12 000
Transport des particules	Gaz flamme	Air comprimé	Gaz flamme	Gaz flamme	Air comprimé	Gaz plasma (Ar/H)
Vitesse des particules (m/s)	40	150	700	950	250	200
Forme du matériau d'apport	Poudre	Fil ou cordon	Poudre	Poudre	Fil	Poudre
Rendement moyen (%)	50	70	70	70	80	70
Épaisseur (mm)	0,1 à 1,5	0,1 à 1,5	0,05 à 1	0,05 à 1	0,2 à 3	0,05 à 1,5
Exemple de matériaux d'apport	-Métaux -Céramiques -Carbures dans matrice métallique	-Métaux -Céramiques -Carbures dans matrice métallique	-Métaux -Carbures	-Métaux -Céramiques	-Métaux	-Métaux -Céramique -Carbures

PROJECTION FLAMME

Il s'agit du procédé le plus ancien, à l'origine de la projection thermique. Elle est communément appelée « métallisation ». Elle est particulièrement adaptée aux matériaux à bas point de fusion. Elle fait appel à une flamme oxyacétylénique comme source de chaleur. La température à l'intérieur de la flamme peut atteindre 3 000°C. Le matériau d'apport est véhiculé par l'énergie cinétique transmise par les gaz de combustion (Figure 2).

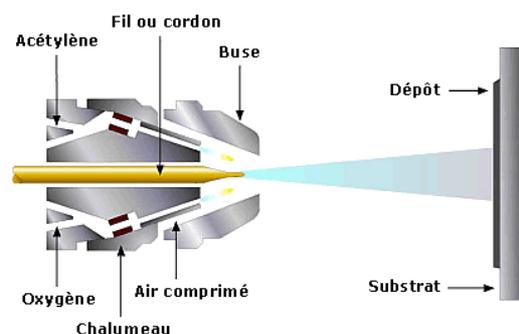


Figure 2 : Principe de la projection flamme [4]

Cette technique se décline en plusieurs procédés :

- Dans la **projection flamme-poudre**, le matériau d'apport se présente sous forme de poudre. La température des particules atteint 2 000°C au sein de la flamme. La vitesse des particules est faible et la distance entre la buse et le support ne doit être que de quelques millimètres. Les matériaux d'apport les plus fréquemment utilisés sont les alliages autofusibles à base de nickel et de cobalt. Ce procédé est très répandu dans la plupart des industries pour résoudre des problèmes d'abrasion, de corrosion, d'usure, d'isolation thermique ou électrique.

- Dans la **projection flamme-fil**, le matériau d'apport se présente sous forme de fil, de cordon, de baguette ou de fil fourré. La flamme ne sert, dans ce cas, qu'à la fonte du matériau. Les particules obtenues seront véhiculées par un flux d'air comprimé. Les matériaux d'apport les plus fréquemment utilisés sont les métaux (Zn, Al, Cu, Sn, Pb, Ni, Mo), les aciers inoxydables ou non, les alliages à base de zinc, de cuivre, de nickel ou d'étain, les céramiques (NiAl, NiCrBSi, Al_2O_3 , $Al_2O_3-TiO_2$, Cr_2O_3 , ZrO_2-CaO). Ces dernières se présentent sous forme de cordon ou de baguettes exclusivement. Ce procédé peut être mis en œuvre dans tous les domaines – aéronautique, automobile, papeterie, aciérie, sidérurgie, construction d'infrastructures – pour résoudre des problèmes d'abrasion, de corrosion, d'usure, d'isolation thermique ou électrique.
- Dans le cas de la **projection au canon à détonation**, le matériau d'apport se présente sous forme de poudre et est chargé dans un tube – le canon à détonation – en même temps que le gaz. La détonation est provoquée par l'explosion de ce mélange sous l'action d'une étincelle (Figure 3). Les matériaux utilisés sont principalement les carbures de chrome ou de tungstène avec un liant métallique de nickel ou de cobalt, l'alumine et l'oxyde de chrome. Ce procédé n'est utilisé qu'en sous-traitance, du fait du bruit émis lors de la détonation et des contraintes de mise en œuvre. Les principaux domaines d'utilisation sont le textile, la sidérurgie, l'aéronautique et la chimie.

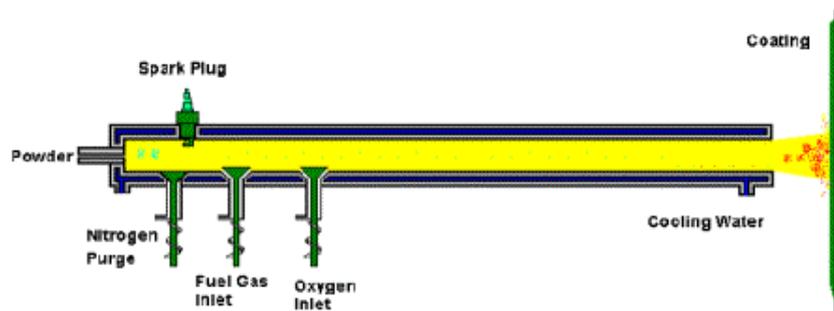


Figure 3 : Principe de la projection par canon à détonation [2]

- Dans le cas de la **projection à tir continu**, deux procédés peuvent être mis en œuvre : le procédé HVOF (High Velocity Oxy-Fuel) et le procédé HVOF (High Velocity Air-Fuel) (Figure 4). Le choix entre ces deux procédés se fait pour des raisons économiques. Les matériaux d'apport utilisés sont les métaux et les alliages à base de nickel et de cobalt. Les carbures à base de chrome ou de tungstène sont également des matériaux projetables par cette technique. Par contre, les oxydes sont très rarement utilisés. Ce procédé est principalement utilisé dans le traitement anticorrosion dans les secteurs de l'aéronautique, l'aciérie et la papeterie.

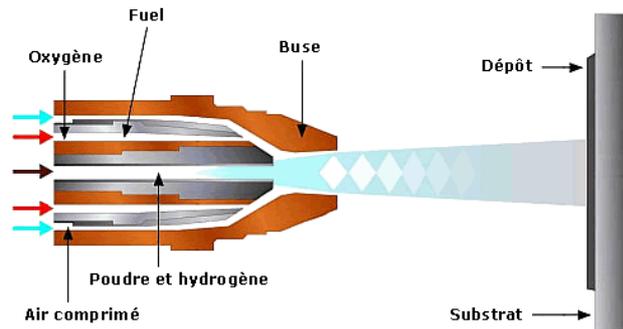


Figure 4 : Principe de la projection selon le procédé HVOF [4]

- Le procédé de **projection flamme avec refusion** consiste à projeter le matériau d'apport à l'aide d'une flamme (procédé flamme classique). Lorsque le dépôt est créé, celui-ci est de nouveau fondu en utilisant la flamme du pistolet de projection comme source de chaleur. Cette technique permet d'améliorer le niveau d'adhérence, mais également de diminuer la porosité. Les matériaux d'apport sont principalement des autofusibles (NiCrBSi, NiCrBSiFe ou du carbure de tungstène avec une matrice NiCrBSiFe). Ce procédé est principalement utilisé sur des pièces subissant de l'oxydation à chaud, par voie humide, de la fissuration, de l'abrasion.

PROJECTION PAR ARC ELECTRIQUE

Le principe de ce procédé consiste à créer un arc électrique entre deux fils de matériau d'apport afin de le fondre. Il sera ensuite projeté grâce à un flux d'air sur le support (Figure 5). Dans ce cas, la température de fusion peut atteindre 6 000°C. L'épaisseur du dépôt est alors comprise entre 0,2 et 3 mm avec une porosité de 5 à 10 %.

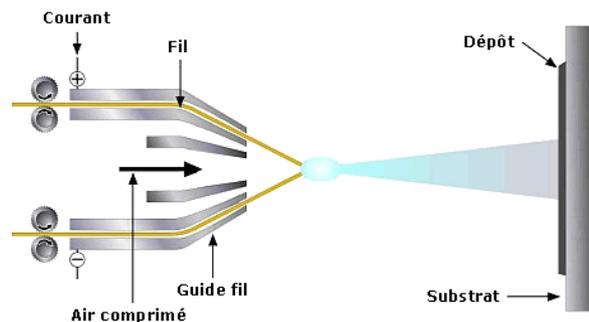


Figure 5 : Principe de la projection par arc électrique [4]

Les matériaux d'apport doivent d'être conducteurs. Il s'agit du zinc, de l'aluminium, du cuivre, du molybdène et des aciers. Au cours de ces dernières années, de nouveaux matériaux apparaissent sur le marché : les fils fourrés qui sont en réalité des alliages de type NiCrAl, NiMoAl, FeCrCMn, des fils à base de carbures de chrome ou de tungstène, des composites AlSi chargés en graphite.

Ce procédé est principalement utilisé dans les secteurs de l'automobile et de l'aéronautique.

PROJECTION PAR PLASMA

Le principe de ce procédé est l'utilisation d'un arc électrique dans un plasma gazeux. Le matériau d'apport sous forme de poudre est introduit dans cette source de chaleur d'une température comprise entre 15 000 et 20 000°C (Figure 6). Ce procédé est essentiellement mis en œuvre dans l'air ambiant, mais pour obtenir des revêtements plus épais à de plus faibles températures, il peut être mis en œuvre sous atmosphère contrôlée ou sous vide. L'épaisseur des dépôts est variable en fonction des demandes et la porosité est inférieure à 10 %.

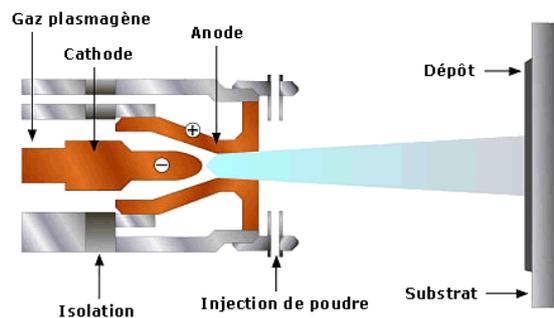


Figure 6 : Principe de la projection par plasma [4]

Les matériaux d'apport ont une granulométrie comprise entre 2 et 120 μm . Il s'agit de métaux (Al, Zn, Mo, Ti, etc.), d'alliages (NiCr, NiAl, NiCrAlY, etc.), de céramiques (Al_2O_3 , Cr_2O_3 , TiO_2 , ZrO_2 , etc.), de carbures (WC, Cr_3C_2 , etc.) ou de cermets ($\text{Cr}_3\text{C}_2/\text{NiCr}$, WC/Co, ZrO_2/NiAl , etc.)

Ce procédé peut être facilement mis en œuvre et permet de résoudre des problèmes d'usure, de corrosion, de barrière thermique, de frottement ou d'oxydation, notamment dans les secteurs de l'aéronautique et de l'automobile.

PROJECTION COLD SPRAY

Ce type de projection a été mis au point en Russie et s'est développé par la suite aux USA et en Allemagne. Les particules d'une taille comprise entre 10 et 40 μm sont chauffées dans un gaz, le plus souvent neutre (azote ou hélium) à une température comprise entre 100°C et 800°C. Elles sont ensuite projetées sur le support à l'aide d'une buse de Laval permettant de transformer un jet subsonique en un jet supersonique, afin d'obtenir une déformation suffisante à l'impact sur le substrat. La distance entre la buse et le support est faible et comprise entre 12,7 mm et 50 mm (Figure 7).

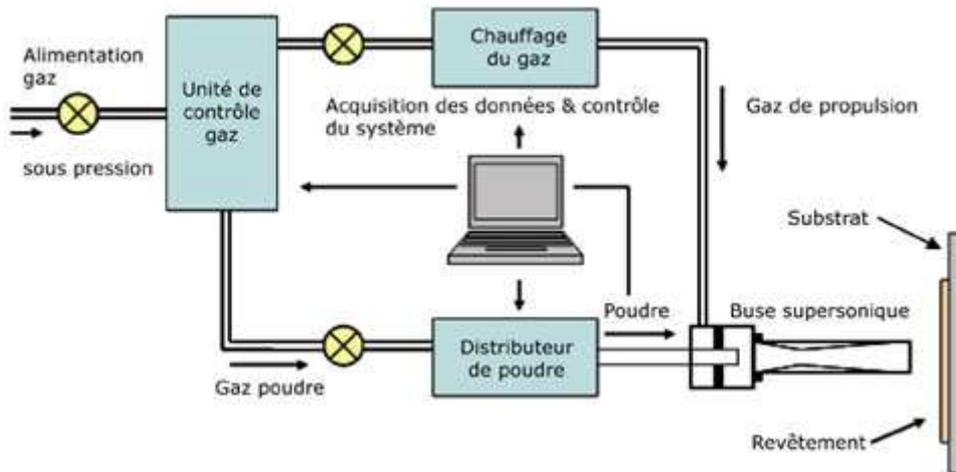


Figure 7 : Principe de la projection par Cold Spray [2]

Cette technique est particulièrement adaptée au traitement localisé de pièces de grandes dimensions. Elle est également caractérisée par un faible rejet de poussières et une grande souplesse d'utilisation. Un autre avantage à cette technique est la non-modification de la structure des poudres projetées, produisant ainsi des revêtements ne contenant que peu d'impuretés, tels que les oxydes formés lors de l'élévation de température.

La principale propriété des métaux et des alliages utilisés est la ductibilité. Le zinc, le cuivre, l'étain, l'argent, l'aluminium, le titane, les alliages nickel-chrome et cuivre-aluminium, ainsi que des polymères et des céramiques sont projetés à l'aide de cette technique.

Cette technique est mise en œuvre pour résoudre des problèmes de corrosion, d'usure, ou de conductivité électrique, dans des secteurs d'activité tels que le biomédical, l'aérospatiale, la chimie et l'électronique.

Certains professionnels de la projection thermique ne considèrent pas ce nouveau procédé comme appartenant réellement à la famille des procédés de projection thermique. En effet, les particules métalliques sont chauffées à une température le plus souvent inférieure à la température de fusion. L'accrochage des particules se fait exclusivement par des liaisons mécaniques dues aux chocs des particules sur le support.

INSTALLATIONS DE PROJECTION THERMIQUE

Les installations de projection thermique se divisent en 2 catégories :

- Les installations portatives : il s'agit essentiellement des procédés flamme-poudre, flamme-fil et par arc électrique. Le principe est décrit
- Figure 8.
- Les cabines sont divisées en 2 catégories : les cabines ouvertes et les cabines fermées le plus souvent confinées. L'utilisation de cabines permet, contrairement à l'utilisation d'un matériel portatif hors cabine, de capter les émissions de particules au cours de la projection. Par contre pour les cabines ouvertes, les opérateurs et les salariés se trouvant à proximité devront être équipés de protection auditive.

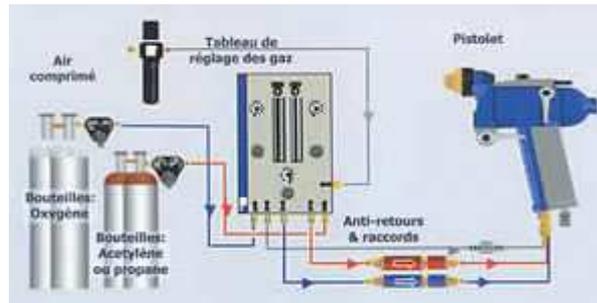


Figure 8 : Schéma d'une installation de projection thermique par flamme ou arc électrique [4]

Les installations de projection thermique par canon à détonation sont isolées dans une enceinte résistant aux explosions et isolée phonétiquement. Les commandes sont situées à l'extérieur de l'enceinte.

Les installations de projection par plasma sont placées dans une enceinte protégeant ainsi les opérateurs de la chaleur émise par le procédé. Comme pour les installations de projection par canon à détonation, les commandes sont situées à l'extérieur de la cabine de projection.

MATERIAUX PROJETES

Les premiers matériaux projetés étaient des métaux ou des alliages métalliques. Avec l'évolution de la projection thermique et l'augmentation des températures, il est maintenant possible de projeter des carbures ou des céramiques (Figure 9). En principe, il est possible de projeter tous les matériaux à condition que leur température de fusion soit séparée de leur température de décomposition ou de vaporisation de 300°C minimum.

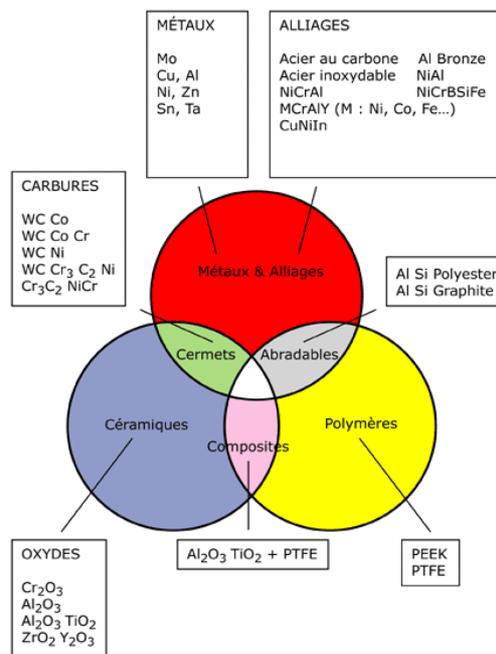


Figure 9 : Les différentes familles de matériaux utilisés en projection thermique [2]

Le matériau d'apport est caractérisé par sa composition chimique, sa forme (poudre, fil, cordon, baguette, etc.), sa dimension (granulométrie des poudres, diamètre des fils) et son mode d'élaboration.

La grande diversité des matériaux projetés permet une utilisation de la projection thermique dans de nombreux domaines d'application. Au couple « propriété recherchée et application finale du matériau support » correspond un matériau spécifique.

DIFFERENTES FORMES DES MATERIAUX

Les matériaux (Tableau 2) se présentent sous différentes formes en fonction de leurs propriétés et de l'utilisation qui sera faite en projection thermique :

- La plupart des matériaux métalliques, sous condition qu'ils soient tréfilables, peuvent se présenter sous forme de **fil**. Ils seront commercialisés en bobines ou en couronne. C'est la forme la plus utilisée car mise en œuvre dans les procédés flamme et arc électrique ;
- Les céramiques non tréfilables se présentent sous forme de **baguette** de longueur 24 pouces ;
- Lorsque le matériau est non tréfilable, il peut se présenter sous forme de **cordonsouple** : il est contenu dans une gaine organique qui sera éliminée à la fusion ;
- Le **fil fourré** consiste à garnir un feuillard métallique de poudre métallique selon 3 modes de fabrication : par étirage, plissage ou sertissage. La fabrication peut être complétée par un ébavurage et un traitement de bleuissage au four. Sous forme de bobine uniquement, il n'est utilisé que pour le procédé à l'arc électrique ;
- La **poudre** permet d'utiliser une plus grande diversité de matériaux et de composition. En fonction de la nature des matériaux, le procédé d'obtention de poudre est différent :
 - L'**atomisation** permet, à partir de métal fondu, d'obtenir des poudres de métal pur ou d'alliage ;
 - L'**agglomération** permet d'obtenir des poudres de carbures, de céramiques ou de composites, après mélange d'un liant et du (des) matériau(x) suivi d'une étape d'atomisation et de séchage ;
 - Le **frittage** permet d'obtenir des carbures et des céramiques ;
 - La **fusion** suivie d'un broyage permet d'obtenir des poudres de carbures.

Le choix du matériau se fait également en fonction du procédé de projection thermique mis en œuvre (Tableau 3) et en fonction du type d'utilisation (Tableau 4).

Tableau 2 : Exemples de matériaux se présentant sous forme de fil, de cordon souple ou de poudre [4]

Présentation	Matériaux
Fils métalliques	argent, aciers au carbone, acier inoxydable, acier au manganèse, acier au molybdène, aluminium, bronze-aluminium, bronze-étain, cadmium, cuivre, étain, fer, laiton, molybdène, nickel, nickel-chrome, plomb, zinc, zinc-aluminium
Cordons souples	alumine, alumine-titane, cobalt-nickel-chrome-tungstène, fer-chrome-bore, fer-chrome-carbone, fer-nickel-chrome, Nialide, nickel-aluminium-molybdène, nickel-chrome-aluminium, nickel-chrome-aluminium-molybdène, nickel-chrome-aluminium-yttrium, nickel-chrome-bore, nickel-chrome-fer, oxyde de chrome, oxyde de titane, zircone
Poudres métalliques et réfractaires	acier inoxydable, aluminium, aluminure de nickel, alumine calcinée, alumine électrofondue, alumine-titane, borure de titane, bronze, chrome, cobalt, cuivre, fluorure de calcium, hydruure de zirconium, molybdène, nickel, titane, tungstène, carbure de chrome, carbure de niobium, carbure de titane, carbure de tungstène, carbure de zirconium, magnésie, mullite, nickel alumine, oxyde de chrome, oxyde de nickel, oxyde de titane, zircon, zircone

Tableau 3 : Choix du matériau en fonction du procédé de projection thermique [3]

Famille	Matériaux	FP	AE	PS	HV	CD
Aciers	Aciers non alliés					
	Aciers alliés					
Inox	Inox martensitique					
	Inox austénitique					
Métaux	Nickel					
	Zinc					
	aluminium					
	Molybdène					
	Tantale					
	Etain					
	Argent					
Alliages	base Cobalt					
	base Nickel - Inconel					
	base Nickel - Monel					
	Cuivre					
	Zinc Aluminium					
Alliages Auto-fusibles	base cobalt					
	NiCrBSi					
	base Nickel chargés carbures					
	Aluminiure de nickel					
	Nickel-Chrome-Aluminium					
Alliages MCrAlY	« M »CrAlY					
Oxydes	Alumine					
	Alumine + dioxyde de titane					
	Oxyde de chrome					
	zircone					
Carbures (+liants)	Carbure de tungstène					
	Carbure de chrome					
	Carbure de titane					
	Carbure de bore					
Antifricition	Etain-antimoine					
	Etain-plomb					
Abradables	Nickel-grpahite					
	Aluminium-résine					
Borure	Borure de titane					
	Borure de zirconium					
Nitrure de titane	Nitrure de titane					
Siliciure de molybdène	Siliciure de molybdène					

Tableau 4 : Choix du matériau en fonction du type d'utilisation [3]

Type d'utilisation	Matériau	FP	FF	FC	AE	PS	HV
Sous-couche	Ni-Cr 80/20						
	Aluminiure de nickel						
	Molybdène						
	« M »CrAlY						
Isolation électrique	Alumine						
	Spinnelle						
Usure par frottement	Oxyde de chrome						
	Alumine-titane						
	Molybdène						
	Bronze						
Abrasion	Carbures de tungstène						
	Carbures de chrome						
	Alumine						
	Autofusibles (base Ni ou baseCo)						
Corrosion Oxydation	Zinc						
	Aluminium						
	ZnAl						
	Acier Inox						
	Carbures de Chrome						
	Alumine						
Corrosion à chaud	Autofusibles base Ni (NiCrBSi)						
	Autofusibles base Co						
	« M »CrAlY						
	Alumine						
Isolation thermique	Alumine						
	Zirconate de calcium et de magnésium						
	Zircone stabilisée chaux						
	Zircone stabilisée yttrium						
Réparation	Alliages anti-friction						
	Abradables						
	Auto-adhérents						
	Aciers						

EXPOSITION DES SALARIES

La projection thermique présente un rendement compris entre 50 % et 90 %, ce qui se traduit par une émission de particules (qui ne se déposent pas sur le support) compris entre 10 % et 50 %. Ces particules émises sont soit métalliques ou sont oxydées : oxyde d'aluminium, oxyde de nickel, oxyde de fer... [5].

Une étude menée au laboratoire de Biométrie du département « Toxicité et Biométrie » de l'INRS et dont les résultats n'ont pas été publiés a mis en évidence que l'excrétion urinaire est plus élevée chez les opérateurs de projection thermique par rapport à celle mesurée chez les opérateurs de soudage. De plus, l'excrétion urinaire des opérateurs projetant avec le procédé au plasma était plus élevée que celle des opérateurs projetant avec le procédé High Velocity Oxygen Fuel.

Chadwick *et al.* (1997) ont comparé les fumées émises par trois procédés de projection thermique : arc électrique, plasma et canon à détonation. L'émission de particules de chrome, de nickel ou de cobalt est beaucoup plus importante lors de la mise en œuvre du

procédé plasma. Par contre, seules les excrétions urinaires de cobalt et de nickel sont plus élevées chez les opérateurs de projection plasma. L'excrétion urinaire de chrome est plus élevée chez les opérateurs de projection à l'arc électrique [6].

Heriaud-Kraemer *et al.* (2003) ont mené une étude dans un établissement réalisant des opérations de projection thermique pour le secteur de l'aéronautique. L'établissement possédait des installations manuelles et automatiques pour les procédés à la flamme, à l'arc électrique et plasma pour déposer des revêtements abrasables, anticorrosifs ou des revêtements métalliques, céramiques ou organiques, réparties dans 3 cabines de projection et manipulées par 9 opérateurs travaillant en 2*8. Les pièces traitées étaient de tailles très différentes allant de 2,5 mm à 1,2 mètres. Les analyses de capacité respiratoire par spirométrie ne mettent pas en évidence de troubles respiratoires chez les salariés entre le 1^{er} jour et le dernier jour de travail hebdomadaire [7].

Petsas *et al.* (2007) ont réalisé une étude de caractérisation de la qualité de l'air dans un établissement grec réalisant, entre autre, des opérations de projection thermique. Les auteurs ne donnent pas de précision sur le procédé de projection thermique mis en œuvre. Ils soulignent juste le fait que cette projection se fait en cabine ventilée, à l'exception des pièces trop volumineuses. Pendant un mois, 3 salariés ont été suivis en les équipant de systèmes de prélèvement de la fraction inhalable. Les niveaux d'exposition sont les plus importants lors des phases de maintenance et pour les phases de projection hors de la cabine. Les auteurs préconisent l'utilisation d'un masque facial lors des opérations de maintenance et de projection thermique hors cabine [8].

Schaller *et al.* (2007) ont suivi pendant un an un salarié exposé accidentellement pendant 6 heures lors de la mise en œuvre du procédé de projection par flamme-fil de nickel et d'aluminium dans un incinérateur de déchets alors que le système de ventilation était défectueux. L'opérateur présentait des taux élevés de nickel et d'aluminium dans le sang et dans l'urine. L'excrétion de ces métaux s'est faite lentement et des traces étaient encore mesurables un an après l'exposition [9].

Selon Bémer *et al.* (2010), l'émission des particules est 1000 fois plus importante lors de la mise en œuvre de la projection par arc électrique que lors du soudage à l'arc électrique. Dans cette même étude, les auteurs ont montré que, quel que soit le procédé – arc électrique ou flamme – 2 à 4,5 % du métal consommé forment les fumées émises lors de leur mise en œuvre. De plus, l'émission de particules est plus importante pour un procédé à l'arc électrique que pour un procédé à la flamme, tout paramètre comparable. Le procédé influence également le nombre et la taille des particules émises. Le procédé par arc électrique est beaucoup plus émissif en nombre de particules par rapport au procédé à la flamme. Le procédé de projection par flamme génère des particules ultra fines dont le diamètre médian est de 50 nm, alors que le procédé par arc électrique génère des particules de diamètre médian égal à 75 nm, avec une fraction de particules dont la taille est supérieure au micron. Ils ont également montré que le métal projeté a une influence sur l'émission de particules. L'aluminium est beaucoup plus émissif lorsqu'il est projeté pur par arc électrique en comparaison avec la projection d'un alliage zinc-aluminium ou de zinc pur [10].

Dans la base de données COLCHIC, regroupant les mesures d'exposition réalisées par les 8 laboratoires interrégionaux de chimie des Caisses d'Assurance Retraite et de la Santé au Travail (CARSAT) et de l'INRS, peu de données sont répertoriées concernant l'exposition des salariés lors d'opérations de projection thermique à l'aide d'appareils portatifs. Par contre, le nombre de mesures concernant l'exposition des salariés lors de la mise en œuvre de projection thermique automatisée est suffisant pour faire des calculs statistiques qui sont données dans les Tableau 5 et

Tableau 6. Il n'est cependant pas possible de différencier les différents types de projection thermique. Les données suivent une loi log-normale, la moyenne géométrique est donc la valeur la plus représentative de l'exposition moyenne au poste de travail. Les mesures d'exposition sont faibles et ne dépassent pas les VLEP-8h, mis à part une valeur pour le cuivre.

