HAL
open science

Développement de nouveaux fils fourrés pour le soudage à l'arc d'aciers inoxydables ferritiques destinés à la fabrication des parties chaudes de ligne d'échappement automobile

Vincent Villaret, Frédéric Deschaux-Beaume, Fabien Januard, Jean-Marie Fortain, Gilles Fras, Sébastien Rouquette

To cite this version:

Vincent Villaret, Frédéric Deschaux-Beaume, Fabien Januard, Jean-Marie Fortain, Gilles Fras, et al.. Développement de nouveaux fils fourrés pour le soudage à l'arc d'aciers inoxydables ferritiques destinés à la fabrication des parties chaudes de ligne d'échappement automobile. Matériaux 2010, Oct 2010, Nantes, France. 11p. hal-00808058

HAL Id: hal-00808058

https://hal.science/hal-00808058v1

Submitted on 4 Apr 2013

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.

Développement de nouveaux fils fourrés pour le soudage à l'arc d'aciers inoxydables ferritiques destinés à la fabrication des parties chaudes de ligne d'échappement automobile

Vincent Villaret[a,b], Frédéric Deschaux-Beaume[b], Fabien Januard[a], Jean-Marie Fortain[a] , Gilles Fras[b] , Sébastien Rouquette[b]

[a] AIR LIQUIDE / CTAS, 13 Rue d'épluches 95310 St OUEN L'AUMÔNE, vincent.villaret@airliquide.com
[b] Laboratoire de Mécanique et Génie Civil – UMR 5508, Université de Montpellier 2, 34095 Montpellier cedex, France, frederic.deschaux-beaume@iut-nimes.fr

RESUME: Dans le contexte actuel de raréfaction des énergies fossiles, les constructeurs automobiles cherchent à optimiser l'efficience énergétique de leurs véhicules. Cette amélioration passe par un changement de conception des collecteurs de gaz d'échappement. Les collecteurs tendent vers des pièces mécano-soudés adaptées aux nouvelles contraintes. Ces évolutions passent par le développement et l'utilisation de matériaux résistant à des conditions de service de plus en plus sévères, en termes de tenue à la corrosion à chaud et à la fatigue thermique. Pour répondre à de telles exigences, des aciers inoxydables ferritiques à haute teneur en chrome (19%) avec addition de molybdène (2%) sont développés, pour lesquels nous rencontrons des problèmes de soudabilité. Pour remédier à ces problèmes et assurer des caractéristiques en zone fondue proches de celles du métal de base, de nouveaux produits d'apports (fils fourrés) sont développés dans le cadre de la présente étude.

MOTS-CLES : Aciers inoxydables ferritiques, collecteurs d'échappements, stabilisation Ti/Nb, MIG/MAG.

Introduction:

Dans un environnement de concurrence exacerbée, les arguments écologiques et économiques sont aujourd'hui décisifs, en particulier dans le secteur automobile. Les constructeurs suivent donc une démarche d'amélioration globale et continue visant, en particulier, à optimiser l'efficience énergétique de leurs véhicules. Le gain de poids et l'augmentation du rendement moteur sont ainsi deux éléments majeurs. Ce dernier se traduit couramment par une augmentation de la température des gaz d'échappement qui impose une modification de la conception des lignes d'échappement. Celles-ci ont pour fonction première d'évacuer les gaz de combustion du moteur thermique vers l'arrière du véhicule (Figure 1). Avec l'évolution des normes anti-pollution, la ligne d'échappement intègre des fonctions supplémentaires telles que le traitement des gaz nocifs et polluants par l'intermédiaire d'un catalyseur dont l'efficacité n'est assurée qu'à partir de 400°C. La ligne d'échappement est un ensemble de pièces complexes, et le collecteur en est la pièce la plus proche du moteur, donc la plus chaude et la plus critique.
Usuellement en fonte, la conception des collecteurs a évolué vers des pièces mécano-soudées plus adaptées aux contraintes actuelles, plus légers, avec une meilleure résistance aux conditions d'utilisation (corrosion, cycles thermiques, contraintes mécaniques, température d'utilisation).
Cette évolution implique le développement de matériaux et de solutions d'assemblage adaptés aux contraintes techniques et économiques.

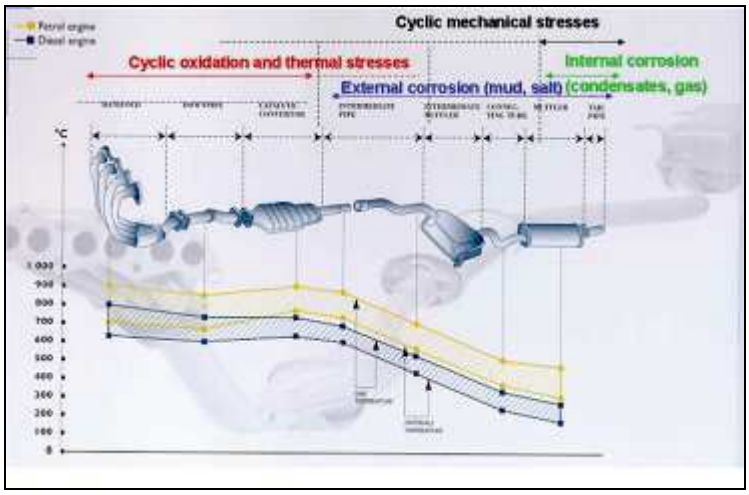

Figure 1: schéma de la ligne d'échappement automobile [1].

Les principales contraintes subies par le matériau sont :

- les cycles thermiques (de la température ambiante à environ 900°C pour un nombre de cycle moyen d'environ 1000 par an) ;
- l'oxydation cyclique (due aux cycles thermiques et entrainant un phénomène d'écaillage) ;
- la corrosion, particulièrement à haute température.

Parmi les différents matériaux candidats pour de telles applications, les aciers inoxydables ferritiques sont certainement les plus prometteurs, car ils combinent de bonnes propriétés à chaud et un coût modéré. L'effet d'une opération de soudage sur leurs propriétés reste toutefois à étudier.

Etat de l'art :

Les aciers inoxydables ferritiques sont des alliages fer/chrome contenant entre 11 et 28% de chrome, et dont la teneur en carbone n'excède pas 0,1%. Ils se différencient des aciers inoxydables austénitiques par l'absence de nickel, et par le fait qu'ils conservent une structure ferritique depuis la température du liquidus jusqu'à la température ambiante.

