
La société Ugine & ALZ [1]

Ugine & ALZ est le leader européen des produits plats en acier inoxydable. Née de la fusion d'Ugine SA (pionnier de l'acier inoxydable) et de ALZ NV, Ugine & ALZ est une société du groupe Arcelor, le premier groupe mondial de la sidérurgie.

Présent dans l'ensemble des grandes régions industrielles d'Europe avec cinq sites de production (Isbergues, Gueugnon et L'Ardoise en France, Genk et Charleroi en Belgique) et huit centres de services, Ugine & ALZ propose aujourd'hui la palette d'aciers plats inoxydables la plus large et la plus complète du marché. L'offre produit comprend une gamme étendue de nuances inoxydables pour tous les besoins de l'industrie (automobile, électroménager, bâtiment...), des produits laminés à chaud et à froid, un éventail de présentations et de dimensions (bobines, tôles, flans...) ainsi qu'une gamme très large d'aspects de surface.

En quelques chiffres*, Ugine & ALZ c'est 6 000 personnes, 1,4 million de tonnes produites par an - soit 25% de part de marché en Europe - et 2,4 milliards d'euros de chiffre d'affaires. Producteur d'aciers inoxydables, Ugine & ALZ propose également un ensemble de services associés qui va du parachèvement des bobines à la livraison en *just in time* en passant par une assistance technique dès la conception du projet client et jusqu'à sa mise en œuvre.

2. L'application collecteur d'échappement

Dans une ligne d'échappement, le collecteur est la pièce la plus proche du moteur et ainsi la plus chaude. Son rôle est de collecter les gaz chauds sortant des cylindres et de les conduire au catalyseur en limitant au mieux les pertes thermiques.

Cette pièce doit répondre à un cahier des charges spécifique comprenant, entre autres, des critères de résistance thermomécanique, de poids ou de facilité de mise en œuvre ainsi que des critères environnementaux et économiques. Aujourd'hui, les aciers inoxydables viennent concurrencer la fonte traditionnellement utilisée pour la fabrication des collecteurs d'échappement.

2.1. Fonctions

Le moteur à essence est un moteur à combustion interne, à allumage commandé, qui transforme l'énergie générée par le carburant en énergie cinétique. Ce fut à l'occasion de l'Exposition Universelle de Paris que l'ingénieur allemand Nikolaus August OTTO présenta en 1878 le premier moteur à gaz à compression fonctionnant suivant le principe du cycle à 4 temps. A chaque cycle, suite à l'admission (1^{er} temps), la compression et l'allumage (2^{ème} temps), l'explosion et la détente (3^{ème} temps), les gaz sont expulsés du cylindre durant un 4^{ème} temps, l'échappement.

La première fonction d'un collecteur d'échappement est de collecter les gaz d'échappement refoulés lors de la montée du piston pour les conduire jusqu'au catalyseur.

Les principaux composants des gaz d'échappement - l'azote N₂ (environ 70%), le dioxyde de carbone CO₂ et la vapeur d'eau H₂O - ne sont pas toxiques quoique les émissions de CO₂ contribuent à l'*effet de serre*. Les composants secondaires - le monoxyde de carbone CO, les oxydes d'azote NO_x et de soufre SO_x, de nombreux hydrocarbures imbrûlés HC et des particules - sont beaucoup plus nocifs. Bien que les composants secondaires ne représentent qu'une très faible quantité des rejets, leurs seuils de tolérance sont systématiquement revus à la baisse par les législateurs.

* chiffres de 2003

Les systèmes d'allumage et d'injection disponibles aujourd'hui permettent d'atteindre des valeurs d'émissions de polluants très faibles et une réduction supplémentaire passe par l'utilisation d'un catalyseur*. Environ 80% des polluants sont émis les deux premières minutes [2]. La température joue un rôle très important au niveau du catalyseur car la conversion des polluants commence véritablement à une température supérieure à 300°C environ.

La seconde fonction du collecteur est alors de limiter les pertes thermiques des gaz d'échappement avant qu'ils arrivent au pot catalytique, principalement lors d'un démarrage à froid du moteur (*light-off*), afin d'assurer une bonne température de catalyse.