Tableau 5 : Mesures d'exposition lors de la conduite d'installation de projection thermique

	Poussières inhalables	Nickel	Chrome	Chrome 6 soluble	Chrome 6 insoluble	Cuivre
Unité	mg/m ³	µg/m ³	µg/m ³	µg/m ³	µg/m ³	µg/m ³
VLEP-8h	-	1000	2000	50	-	200
nb de mesures	48	26	32	23	23	15
moyenne	0,58	26	6,9	0,35	0,64	64,42
étendue	0,03-5,76	0,1-398	0,3-30	<0,01-1,6	0,02-4,7	0,20-671
médiane	0,24	5,4	3,9	0,1	0,09	17
moyenne géométrique	0,26	3,4	3,4	0,09	0,15	6,34
écart-type géométrique	3,31	9,24	3,79	8,04	5,68	14,21
P5	0,05	0,1	0,4	<0,01	0,02	0,2
P25	0,1	0,6	1,1	0,04	0,05	0,25
P75	0,52	24	10,5	0,58	0,68	57
P90	0,96	39	20	1	2,6	66
P95	3,09	57	20	1,44	3	671

Tableau 6 : Mesures de concentration ambiante lors de la conduite d'installation de projection thermique

	Poussières inhalables	Nickel	Chrome	Chrome 6 soluble	Chrome 6 insoluble	Cuivre	Plomb	Zinc
Unité	mg/m ³	µg/m ³	µg/m ³	µg/m ³	µg/m ³	µg/m ³	µg/m ³	µg/m ³
VLEP-8h		1000	2000	50	-	200	100	-
nb de mesures	42	20	36	21	20	14	14	14
moyenne	0,96	20,4	26,6	0,15	0,19	14,76	7,92	2,05
étendue	0,05-13,8	<0,01-150	0,2-309	<0,01-0,82	<0,01-2,02	0,8-54,0	0,4-49	<0,01-11,2
médiane	0,22	4,7	2,2	0,05	0,06	6,95	2,75	0,16
moyenne géométrique	0,28	5,1	4,1	0,06	0,04	6,83	2,49	0,18
écart-type géométrique	4,00	5,68	6,67	4,53	4,66	4,01	4,42	25,60
P5	0,05	0,29	0,4	<0,01	<0,01	0,8	0,4	<0,01
P25	0,1	2,52	1,03	0,03	0,02	1,5	1	0,09
P75	0,57	14,5	15,4	0,16	0,08	16	4,25	3,67
P90	2,63	81	65	0,5	0,54	48	34,9	5,68
P95	4,04	146	173	0,52	1,49	54	49	11,2

METHODOLOGIE

CHOIX DES PROCÉDES

Pour réaliser l'enquête et être le plus exhaustif possible, l'ensemble des procédés de projection thermique a été sélectionné : la projection flamme-poudre (FP), la projection flamme-fil (FF), la projection à l'arc électrique (AE), la projection plasma soufflé (PS), la projection high velocity oxygen fuel ou high velocity air fuel (HVOF/HVAF), la projection par canon à détonation (DG). A ces 6 procédés a été ajouté le procédé par Cold Spray (CS), qui n'est pas un procédé de projection thermique mais qui semblerait être une bonne alternative à ces procédés.

SELECTION DES SECTEURS D'ACTIVITE

A partir des utilisations faisant appel à la projection thermique, les secteurs d'activité faisant appel à ces procédés ont été listés en 2 catégories :

- Les secteurs auxquels sont rattachés les établissements qui ne possèdent pas d'installation et qui font systématiquement appel à la sous-traitance. Ils ne seront pas interrogés mais leur activité sera citée dans la partie sous-traitance dans le questionnaire ;
- Les secteurs auxquels sont rattachés les établissements qui sont équipés d'installations de projection thermique soit parce qu'ils sont prestataires pour d'autres établissements, soit parce qu'ils possèdent leurs propres installations

intégrées dans leur outils de production ou pour assurer la maintenance de leur système de production (les ateliers intégrés).

Le choix des secteurs interrogés a été validé par des établissements concepteurs d'installations et vendeurs de matériaux à projeter.

Les secteurs auxquels sont rattachés les établissements qui font de la projection thermique ont été sélectionnés : les applicateurs qui réalisent ces opérations pour le compte de clients (sous-traitance) et les ateliers intégrés. Au total 56 secteurs d'activité, selon la codification NAF, niveau 5 ont été intégrés à l'enquête (

Tableau 7) [11].

Tableau 7 : Liste des 56 secteurs d'activité interrogés

Secteur	Intitulé	Secteur	Intitulé
0510Z	Extraction de houille	2830Z	Fabrication de machines agricoles et forestières
0610Z	Extraction de pétrole brut	2841Z	Fabrication de machines-outils pour le travail des métaux
1920Z	Raffinage du pétrole	2849Z	Fabrication d'autres machines-outils
2059Z	Fabrication d'autres produits chimiques n.c.a.	2910Z	Construction de véhicules automobiles
2311Z	Fabrication de verre plat	2920Z	Fabrication de carrosseries et remorques
2312Z	Façonnage et transformation du verre plat	2932Z	Fabrication d'autres équipements automobiles
2313Z	Fabrication de verre creux	3011Z	Construction de navires et de structures flottantes
2314Z	Fabrication de fibres de verre	3020Z	Construction de locomotives et d'autre matériel ferroviaire roulant
2319Z	Fabrication et façonnage d'autres articles en verre, y compris verre technique	3030Z	Construction aéronautique et spatiale
2511Z	Fabrication de structures métalliques et de parties de structures	3040Z	Construction de véhicules militaires de combat
2512Z	Fabrication de portes et fenêtres en métal	3091Z	Fabrication de motocycles
2529Z	Fabrication d'autres réservoirs, citernes et conteneurs métalliques	3311Z	Réparation d'ouvrages en métaux
2550B	Découpage, emboutissage	3312Z	Réparation de machines et équipements mécaniques
2561Z	Traitement et revêtement des métaux	3315Z	Réparation et maintenance navale
2562B	Mécanique industrielle	3316Z	Réparation et maintenance d'aéronefs et d'engins spatiaux
2573A	Fabrication de moules et modèles	3317Z	Réparation et maintenance d'autres équipements de transport
2573B	Fabrication d'autres outillages	3320A	Installation de structures métalliques, chaudronnées et de tuyauterie
2599A	Fabrication d'articles métalliques ménagers	3320C	Conception d'ensemble et assemblage sur site industriel d'équipements de contrôle des processus industriels
2599B	Fabrication d'autres articles métalliques	3511Z	Production d'électricité
2711Z	Fabrication de moteurs, génératrices et transformateurs électriques	3521Z	Production de combustibles gazeux
2790Z	Fabrication d'autres matériels électriques	3522Z	Distribution de combustibles gazeux par conduites
2811Z	Fabrication de moteurs et turbines, à l'exception des moteurs d'avions et de véhicules	3530Z	Production et distribution de vapeur et d'air conditionné
2812Z	Fabrication d'équipements hydrauliques et pneumatiques	4332B	Travaux de menuiserie métallique et serrurerie
2813Z	Fabrication d'autres pompes et compresseurs	4334Z	Travaux de peinture et vitrerie
2814Z	Fabrication d'autres articles de robinetterie	4399B	Travaux de montage de structures métalliques
2815Z	Fabrication d'engrenages et d'organes mécaniques de transmission	4910Z	Transport ferroviaire interurbain de voyageurs
2822Z	Fabrication de matériel de levage et de manutention	4920Z	Transports ferroviaires de fret
2829B	Fabrication d'autres machines d'usage général	4931Z	Transports urbains et suburbains de voyageurs

OBTENTION DES ADRESSES

Le nombre d'établissements par secteur et par taille d'établissements pour l'année 2010 a été obtenu en interrogeant le site internet du pôle emploi. En 2010, 60 937 établissements étaient rattachés à l'un de 56 secteurs sélectionnés [12].

Le secteur 2561Z – traitement et revêtement des métaux – est le principal secteur dans lequel les applicateurs sont référencés. Bien que le nombre d'établissements soit supérieur à 1000, l'ensemble des établissements a reçu un questionnaire.

Etant donné la dispersion des installations dans l'ensemble des secteurs, il a été établi la règle suivante :

- Si le nombre d'établissements rattachés à un secteur d'activité donné est inférieur à 1000, il ne sera pas fait de plan de sondage et l'ensemble des établissements sera interrogé. Dans le cas contraire, il sera réalisé un plan de sondage par taille d'établissements.

Le plan de sondage a été forcé pour les établissements de petites tailles. Pour les établissements à effectif élevé (moins de 5 par secteur), l'ensemble des établissements a été interrogé.

En résumé, tous les établissements du secteur 2561Z et de 45 autres secteurs ont été interrogés, alors que seulement un échantillon d'établissements de 10 secteurs a été interrogé. Les taux de sondage sont donnés dans le Tableau 8. Pour faciliter le traitement ultérieur et prendre en compte les établissements ayant changé de code NAF par rapport au fichier fourni par l'INSEE, des regroupements de codes ont été réalisés :

- En fonction des divisions de la nomenclature NAF ;
- En fonction du domaine d'activité des établissements.

La division de la réparation et de l'installation de machines et d'équipements (NAF 33) a été divisée en deux groupes :

- Réparation d'équipements : 3311Z – 3312Z – 3314Z – 3319Z ;
- Installation d'équipements : 3320A – 3320C.

Les adresses ont été commandées auprès des services gérant la base SIRENE de l'INSEE [13].

Tableau 8 : Regroupement des secteurs d'activité et taux de sondage par activité

Activité	Secteurs d'activité NAF	Taux de sondage
Total		35 %
Aéronautique	3030Z 3316Z 2651Z	100 %
Automobile	2910Z 2920Z 2932Z	52 %
Bâtiment et Travaux Publics (BTP)	4332B 4334Z 4399B	11 %
Energie	0510Z 0610Z 1920Z 3511Z 3521Z 3522Z 3530Z	100 %
Fabrication d'Équipements électriques	2711Z 2790Z	100 %
Fabrication de Machines et Equipements	2811Z 2812Z 2813Z 2814Z 2815Z 2822Z 2829Z 2830Z 2841Z 2849Z	100 %
Fabrication de Produits Métalliques	2511Z 2512Z 2529Z-2573A 2573B 2599A 2599B	49 %
Ferroviaire	3020Z 3317Z 4910Z 4920Z	28 %
Industrie Chimique	2059Z	100 %
Installation d'équipements	3320A 3320C	36 %
Militaire	3040Z	100 %
Motocycles	3091Z	100 %
Naval	3011Z 3315Z	100 %
Réparation d'ouvrages	3311Z 3312Z 3314Z 3319Z	38 %
Traitement et Revêtement des métaux	2561Z	100 %
Transports urbains	4931Z	100 %
Travail des métaux	2550B 2562B	26 %
Verre	2311Z 2312Z 2313Z 2314Z 2319Z	100 %

CREATION DU QUESTIONNAIRE

Il a été choisi de réaliser un questionnaire commun à tous les secteurs pour faciliter le traitement ultérieur. L'objectif de ce questionnaire était de connaître la répartition des différents procédés en fonction du secteur d'activité, la répartition des installations et le nombre de salariés utilisant ces installations, les matériaux mis en œuvre par type de procédés.

Le questionnaire est composé de 4 parties :

- Une partie « administrative » : coordonnées de l'établissement pour ne pas envoyer un second questionnaire lors de la relance, le code NAF, l'effectif total de l'établissement. La dernière question de cette partie concernait l'utilisation au sein de l'établissement d'un ou de plusieurs procédés de projection thermique ;
- Une partie « projection thermique » : type et nombre d'installations de projection thermique, nombre de salariés présents dans l'atelier, nombre de salariés utilisant les installations de projection thermique, la fréquence d'utilisation, le port d'un appareil de protection respiratoire, les matériaux et les quantités utilisés par procédé et l'objectif de l'application de la projection thermique en fonction du procédé ;
- Une partie « opérations en amont et en aval » : type de préparation et de nettoyage des supports, nettoyage des ateliers et le nombre de salariés affectés à ces différentes tâches ;
- Une partie « sous-traitance » : le (ou les) secteur(s) pour lequel (ou lesquels) les applicateurs travaillent et la fréquence de déplacement chez le client.

En plus du questionnaire papier, une version informatique a été créée afin de permettre aux établissements de saisir directement leurs réponses informatiquement sur le serveur Sphinx.

COLLECTE ET TRAITEMENT DES DONNEES

L'envoi de 21 345 questionnaires s'est fait par voie postale fin avril 2012. Une relance auprès de plus de 15 000 établissements n'ayant pas répondu au premier envoi a été faite en septembre 2012.

Les établissements concernés par l'enquête avaient la possibilité de répondre soit directement sur la version papier du questionnaire et de la retourner à l'aide d'une enveloppe T qui leur était fournie, soit en ligne grâce à la mise en place d'un portail web permettant d'accéder au questionnaire créé avec le logiciel Sphinx. Les réponses des questionnaires papier ont été saisies dans l'application Sphinx après contrôle et corrections éventuelles des réponses.

Les données ont ensuite été traitées et redressées par rapport à l'ensemble des établissements appartenant aux 56 secteurs à l'aide du logiciel Sphinx et du tableur Excel. Les données statistiques ont été obtenues à partir des formules suivantes [14] :

1. Pour les réponses à choix multiples (par exemple oui/non ; choix des objectifs, des matériaux...) :

$$\widehat{N}_{gj} = \sum_1^G W_g * \frac{n_{gj}}{n_g} = \sum_1^G \frac{N_g}{N} * \frac{n_{gj}}{n_g}$$

avec :

- N : nombre total d'établissements ;
- N_g : nombre total d'établissements dans la strate g ;
- n_g : nombre de réponses dans la strate g ;
- n_{gj} : nombre de réponses positives dans la strate g ;
- \widehat{N}_{gj} : nombre estimé d'établissements ou de procédés répondant positivement dans la strate g ;

calcul de la variance : $V(\widehat{N}_{gj}) = \sum_1^G W_g^2 * (1 - f_g) * \frac{p_g * q_g}{n_g - 1}$

Avec $f_g = \frac{n_g}{N_g}$ $p_g = \frac{n_{gj}}{n_g}$ $q_g = 1 - p_g$

2. Pour les réponses numériques :

$$\widehat{Y}_j = \sum_1^G \widehat{N}_{gj} * \overline{y_{gj}}$$

avec :

- \widehat{Y}_j : nombre total estimé de salariés
- $\overline{y_{gj}}$: nombre moyen de salariés par strate
- \widehat{N}_{gj} : nombre estimé d'établissements ou de procédés répondant positivement dans la strate g

calcul de la variance :

$$V(\widehat{Y}_j) = \widehat{N}_j^2 * V(\widehat{Y}_j) + \widehat{Y}_j^2 * V(\widehat{N}_j)$$

$$V(\widehat{Y}_j) = \sum_1^G \frac{(N_g - n_g) * \widehat{N}_{gj}}{n_g} * \frac{\sum_1^{n_{gj}} (y_{gj} - \widehat{y}_{gj})^2}{(n_g - 1)} + \widehat{Y}_j^2 * N_j^2 * \sum_1^G W_g * (1 - f_g) * \frac{p_g * q_g}{n_g - 1}$$

RESULTATS

L'ensemble des résultats présentés dans ce rapport est issu de l'enquête menée d'avril à décembre 2012.

DEFINITIONS DES TERMES UTILISES DANS LE RAPPORT

Tableau 9 : Définitions des termes utilisés dans le rapport

Taille des établissements		
	Micro-entreprises (μ E)	moins de 10 salariés
	Très petites entreprises (TPE)	De 10 à 19 salariés
	Petites et moyennes entreprises (PME)	De 20 à 249 salariés
	Entreprises de taille intermédiaire (ETI)	De 250 à 499 salariés
	Grandes entreprises (GE)	500 salariés et plus
Type d'installations		
	Appareils portatifs	
	Cabines non confinées	Installations automatisées placées dans une cabine fermée non confinée, une cabine ouverte ou sans cabine, les opérateurs peuvent accéder à l'installation pendant la projection
	Cabines confinées	Installations automatisées placées dans une cabine fermée, les opérateurs ne peuvent pas accéder à l'installation pendant la projection.
Appareils de protection respiratoire		
	Filtrants à ventilation libre	Demi-masque à usage unique, demi-masque ou masque complet à cartouche
	Filtrants à ventilation assistée	TM2P (demi-masque), TH3P (cagoule, casque...), TM3P (masque complet),
	Isolants à adduction d'air ou autonome	Masque, casque ou cagoule
Fréquence d'utilisation		
	Jamais	
	Occasionnelle	Utilisation des installations de projection thermique moins d'un mois dans l'année
	Fréquente	utilisation des installations de projection thermique entre un et trois mois dans l'année
	Permanente	Utilisation des installations de projection thermique plus de trois mois dans l'année
Déplacement lors d'opération de sous-traitance		
	Jamais	La projection thermique se fait toujours dans les ateliers de l'établissement interrogé
	Occasionnellement	Moins de 50 % des déplacements
	Fréquemment	Plus de 50 % des déplacements
	Toujours	100 % des déplacements

DONNEES GENERALES

CARACTERISTIQUES DES ETABLISSEMENTS FAISANT DE LA PROJECTION THERMIQUE

Le taux de retour est de 43 %. Après redressement, le nombre d'établissements utilisant au moins un procédé de projection thermique est compris entre 780 et 960 établissements. Ces établissements appartiennent au secteur du BTP, du traitement et revêtement de surface, de la fabrication de produits métalliques, du travail des métaux, de la réparation d'ouvrages métalliques (Figure 10). Rapporté au nombre d'établissements de chaque activité, le secteur du revêtement de surface est le secteur dans lequel la projection thermique est la plus utilisée. La projection thermique dans le secteur du BTP ne représente que 1 %. Le secteur militaire est peu représentatif étant donné le nombre d'établissements total (Figure 11). Ce sont principalement des micro et des très petites entreprises (68 % d'entre-elles emploient moins de 20 salariés) (Figure 12). La région Rhône-Alpes est la région dans laquelle se trouve la majorité des établissements faisant de la projection thermique (tous procédés confondus), elle est suivie des régions Ile-de-France, Centre et Nord-Pas-de-Calais (Figure 13).

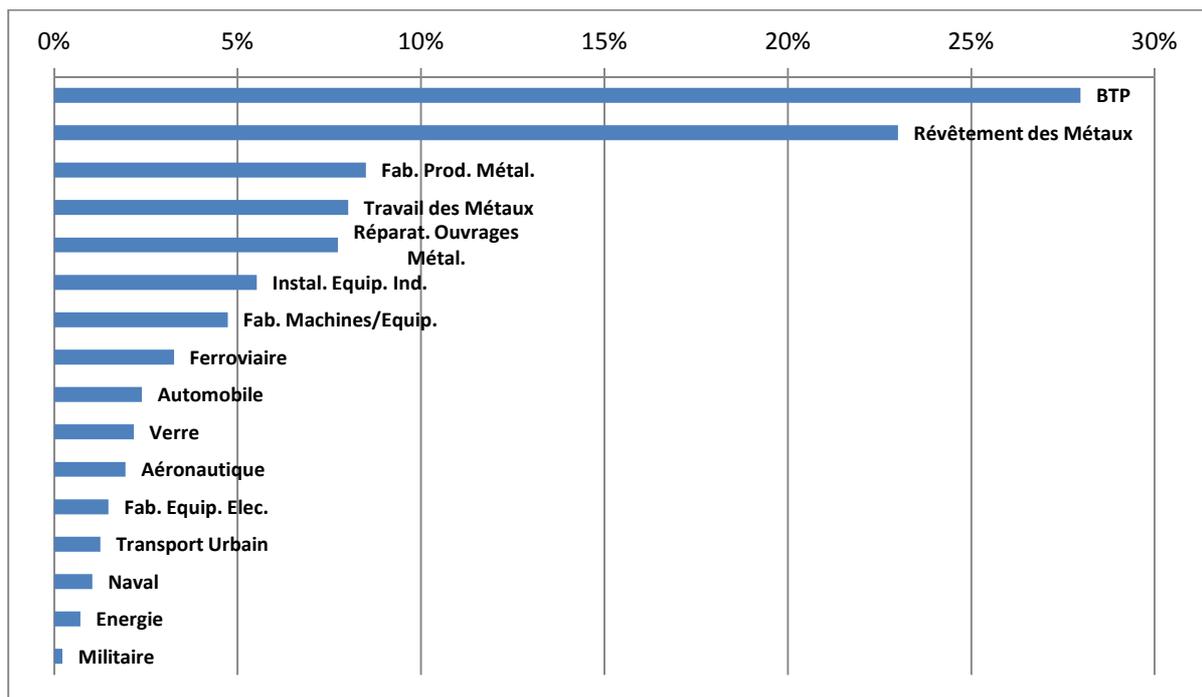


Figure 10 : Répartition des établissements faisant de la projection thermique en fonction de l'activité

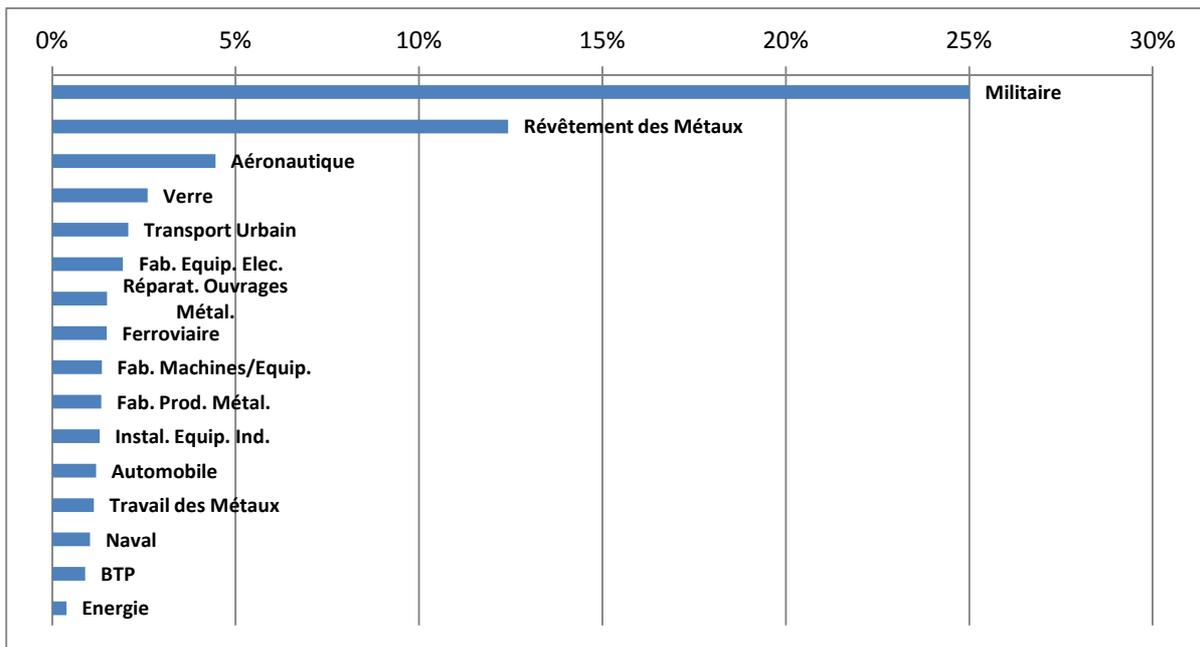


Figure 11 : Répartition des établissements faisant de la projection thermique par rapport aux établissements de chaque secteur

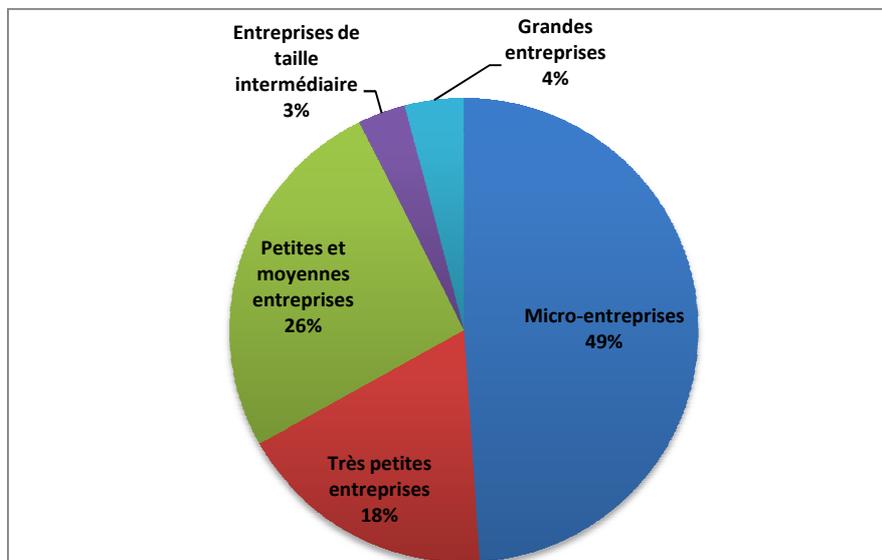


Figure 12 : Répartition des établissements faisant de la projection thermique en fonction de l'effectif



Figure 13 : Répartition géographique des établissements faisant de la projection thermique

PROCEDES

Plus de 75 % des établissements ne sont équipés que d'un seul procédé. A l'inverse, 2 % des établissements sont équipés des 5 procédés (Figure 14).

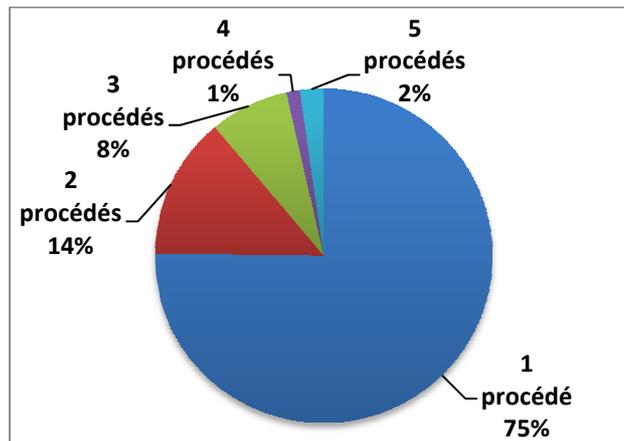


Figure 14 : Répartition des établissements en fonction du nombre de procédés de projection thermique dans l'établissement

Le procédé majoritaire est le procédé par arc électrique. Il est utilisé dans 491 établissements des établissements. A l'inverse, il n'y a que 51 établissements utilisant le procédé par HVOF (Figure 15).