Ils présentent également l'avantage d'être sensiblement moins couteux que les aciers inoxydables austénitiques ou les alliages base nickel, eux mêmes sensibles à l'oxydation cyclique et au phénomène d'écaillage.

La structure ferritique présente cependant des propriétés particulières à prendre en compte pour la mise en œuvre de la solution de soudage.

Tout d'abord, l'azote, le carbone, et l'hydrogène ont une solubilité très faible au sein de la matrice ferritique, entrainant, entre autres, fragilisation et durcissement [2].

L'utilisation d'une composition et d'un débit de gaz de protection adaptés permet de s'affranchir de la pollution par l'atmosphère (en particulier de l'azote et de l'humidité). Les mélanges fournis par Air Liquide assurent un niveau de qualité optimum, en particulier dans la gamme ARCAL qui garantit moins de 40 ppm d'H_2O et 200 ppm d'azote. Ces éléments seront également à minimiser dans le métal d'apport de façon à contrôler la composition de la zone fondue.

Ensuite, lors du cycle thermique de soudage, il y a formation de carbures de chrome aux joints de grains, créant ainsi un appauvrissement en chrome au voisinage de ces zones [2]. Ce phénomène favorise la corrosion intergranulaire, préférentiellement en zone fondue et en zone affectée thermiquement (ZAT).

La stabilisation par des éléments d'addition spécifiques peut contribuer à pallier ces problèmes. L'addition de faible teneur de titane et/ou de niobium (<1% massique), plus avides en azote et en carbone que le chrome, permet de stabiliser la zone fondue par la formation de carbures et nitrures de titane et de niobium. Il existe des formules de stabilisation que l'on retrouve dans la littérature [3, 4, 5, 6] (Tableau 1).

élément(s) stabilisant(s)	Formule Stœchiométrie	Formule Pratique totale	Fourchette de teneur
Niobium	%Nb = 7.7(%C) + 6.6(%N)	%Nb = 0.2 + 7 (%C+%N)	0.2 < %Nb < 0.8
Titane	%Ti = 4 (%C) + 3.4 (%N)	%Ti = 0.15 + 4 (%C+%N)	0 < %Ti < 0.6
Niobium + Titane	-	0.2 + 4(%C+%N)< %Nb+%Ti < 0.8	-

Tableau 1 : Formules de stabilisation au Titane et Niobium (%(C+N)< 0.06%).

Enfin, également lié au cycle thermique lors de l'opération de soudage, nous observons un grossissement sensible de la taille de grain. Il touche en particulier la zone fondue et la ZAT (Figure 2). Ce problème engendre une nette diminution des propriétés mécaniques de l'assemblage.

Afin de limiter le phénomène en ZAT, une des solutions consiste à travailler sur le procédé de soudage de manière à limiter l'énergie de soudage.

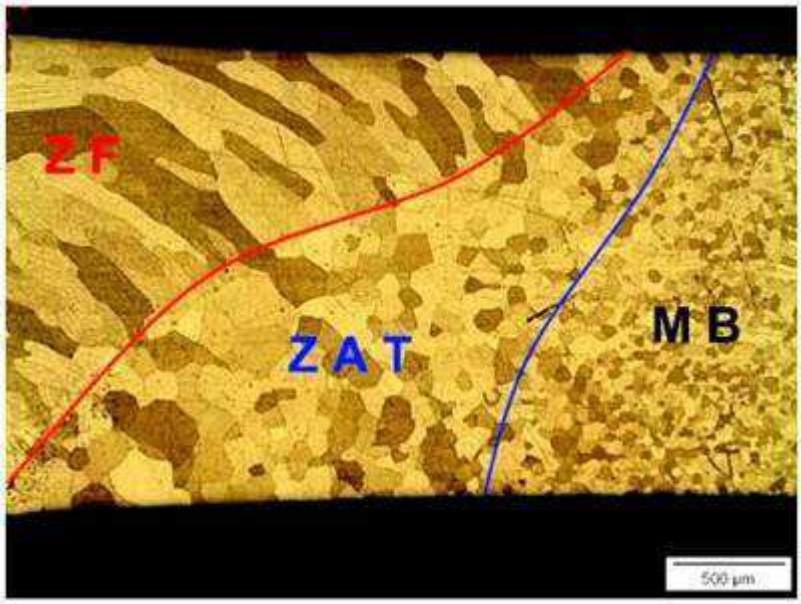

Figure 2: impact du cycle thermique sur le grossissement de grain de ferrite (cordon TIG sans métal d'apport.)

Les additions de Ti et Nb permettent aussi de limiter le grossissement du grain par la formation de précipités aux joints de grains [6]. Le titane permet en outre d'obtenir une zone fondue à grains fins, par la formation de nitrures de titane très stables dans le métal liquide servant de sites de nucléation permettant d'obtenir une structure à grains équiaxes lors de la solidification [7].
Le niobium en excès se retrouve en solution solide dans la matrice ferritique, et permet d'améliorer la tenue mécanique à haute température, contrairement au titane (figure 3) [8].
L'addition de molybdène dans les aciers inoxydables ferritiques joue également un rôle important. En effet, le molybdène agit sur la résistance à la corrosion/oxydation, ainsi que sur le pH de dépassivation, son effet sur ce dernier étant plus de trois fois supérieur à celui du chrome [9]:

$$pH = 2{,}95 - 0{,}042\ (Cr + 3{,}2.Mo)$$

Le molybdène, tout comme le niobium, a un effet positif sur la résistance mécanique à haute température (tenue au fluage). En revanche, une addition de molybdène supérieure à 2% peut réduire sensiblement la ténacité.