2.2. Sollicitations en fonctionnement

Les gaz d'échappement entrant dans le système collecteur ont une température s'élevant à 900°C dans le cas de motorisation essence voire même 1000°C pour les motorisations les plus puissantes. De nature complexe, ces gaz contiennent des éléments agressifs pour le métal (CO, O₂, H₂O_{vapeur}, S, etc). De plus, la condensation des gaz peut conduire à la présence de solutions acides en surface intérieure du collecteur alors que durant l'utilisation du véhicule, la surface externe est exposée à l'état des routes : pluie, boue ou encore sels de déneigement (chlorures). La résistance à diverses sortes de corrosion est ainsi particulièrement importante pour ces pièces.

Les lignes d'échappement sont également soumises à des sollicitations mécaniques et thermiques. En plus du fluage lié au propre poids du collecteur, la sollicitation mécanique est engendrée par les vibrations du moteur et le roulement du véhicule. Il s'agit d'un chargement de fatigue aux amplitudes et fréquences variables. La sollicitation thermique, liée au bridage des pièces chaudes, est constituée de transitoires correspondants aux démarrages, accélérations-décélérations et arrêts du moteur du véhicule ainsi qu'à des maintiens ou à des faibles variations de température en fonction du régime moteur. Cette sollicitation produit un endommagement de fatigue thermique couplé aux effets des hautes températures comme l'oxydation et la viscoplasticité (fluage notamment).

Le perfectionnement des performances des véhicules automobiles s'effectue, en partie, par une amélioration du rendement moteur (injection, culasse multisoupapes, turbo). Ainsi, la température des gaz d'échappement est toujours revue à la hausse entraînant une température de fonctionnement du collecteur continûment croissante. Les sollicitations thermomécaniques du collecteur sont ainsi accrues de même que la sensibilisation à la corrosion.

2.3. Cahier des charges

Les collecteurs d'échappement sont des pièces techniques aux exigences spécifiques que les constructeurs d'automobiles garantissent à des durées d'utilisation élevées. Les matériaux employés pour leur fabrication doivent répondre à des cahiers des charges extrêmement complexes et variés.

Le cahier des charges d'un collecteur d'échappement comprend notamment des contraintes de résistance et de durabilité du matériau (résistance mécanique, stabilité microstructurale, tenue à l'oxydation), des contraintes technologiques (poids, mise en œuvre, encombrement), des contraintes environnementales (réduction de l'émission de polluants, du bruit) et des contraintes économiques (coût !).

Le développement d'un collecteur est donc fonction du type de motorisation et de l'environnement de celui-ci. Bien souvent, il s'agit d'une solution particularisée à chaque véhicule.

* en Europe, tous les véhicules à essence neufs sont catalysés depuis le 1^{er} janvier 1993

2.4. La solution acier inoxydable

La fonte est le matériau traditionnel pour la fabrication des collecteurs d'échappement. Chez Renault [3], la fonte grise à graphite sphéroïdale SiMo (au silicium et au molybdène) est préférentiellement utilisée mais, en raison d'importantes évolutions microstructurales apparaissant à haute température (oxydation, graphitisation, décarburation et transformation allotropique), elle ne présente plus une résistance thermomécanique suffisante. De plus, la desquamation des oxydes du collecteur peut endommager le pot catalytique ou le boucher.

Au vu des cahiers des charges actuels, l'acier inoxydable est devenu une solution incontournable pour l'application *collecteur d'échappement* [2, 4, 5]. En effet, les aciers inoxydables présentent de meilleures propriétés que la fonte pour cette application (tab 1.1). Ces matériaux dominent déjà le marché des véhicules à forte motorisation et pénètrent rapidement les autres segments.

<i>Propriété</i>	<i>Température</i>	<i>Fonte GS SiMo [3]</i>	<i>Acier inox. R20-12 [6]</i>	<i>Acier inox. F17TNb [7]</i>
Composition chimique (% masse)	/	3,2C 3,9Si 0,6Mo	20Cr 12Ni	17Cr + Ti/Nb
Structure (jusqu'à 850°C pour fonte)	/	ferrite	austénite	ferrite
Résistance mécanique (MPa)	20°C	350-400	620	490
Limite d'élasticité (MPa)	20°C	220-250	310	300
Allongement à rupture (%)	20°C	18-22	50	30
Masse volumique (g.cm ⁻³)	20°C	7,0	7,9	7,7
Dilatation thermique (x10 ⁶ K ⁻¹)	20-800°C	15,4	18,5	12,8
Conductivité thermique (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)	500°C	28,7	21	26,3
Capacité thermique (J.kg ⁻¹ .K ⁻¹)	20°C	455	500	460

tableau 1.1 : Comparaison fonte-aciers inoxydables, propriétés physiques et mécaniques

A résistance mécanique équivalente, la masse d'un collecteur en acier inoxydable est plus faible que celle d'un collecteur en fonte. Cela se traduit tout d'abord par une consommation moindre, donc moins de rejets de polluants, mais également par une inertie thermique plus faible qui évite le refroidissement des gaz et donc un délai de fonctionnement (*light-off*) du catalyseur réduit.