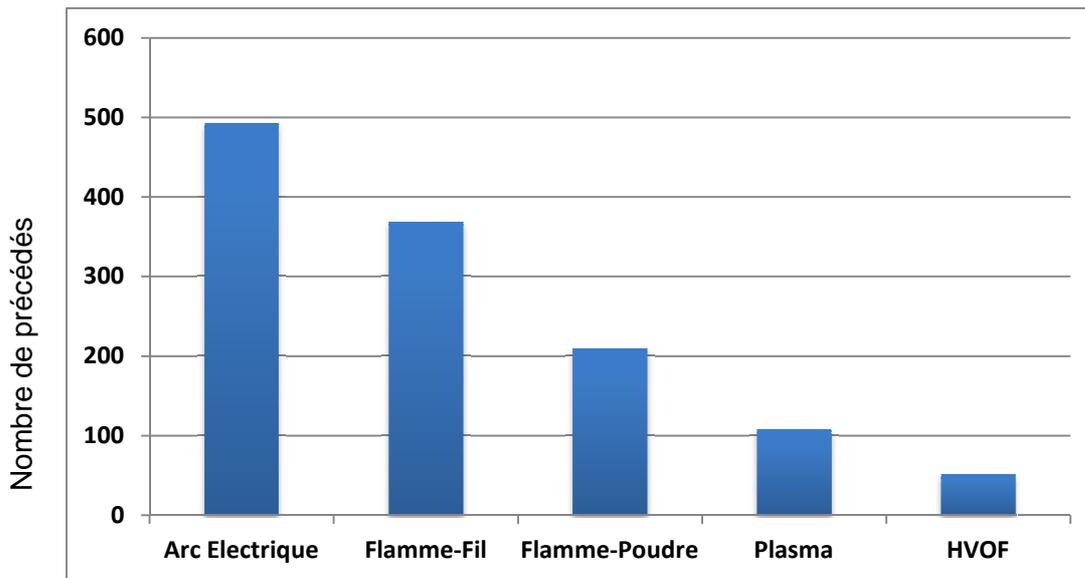


Figure 15 : Répartition des procédés

SALARIES TRAVAILLANT DANS LES ATELIERS DE PROJECTION THERMIQUE

Le nombre de salariés travaillant dans les ateliers dans lesquels sont placées les installations de projection thermique est compris entre 4 100 et 4 900 salariés. Selon les chiffres donnés dans le Tableau 10, les ateliers ne sont pas dédiés à un procédé puisque la somme des salariés dans les ateliers en fonction des procédés est nettement supérieure au nombre total.

Tableau 10 : Répartition des salariés dans les ateliers de projection thermique en fonction du procédé

Type de procédés	Nombre de salariés
Arc électrique	4 460
Flamme-Fil	3 889
Flamme-Poudre	2 773
Plasma	3 000
HVOF	1 878

INSTALLATIONS

La projection thermique est principalement réalisée avec des appareils portatifs (Figure 16). Le nombre de salariés travaillant sur les installations, tous procédés confondus, est de 2 700 salariés dont 60 % travaillent sur des appareils portatifs, 29 % conduisent des installations placées dans des cabines ventilées inaccessibles pendant la projection thermique.

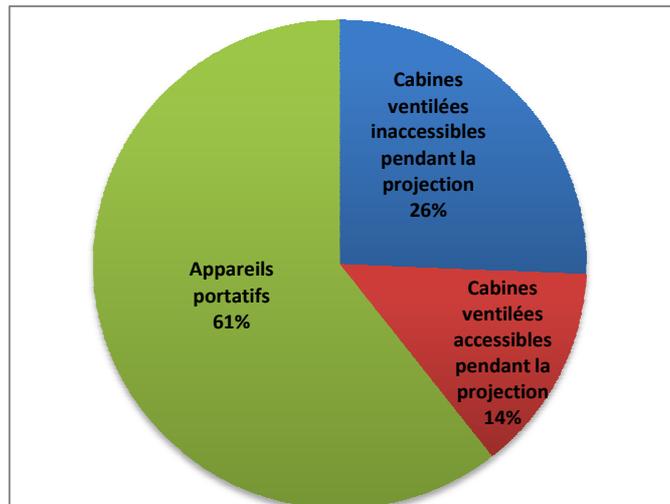


Figure 16 : Répartition des installations de projection thermique

UTILISATION DE LA PROJECTION THERMIQUE

43 % des établissements utilisent de manière permanente leurs installations, alors que moins de 1 % n'utilisent plus leur procédé, le plus souvent au profit d'un autre procédé plus performant ou plus facile d'utilisation (Figure 17).

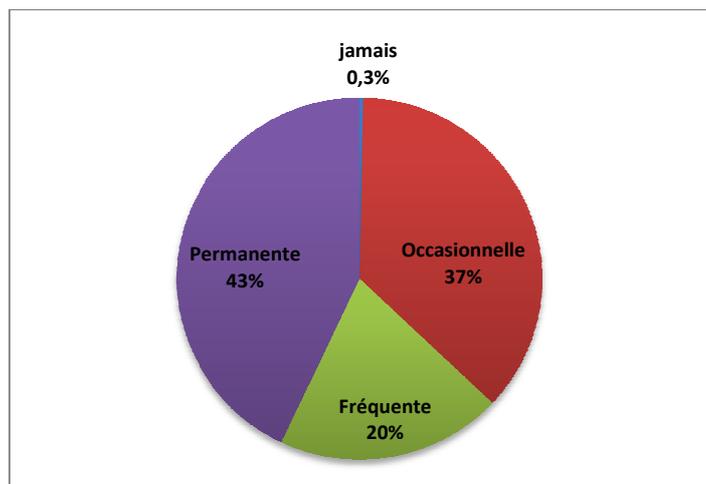


Figure 17 : Fréquence d'utilisation des procédés de projection thermique

SOUS-TRAITANCE

Plus de 80 % des établissements appartenant principalement aux secteurs du revêtement des métaux, du BTP, du travail des métaux, de la réparation d'ouvrages métalliques, de l'installation d'équipements industriels et de la fabrication des produits métalliques sont des établissements prestataires faisant de la projection thermique (Figure 18). 74 % de ces établissements ne se déplacent jamais chez leurs clients pour faire des opérations de projection thermique. Par contre, pour les 26 % qui se déplacent chez leurs clients, quelle que soit la fréquence, ils utilisent des appareils portatifs (Figure 19). Les clients de ces établissements sous-traitant appartiennent majoritairement au secteur de la sidérurgie, du BTP, de la pétrochimie, de l'énergie (Figure 20).

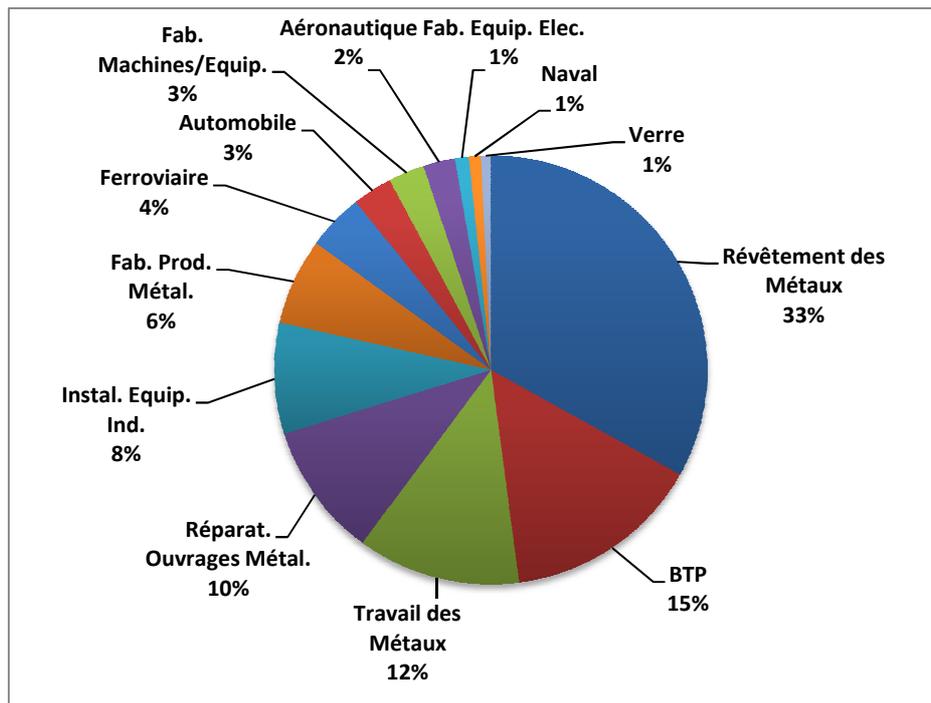


Figure 18 : Répartition des établissements faisant de la sous-traitance en fonction de leur activité

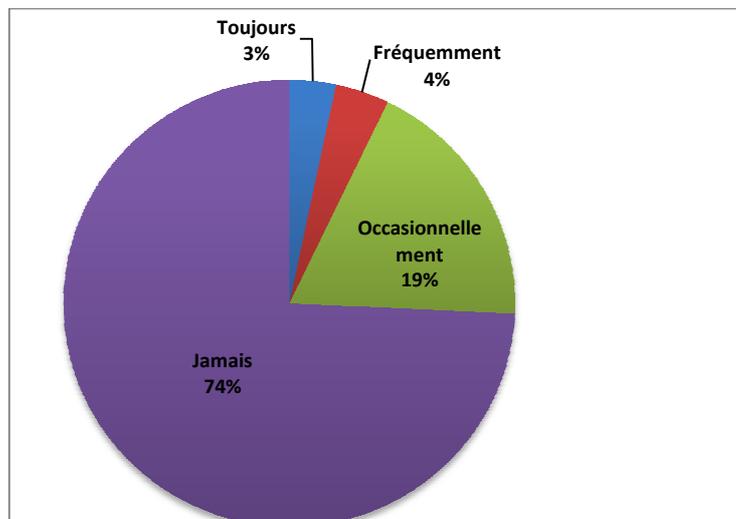


Figure 19 : Fréquence de déplacement des établissements faisant de la sous-traitance

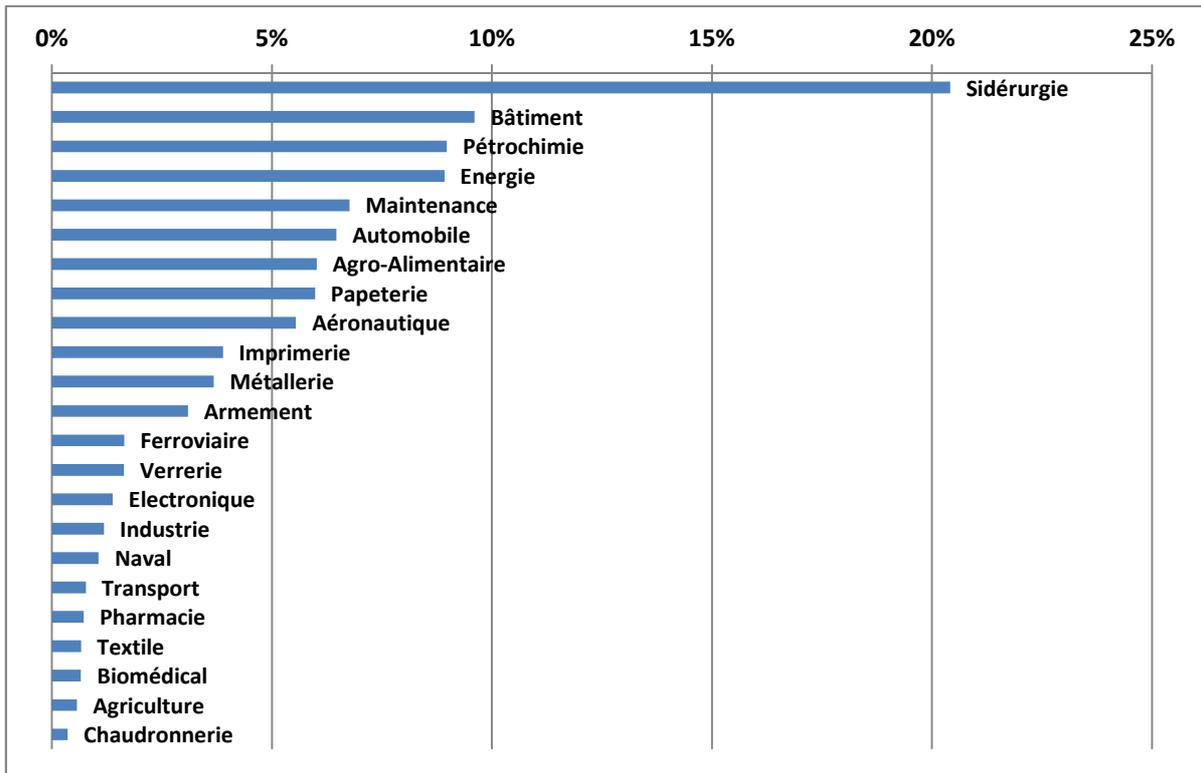


Figure 20 : Répartition des secteurs faisant appel à la sous-traitance en fonction de leur activité

APPAREILS DE PROTECTION RESPIRATOIRE

Quel que soit le procédé, il s'avère que, dans 12 % des établissements, les salariés ne portent pas de protection respiratoire (Figure 21).

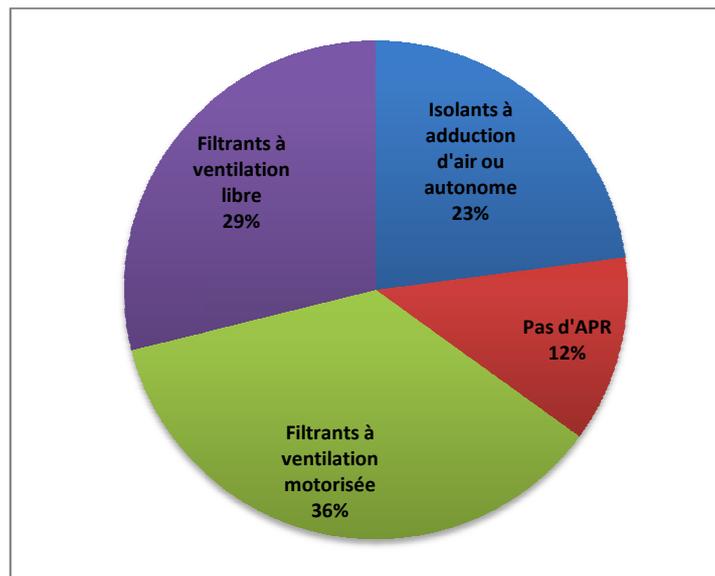


Figure 21 : Répartition des appareils de protection respiratoire

MATERIAUX PROJETES EN PROJECTION THERMIQUE

Au total, plus d'une centaine de matériaux ont été cités parmi les réponses. Pour faciliter le traitement des données, ceux-ci ont été regroupés par famille. Le matériau le plus utilisé en projection thermique est l'alliage zinc-aluminium avec plus de 14 % des établissements déclarant le mettre en œuvre (Figure 22).

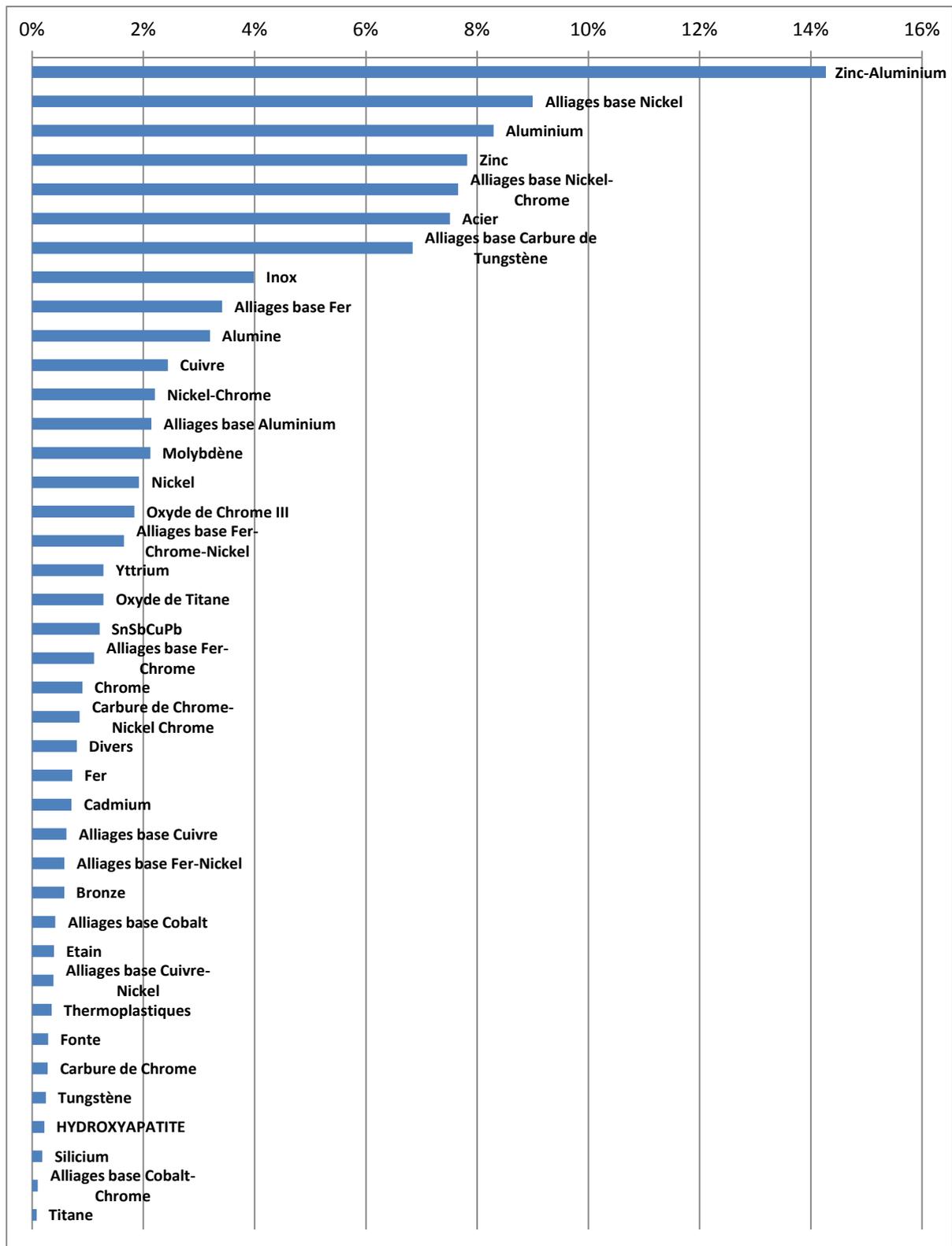


Figure 22 : Répartition des matériaux quel que soit le procédé

PROPRIETES RECHERCHEES AVEC LA PROJECTION THERMIQUE

La projection thermique est utilisée dans le traitement anticorrosion principalement, mais également dans les traitements anti-usure, pour le rechargement des pièces et pour réduire les frottements. Dans certains cas de figure, le revêtement servira de sous-couche pour améliorer l'accrochage d'autres matériaux ou de peinture. Quelques établissements l'utilisent également pour améliorer des propriétés déjà existantes (amélioration de la conductivité, de la résistance thermique ou électrique) (Figure 23).

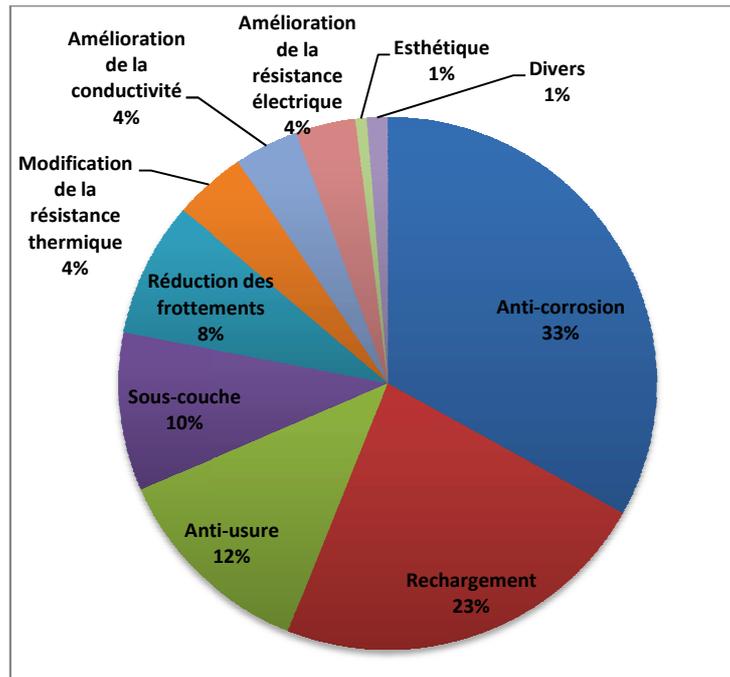


Figure 23 : Répartition des différentes propriétés recherchées lors de la mise en œuvre de la projection thermique

PREPARATION DES PIECES A TRAITER

La préparation des pièces à traiter par projection thermique n'est pas une opération obligatoire. Lorsqu'elle est réalisée, elle peut se faire par voie chimique ou mécanique. Les principales voies de préparation sont le sablage ou le grenailage (63 %) (Figure 24). Ces deux opérations peuvent générer des particules métalliques provenant des pièces à traiter.

Le nettoyage des zones de travail se fait principalement à l'aide d'un système d'aspiration équipé d'un système intégré de récupération des poussières (44 %). Cependant, 23 % des établissements déclarent utiliser le balai ou la soufflette d'air comprimé pour nettoyer les zones de travail (Figure 25).

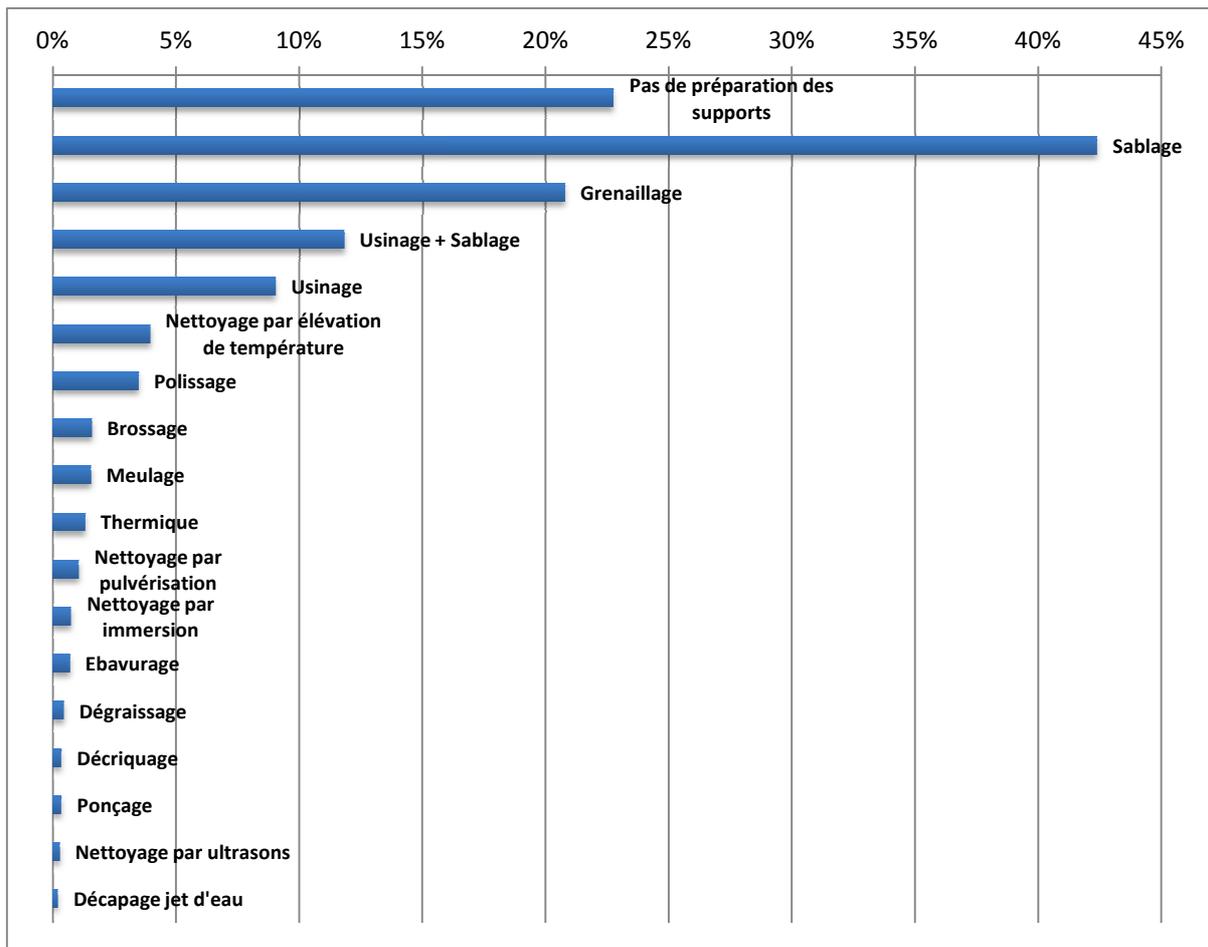


Figure 24 : Les différents modes de préparation des supports à traiter

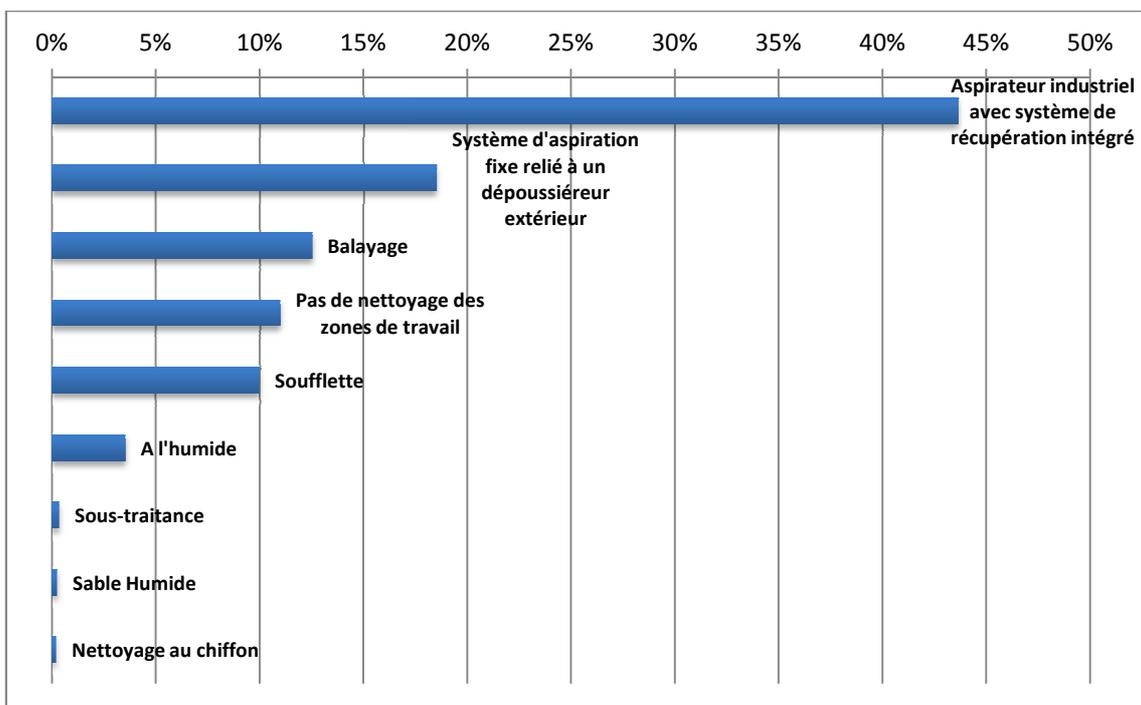


Figure 25 : Les différents modes de nettoyage des zones de travail

PROCEDE PAR ARC ELECTRIQUE

Les 491 établissements – dont 70 % emploient moins de 20 salariés (Figure 26) – utilisant le procédé par arc électrique sont présents principalement dans les régions Rhône-Alpes, Provence-Alpes-Côte-d’Azur et Centre (Figure 27). Les établissements appartiennent principalement au secteur du BTP et du revêtement des métaux (Figure 28). La majorité des installations sont des appareils portatifs (Figure 29). Ces installations sont utilisées pour projeter des alliages zinc-aluminium, de l’aluminium, de l’acier ou du zinc pour effectuer un traitement anti-corrosion ou du rechargement (Figure 30 et Figure 31). Elles sont utilisées par 1 150 salariés, dont 54 % utilisent des appareils portatifs, 9 % des installations automatiques placées dans des cabines ventilées accessibles pendant la projection et 27 % des installations automatiques placées dans des cabines ventilées accessibles pendant la projection. Dans 23 % des situations de projection thermique par arc électrique à l’aide d’appareils portatifs, il n’y a pas de port d’appareil de protection respiratoire (Figure 32). La sidérurgie et le bâtiment sont les 2 principaux secteurs qui font appel à la projection thermique par arc électrique (Figure 33).