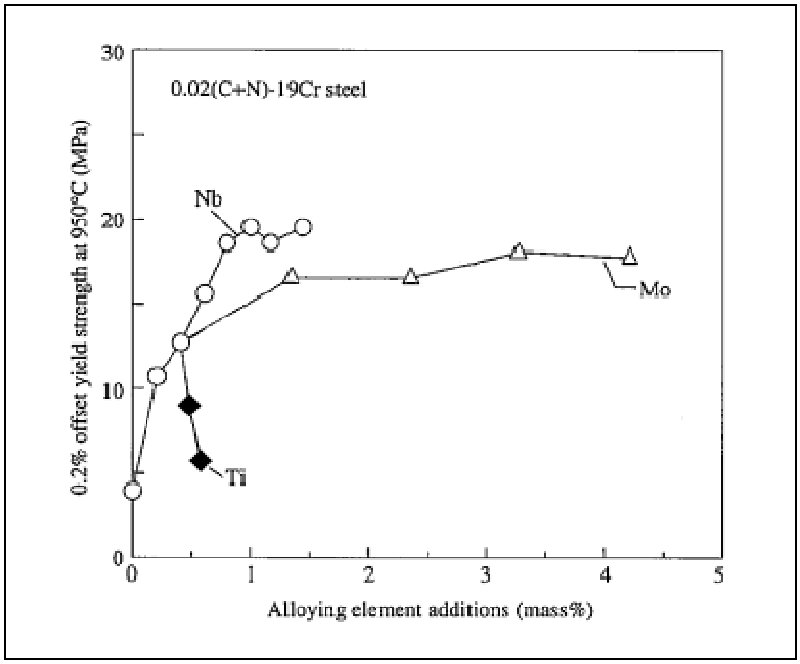

Figure 3 : effet de la teneur en Mo, Nb et Ti sur les caractéristiques mécaniques à 950°C d'un acier inoxydable ferritique.

Dans le but d'offrir une solution aux constructeurs automobiles, ARCELOR MITTAL a développé un acier inoxydable ferritique, désigné par la suite K44X (composition tableau 2) permettant de remplir le cahier des charges lié aux sollicitations extrêmes subies par les collecteurs, en particulier vis-à-vis de la résistance à la corrosion et de la tenue mécanique à haute température.

K44X	Composition (%massique)												
	C	Si	Mn	P	S	N	Cr	Cu	V	Ni	Mo	Ti	Nb
	<0,022	0,6	0,3	<0,03	<0,05	<0,025	19	<0,3	0,1	<0,025	1,9	<0,01	0,6

Tableau 2 : composition de l'acier K44X

Ce matériau, produit sous la forme de tôles minces (0,6 à 2,5 mm), est destiné à la fabrication de collecteurs mécano-soudés. Cependant, parmi les matériaux d'apport de soudage actuellement commercialisés, aucun ne répond de manière satisfaisante aux contraintes citées. L'objectif de l'étude a donc été de développer et de tester différents produits d'apport de soudage.

Choix du procédé de soudage :

Le choix du procédé s'est fait à partir des renseignements obtenus sur les procédures de fabrications des collecteurs d'échappement mécano-soudés. Dans l'industrie automobile, la fabrication de pièces complexes demandant une opération de soudage en position est généralement robotisée. En tenant compte de la nécessité d'avoir un apport de métal extérieur, la solution MIG/MAG robotisée semble être la plus pertinente.

Le procédé MIG/MAG permet de souder avec divers modes de transferts de métal, selon le choix des paramètres énergétiques du procédé. En effet, suivant les paramètres électriques choisis, le transfert de métal dans l'arc n'obéit pas aux mêmes mécanismes, et les résultats obtenus (composition, énergie transférée, formes de cordon, cycles thermiques…) sont différents. De façon évidente, une seule composition de fil fourré sera retenue pour le procédé MIG/MAG, quel que soit le transfert considéré. Toutefois, il est important de quantifier la composition en zone fondue en fonction des paramètres énergétiques du procédé, de façon à assurer une fourchette de tolérance, en particulier pour les éléments stabilisants.

Nous avons donc utilisé deux modes de transfert, le court circuit et le pulsé.

Le premier est un mode de transfert naturel. Les gouttes de métal liquide se forment pendant le temps d'arc, grossissent jusqu'à venir en contact avec le bain, d'où le nom de soudage par court-circuit (figure 5). Les gouttes se détachent alors, et l'arc se réamorce. Ce type de transfert est relativement peu énergétique.

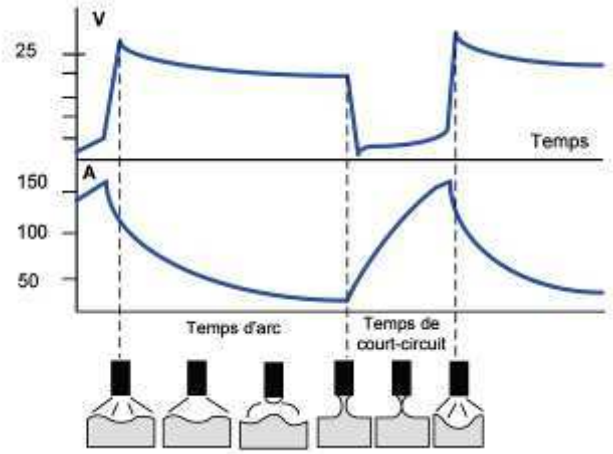

Figure 4 : transfert par court circuit [10].

Le second est le mode pulsé, il s'agit d'un transfert forcé. A partir d'un certain seuil de courant, les gouttes de métal liquide se forment et se détachent spontanément sans entrer en court-circuit sous l'effet des forces électromagnétiques. Ce type de transfert, dit « spray », nécessite donc un courant élevé (dépendant du gaz, du diamètre de fil, etc…). Une alternative est le transfert pulsé : le courant n'est pas constant mais sous forme de créneau, alternant entre temps froid et temps chaud. Il permet de contrôler le détachement des gouttes (une goutte par impulsion de courant, correspondant au temps chaud) à des niveaux d'énergie plus faibles que le mode de transfert spray.

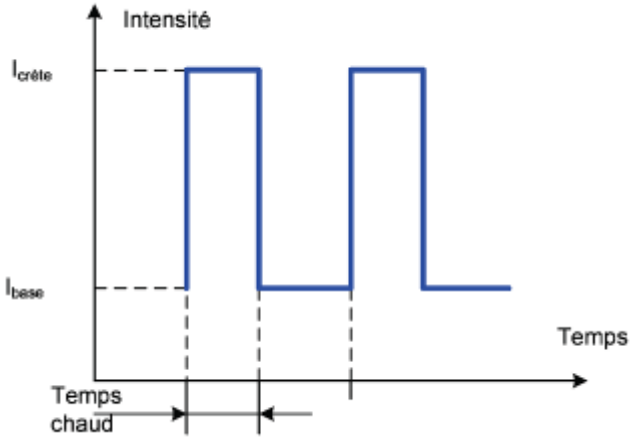

Figure 5 : forme d'onde du courant pulsé [10].