Les aciers inoxydables présentent une grande stabilité microstructurale sur un large intervalle de température. D'autre part, leur résistance à la corrosion est bien supérieure à celle de la fonte. Ces propriétés font des aciers inoxydables des matériaux plus durables que la fonte.

Les aciers inoxydables sont déjà utilisés pour la fabrication de catalyseurs (depuis la fin des années 1970 chez General Motors [8]) ou la réalisation de collecteurs d'échappement *tuning* surtout pour ses qualités esthétiques. De nombreux constructeurs d'automobiles s'intéressent à cette solution et tendent à l'intégrer à tous leurs véhicules. Les pots d'échappement en acier inoxydable représentent maintenant des marchés supérieurs à 100 000 tonnes en Europe [9].

Malgré des coûts de matière première et de mise en œuvre plus élevés que la solution fonte, les aciers inoxydables sont des matériaux de premier choix pour l'application *collecteur d'échappement*.

3. L'essai de fatigue thermique d'Ugine & ALZ

3.1. Les tests de validation des échappementiers

Les collecteurs d'échappements sont fabriqués par des échappementiers en sous-traitance des grands constructeurs d'automobiles.

La solution collecteur est adaptée individuellement à chaque véhicule visé et, la plupart du temps, les tests de validation d'un modèle s'effectuent sur banc moteur (fig 1.1). L'échappementier y teste un prototype, alternant les phases de montée en régime, maintien en pleine charge et fluctuation du régime moteur.

Peu de données sont disponibles concernant ces tests de validation. Cependant, d'après diverses sources bibliographiques [8, 10-14], il semble raisonnable d'avancer actuellement des températures maximales du métal de l'ordre de 900°C.

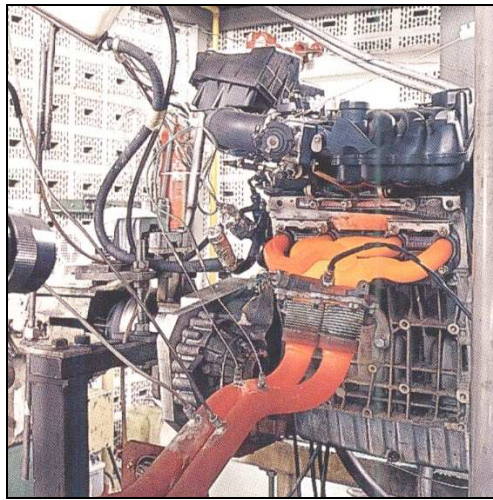


figure 1.1 : Test d'un collecteur sur banc moteur

3.2. L'essai de fatigue thermique

Ugine & ALZ, fabricant d'aciers inoxydables, doit montrer la résistance de son produit vis-à-vis de l'application *collecteur d'échappement*. En partie chaude de l'amont de la ligne d'échappement, les zones critiques des collecteurs sont sollicitées en fatigue thermique de façon prépondérante.

Afin d'apprécier la résistance des diverses nuances de sa gamme, Ugine & ALZ a développé un essai original de fatigue thermique. Cet essai apparaît représentatif, en zones critiques, des tests effectués par les échappementiers sur collecteur complet.

3.2.1. Principe de l'essai

Le principe de l'essai de fatigue thermique d'Ugine & ALZ est de générer des cycles alternés de chauffage et de refroidissement sur une éprouvette.

L'éprouvette est une bande de tôle, cintrée par pliage à froid, bridée par deux mors fixes. La sollicitation est obtenue en répétant un cycle thermique constitué d'une phase de chauffage par effet Joule suivie d'une phase de refroidissement naturel. Le bridage des déformations thermiques de l'éprouvette se traduit alors par une sollicitation mécanique, maximale au niveau du « V » de l'éprouvette.

L'essai est instrumenté avec un thermocouple placé au milieu de l'éprouvette. Un régulateur permet alors d'imposer les températures minimale et maximale du cycle en ce point. L'effort de réaction exercé sur l'un des mors fixes est également mesuré. La rupture est atteinte lorsque cet effort a chuté de 50% par rapport à l'effort maximum mesuré généralement aux premiers cycles. La durée de vie est alors égale au nombre de cycles N_f correspondants.