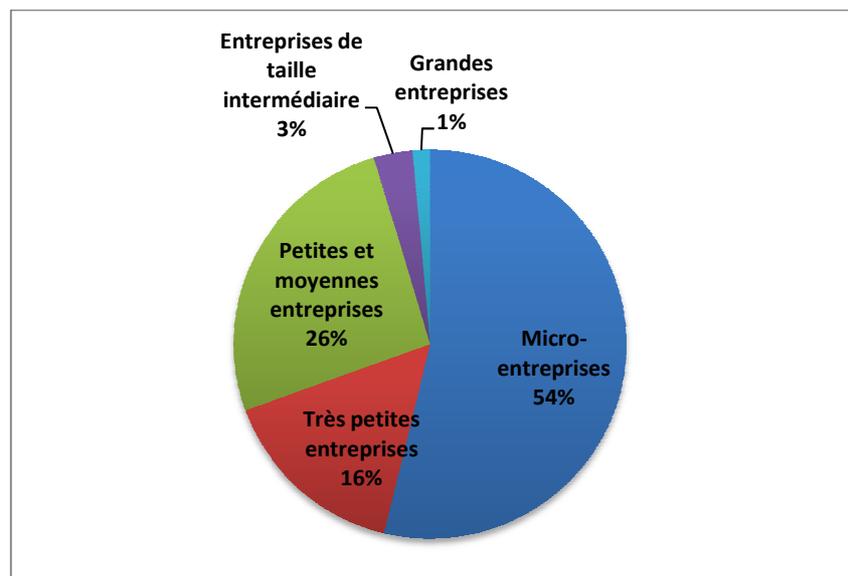


Figure 26 : Répartition des établissements faisant de la projection thermique par arc électrique en fonction de leur taille



© Géoclip 2012 - IGN GéoFla - Carte réalisée à partir de données importées par l'utilisateur.

Figure 27 : Répartition géographique des établissements faisant de la projection thermique par arc électrique

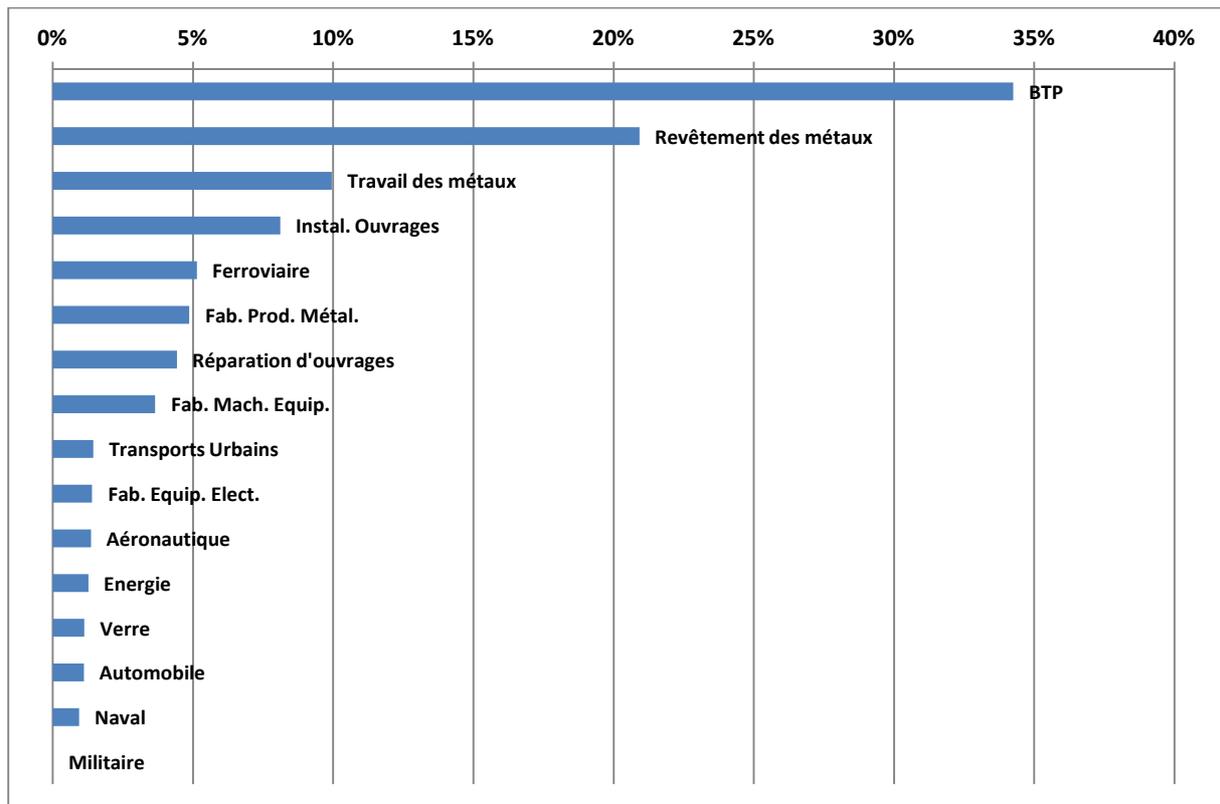


Figure 28 : Répartition des établissements faisant de la projection thermique par arc électrique en fonction de l'activité

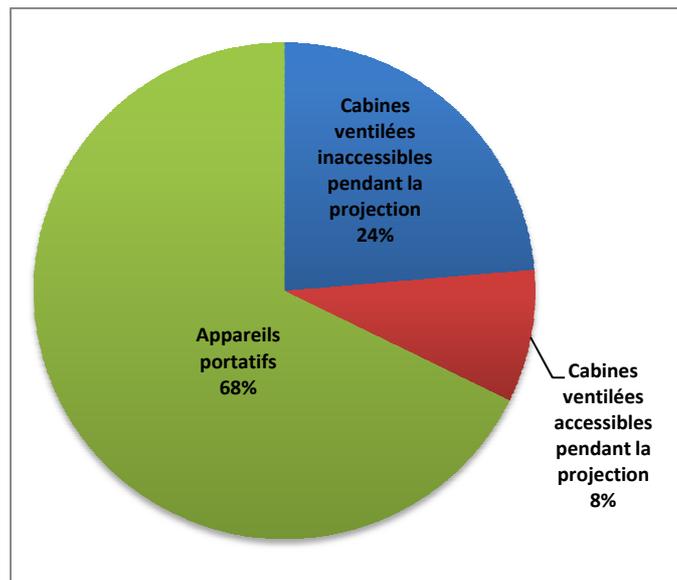


Figure 29 : Répartition des installations de projection par arc électrique en fonction de leur configuration

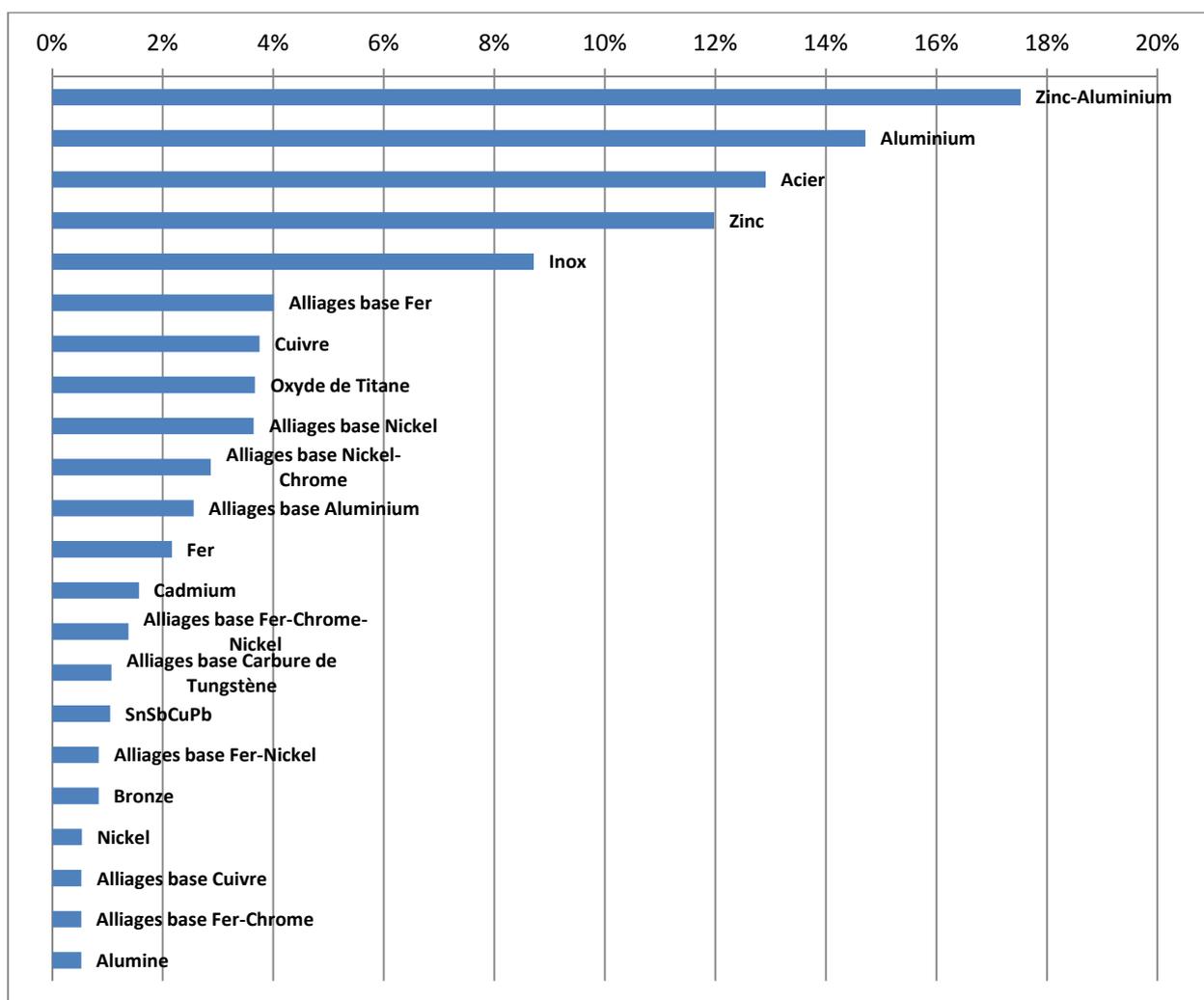


Figure 30 : Répartition des matériaux projetés par le procédé par arc électrique

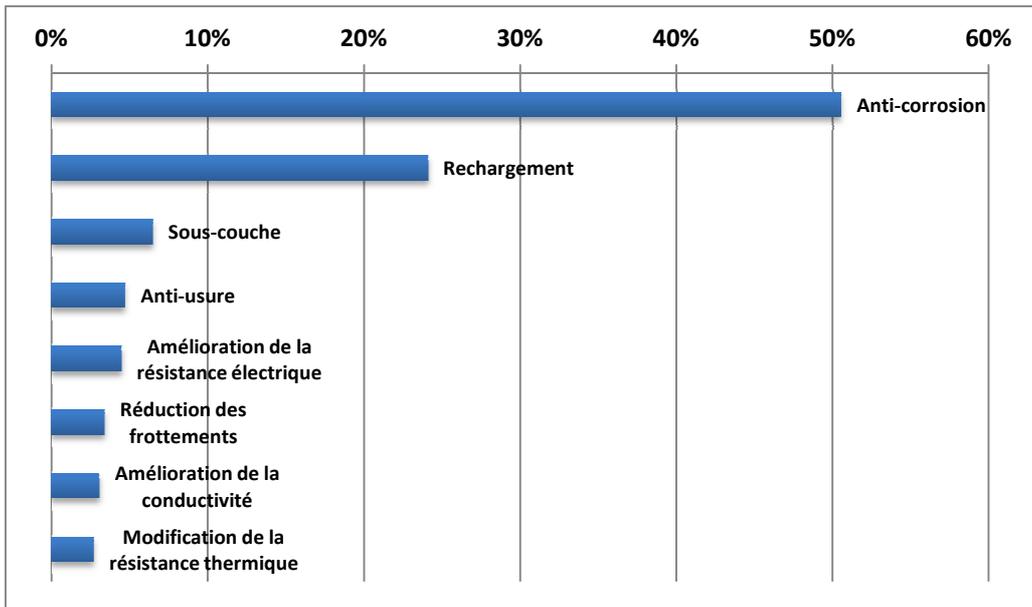


Figure 31 : Propriétés recherchées lors de la mise en œuvre de la projection thermique par arc électrique

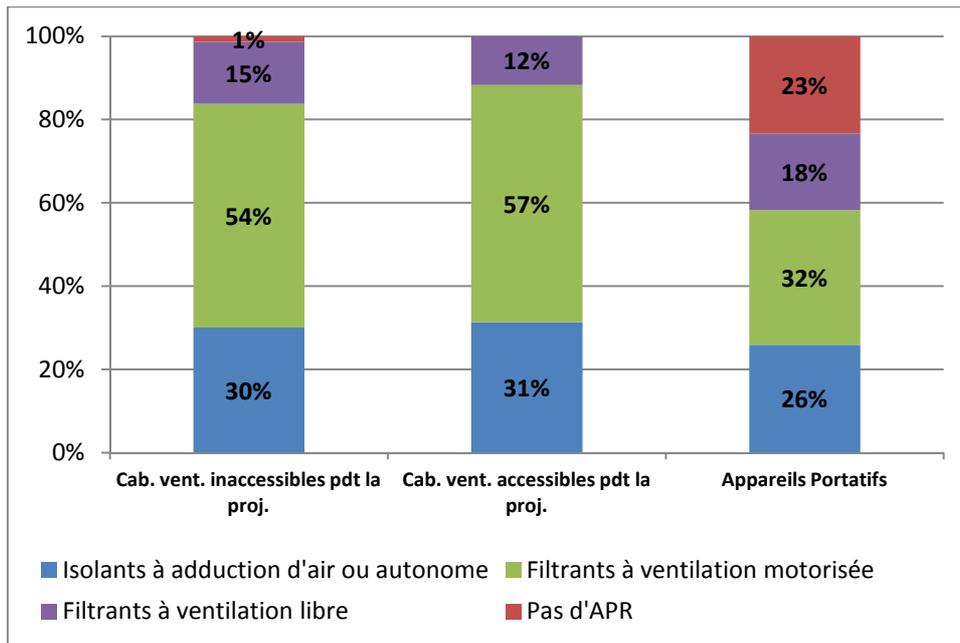


Figure 32 : Appareils de protection respiratoire en fonction du type d'installations pour le procédé arc électrique

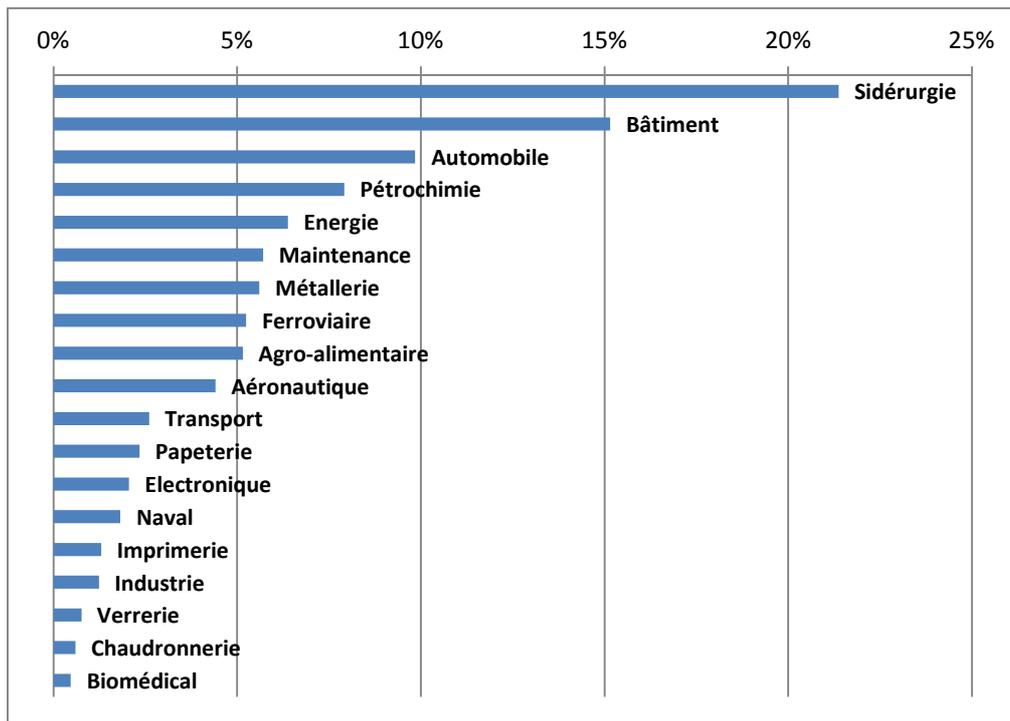


Figure 33 : Activités faisant appel aux prestataires de projection thermique par arc électrique

PROCEDE PAR FLAMME-FIL

Les 368 établissements – dont 74 % emploient moins de 20 salariés (Figure 34) – utilisant le procédé par flamme-fil sont présents principalement dans les régions Rhône-Alpes, Pays-de-la-Loire et Poitou-Charentes (Figure 35). Les établissements appartiennent principalement aux secteurs du revêtement des métaux et du BTP (Figure 36). La majorité des installations sont des appareils portatifs (Figure 37). Ces installations sont utilisées pour projeter des alliages zinc-aluminium pour effectuer un traitement anti-corrosion (Figure 38 et Figure 39). Elles sont utilisées par 526 salariés, dont 71 % utilisent des appareils portatifs, 16 % des installations automatiques placées dans des cabines ventilées accessibles pendant la projection et 13 % des installations automatiques placées dans des cabines ventilées accessibles pendant la projection. Dans 9 % des situations de projection thermique par flamme-fil à l'aide d'appareils portatifs, il n'y a pas de port d'appareil de protection respiratoire (Figure 40). La sidérurgie est le principal secteur qui fait appel à la projection thermique par flamme-fil (Figure 41).

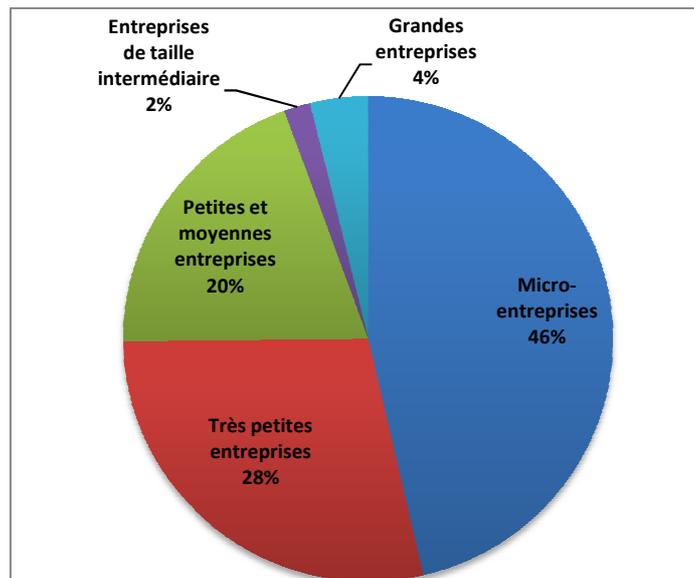


Figure 34 : Répartition des établissements faisant de la projection thermique par flamme-fil en fonction de leur taille



Figure 35 : Répartition géographique des établissements faisant de la projection thermique par flamme-fil

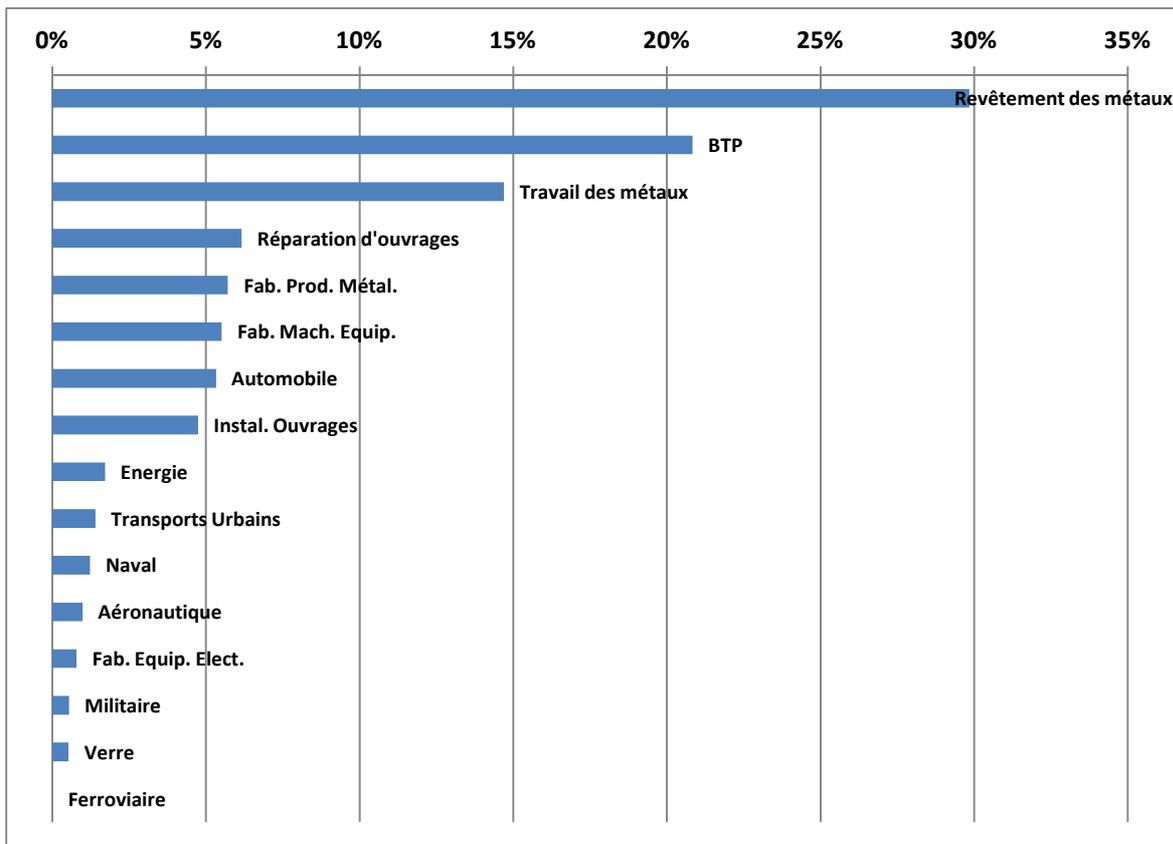


Figure 36 : Répartition des établissements faisant de la projection thermique par flamme-fil en fonction de l'activité

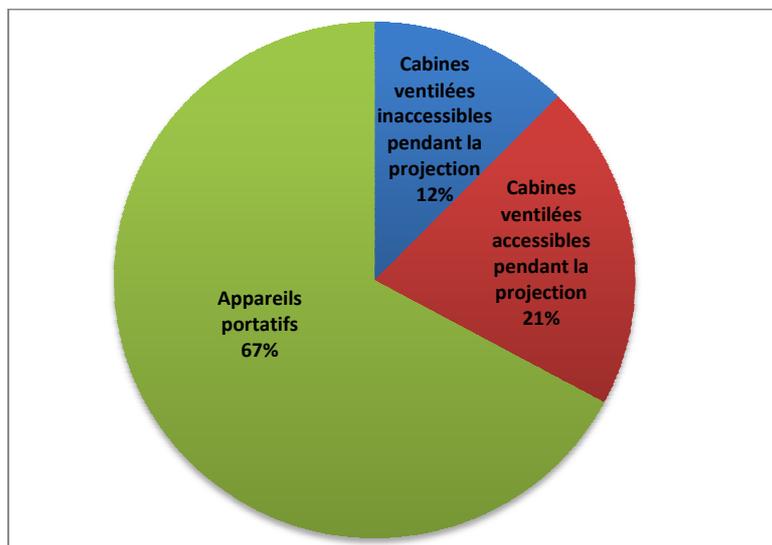


Figure 37 : Répartition des installations de projection par flamme-fil en fonction de leur configuration

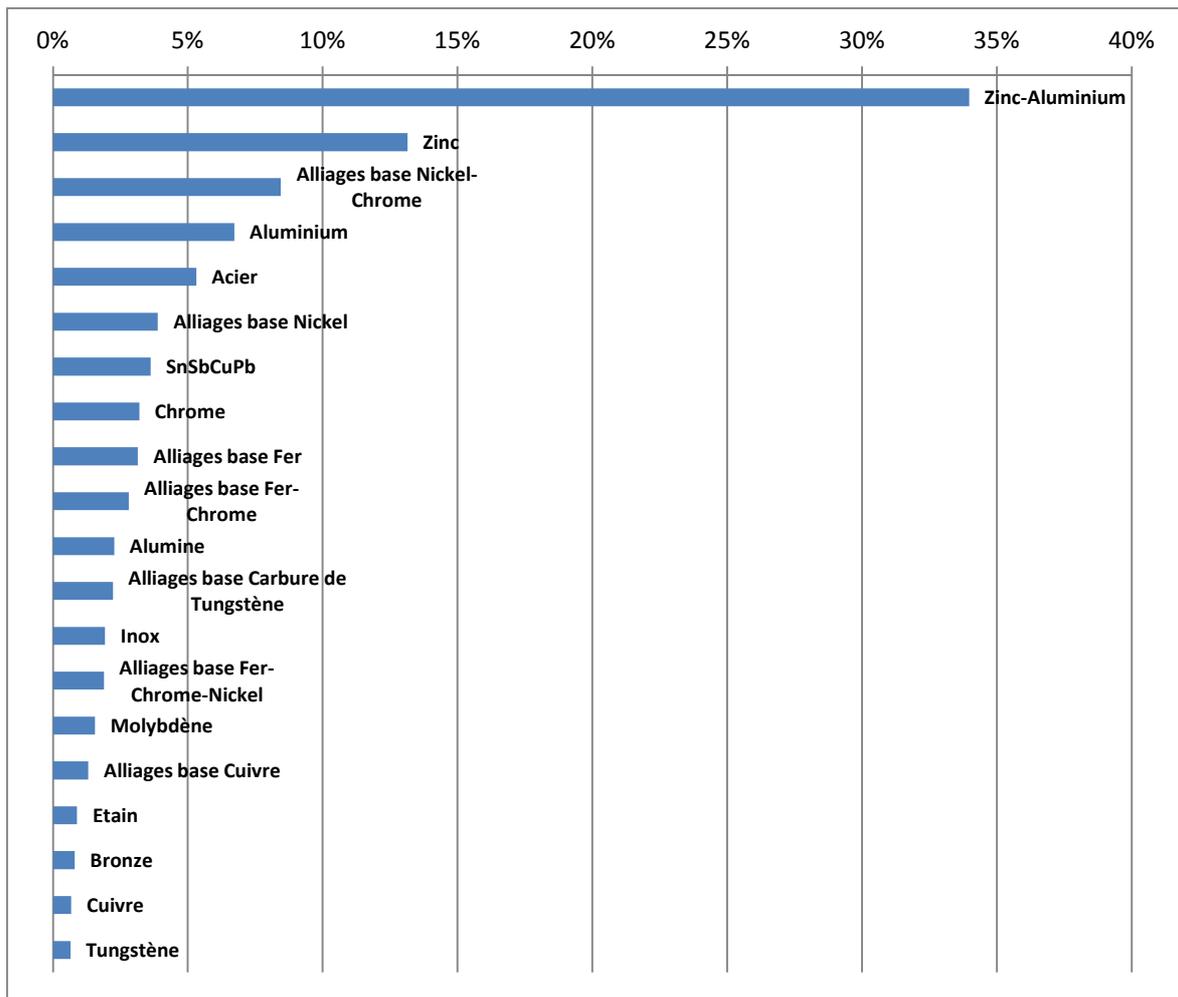


Figure 38 : Répartition des matériaux projetés par le procédé par flamme-fil

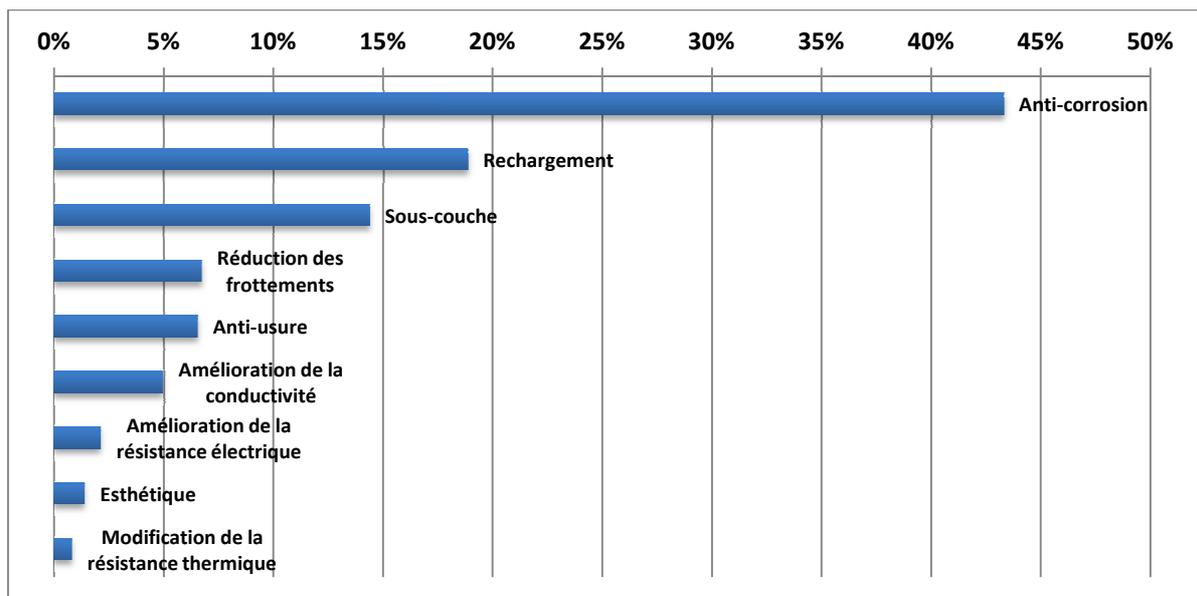


Figure 39 : Propriétés recherchées lors de la mise en œuvre de la projection thermique par flamme-fil