Dans les deux cas, nous avons choisi les paramètres électriques de manières à limiter l'énergie de soudage, et ainsi l'apport d'énergie à la ZAT, pour limiter le grossissement de grain.
Les puissances électriques délivrées étant différentes pour nos deux transfert, il a fallu adapter la vitesse de soudage afin d'obtenir la pleine pénétration lors de l'opération de soudage.
Les opérations de soudage se sont déroulées sur une installation automatique équipée d'un poste DIGIWAVE® et d'une torche PROMIG 441. Le gaz de soudage utilisé est un mélange Ar/CO_2 respectivement à 98 et 2% (ARCAL 12).

Développement du matériau d'apport :

La problématique de cette étude est de garantir les caractéristiques mécaniques, en particulier en fatigue thermique, et la résistance à la corrosion d'un assemblage de la nuance K44X soudé avec les procédés utilisés dans l'industrie automobile. L'étude se focalise sur le développement de métaux d'apport permettant d'obtenir après soudage MIG/MAG des caractéristiques en zone fondue proches de celles du métal de base.
L'utilisation d'un métal d'apport homogène est séduisante. Toutefois, pour cette nuance relativement spécifique, la fabrication d'un fil plein associé est problématique, en particulier pour de simples raisons logistiques. Les quantités minimum requises pour l'approvisionnement ne sont pas compatibles avec les quantités de fil à produire dans le cadre d'une telle étude ou pour des fabrications spécifiques.
L'utilisation d'un métal d'apport hétérogène choisi parmi les produits existant, et compatible avec la nuance, laisse entrevoir plusieurs problèmes :
- dans le cas de l'emploi d'un métal d'apport austénitique, l'inhomogénéité de l'assemblage, par la présence d'une structure de zone fondue austéno-ferritique, entraine une dilatation thermique différentielle rédhibitoire dans le cas d'applications à haute température ;
- aucun métal d'apport ferritique disponible commercialement ne permet d'obtenir une zone fondue dont la résistance à la corrosion est équivalente au métal de base. Tous les produits d'apport comportent en effet des lacunes vis-à-vis des éléments Cr et Mo ;
- des lacunes en éléments d'addition Ti et Nb des produits d'apport commercialisés entraine un grossissement de grain important lors de la solidification de la zone fondue et donc une fragilisation de l'assemblage.
La solution qui semble s'imposer est le développement d'un fil fourré. L'étude visera donc à développer un métal d'apport homogène au K44X sous forme de fil fourré ainsi que le procédé et les modes opératoires de soudage pour le fil développé.
Compte tenu du type de nuance, ainsi que du nombre de compositions étudiées, notre choix s'est porté sur le développement d'un fil fourré utilisant la technologie Chemetron (figure 6)

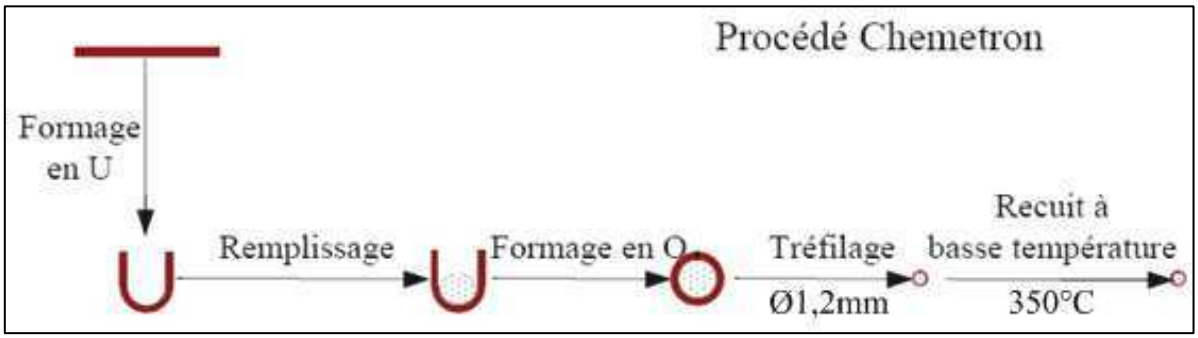

Figure 6 : Principe du procédé Chemetron

Entre donc dans la composition du fil fourré, à la fois celles du feuillard et du flux.
Nous estimons l'influence du flux dans la composition finale du fil à environ 20%. Dans la nuance étudiée, il est impossible de garantir les teneurs en éléments d'additions, en particulier en chrome, avec l'utilisation d'un feuillard en acier doux. Notre choix s'est donc porté sur l'utilisation du feuillard ARCELOR MITTAL K09 (AISI 409, composition tableau 3) qui offre une certaine latitude vis-à-vis des éléments présents dans le flux (Mo, Nb, Ti, Cr).

K09	Composition (%massique)												
	C	Si	Mn	P	S	N	Cr	Cu	V	Ni	Mo	Ti	Nb
	0,017	0,59	0,23	0,022	0,006	0,01	11,5	0,066	0,074	0,088	0,023	0,18	0,009

Tableau 3 : composition du feuillard K09

Comme nous l'avons vu, l'étude bibliographique montre l'importance des teneurs en titane et en niobium dans l'obtention de caractéristiques mécaniques élevées à haute température et une structure à grains fins. Nous nous sommes donc focalisés sur l'étude des teneurs en niobium et titane.
Dans un premier temps, nous avons tenté de définir la composition du fil fourré permettant d'obtenir la composition souhaitée en zone fondue.
Il faut ici distinguer la composition des couples fil-flux (produits d'apport), celle des métaux déposés, et celle des zones fondues obtenues après soudage. La composition de métal déposé est ainsi différente de celle du produit d'apport, à cause du phénomène de transfert des éléments chimiques dans l'arc. Lors de l'opération de soudage MAG, certains éléments chimiques ne transfèrent pas dans le bain de fusion dans leur totalité. Certains forment des oxydes en réaction avec le gaz ou d'autres composés chimiques que l'on retrouve en surface du cordon ou dans les fumées de soudage. De même, la zone fondue a une composition différente de celle du métal déposé, à cause de la dilution avec le métal de base. A cause de ces phénomènes, qui dépendent de plus des énergies de soudage employées, la relation entre les compositions du matériau d'apport et de la zone fondue n'est pas immédiate.
Dans notre cas, l'élément présent dans nos compositions susceptible d'engendrer une perte assez importante pour avoir une influence métallurgique sur la zone fondue est le titane. Nous avons établi deux compositions étalons (K44-2, K44-3 dans tableau 4), dont l'intérêt est de quantifier les pertes en élément Ti lors de l'opération de soudage. En effet, ces deux compositions permettent d'évaluer séparément le taux de transfert de l'élément Ti présent dans le feuillard, et le taux de transfert du titane présent dans le flux.
Une fois ces relations obtenues, d'autres compositions de métaux d'apport ont été développées (compositions K44-4 à K44-8), dans le but d'explorer l'influence des éléments titane et niobium sur les caractéristiques de la zone fondue (tableau 4).