3.2.2. Le montage expérimental

Une photographie du montage expérimental de l'essai de fatigue thermique est présentée à la figure 1.2.

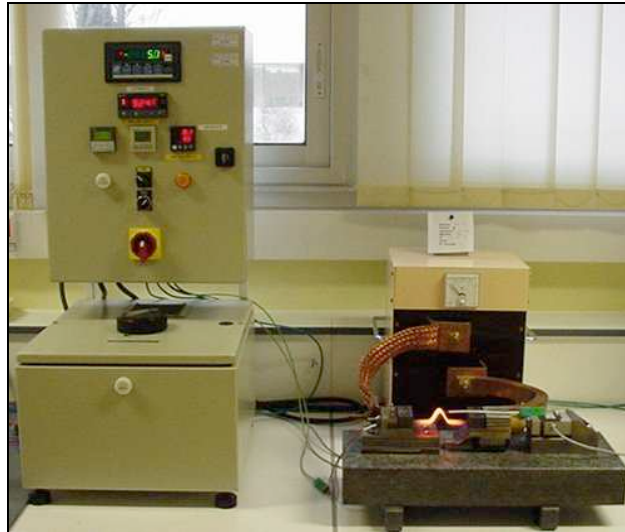


figure 1.2 : Photographie du banc d'essai de fatigue thermique Ugine & ALZ

L'éprouvette d'essai est une bande de tôle prélevée dans le sens perpendiculaire au sens de laminage (sens travers) et de dimension 200x20mm pour une épaisseur de 1,5 ou 2mm. La forme de cette éprouvette est déterminée par calcul thermoélastique (éléments finis) à l'aide du logiciel Systus. L'éprouvette pliée en « V » semble la mieux adaptée avec des efforts maximum en sommet du « V » (fig 1.3).



figure 1.3 : Eprouvette de fatigue thermique avant et après mise en forme

La mise en forme de la bande de tôle est effectuée à froid dans un montage matrice-poinçon. Le rayon de pliage ($R=3\text{mm}$ à la fibre neutre, angle d'ouverture 70°) simule les zones embouties ou coudées présentes sur les parties amont des collecteurs d'échappement.

Le chauffage de l'éprouvette est effectué par effet Joule alors que son refroidissement se fait librement à l'air. Un variateur de courant alimentant le primaire d'un transformateur régule la puissance de celui-ci qui, en sortie, peut délivrer 3000W. Il est ainsi possible de faire varier la vitesse de chauffage de l'éprouvette en fonction de la puissance délivrée par le transformateur.

Un coffret de commande permet d'indexer la température haute du chauffage et la température basse au refroidissement. Cette régulation est assurée par l'intermédiaire d'un thermocouple de type Chromel-Alumel de diamètre 0,2mm fixé sur le sommet de l'éprouvette (fig 1.4). En façade, le nombre de cycles est visualisé sur un compteur-décompteur programmable.



figure 1.4 : Photographie de l'éprouvette de fatigue thermique chauffée par effet Joule

Les caractéristiques du montage ainsi définies permettent d'assurer un chauffage de l'ambiante à 900°C en 30 secondes pour une éprouvette de section 20x2mm² et de 200mm de long. Le refroidissement naturel de l'éprouvette de 900 à 250°C s'effectue en 3 minutes environ.

L'effort de bridage nécessaire pour contrarier les dilatation et contraction thermiques de l'éprouvette au cours des cycles de chauffage et de refroidissement successifs est mesuré par un capteur de force à jauges (± 200 daN). Celui-ci est disposé à une des extrémités du montage. La centrale d'acquisition enregistre simultanément les mesures de température et de force.

Il est ainsi possible de tracer les cycles *effort-température* et de suivre l'évolution des courbes en fonction du nombre de cycles (fig 1.5). Le premier demi-cycle (la première montée en température) correspond à un cycle d'accommodation avec la mise en compression de l'éprouvette. Les cycles suivants de *chauffage/refroidissement* présentent une hystérésis formée par la superposition des courbes.