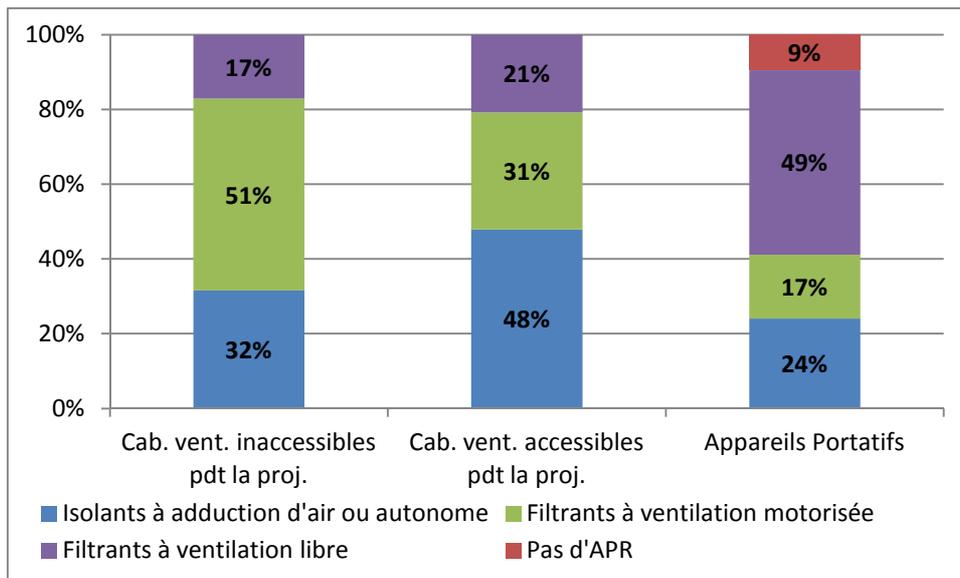


Figure 40 : Appareils de protection respiratoire en fonction du type d'installations pour le procédé flamme-fil

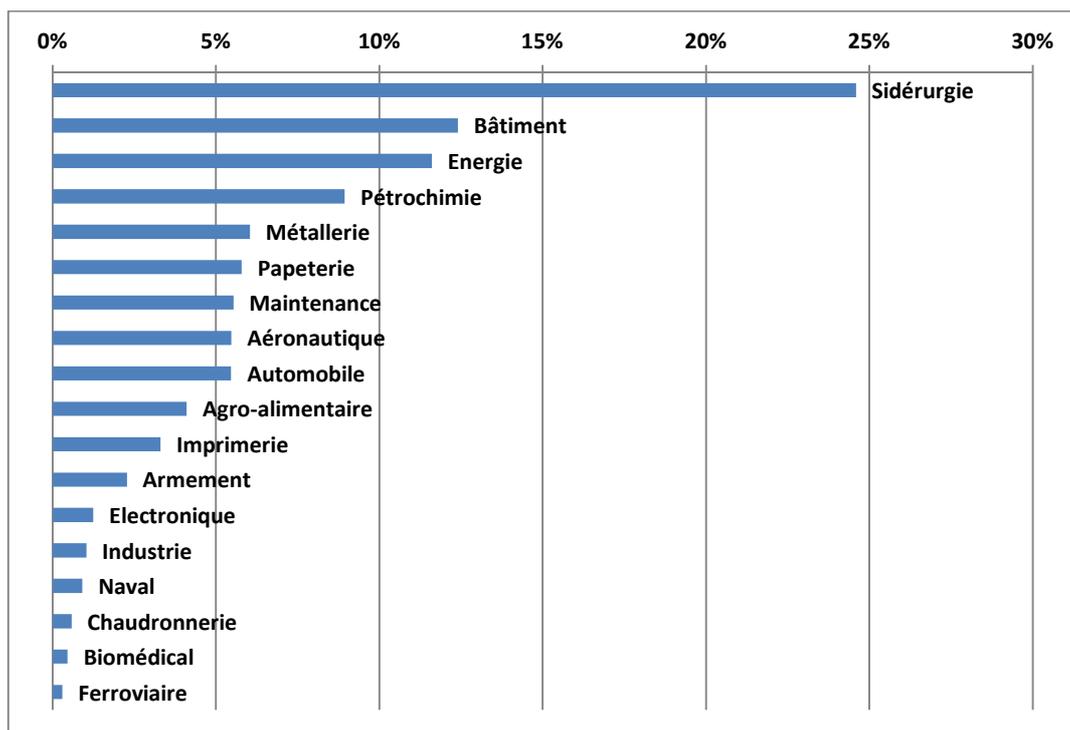


Figure 41 : Activité faisant appel aux prestataires de projection thermique par flamme-fil

PROCEDE PAR FLAMME-POUDRE

Les 208 établissements – dont 50 % emploient moins de 20 salariés (Figure 42) – utilisant le procédé par flamme-poudre sont présents principalement dans les régions Rhône-Alpes, Provence-Alpes-Côte-d’Azur (Figure 43). Les établissements appartiennent principalement aux secteurs de la réparation d’ouvrages, du travail des métaux et du revêtement des métaux (Figure 44). La majorité des installations sont des appareils portatifs (Figure 45). Ces installations sont utilisées pour projeter des alliages base nickel-chrome, base nickel ou du nickel pur pour effectuer du rechargement (Figure 46 et Figure 47). Elles sont utilisées par 392 salariés, dont 57 % utilisent des appareils portatifs, 22 % des installations automatiques placées dans des cabines ventilées accessibles pendant la projection et 21 % des installations automatiques placées dans des cabines ventilées accessibles pendant la projection. Dans 17 % des situations de projection thermique par flamme-poudre à l’aide d’appareils portatifs, il n’y a pas de port d’appareil de protection respiratoire (Figure 48). La sidérurgie est le principal secteur qui fait appel à la projection thermique par flamme-poudre (Figure 49).

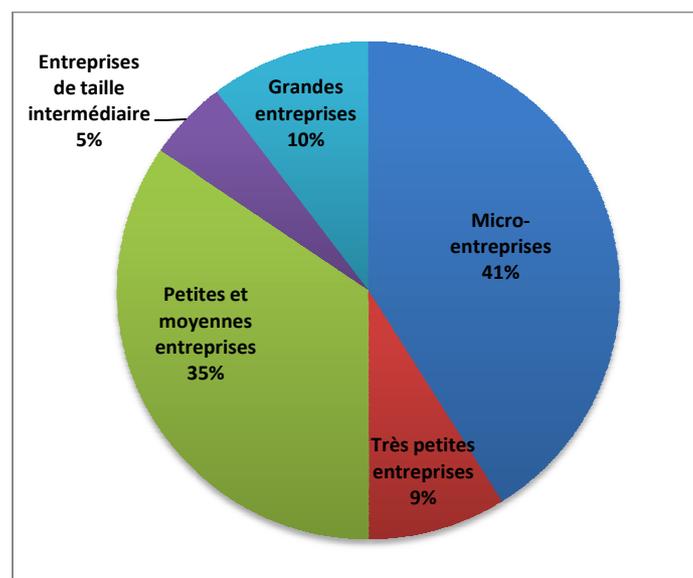


Figure 42 : Répartition des établissements faisant de la projection thermique par flamme-poudre en fonction de leur taille



© Géoclip 2012 - IGN GéoFla - Carte réalisée à partir de données importées par l'utilisateur.

Figure 43 : Répartition géographique des établissements faisant de la projection thermique par flamme-poudre

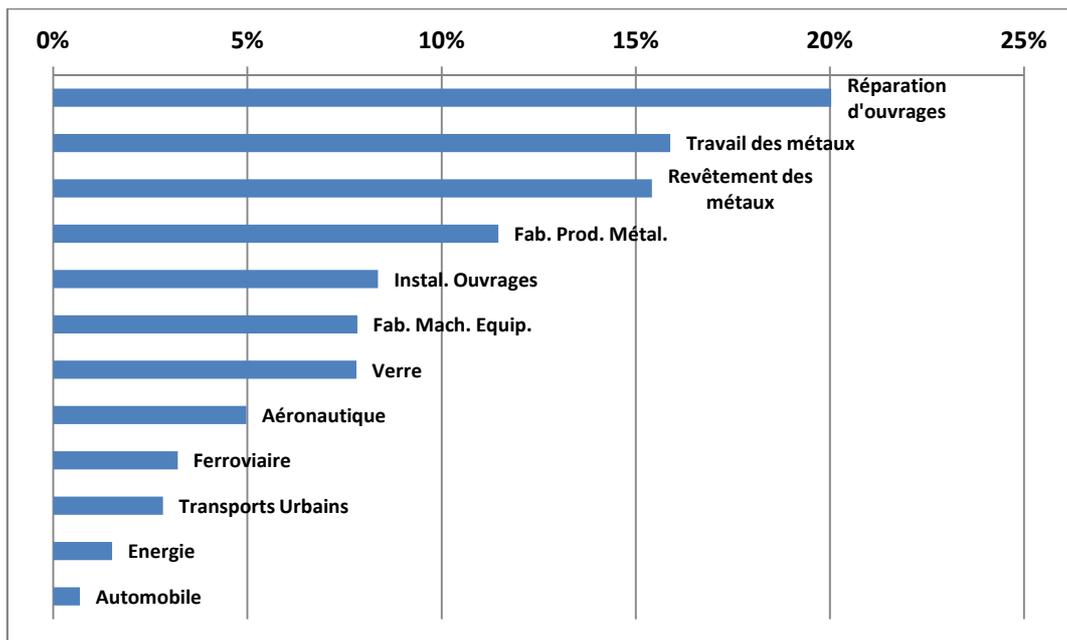


Figure 44 : Répartition des établissements faisant de la projection thermique par flamme-poudre en fonction de leur activité

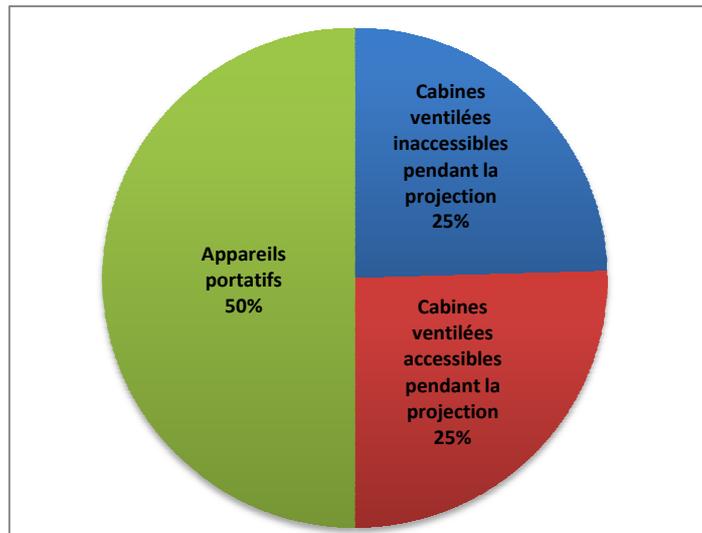


Figure 45 : Répartition des installations de projection par flamme-poudre en fonction de leur configuration

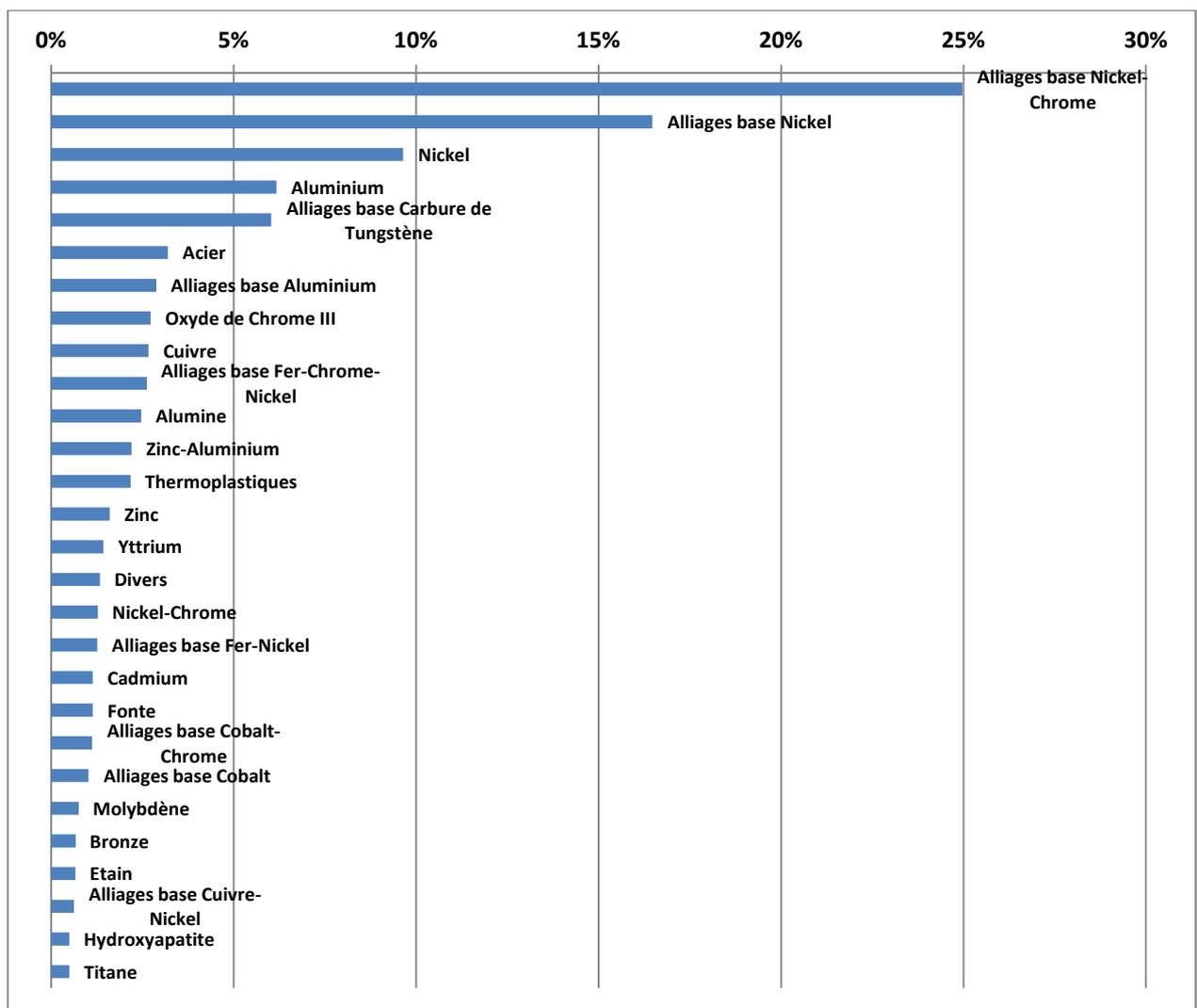


Figure 46 : Répartition des matériaux projetés par le procédé par flamme-poudre

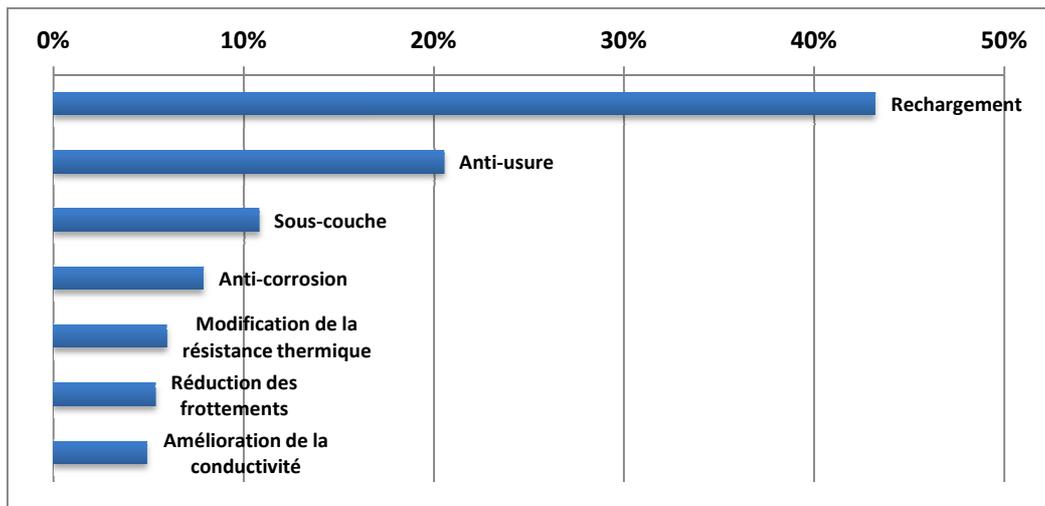


Figure 47 : Propriétés recherchées lors de la mise en œuvre de la projection thermique par flamme-poudre

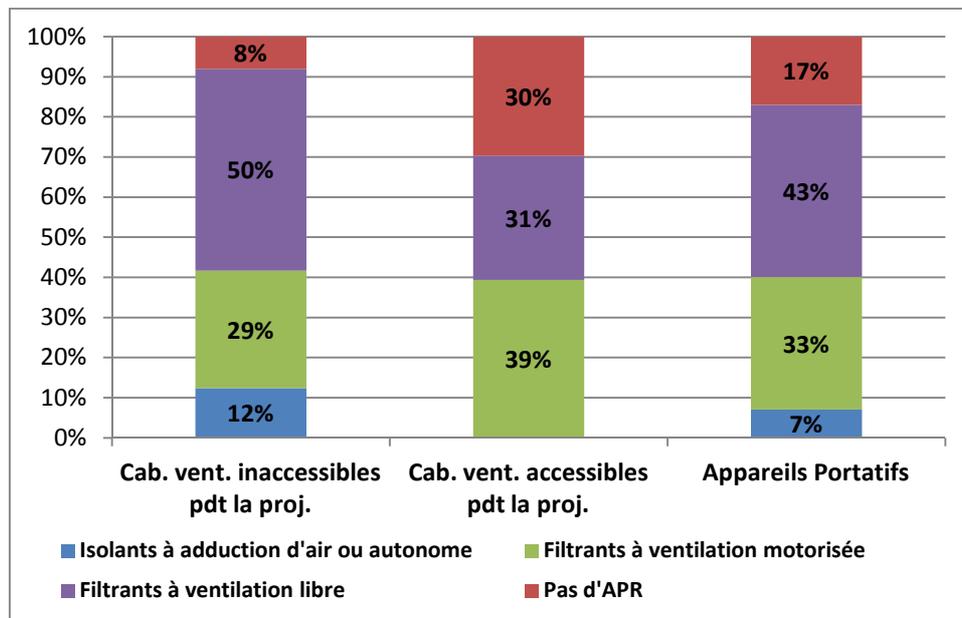


Figure 48 : Appareils de protection respiratoire en fonction du type d'installations pour le procédé flamme-poudre

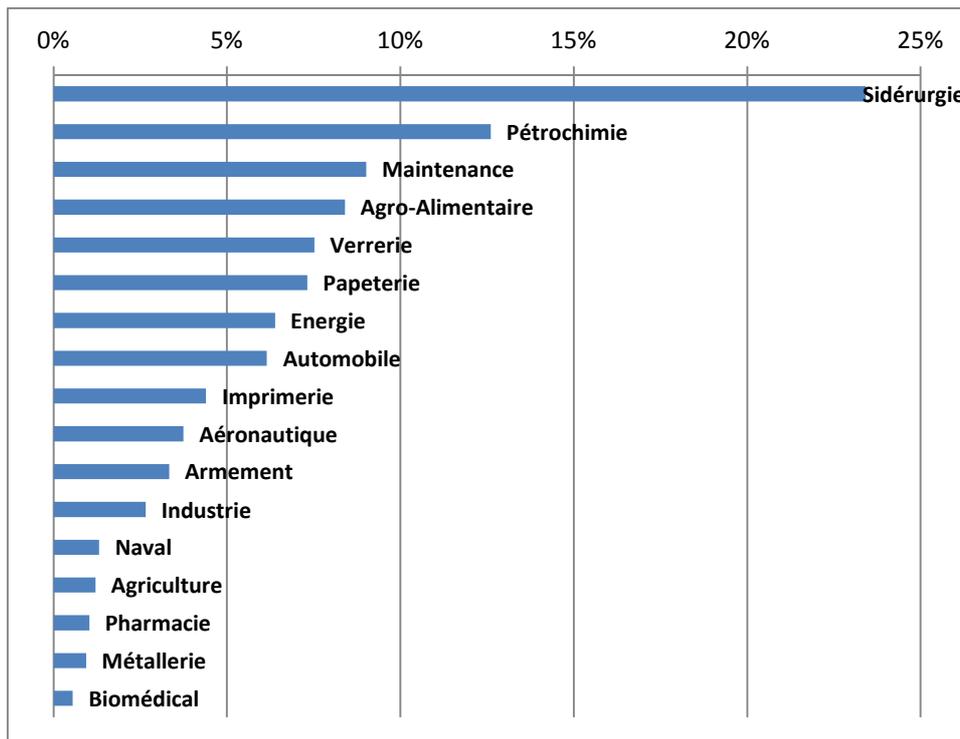


Figure 49 : Activités faisant appel aux prestataires de projection thermique par flamme-poudre

PROCEDE PAR PLASMA

Les 107 établissements – dont 59 % emploient moins de 20 salariés (Figure 50) – utilisant le procédé par plasma sont présents principalement dans les régions Rhône-Alpes, Auvergne, Alsace et Picardie (Figure 51). Les établissements appartiennent principalement au secteur du travail des métaux (Figure 52). La majorité des installations sont des cabines ventilées inaccessibles pendant la projection thermique. Il faut noter la présence d'appareils portatifs, ces installations sont moins exothermiques et utilisées pour projeter des revêtements sur des pièces de grand gabarit ne pouvant pas être placées dans les cabines (Figure 53). Ces installations sont utilisées pour projeter des alliages base nickel ou base de carbures de tungstène pour effectuer des traitements de réduction des frottements ou anti-usure (Figure 54 et Figure 55). Elles sont utilisées par 536 salariés, dont 68 % utilisent des appareils portatifs, 4 % des installations automatiques placées dans des cabines ventilées accessibles pendant la projection et 28 % des installations automatiques placées dans des cabines ventilées accessibles pendant la projection. Dans 13 % des situations de projection thermique par plasma à l'aide d'appareils portatifs, il n'y a pas de port d'appareil de protection respiratoire (Figure 56). Les secteurs de l'énergie, de l'aéronautique et de l'armement sont les principaux secteurs qui font appel à la projection thermique par plasma (Figure 57).