Le choix des compositions a été fait en se basant sur les données bibliographiques. En effet, les premiers essais de soudage ont permis de quantifier les teneurs en azote et en carbone présents dans la zone fondue après une opération de soudage réalisée avec une protection gazeuse représentative des procédures industrielles (ARCAL 12, 12 l/min). A partir de ces données, un calcul des besoins en éléments stabilisants (Ti et Nb) a été fait en tenant compte de la composition du métal de base, de sa dilution en zone fondue, et du pourcentage d'azote et de carbone. Chaque composition proposée passe par ce calcul afin de vérifier que la teneur en Ti et Nb garantit la stabilisation totale, et d'estimer l'excès de stabilisant pouvant se retrouver en solution dans la matrice ferritique, et ayant un effet sur les caractéristiques de la zone fondue.

	Composition (massique%)												
	C	Si	Mn	P	S	N	Cr	Cu	V	Ni	Mo	Ti	Nb
K44-2	0,01	0,6	0,3	<0,03	<0,005	0,01	19	<0,3	0,1	<0,25	1,9	**0**	**0**
K44-3												**0,6**	**0**
K44-4												**0**	**0,5**
K44-5												**0**	**0,8**
K44-6												**0,2**	**0**
K44-7												**0,1**	**0,4**
K44-8												**0,3**	**0,3**

Tableau 4 : compositions souhaitées de métal déposé hors dilution.

Des essais préliminaires sur le fil K44-3 ont permis de trouver un point de fonctionnement en pulsé et en court-circuit. Ces paramètres ont servi de base pour les autres fils dont les paramètres ont été obtenus par l'ajustement des réglages fins. Mis à part les paramètres électriques, tous les autres paramètres sont fixes. L'objectif est d'obtenir pour chaque fil, un cordon soudé de 500mm de long pour les deux transferts afin de pouvoir ensuite faire toutes les analyses de caractérisation. Chaque essai est réalisé avec l'acquisition de la tension et de l'intensité de soudage, permettant par la suite de calculer la puissance électrique délivrée, et

l'énergie de soudage (tableau 5). Par la suite, les éprouvettes soudées seront désignées par la composition de fil suivie du mode de transfert employés.

composition	Type de transfert	Puissance électrique délivrée (W)	Vitesse de soudage ($cm.min^{-1}$)	Energie de soudage ($J.cm^{-1}$)
K44-2	Court-circuit	1840	50	2205
	Pulsé	2570	70	2205
K44-3	Court-circuit	1620	50	1945
	Pulsé	2590	70	2220
K44-4	Court-circuit	1825	50	2190
	Pulsé	2580	70	2210
K44-5	Court-circuit	1740	50	2085
	Pulsé	2555	70	2190
K44-6	Court-circuit	1695	50	2035
	Pulsé	2675	70	2290
K44-7	Court-circuit	1670	50	2000
	Pulsé	2610	70	2235
K44-8	Court-circuit	1805	50	2165
	Pulsé	2540	70	2180

Tableau 5 : puissance électrique délivrée moyenne par cordon et énergie de soudage associée.

Caractérisation des soudures:

L'objectif des analyses effectuées sur les éprouvettes soudées est avant tout de mettre en évidence l'influence du titane et du niobium ajoutés au métal d'apport sur l'opération de soudage, ainsi que sur les caractéristiques mécaniques et microstructurales des zones fondues. En effet, d'après la littérature, la présence de niobium et de titane en solution et sous forme de précipités confère à la structure ferritique de bonnes propriétés de résistance à la corrosion intergranulaire et de tenue mécanique.

La caractérisation permettra aussi d'établir une relation entre les paramètres procédés et les caractéristiques de la zone fondue, et notamment de mettre en évidence l'influence du transfert et de la dilution sur la composition et le comportement de la zone fondue.

La démarche a donc consisté à caractériser les précipités présents dans la zone fondue dus aux éléments stabilisants, et à quantifier les excès de stabilisants se trouvant en solution dans la matrice ferritique, pour les différentes compositions de produits d'apport et les deux modes de transfert, de manière à établir des corrélations avec les caractéristiques mécaniques et de tenue à la corrosion des soudures.

Pour parvenir à ces objectifs, plusieurs techniques de caractérisation ont été employées :

- des analyses chimiques par ICP (*inductively coupled plasma*), pour connaître la composition globale de la zone fondue ;
- des analyses chimiques par microsonde de Castaing (EPMA), pour connaître la répartition des éléments au sein des différentes zones ou phases ;
- des observations sur macrographies et micrographies optiques
- des observations en microscopie électronique à balayage, avec analyses de particules par EDS (OXFORD® INCAfeature)
- des essais mécaniques et des tests d'oxydation, dont les résultats ne seront pas présentés dans cette étude.

Caractéristiques générales des cordons :

En terme opératoire, des points de fonctionnement stables en pulsé et en court-circuit ont permis d'obtenir des cordons réguliers pour toutes les compositions de produits d'apport.

Les macrographies réalisées (figure 7) sur les éprouvettes nous ont permis de calculer les taux de dilution, qui auront un effet sur la composition des zones fondues (tableau 6). Les taux de dilution sont plus faibles en court-circuit (entre 19 et 37%) qu'en pulsé (entre 40 et 50%).