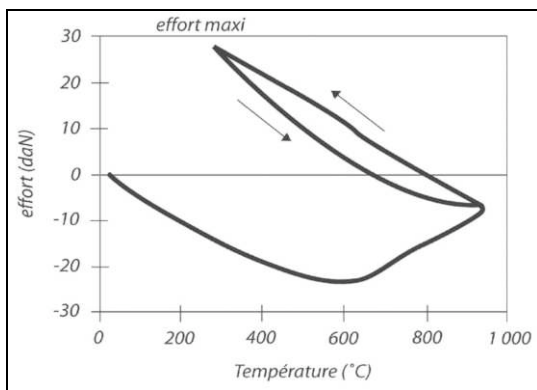


figure 1.5 : Enregistrement effort-température d'un essai de fatigue thermique 250-950°C

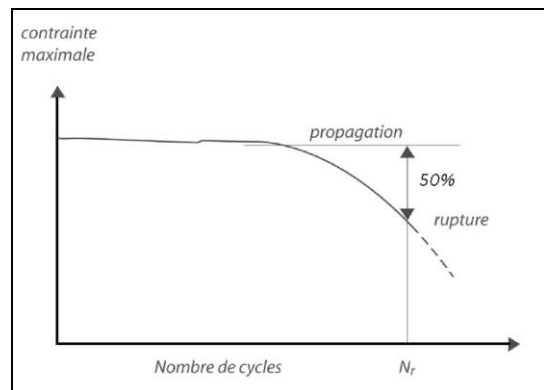


figure 1.6 : Diagramme effort maximal- nombre de cycles thermiques lors d'un essai de fatigue thermique

La modularité de l'essai de fatigue thermique repose sur le choix des températures minimale et maximale ainsi que sur un éventuel maintien isotherme. Elle repose également sur la géométrie du montage (écartement entre mors) et sur celle de l'éprouvette (forme, épaisseur). Ces divers paramètres influent directement la sévérité l'essai de fatigue thermique.

L'essai de fatigue thermique d'Ugine & ALZ présente les avantages de facilité de mise en œuvre et de faible coût. De plus, diverses configurations du montage expérimental peuvent être effectuées afin d'approcher au mieux les sollicitations réelles.

3.2.3. La fin d'essai (rupture)

Au cours des cycles *chauffage-refroidissement* successifs d'un essai de fatigue thermique, la superposition des courbes *effort-température* montre l'affaissement de l'effort maximal mesuré à la température basse du cycle thermique. Le suivi de ce point en fonction du nombre de cycles conduit à tracer la courbe de durée de vie de l'éprouvette (fig 1.6). Cette courbe présente une allure semblable à celle obtenue pour un essai de fatigue oligocyclique conventionnel.

Les courbes *effort maximal-nombre de cycles* se caractérisent par deux phases. Une première phase où l'effort maximal (température basse) évolue peu, ce qui traduit la phase d'amorçage et le début de propagation des fissures de fatigue. Une deuxième phase où l'effort maximal diminue rapidement et qui traduit en général la propagation d'une fissure de fatigue thermique conduisant à la ruine de la structure. Lorsque l'effort devient inférieur à 50% de l'effort maximal en phase d'amorçage, la durée de vie N_f est déterminée.

La faible dispersion des courbes, tout à fait acceptable pour un essai de fatigue, reflète la bonne reproductibilité des conditions d'essai. Les essais de fatigue thermique appliqués à l'ensemble de la gamme d'aciers inoxydables pour collecteur d'échappement d'Ugine & ALZ permet alors de classer des différentes nuances vis-à-vis de cette application.

Cependant, le mécanisme d'endommagement des nuances ferritiques est différent de celui des nuances austénitiques. Pour les nuances ferritiques, les fissures s'amorcent et se propagent en rayon interne du « V » de l'éprouvette (fig 1.7). Pour les austénitiques, c'est en rayon externe de celui-ci que des fissures se sont propagées dans l'épaisseur (fig 1.8). La compréhension de ces différents mécanismes d'endommagement est l'un des sujets de la présente thèse.

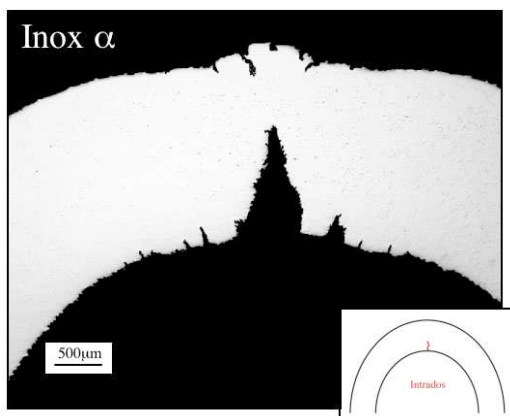


figure 1.7 : Eprouvette en acier inoxydable ferritique rompue en fatigue thermique [15]
(endommagement en intrados)