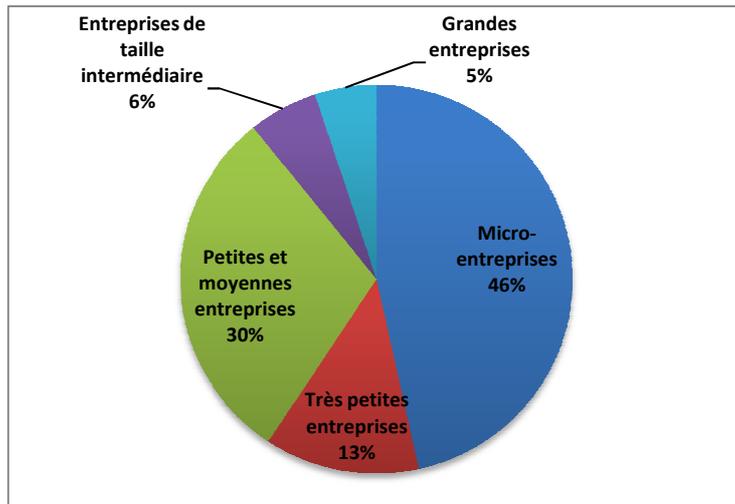


Figure 50 : Répartition des établissements faisant de la projection thermique par plasma en fonction de leur taille



Figure 51 : Répartition géographique des établissements faisant de la projection thermique par plasma

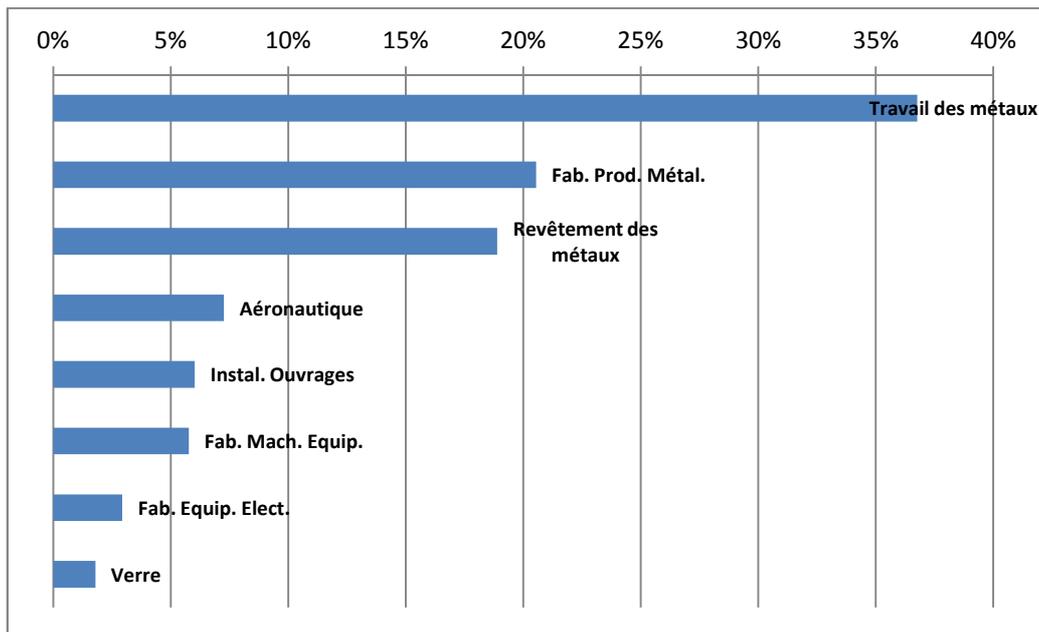


Figure 52 : Répartition des établissements faisant de la projection thermique par plasma en fonction de l'activité

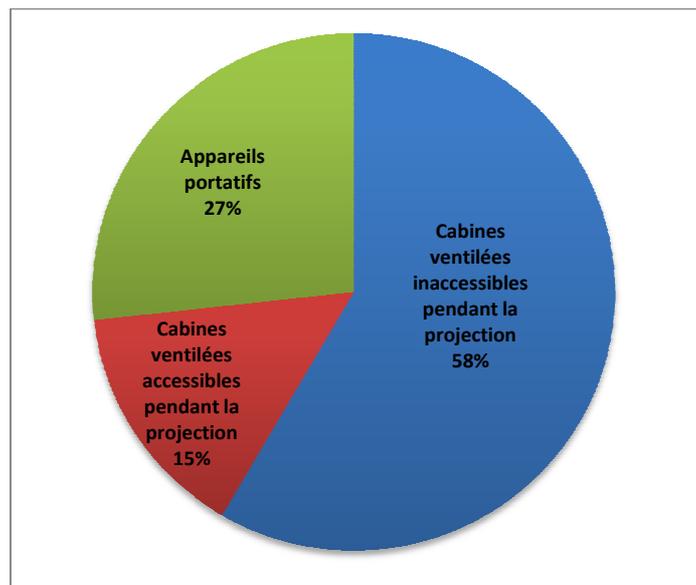


Figure 53 : Répartition des installations de projection par plasma en fonction de leur configuration

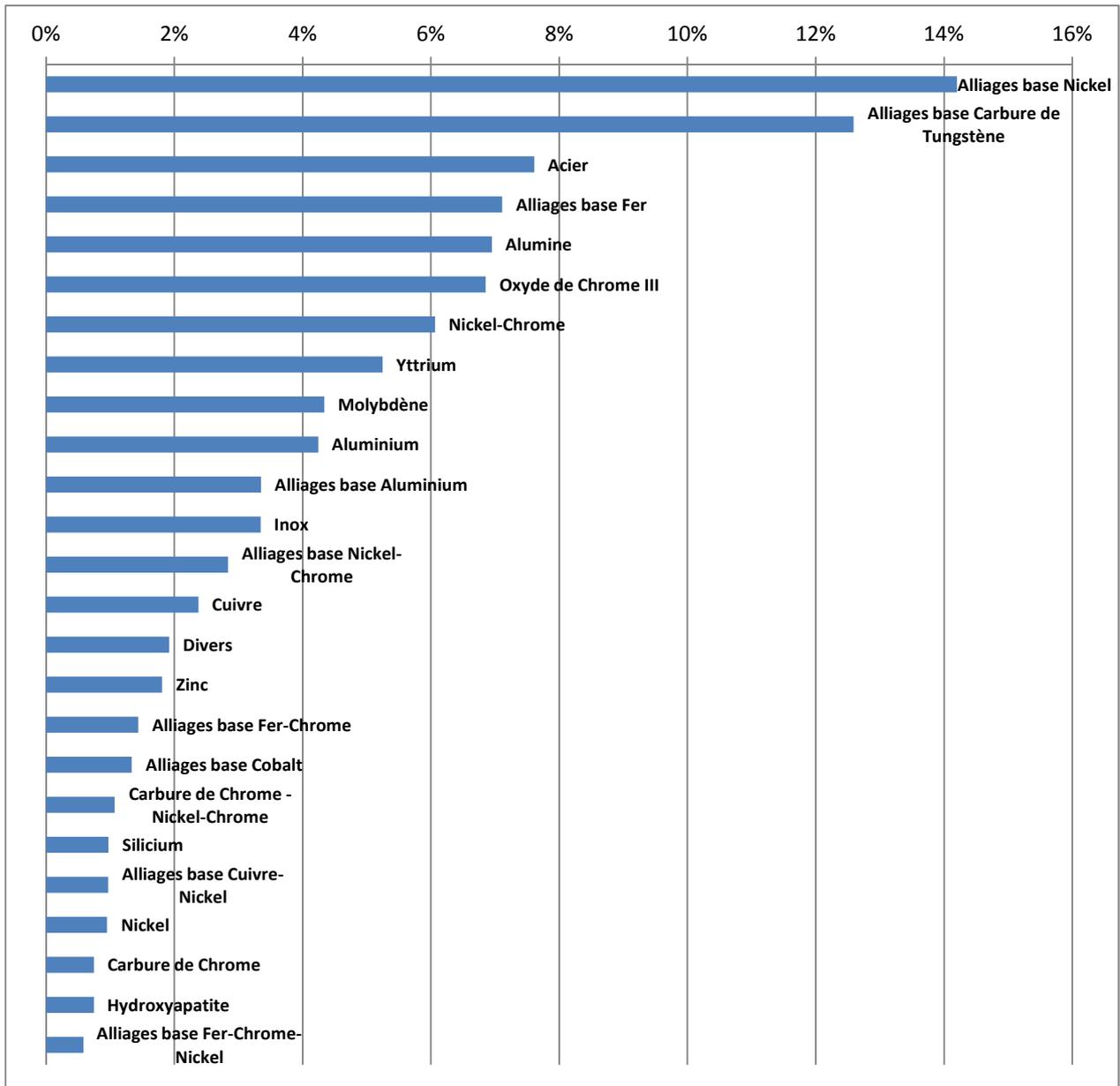


Figure 54 : Répartition des matériaux projetés par le procédé par plasma

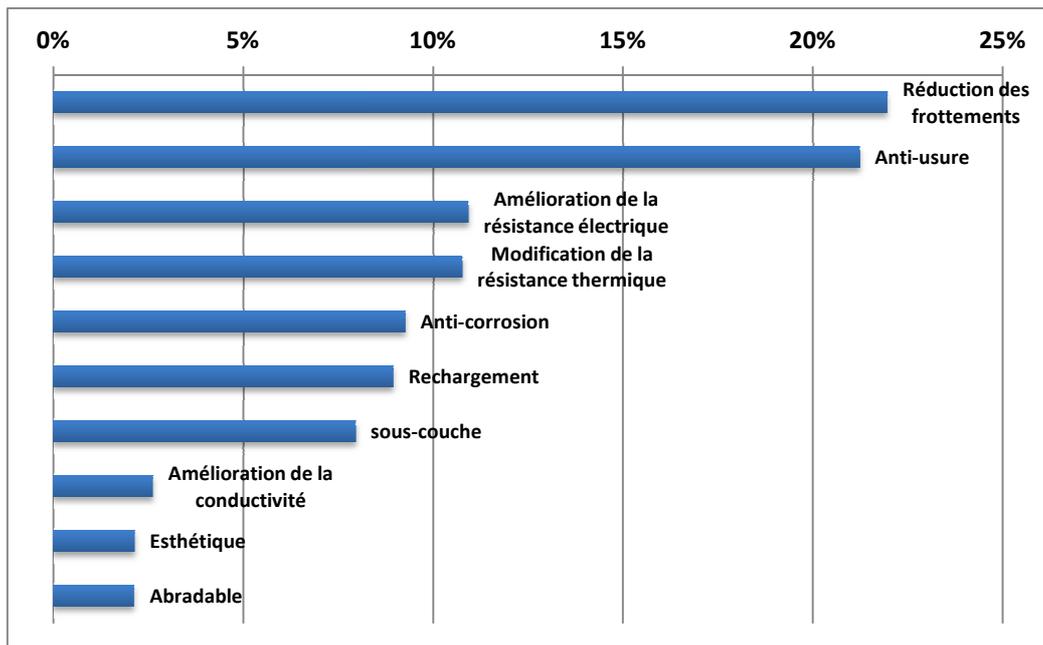


Figure 55 : Propriétés recherchées lors de la mise en œuvre de la projection thermique par plasma

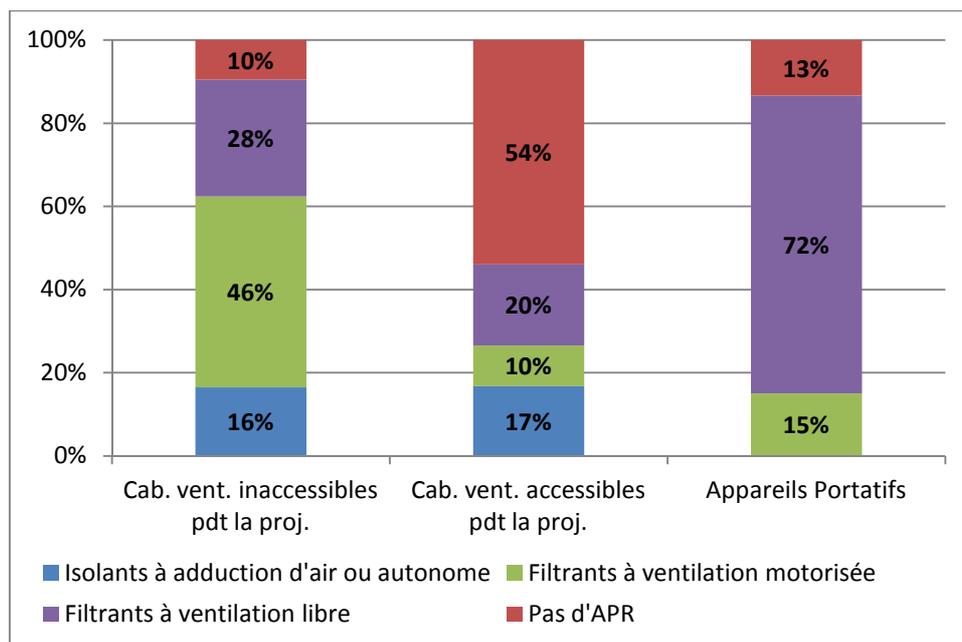


Figure 56 : Appareils de protection respiratoire en fonction du type d'installation pour le procédé plasma

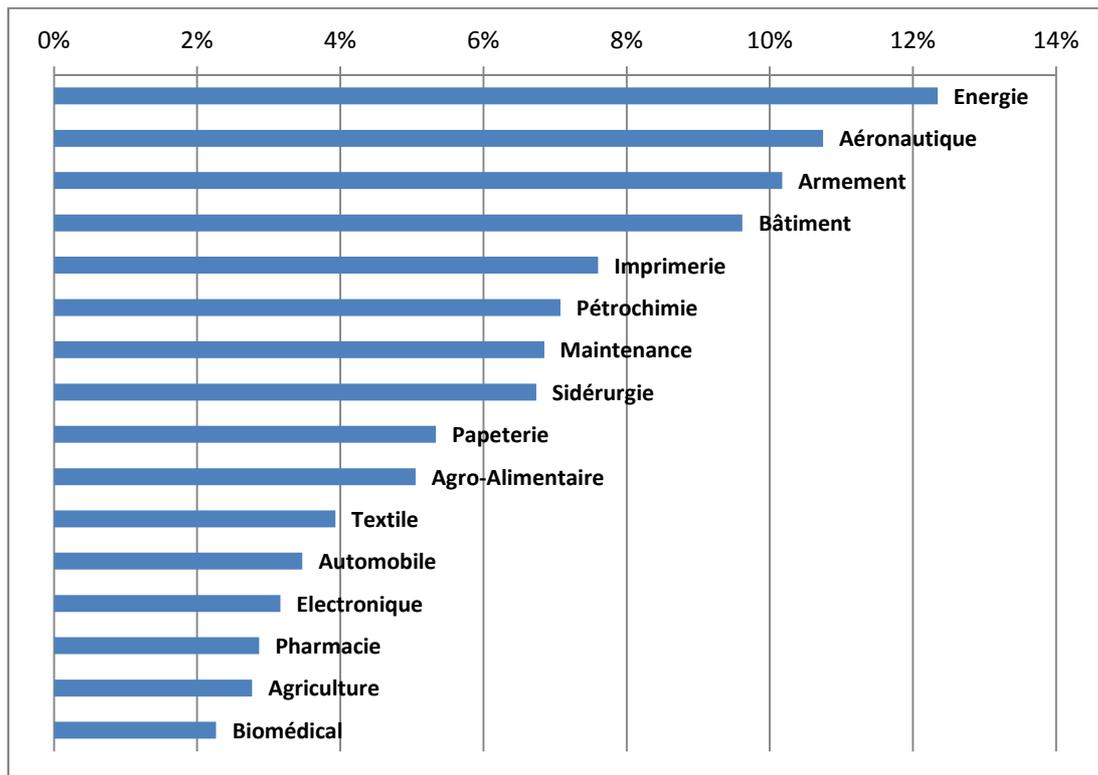


Figure 57 : Activités faisant appel aux prestataires de projection thermique par plasma

PROCEDE PAR HVOF

Les 51 établissements – dont 70 % emploient moins de 20 salariés (Figure 58) – utilisant le procédé par HVOF sont présents principalement dans les régions Rhône-Alpes, Alsace et Aquitaine (Figure 59). Les établissements appartiennent principalement au secteur du revêtement des métaux (Figure 60). La majorité des installations sont des cabines ventilées inaccessibles pendant la projection thermique. Il faut noter la présence d'appareils portatifs, ces installations sont moins exothermiques et utilisées pour projeter des revêtements sur des pièces de grand gabarit ne pouvant pas être placées dans les cabines (Figure 61). Ces installations sont utilisées pour projeter des alliages base de carbures de tungstène pour effectuer des traitements anti-usure (Figure 62 et Figure 63). Elles sont utilisées par 89 salariés, dont 15 % utilisent des appareils portatifs, 12 % des installations automatiques placées dans des cabines ventilées accessibles pendant la projection et 73 % des installations automatiques placées dans des cabines ventilées accessibles pendant la projection. Lors de l'utilisation des appareils portatifs, le port de filtres à ventilation motorisé est effectif dans 100 % des situations (Figure 64). Les secteurs de la papeterie, de la sidérurgie et de l'agro-alimentaire sont les principaux secteurs qui font appel à la projection thermique par HVOF (Figure 65).

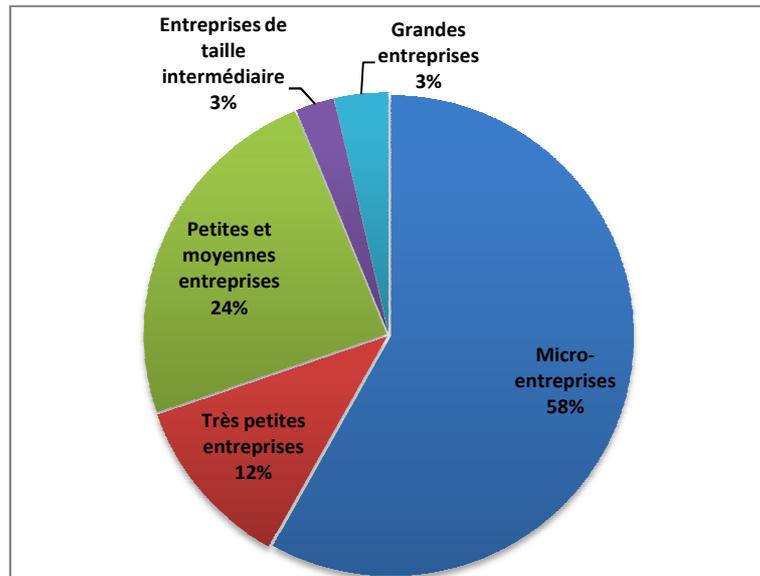


Figure 58 : Répartition des établissements faisant de la projection thermique par HVOF en fonction de leur taille



© Géoclip 2012 - IGN GéoFla - Carte réalisée à partir de données importées par l'utilisateur.

Figure 59 : Répartition géographique des établissements faisant de la projection thermique par HVOF

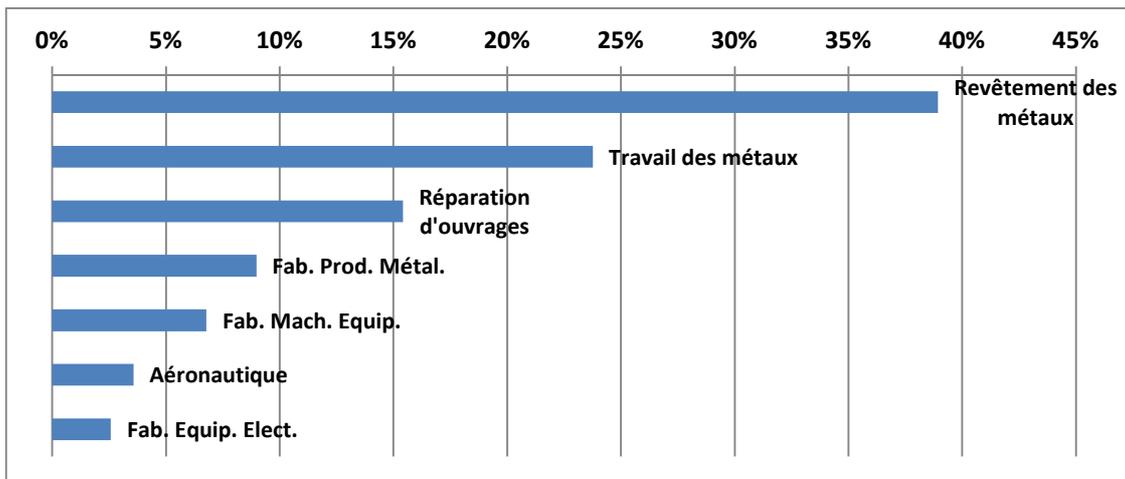


Figure 60 : Répartition des établissements faisant de la projection thermique par HVOF en fonction de l'activité

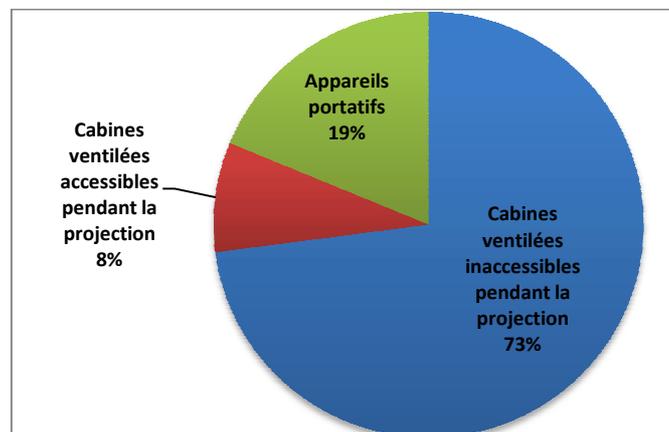


Figure 61 : Répartition des installations de projection par HVOF en fonction de leur configuration

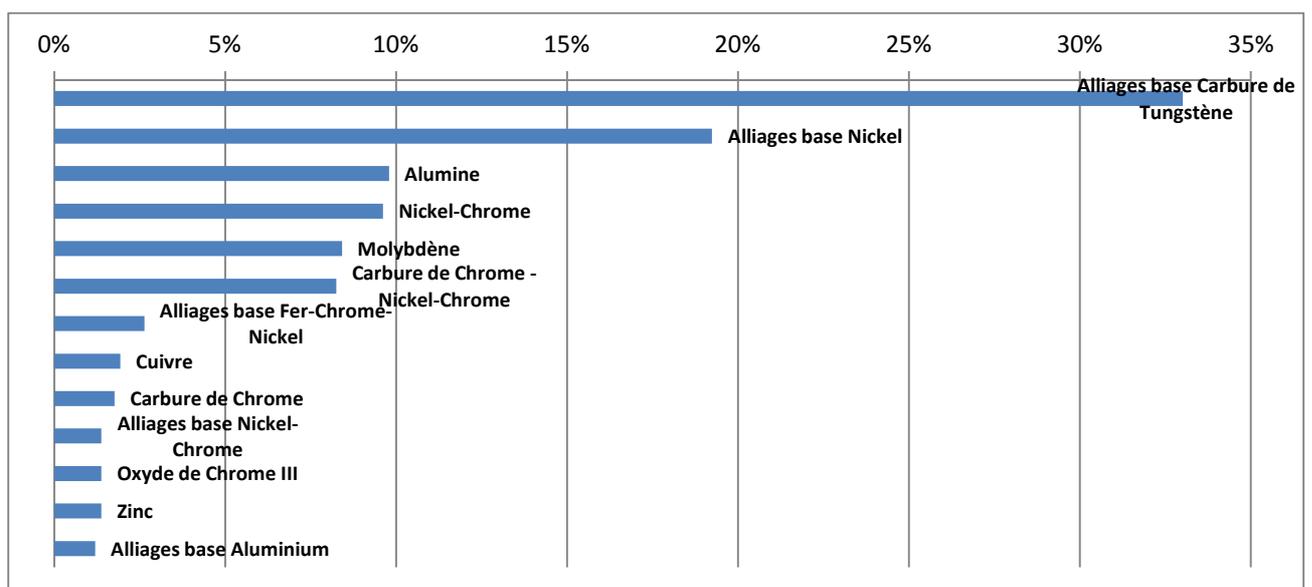


Figure 62 : Répartition des matériaux projetés par le procédé par HVOF

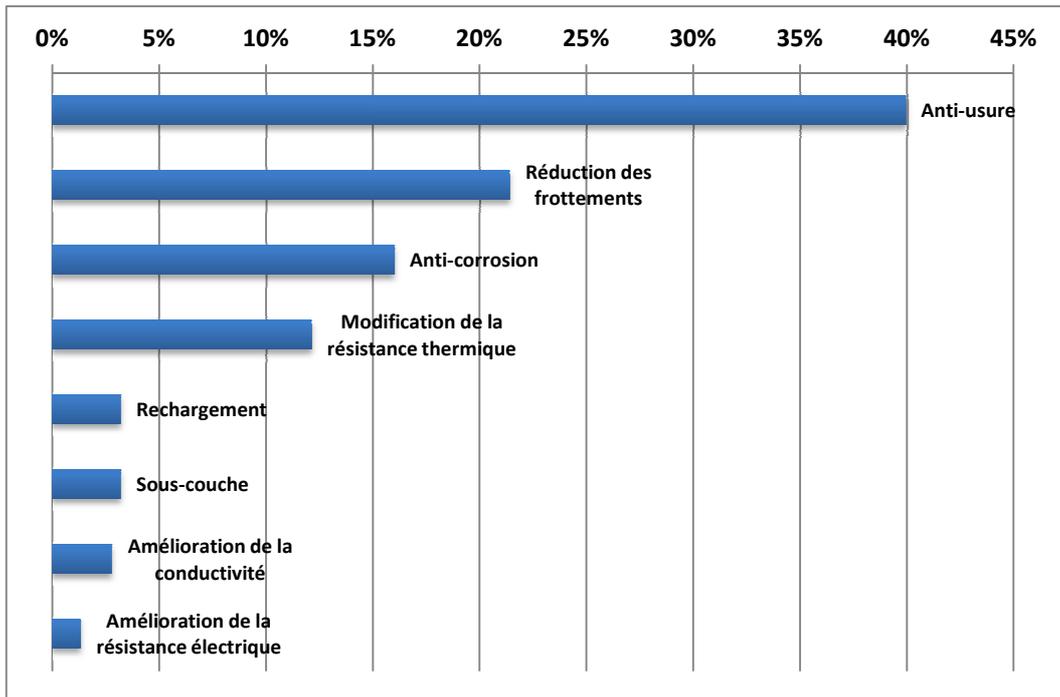


Figure 63 : Propriétés recherchées lors de la mise en œuvre de la projection thermique par HVOF

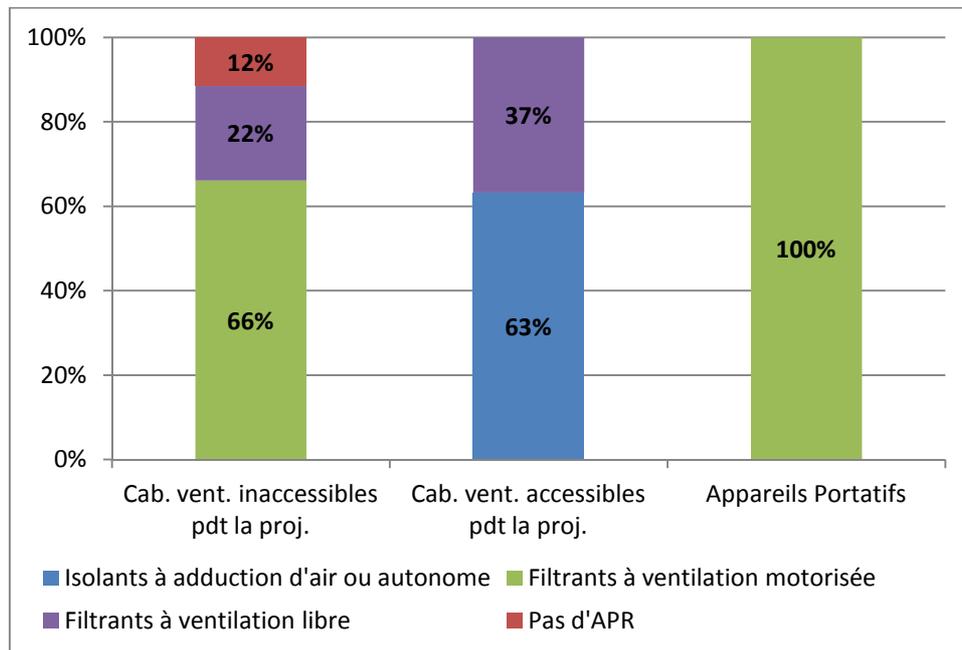


Figure 64 : Appareils de protection respiratoire en fonction du type d'installations pour le procédé HVOF

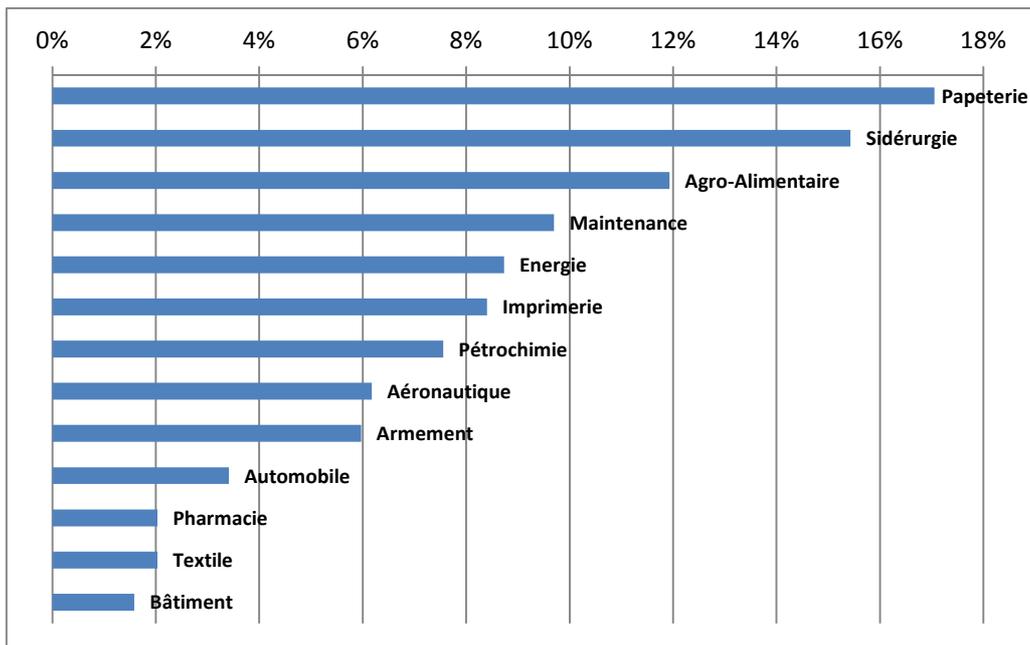


Figure 65 : Activités faisant appel aux prestataires de projection thermique par HVOF

SECTEUR DU TRAITEMENT ET DU REVETEMENT DES METAUX

Dans ce secteur, la projection thermique est très présente, puisque, d'après la Figure 11, plus de 12 % des établissements de ce secteur sont équipés d'installations de projection thermique. Il s'agit essentiellement d'établissements de moins de 20 salariés. Dans ce secteur, il n'y a pas d'établissements de plus de 250 salariés (Figure 66). Ils sont localisés sur tout le territoire, mais leur densité est plus importante dans les régions Rhône-Alpes et Pays-de-la-Loire (Figure 67).