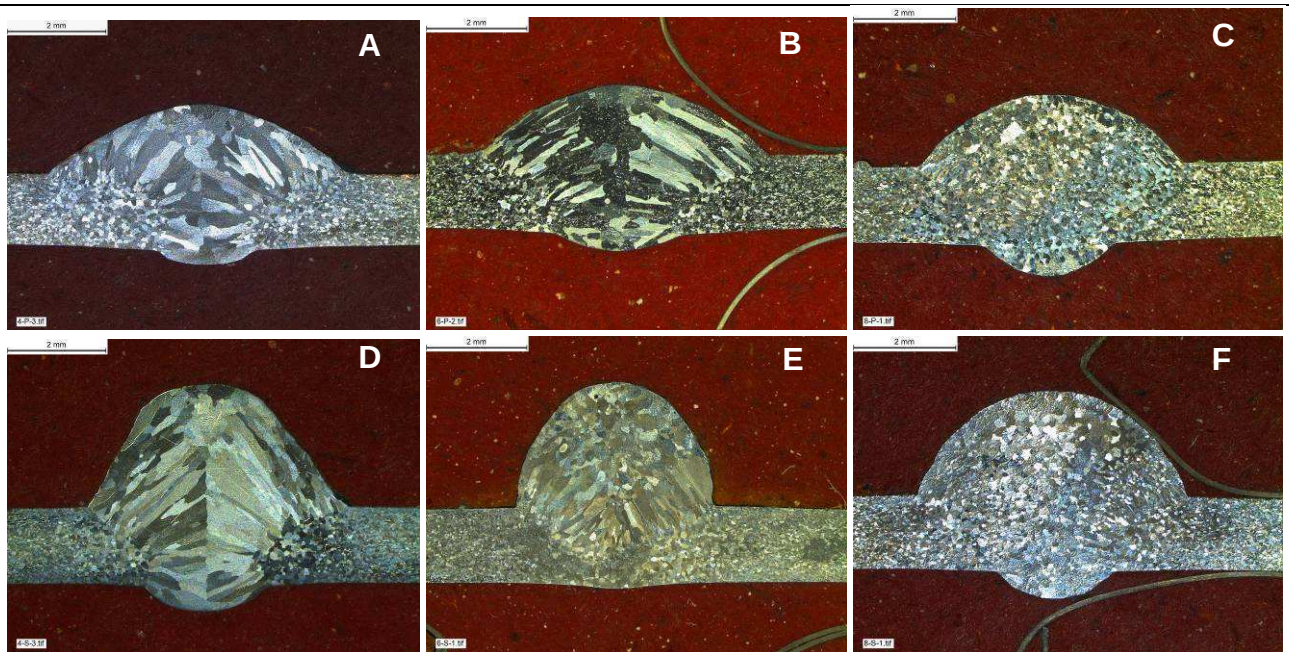

Figure 7 : Macrographies des éprouvettes soudées, A :K44-4 / Pulsé, B : K44-6 / Pulsé, C : K44-8 / Pulsé, D : K44-4 / Court-circuit, E : K44-6 / Court-circuit, F : K44-8 / Court-circuit

composition	Type de transfert	Surface Zone Fondue (mm²)	Taux de dilution métal de base(%)	Angle de mouillage (°)
K44-2	Court-circuit	12,78	34	116
	Pulsé	10,41	40	145
K44-3	Court-circuit	12,22	25	102
	Pulsé	10,78	43	129
K44-4	Court-circuit	14,46	35	123
	Pulsé	10,16	41	141
K44-5	Court-circuit	13,54	37	122
	Pulsé	10,06	42	132
K44-6	Court-circuit	9,92	19	103
	Pulsé	11,02	45	133
K44-7	Court-circuit	12,72	32	108
	Pulsé	11,02	42	139
K44-8	Court-circuit	12,84	33	112
	Pulsé	11,17	50	127

Tableau 6: taux de dilution, angle de mouillage, et surface de cordon en fonction de la nuance et du type de transfert.

Les macrographies mettent en évidence les caractéristiques géométriques du cordon. Les cordons obtenus en soudage pulsé (plus énergétique) montrent un mouillage plus favorable en comparaison des cordons obtenus en court-circuit. Les essais de soudage ont de plus révélé une stabilité de l'arc et du transfert plus faibles en court-circuit. En se basant sur les résultats des analyses chimiques, et les macrographies obtenues en transfert pulsé, on a pu observer une légère influence de la teneur en titane sur la géométrie de la zone fondue, qui a pour effet de dégrader le mouillage. Pour la totalité des cordons, le grossissement de grains en ZAT est réduit.

Composition et morphologie des grains en zone fondue :

Les observations micrographiques nous ont permis de constater que suivant le type de transfert et la composition chimique du fil, il était possible d'obtenir trois types de structures pour la zone fondue :

- une structure à gros grains basaltiques perpendiculaires à la frontière de la zone fondue et se rejoignant au niveau du plan de symétrie de la soudure (figure 8 : B).
- une structure à grains fins équiaxes (figure 8 : D)
- une structure mixte comportant une zone centrale à grains fins équiaxes, et une zone périphérique à grains basaltiques (figure 8 : C)