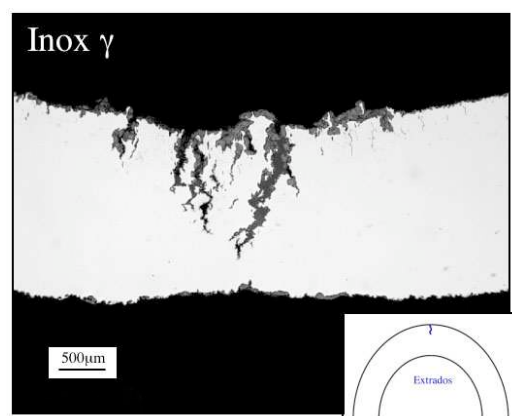


figure 1.8 : Eprouvette en acier inoxydable austénitique rompue en fatigue thermique [15]
(endommagement en extrados)

4. Conclusions

Les collecteurs d'échappement des véhicules automobiles doivent satisfaire un cahier des charges complexe et varié. Ces composants sont sollicités en fatigue thermique de manière prépondérante et les principales propriétés requises pour les matériaux sont la tenue mécanique à chaud, en fatigue et en fluage, ainsi que la tenue à l'oxydation.

L'amélioration des performances des moteurs s'accompagne d'une augmentation constante de la température des gaz d'échappement. Cela conduit à solliciter davantage le collecteur d'échappement. L'utilisation de tôles d'aciers inoxydables constitue une voie d'amélioration pour la fabrication de ces pièces afin de garantir les propriétés actuellement requises.

Fabricant d'aciers inoxydables, la société Ugine & ALZ a développé un essai original de fatigue thermique représentatif de la sollicitation thermomécanique des zones critiques des collecteurs testés sur banc moteur. Cet essai permet de classer les différentes nuances d'aciers inoxydables en fonction de leur durée de vie. Cependant, les mécanismes d'endommagement observés sont différents suivant les nuances ferritiques et austénitiques.

Références de la Partie 1

- [1] Site Internet *www.ugine.fr* (2004)
- [2] J.Y. Merlinand et P. Vaugeois, *Les aciers inoxydables dans l'échappement automobile*, Revue de Métallurgie - CIT, p1529-1536 (1994)
- [3] P. Bastid, *Comportement thermomécanique de fontes à graphite sphéroïdal pour collecteur d'échappement*, Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris (1995)
- [4] J. Casteland et P. Bourgain, *Nuances d'aciers inoxydables pour échappement automobile. Tendances pour résoudre différents problèmes*, Revue de Métallurgie - CIT, p667-672 (1986)
- [5] P. Maîtreperrière, B. Bramaud-Gratteau et J. Decroix, *Evolution des matériaux pour la ligne d'échappement automobile européenne*, Revue de Métallurgie - CIT, p657-666 (1986)
- [6] Ugine & ALZ, *UGINOX R20-12*, Document commercial (1997) disponible sur *www.ugine.fr*
- [7] Ugine & ALZ, *UGINOX F17TNb*, Document commercial (1998) disponible sur *www.ugine.fr*
- [8] J.N. Johnson, *Influence of Columbium on the 870°C Creep Properties of 18% Chromium Ferritic Stainless Steels*, International Congress and Exposition, Detroit, Michigan (1981)
- [9] Arcelor, *Rapport annuel de l'année 2002* (2003) disponible sur *www.arcelor.com*
- [10] N. Fujita, *New Ferritic Stainless Steels in Automotive Exhaust System for Clean Environment*, Nippon Steel (2000)
- [11] K. Shiratani, Y. Watanabe, S. Iwanaga and K. Nishino, *Thermal Fatigue Life Prediction for Stainless Steel Exhaust Manifold*, International congress and Exposition, Detroit, Michigan (1998)
- [12] P. Rombeaux, J. Lagier, J. Ragot and P. Vaugeois, *Ferritic Stainless Steels in Exhaust Systems*, Innovation Stainless Steel, Florence, Italy (1993)
- [13] R. Mohrmann, W. Schmitt, H. Riedel, A. Dietsche and A. Fishersworrning-Bunk, *Modelling of the Fatigue Life of Automobile Exhaust Components*, Fatigue 2002, Stockholm, Suède (2002)
- [14] P. Maziaszand and M. Pollard, *High-Temperature Cast Stainless steel*, Advanced Materials & Processes - Metals technology for design, testing and processing, p57-59 (2003)
- [15] L. Bucher, *Fatigue thermique des aciers inoxydables F17TNb et R20-12 pour application automobile*, Rapport annuel (2002)