Les 5 procédés sont présents simultanément dans 4 % des établissements alors que 77 % des établissements ne possèdent qu'un seul procédé (Figure 68). Les procédés flamme-fil et arc électrique sont les plus présents avec 39 % et 36 % respectivement (Figure 69). Pour les procédés par arc électrique, flamme-fil et flamme-poudre, la majorité des installations sont des appareils portatifs, alors que pour les procédés par plasma et par HVOF, les installations sont des cabines ventilées inaccessibles pendant la projection thermique (Figure 70). Dans ce secteur et contrairement aux autres secteurs, il est rare que les opérateurs ne portent pas d'APR pendant les opérations de projection, mis à part pour la projection flamme-poudre (Figure 71).

Dans ce secteur, le zinc aluminium est le matériau le plus projeté, tous procédés confondus (Figure 72). Cependant, les matériaux projetés dépendent du procédé :

- Pour les procédés par arc électrique et par flamme-fil, le zinc-aluminium est le matériau le plus projeté (Figure 73 et Figure 74) ;
- Pour le procédé par flamme-poudre, les alliages base nickel sont les matériaux les plus projetés (Figure 75) ;
- Pour le procédé par plasma, les oxydes (oxyde de chrome, alumine...) sont les matériaux les plus projetés (Figure 76) ;

- Pour le procédé par HVOF, les alliages base carbure de tungstène sont les matériaux les plus projetés (Figure 77).

La projection de zinc-aluminium a pour but principal le traitement anti-corrosion dans le secteur de traitement et du revêtement de surface (Figure 78). Les propriétés recherchées sont fonction du procédé utilisé.

- Pour le procédé par arc électrique, il s'agit en majorité de la propriété anti-corrosion du zinc-aluminium, du zinc ou de l'aluminium (Figure 79) ;
- Pour le procédé par flamme-fil, il s'agit également de la propriété anti-corrosion du zinc-aluminium (Figure 80) ;
- Pour le procédé par flamme-poudre, il s'agit de la propriété anti-corrosion, pour appliquer une sous-couche ou pour effectuer du rechargement (Figure 81) ;
- Pour le procédé par plasma, la projection thermique permet d'améliorer la résistance électrique, de modifier la résistance thermique ou de réduire les frottements essentiellement par application d'oxydes métalliques (Figure 82) ;
- Pour le procédé par HVOF, la projection thermique permet d'effectuer un traitement anti-usure par application de carbure (Figure 83).

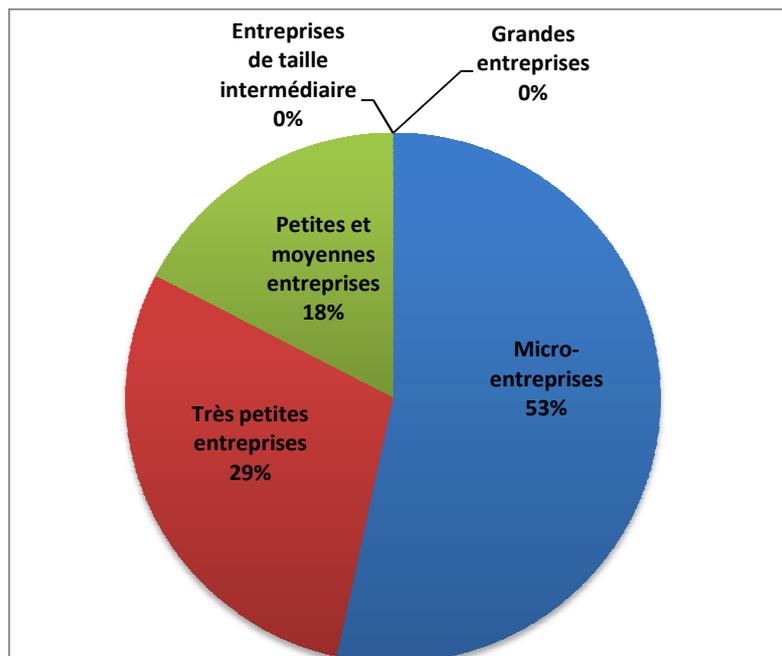


Figure 66 : Répartition des établissements faisant de la projection thermique dans le secteur du revêtement des métaux en fonction de leur taille



© Géoclip 2012 - IGN GéoFla - Carte réalisée à partir de données importées par l'utilisateur.

Figure 67 : Répartition géographique des établissements faisant de la projection thermique dans le secteur du revêtement des métaux

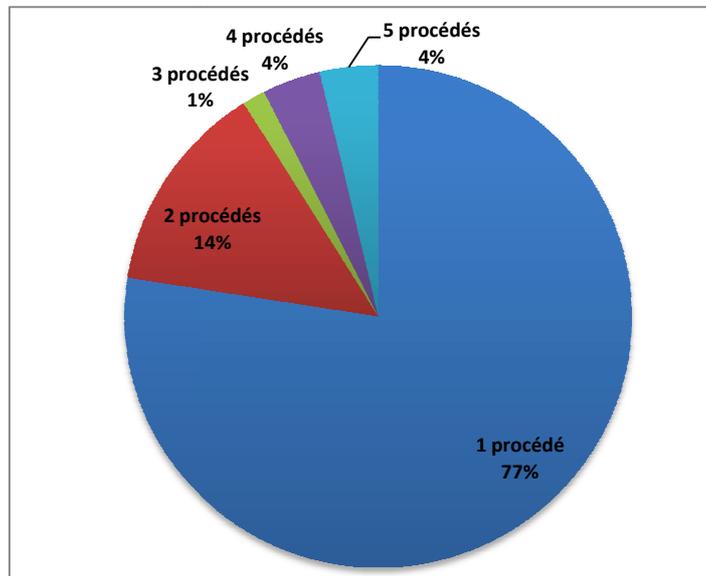


Figure 68 : Nombre de procédés présents dans les établissements du secteur 2561Z

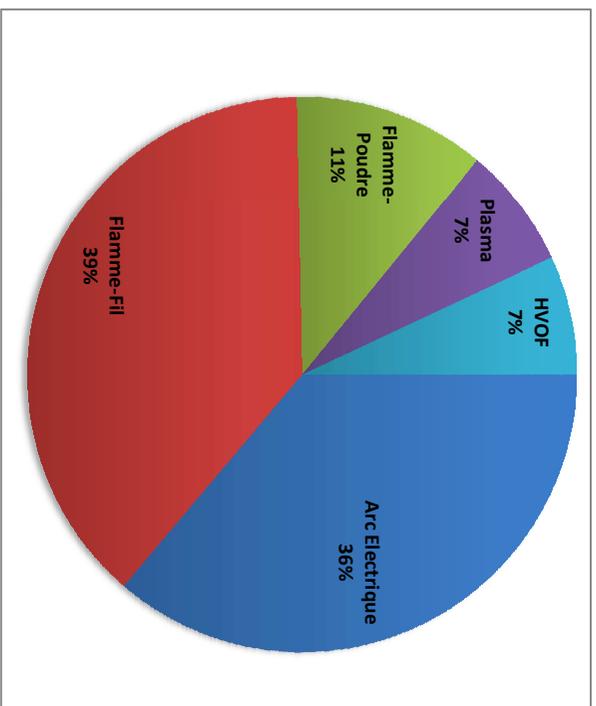


Figure 69 : Représentativité des 5 procédés dans le secteur 2561Z

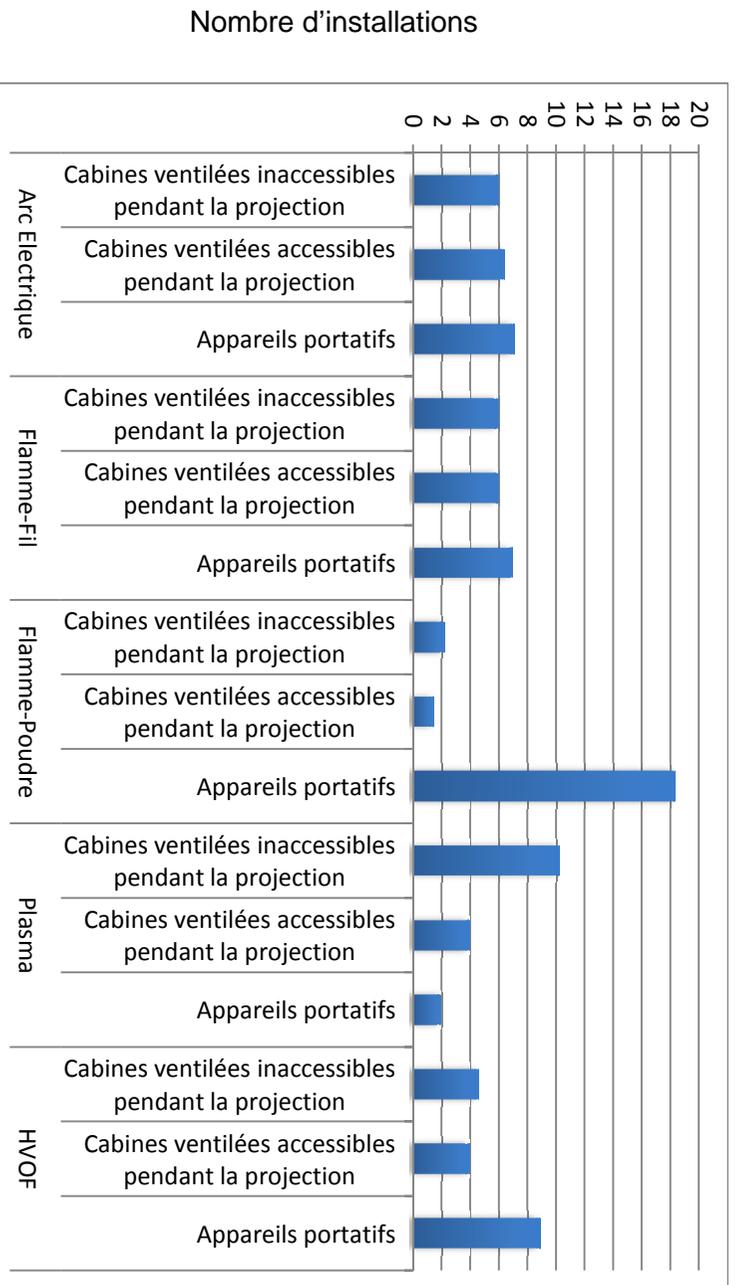


Figure 70 : Répartition des installations en fonction des procédés dans le secteur 2561Z

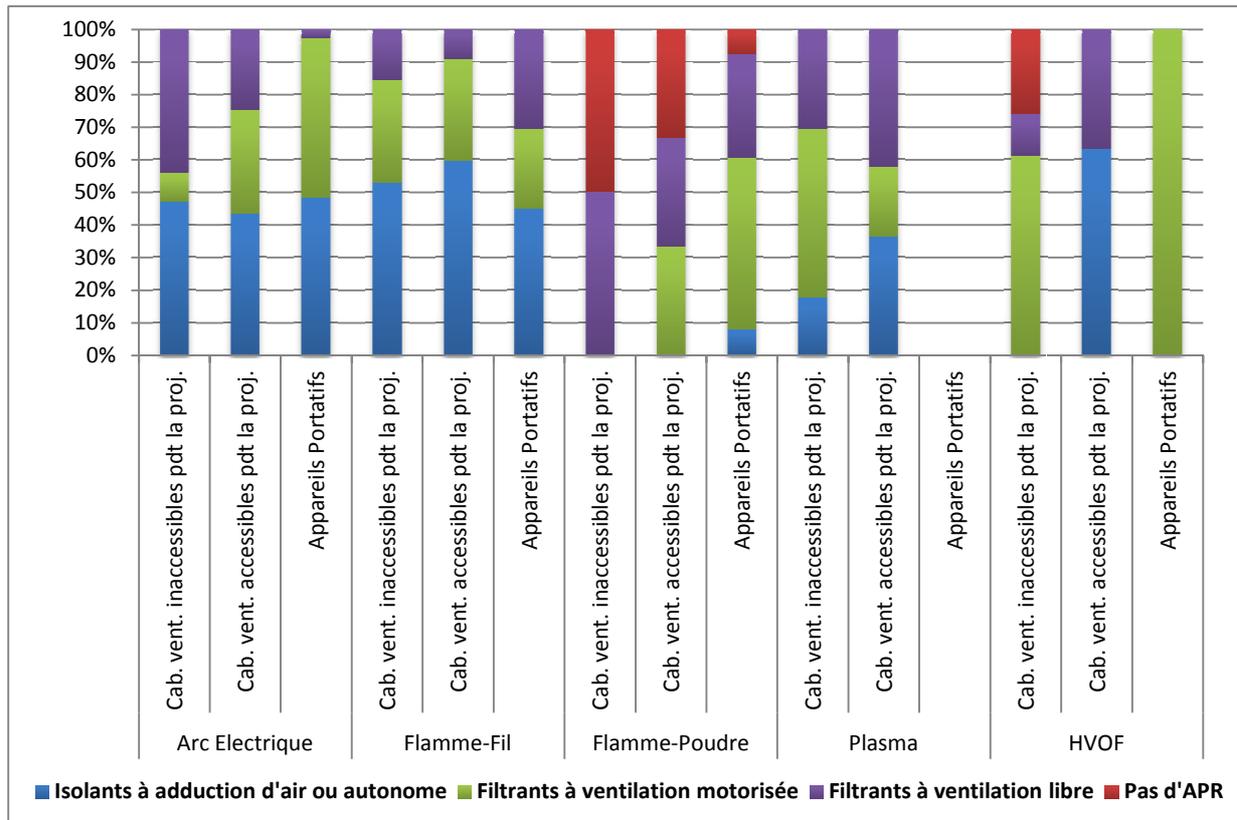


Figure 71 : Appareils de protection respiratoire en fonction des installations pour chaque procédé

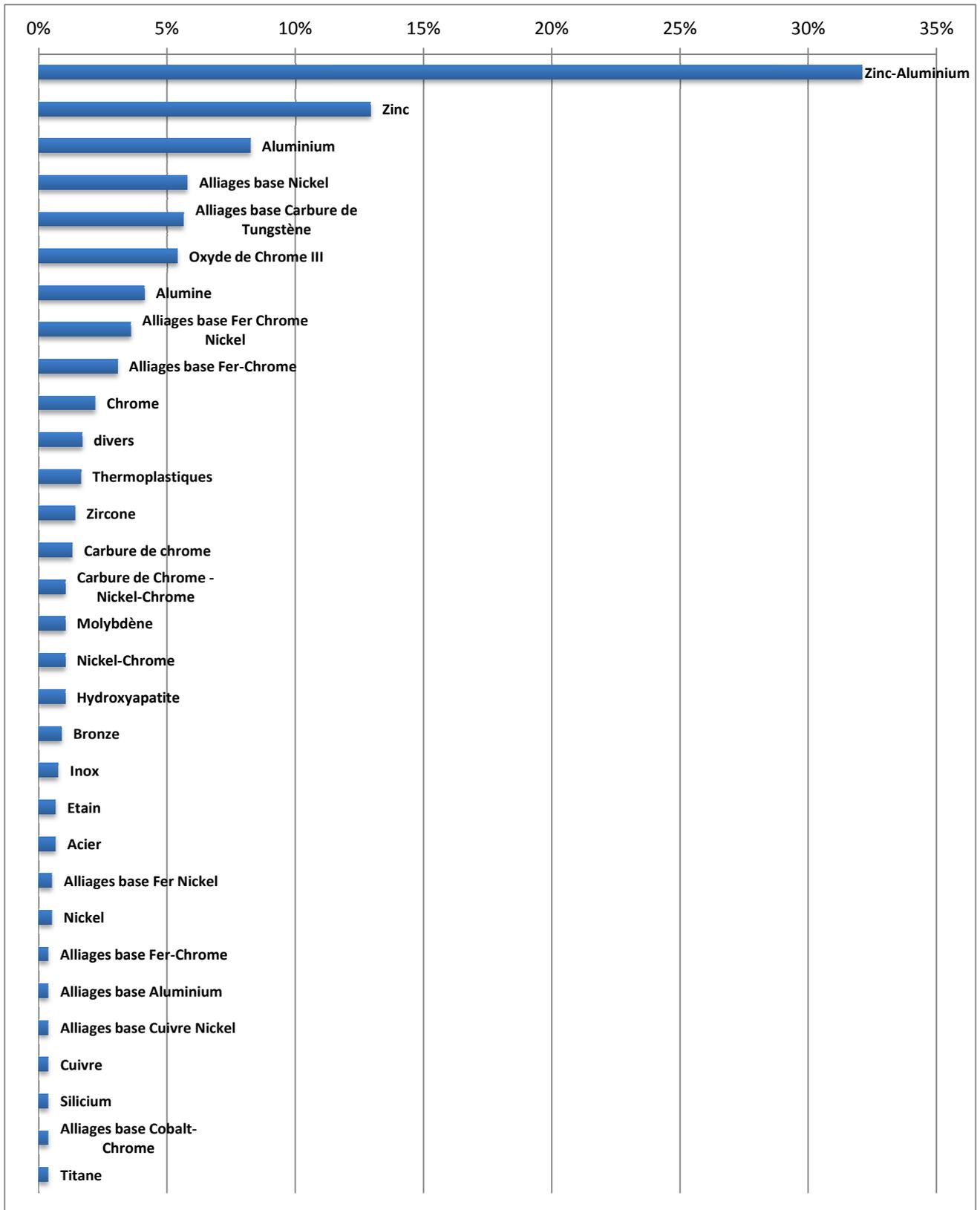


Figure 72 : Répartition des matériaux projetés dans le secteur 2561Z

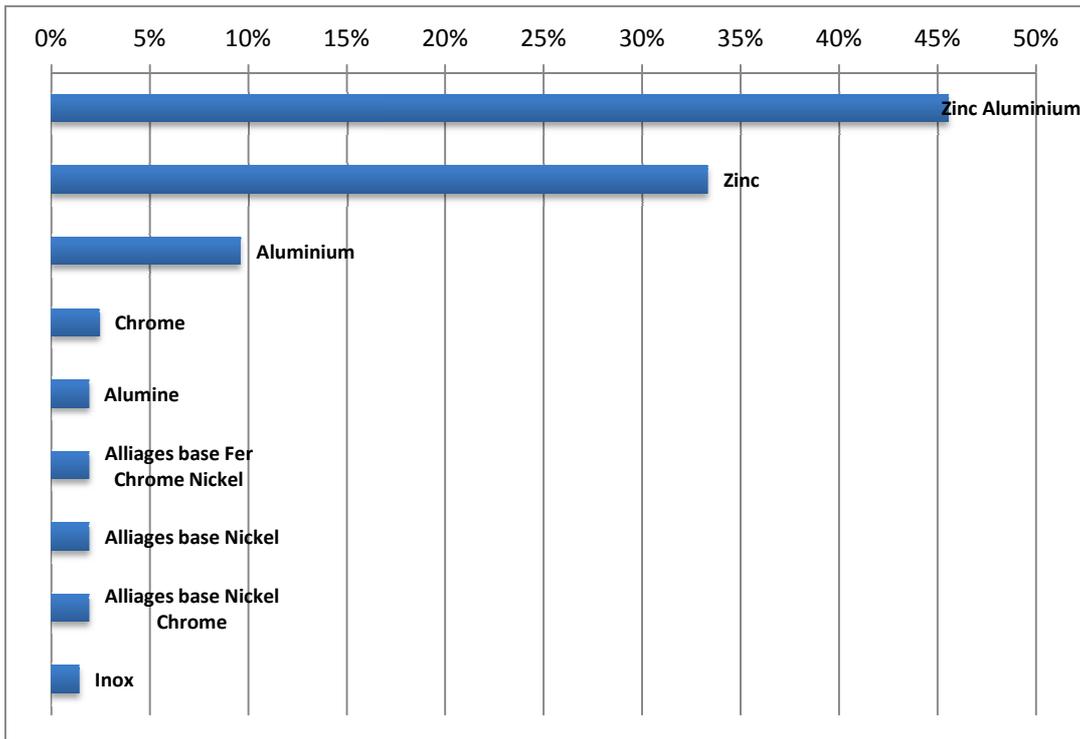


Figure 73 : Répartition des matériaux projetés avec le procédé par arc électrique dans le secteur 2561Z

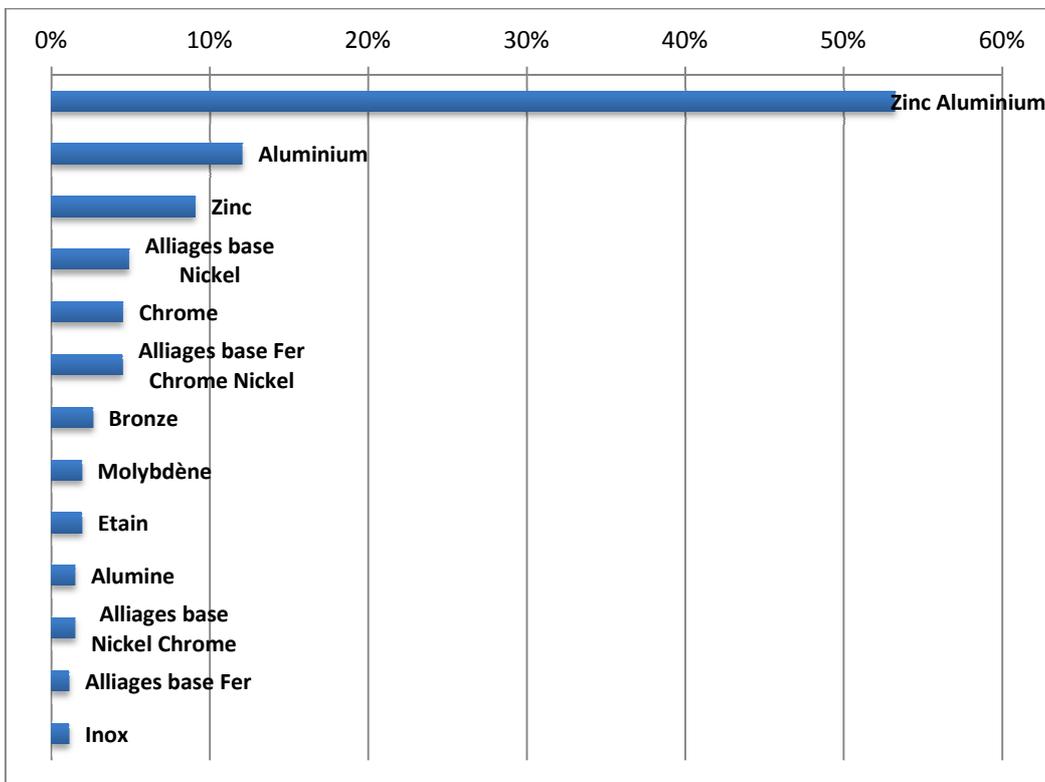


Figure 74 : Répartition des matériaux projetés avec le procédé par flamme-fil dans le secteur 2561Z

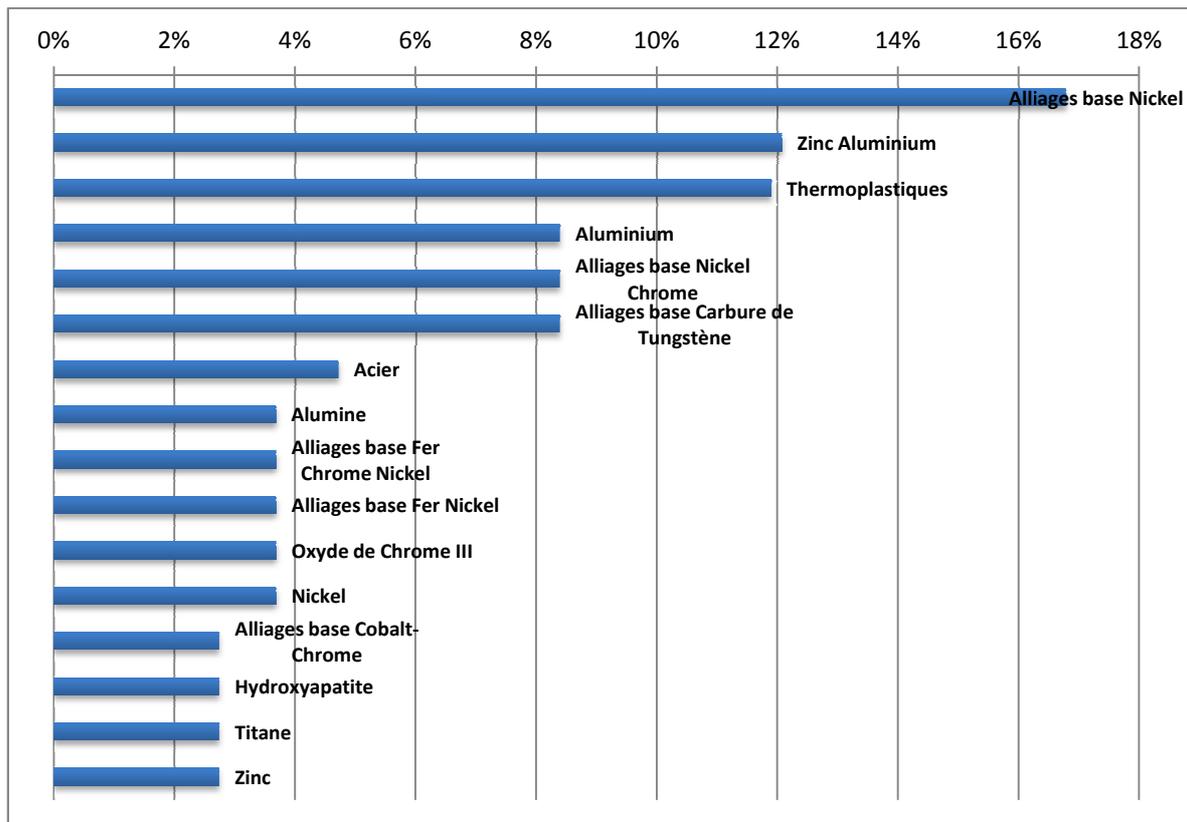


Figure 75 : Répartition des matériaux projetés avec le procédé par flamme-poudre dans le secteur 2561Z