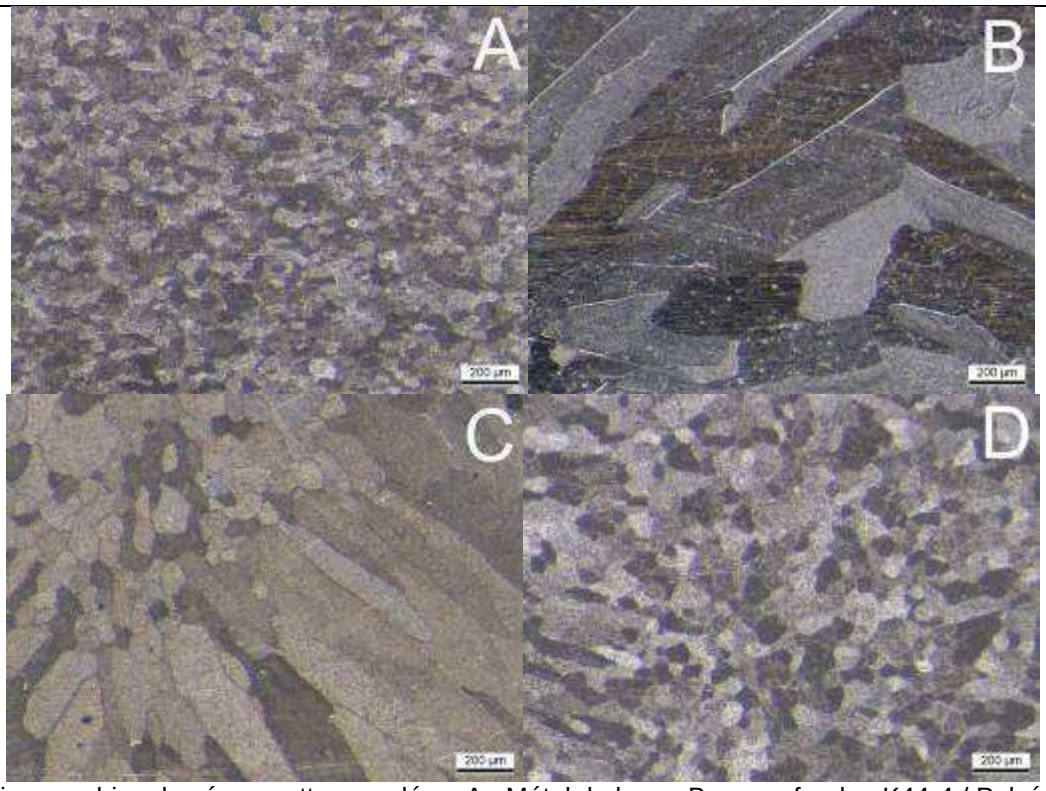

Figure 8 : Micrographies des éprouvettes soudées, A : Métal de base, B : zone fondue K44-4 / Pulsé, C : zone fondue K44-6 / Court-circuit, D : zone fondue K44-8 / Pulsé.

composition	Composition (%massique)												
	C	Si	Mn	P	S	N	Cr	Cu	V	Ni	Mo	Ti	Nb
K44-4 pulsé	0,03	0,61	0,37	0,02	0,01	0,02	19,21	0,06	0,08	0,09	1,73	0,03	0,59
K44-6 court- circuit	0,02	0,64	0,37	0,02	0,01	0,02	19,54	0,07	0,07	0,09	1,75	0,11	0,14
K44-8 pulsé	0,03	0,65	0,39	0,02	0,00	0,02	19,51	0,07	0,08	0,10	1,72	0,15	0,52

Tableau 7 : compositions chimiques des zones fondues des éprouvettes K44-4/pulsé, K44-6/court circuit, K44-8/pulsé.

L'analyse chimique par ICP (tableau 7) montre qu'il existe une teneur minimale en Ti dans la zone fondue nécessaire pour produire l'affinement du grain. Cette teneur limite, située aux alentours de 0,1%, correspond à la transition entre une structure de grains basaltiques grossiers en zone fondue, et une structure de grains fins équiaxes. Du fait des pertes dues au transfert, qui dépendent des paramètres énergétiques du procédé et du mode de transfert, la quantité de Ti contenue dans le fil d'apport doit être supérieure à cette valeur minimale. Une valeur trop élevée de la teneur en titane en zone fondue (%Ti>0.5) peut cependant entraîner la présence de titane en solution solide dans la matrice ferritique, qui diminue la tenue mécanique à chaud.

Nature et répartition des précipités dans la zone fondue :

La quantification et la caractérisation des précipités formés complète la caractérisation métallurgique de la zone fondue. En effet, la répartition des précipités (nature, concentration, taille), mise en relation avec les observations microscopiques, permet de mieux appréhender le rôle des précipités vis-à-vis des microstructures. Des analyses MEB ont été effectuées dans ce but. Ces analyses comprennent un repérage des précipités, puis une analyse chimique par EDS. Celles-ci nous permettent de connaître leurs natures.

Ces analyses préliminaires permettent de paramétrer le logiciel de détection et de classification de particules (OXFORD INCAfeature) fournissant les informations nécessaires à l'établissement d'un recensement des précipités sur une zone définie. Ces données sont traitées à l'aide d'un programme permettant d'obtenir une cartographie des précipités (figure 9).

Les précipités recensés sont de deux natures différentes :

- des précipités riches en titane supposés entre constitués de TiN ;
- des précipités riches en niobium supposés être des carbures de Nb.

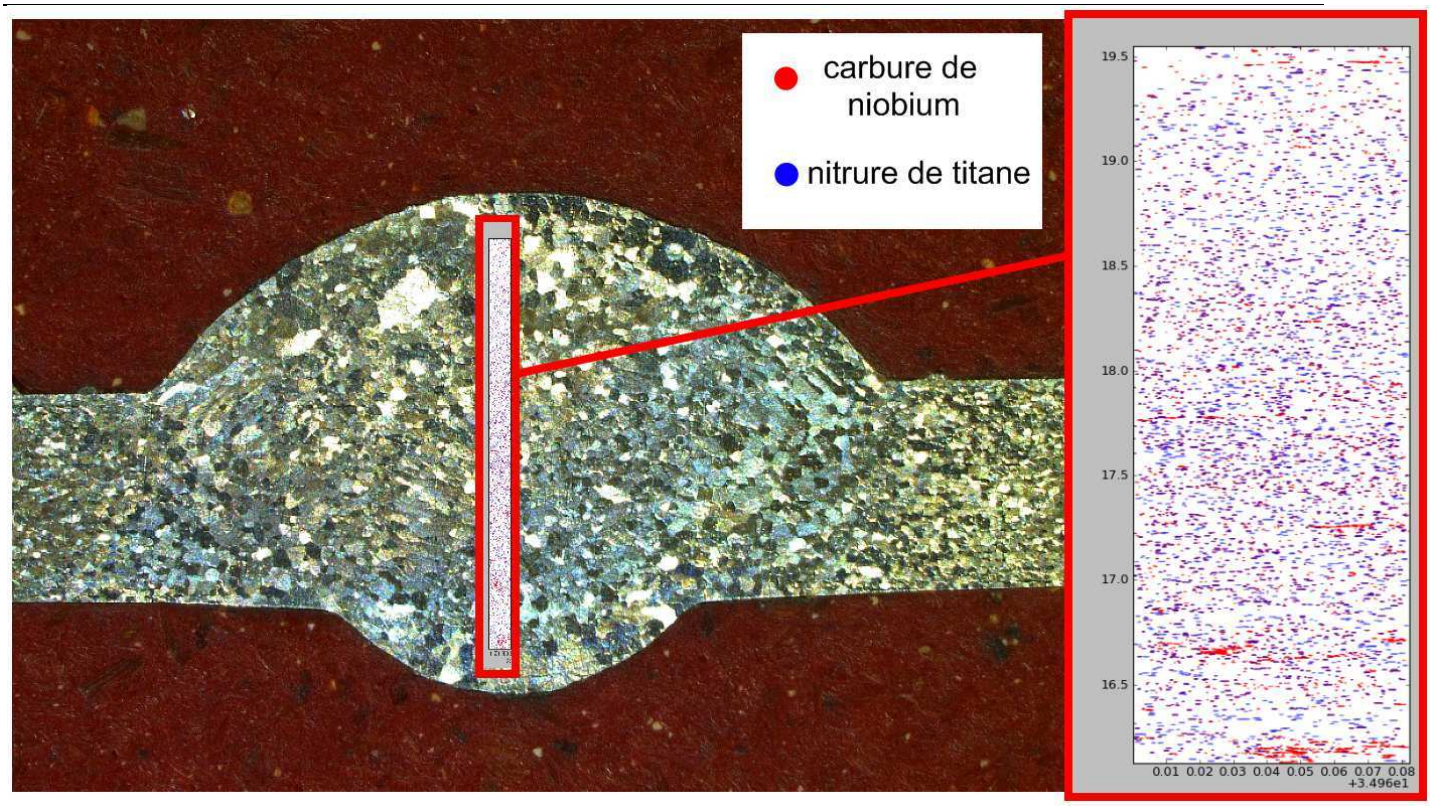

Figure 9 : exemple de répartition des précipités (K44-8 pulsé).

La cartographie de la figure 9 illustre les résultats que l'on a pu obtenir avec cette analyse. L'échantillon analysé (K44-8), riche en titane, présente une taille de grains en zone fondue assez fine et régulière, ce qui pourrait être lié à une distribution uniforme de précipités riches en Ti dans l'ensemble de la zone fondue

Conclusion et perspectives :

Le but final de notre étude est de développer un fil fourré permettant d'obtenir, lors du soudage MIG/MAG d'un acier inoxydable ferritique à 19% de chrome et 2% de molybdène, des zones fondues présentant de bonnes caractéristiques en termes de tenue à la corrosion et de propriétés mécaniques à chaud, tout en présentant une bonne soudabilité opératoire. Nous avons présenté ici les premiers résultats concernant les analyses chimiques et microstructurales des zones fondues obtenues avec différentes compositions de fils fourrés.

Les analyses métallographiques effectuées nous ont permis d'observer l'influence du titane présent dans le produit d'apport sur la microstructure des zones fondues, et les analyses chimiques associées nous ont renseignés sur les teneurs de cet élément. Nous avons ainsi montré que la teneur minimale de titane dans la zone fondue doit être supérieure à environ 0,1% (pour C+N<0.06%) pour garantir un affinement de grain. On peut toutefois penser que la composition n'est pas le seul facteur agissant sur la morphologie des grains, et que la structure obtenue dépend aussi du cycle thermique.

Pour atteindre ces teneurs minimales en zone fondue, le produit d'apport devra avoir une teneur minimale en titane qui sera supérieure à cette valeur limite, du fait des pertes liées au transfert. Ainsi donc, le teneur finale en Ti du fil d'apport développé devra être majorée par rapport à la teneur limite en zone fondue en tenant compte des pertes liées au transfert, sans toutefois dépasser des teneurs qui risqueraient de maintenir trop de titane en solution solide dans la matrice, ce qui aurait pour effet de dégrader les propriétés à chaud de la zone fondue. Cette composition sera par la suite à valider avec une optimisation de procédé.

A partir des outils et des procédures mises en place, il nous est maintenant possible de caractériser de manière plus complète la zone fondue en fonction des compositions des fils et des paramètres énergétiques du procédé.

La suite de l'étude va d'abord consister à compléter les analyses chimiques pour l'ensemble des compositions de fils, de manière à mieux identifier la teneur minimale en Ti nécessaire pour l'affinement de grain en zone fondue.

Afin d'étudier les relations entre les compositions et la microstructure des zones fondues et les propriétés en service des soudures, il nous faut encore procéder à une campagne d'essais mécaniques et physico-chimiques pour toutes les compositions. Cette campagne d'essais comprend plusieurs types d'essais :

- des essais de traction à chaud sur éprouvette traitée thermiquement (effet du vieillissement sur le comportement du niobium en solution dans la matrice ferritique) ;
- des essais de fatigue thermique ;

- des essais d'oxydation cyclique à chaud.

Le traitement des données nous permettra de garantir, quelles que soient les conditions de soudage, des caractéristiques de la zone fondue répondant au cahier des charges de l'application par la fabrication d'un fil dont la chimie sera fixée.

La dernière partie de l'étude concernera l'optimisation du procédé de soudage permettant de garantir une opération de soudage sur une large gamme de conditions et de paramètres. L'opération doit être faite dans les meilleures conditions possibles, avec un minimum de fumée, et l'obtention d'un cordon géométriquement correct et sans projection. Cette amélioration passera par la recherche d'une composition du gaz de protection optimale et des paramètres associés.

Références :

[1] SCHWARTZ, R, EXHAUST F1 UGINE A 430LNb (a ferritic welding grade for exhaust applications), IIW international congress, Mars 2006.

[2] J.L.MOIRON, Souder les aciers inoxydables, Sirpe, 2000.

[3] M. Semchyshen, A.P. Bond, H. J. D., Effects of Composition on Ductility and Toughness of Ferritic Stainless Steels, Toward Improved Ductility Toughness, Climax Molybdenum Development Co., 239-253, 1972.

[4] VAN ZWIETEN A. C. T. M., J. H. B., Some Considerations on the Toughness Properties of Ferritic Stainless Steels—A Brief Review, pressure vessel and piping, 56, 1-31, 1993.

[5] Dundas, H. J. & Bond, A. P, Niobium and Titanium Requirements for Stabilization of Ferritic Stainless Steels, ASTM special technical publication, N°656, 154-178, 1978.

[6] Gordon, W. & van Bennekom, A.,Review of stabilisation of ferritic stainless steels, Materials Science and Technology, 12, 126-131, 1996.

[7] F. Richard, FIL FOURRE METAL CORED POUR LE SOUDAGE DES ACIERS FERRITIQUES 17% Cr : APPLICATION AU SOUDAGE DES POTS D'ECHAPPEMENTS CATALYTIQUES, rapport technique AIR LIQUIDE C.T.A.S., 2002.

[8] FUJITA, N., New ferritic stainless steels in automotive exhaust system for clean environment, technical report n°81 NIPPON STEEL, Janvier 2000.

[9] J.-L. CROLET, J.-M. DEFRANOUX, L. S. R. T., Caractérisation électrochimique de la résistance à la corrosion caverneuse des aciers inoxydables : exemple des aciers ferritiques au Cr-Mo, Journées d'études CEFRACOR 1975, 1975..

[10] JP Planckaert, Modélisation du soudage MIG/MAG en mode short-arc, thèse de l'Université Henri Poincaré, Nancy 1, 2008.