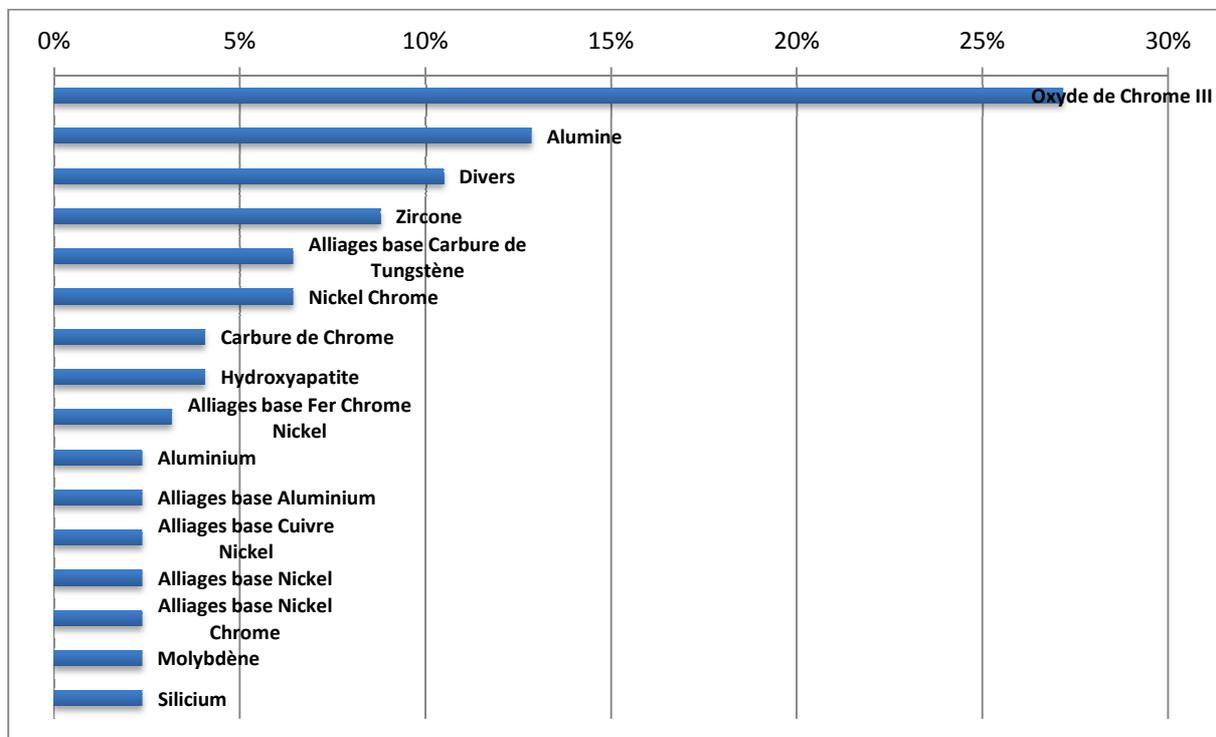


Figure 76 : Répartition des matériaux projetés avec le procédé par plasma dans le secteur 2561Z

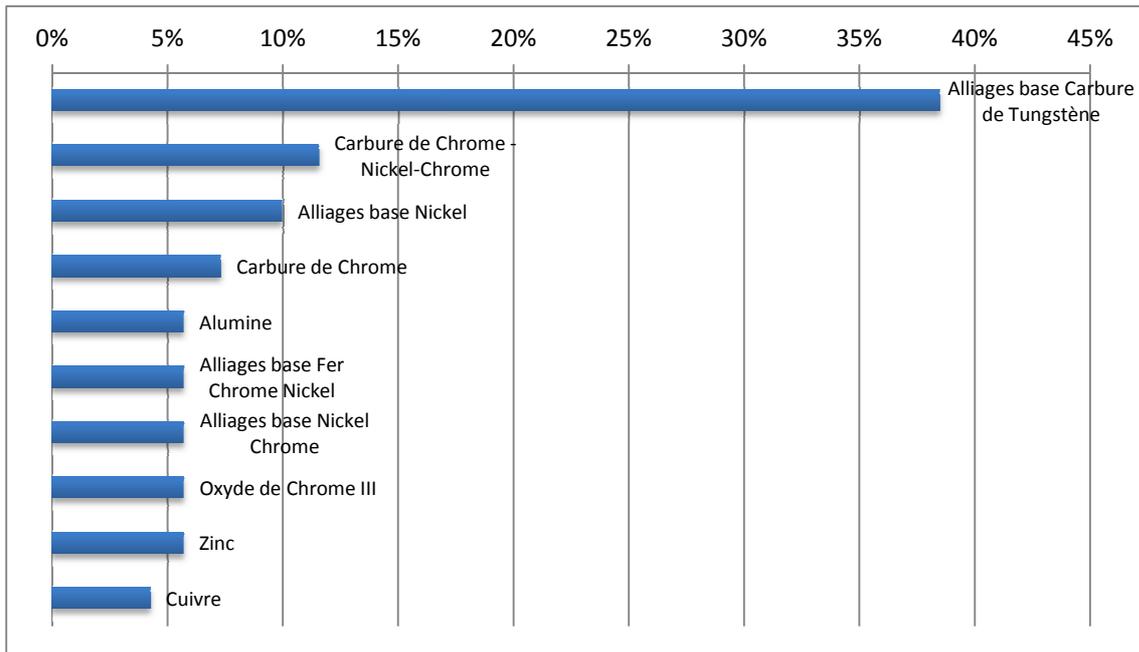


Figure 77 : Répartition des matériaux projetés avec le procédé par HVOF dans le secteur 2561Z

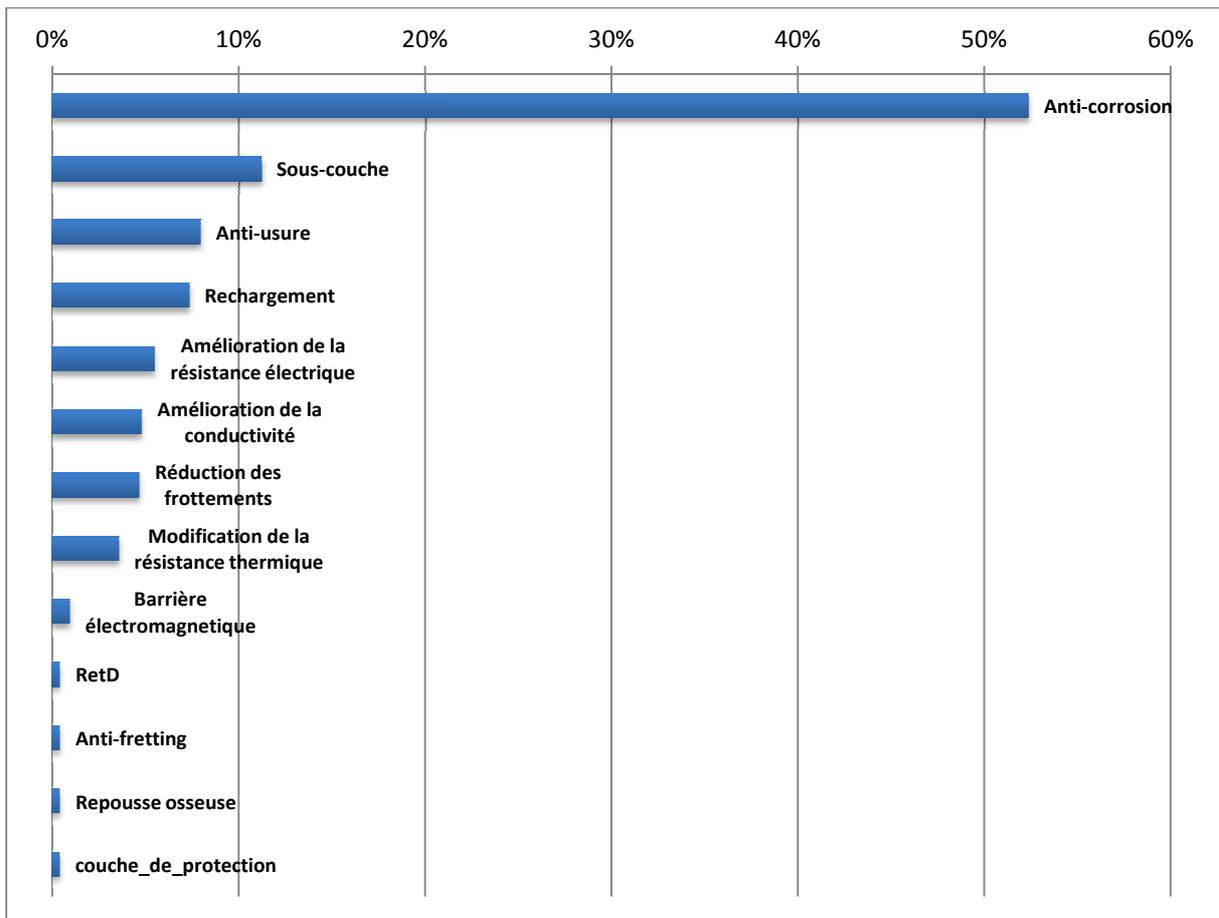


Figure 78 : Propriétés recherchées lors de la projection thermique dans le secteur 2561Z

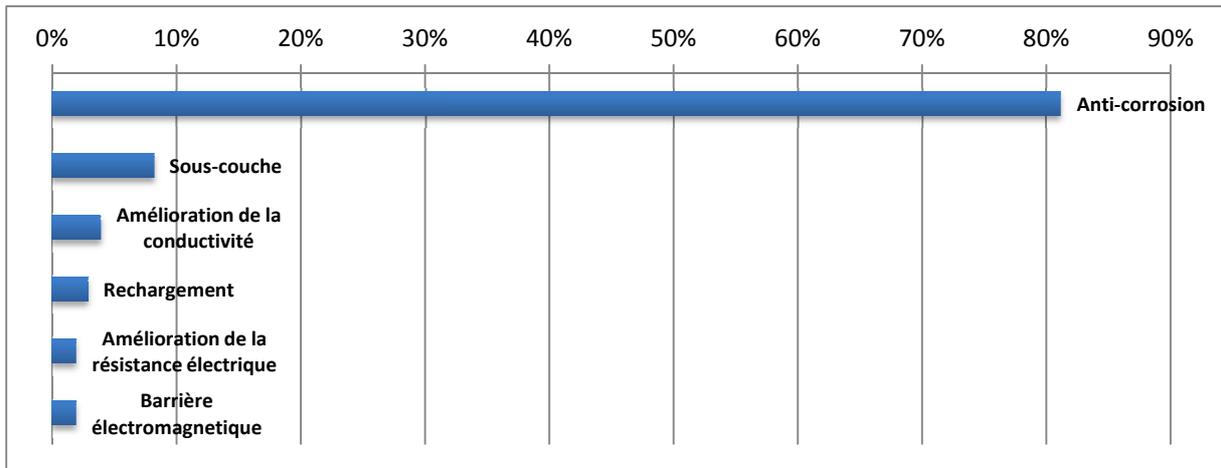


Figure 79 : Propriétés recherchées lors de la projection thermique par arc électrique dans le secteur 2561Z

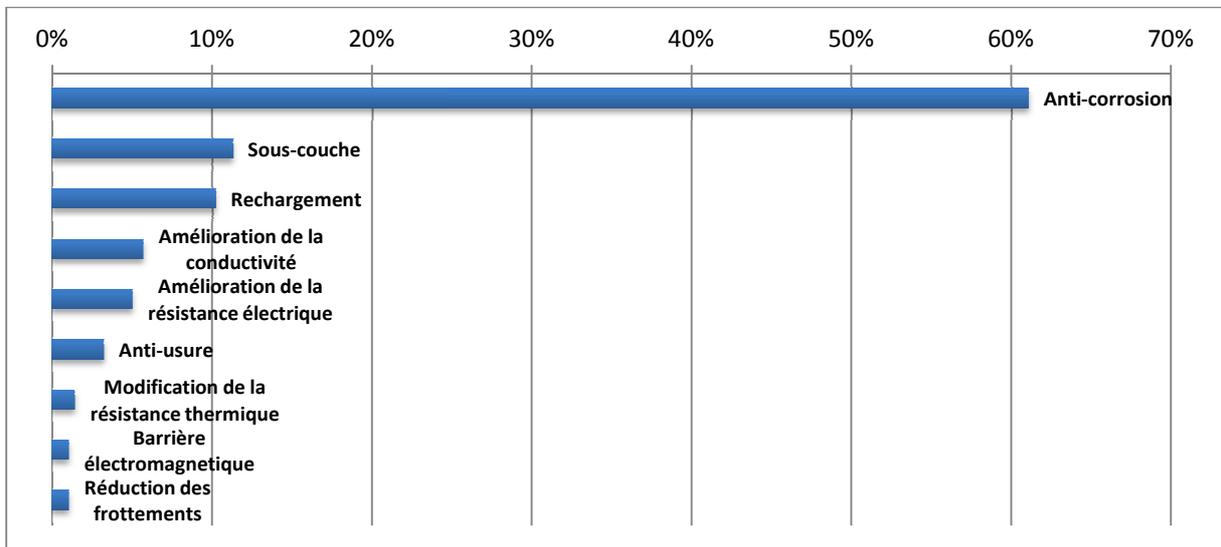


Figure 80 : Propriétés recherchées lors de la projection thermique par flamme-fil dans le secteur 2561Z

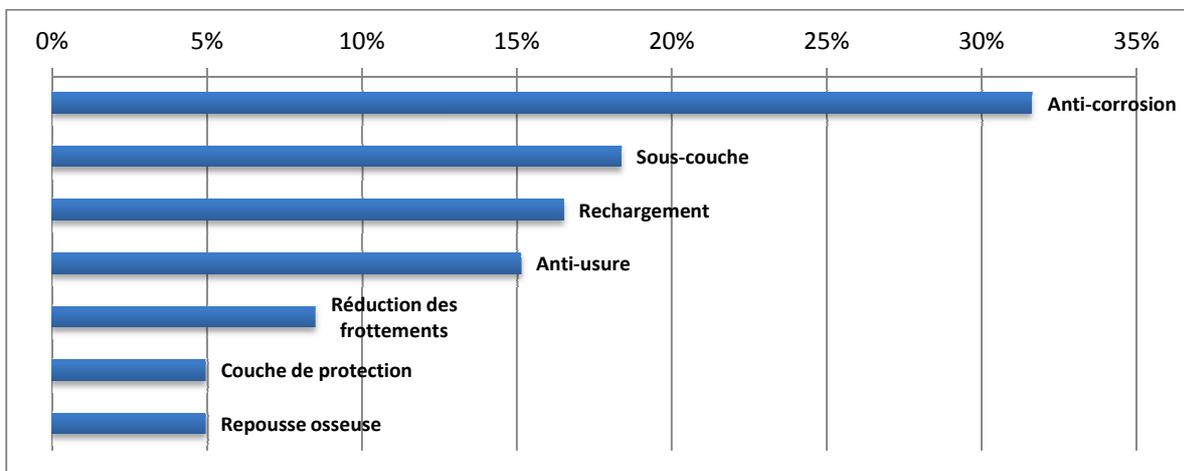


Figure 81 : Propriétés recherchées lors de la projection thermique par flamme-poudre dans le secteur 2561Z

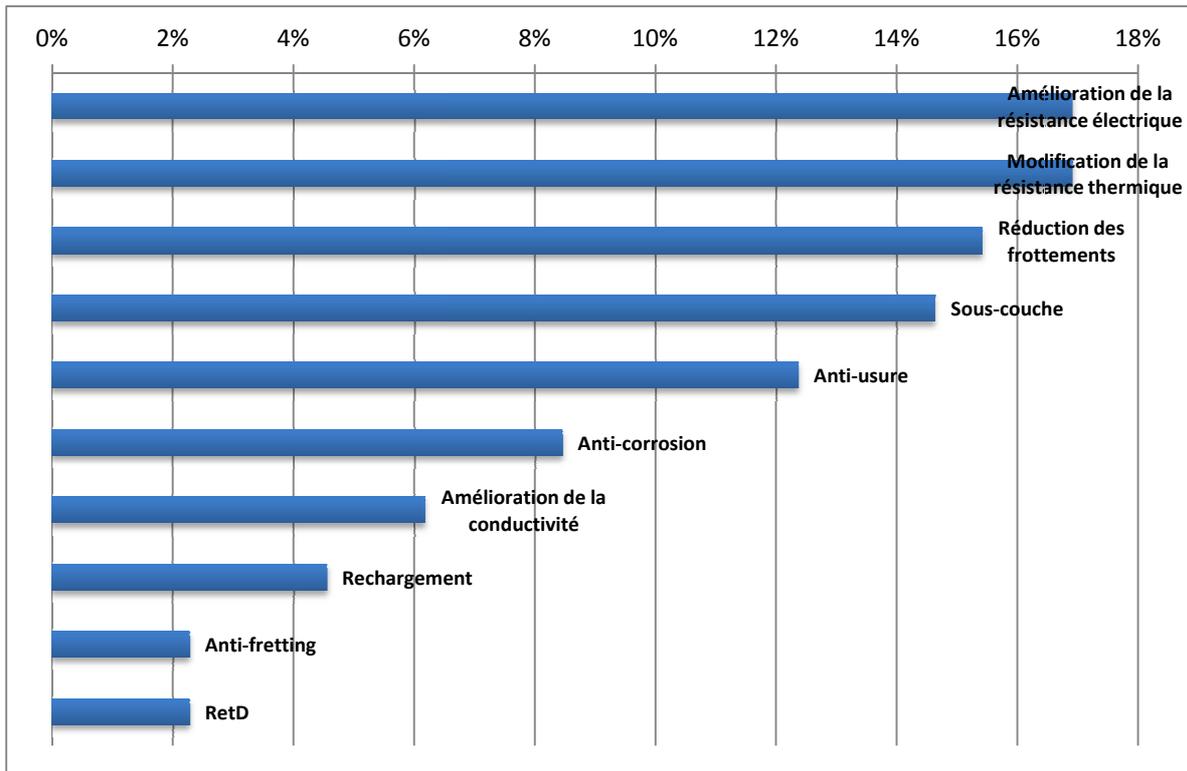


Figure 82 : Propriétés recherchées lors de la projection thermique par plasma dans le secteur 2561Z

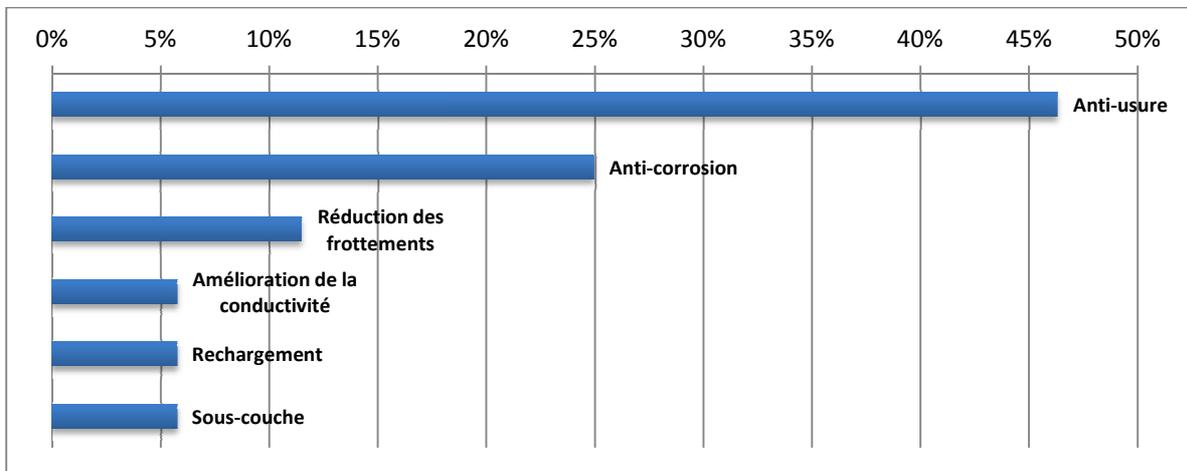


Figure 83 : Propriétés recherchées lors de la projection thermique par HVOF dans le secteur 2561Z

CONCLUSION

L'étude menée en 2012 par l'INRS a mis en avant la dispersion des établissements faisant de la projection thermique dans de nombreux secteurs d'activité, très diversifiés (travail des métaux, fabrication de produits métalliques, aéronautique, automobile, naval, bâtiment et travaux publics...).

Ces procédés sont peu répandus avec seulement 1,5 % des établissements équipés (entre 780 et 960 établissements sur les 61 000 établissements des 56 secteurs d'activité interrogés). Les établissements appartiennent principalement au secteur du traitement et du revêtement de surface et se trouvent principalement en Rhône-Alpes. Le procédé le plus utilisé est l'arc électrique, pour appliquer un traitement anti-corrosion avec du zinc-aluminium. Si le zinc-aluminium est le matériau le plus utilisé, le nickel-chrome et les alliages à base de ces 2 métaux sont des métaux projetés avec les 5 procédés. Le Tableau 11 fait une synthèse de l'ensemble des résultats présentés dans ce rapport.

Dans cette étude, il est apparu que dans 12 % des situations, les salariés ne portent pas d'appareils de protection respiratoire. Le non-port d'APR est fonction du type d'installations et de procédé. Etant donné le rendement de projection et le type de particules émises (particules ultrafines), il est nécessaire de prendre toutes les précautions nécessaires afin de limiter les expositions des salariés. Le port d'appareils de protection respiratoire isolants à adduction d'air ou autonome est la meilleure protection. Il est également nécessaire d'attendre la période de décompensation de la cabine pour accéder aux installations pour limiter les expositions.

Les procédés de projection par canon à détonation et par cold spray sont des procédés peu répandus et en cours de déploiement.

Tableau 11 : Synthèse des caractéristiques des différents procédés

Procédé	Arc Electrique	Flamme-Fil	Flamme-Poudre	Plasma	HVOF
Nb d'établissements	491	368	208	107	51
Localisation	RA, PACA, Centre	RA, PdL, PC	RA, PACA	Picardie, Alsace, RA	Alsace, RA, Aquitaine
Secteurs d'activité	<ul style="list-style-type: none"> • BTP • Revêtement de surface 	<ul style="list-style-type: none"> • Revêtement de surface • BTP 	<ul style="list-style-type: none"> • Réparation • Travail des métaux • Revêtement de surface 	<ul style="list-style-type: none"> • Fabrication de produits métal. • Travail des métaux • Revêtement de surface 	<ul style="list-style-type: none"> • Revêtement de surface • Réparation • Travail des métaux
Taille des établissements	<ul style="list-style-type: none"> • µ-entr. (54 %) • TPE (16 %) • PME (26 %) • ETI (3 %) • GE (1 %) 	<ul style="list-style-type: none"> • µ-entr. (46 %) • TPE (28 %) • PME (20 %) • ETI (2 %) • GE (4 %) 	<ul style="list-style-type: none"> • µ-entr. (41 %) • TPE (9 %) • PME (35 %) • ETI (5 %) • GE (10 %) 	<ul style="list-style-type: none"> • µ-entr. (43,7 %) • TPE (19,7 %) • PME (26,8 %) • ETI (5,6 %) • GE (4,2 %) 	<ul style="list-style-type: none"> • µ-entr. (50 %) • TPE (14,3 %) • PME (28,5%) • ETI (3,6 %) • GE (3,6 %)
Salariés dans les ateliers dans lesquels se trouvent les installations de PT	4460	3889	2773	3000	1978
Cabines ventilées inaccessibles pendant la projection	200	34	56	59	35
Nb de salariés travaillant sur les installations placées dans des cabines ventilées inaccessibles pendant la projection	424	67	83	150	65
Cabines ventilées accessibles pendant la projection	73	56	58	15	4
Nb de salariés travaillant sur les installations placées dans des cabines ventilées accessibles pendant la projection	104	86	87	20	11
Appareils portatifs	573	184	114	27	9
Nb de salariés utilisant les appareils portatifs	623	373	222	366	13

Procédé	Arc Electrique	Flamme-Fil	Flamme-Poudre	Plasma	HVOF
Matériaux (% citations)	<ul style="list-style-type: none"> • ZnAl (18 %) • Al (15 %) • Acier (13 %) • Zn (12 %) 	<ul style="list-style-type: none"> • ZnAl (34 %) • Zn (13 %) 	<ul style="list-style-type: none"> • Alliages base NiCr (25 %) • Alliages base Ni (16 %) 	<ul style="list-style-type: none"> • Alliages base Ni (14 %) • Alliages base WC (13 %) 	<ul style="list-style-type: none"> • Alliages base WC (33 %) • Alliages base Ni (19 %) • NiCr (10 %) • Alumine (10 %)
Objectifs	<ul style="list-style-type: none"> • Anti-Corrosion (51 %) • Rechargement (24 %) 	<ul style="list-style-type: none"> • Anti-Corrosion (43 %) • Rechargement (19 %) • Sous-couche (14 %) 	<ul style="list-style-type: none"> • Rechargement (43 %) • Anti-Usure (21 %) • Sous-couche (11 %) 	<ul style="list-style-type: none"> • Réduction des frottements (22%) • Anti-usure (21 %) 	<ul style="list-style-type: none"> • Anti-usure (40 %) • Réduction des frottements (21 %)
Fréquence d'utilisation d'utilisation	<ul style="list-style-type: none"> • Jamais (<1 %) • Occas. (37 %) • Fréquente (20 %) • Perman. (43 %) 	<ul style="list-style-type: none"> • Jamais (1%) • Occas. (38 %) • Fréquente (23 %) • Perman. (28 %) 	<ul style="list-style-type: none"> • Jamais (1 %) • Occas. (52 %) • Fréquente (9 %) • Perman. (34 %) 	<ul style="list-style-type: none"> • Jamais (4 %) • Occas. (17 %) • Fréquente (9 %) • Perman. (52 %) 	<ul style="list-style-type: none"> • Jamais (0 %) • Occas. (27 %) • Fréquente (19 %) • Perman. (42 %)
Appareils de protection respiratoire	<ul style="list-style-type: none"> • Apport d'air (28 %) • Ventil. assist. (42 %) • Ventil. libre (16 %) • Pas d'APR (13 %) 	<ul style="list-style-type: none"> • Apport d'air (30 %) • Ventil. assist. (25 %) • Ventil. libre (39 %) • Pas d'APR (6%) 	<ul style="list-style-type: none"> • Apport d'air (8 %) • Ventil. assist. (33 %) • Ventil. libre (43 %) • Pas d'APR (16 %) 	<ul style="list-style-type: none"> • Apport d'air (14 %) • Ventil. assist. (36 %) • Ventil. libre (33 %) • Pas d'APR (17 %) 	<ul style="list-style-type: none"> • Apport d'air (5 %) • Ventil. assist. (61 %) • Ventil. libre (23%) • Pas d'APR (10%)

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Levêque, R. : Traitements et revêtements de surface des métaux. Paris: Dunod, 2007.
- [2] Advanced Coating – <http://www.advanced-coating.com/projection.htm> - consulté le 09/01/2014.
- [3] Proner, A. : M 1645 - Revêtements par projection thermique. Paris: Techniques de l'ingénieur, 1999.
- [4] Surfatec - <http://www.surfatec.org/> - consulté le 09/01/2014
- [5] Ricaud, M. : Les fumées de soudage et des techniques connexes. INRS – Aide-Mémoire Technique – ED6132. Juin 2012.
- [6] Chadwick, J.K., H.K. Wilson, and M.A. : White: An investigation of occupational metal exposure in thermal spraying processes. *The Science of the Total Environment* 199(1-2): 115-124 (1997).
- [7] Heriaud-Kraemer, H., G. Montavon, S. Hertert, H. Robin, and C. Coddet : Harmful risks for workers in thermal spraying: A review completed by a survey in a french compagny. *Journal of Thermal Spray Technology* 12(4): 542-554 (2003).
- [8] Petsas, N., G. Kouzilos, M. Vardavoulias, and A. Moutsatsou : Worker exposure monitoring of suspended particules in a thermal spray industry. *Journal of Thermal Spray Technology* 16(2): 214-219 (2007).
- [9] Schaller, K., G. Csanady, J. Filser, B. Jüngert, and H. Drexler : Elimination kinetics of metals after an accidental exposure to welding fumes. *Int. Arch. Occup. Environ. Health* 80(7): 635-641 (2007).
- [10] Bemmerl, D., R. Regnier, I. Subra, B. Sutter, M.T. Lecler, and Y. Morele : Ultrafine particles emitted by flame and electric arc guns for thermal spraying of metals. *The Annals of Occupational Environment* 54(6): 607-614 (2010).
- [11] Institut National de la Statistique et des Etudes Economiques (2008) : Nomenclature des activités françaises NAF rev.2
- [12] Pôle emploi – <http://www.pole-emploi.org/statistiques/selectionstatistique> - consulté le 09/09/2013
- [13] SIRENE – <http://www.sirene.fr/sirene/public/accueil> - consulté le 8/11/2011
- [14] Rao, P.S.R.S : Sampling Methodologies with applications. *Editions Chapman and Hall* (2000)