

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

+

UNIVERSITÉ BADJI MOKHTAR - ANNABA
BADJI MOKHTAR – ANNABA UNIVERSITY



جامعة بادجي مختار – عنابة

Faculté : Science de l'ingénierie

Département : Métallurgie et génie de Matériaux

Domaine : Science technique

Filière : Métallurgie

Spécialité : Génie des surfaces Métalliques

Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master

Thème :

CORROSION DES ACIER INOXYDABLES 316L

Présenté par : *BEN MOHAMED RANIA*

Encadrant : BOUDEBAN SAID

Professeur

Badji Mokhtar Annaba

Jury de Soutenance :

BOUDEBANE S	Professeur	Badji Mokhtar Annaba	Président
BOUDEBANE S	Professeur	Badji Mokhtar Annaba	Encadrant
TOUHAMI M.Z	Professeur	Badji Mokhtar Annaba	Examineur
MECHACHTIS	Professeur	Badji Mokhtar Annaba	Deuxième examinateur

Année Universitaire : 2019/2020

Remerciement

Remerciement

Mes remerciements vont tout d'abord à notre Dieu pour la santé et le courage qu'il m'a a donnés pour terminer ce modeste travail.

Je remercie mon encadreur Pr BOUDEBANE SAID pour le soutien moral pendant toute la durée de préparation de ma thèse de Master.

Je tiens à exprimer mes remerciements à Monsieur Pr Touhami M.Z, et Pr Mechacti S, enseignants au département de Métallurgie pour avoir accepté de faire partie du jury.

Je remercie mes très chers parents qui se sont donnés beaucoup de peine dans la vie pour la réussite de leurs enfants, que Dieu les protège.

Je remercie toute ma famille, mes deux sœurs

Ma grand-mère, mon grand-père, Mes oncles, mes Tantes, mes cousins, et toute la famille.

Je remercie aussi tous mes amis, mes camarades, et tous mes contacts.

Dédicace

*Avec les sentiments d'amour et de gratitude les plus sincères Je dédie ce
modeste travail à :*

*Que dieu la protège, la bougie de ma vie, ma chère mère. Celui qui m'a bien
élevé et qui n'a jamais lésiné des efforts Pour que je ne manque de rien.*

*A mon héros, le plus merveilleux des papas, qui a œuvré pour ma réussite par
son amour, son soutien, tous les sacrifices consentis et ses précieux conseils.*

*A mes deux petites sœurs Sofia & Yasmine pour leur encouragement et qui
ont toujours été là pour moi.*

*A toute ma famille maternelle MIROUH, mes tentes « DJAMILA, SAMIRA et
Karima », mes oncles « Naouri et Faouzi » et leurs époux « NARDJES et Naima »,
ma FATOUM et SAID.*

*A toute la famille BENHEDDIA « MERIEM, GHAYA, SALMA, Amel et ma petite
princesse Nina », pour leur encouragement et soutien de moral « Je vous aime ».*

*A mes 2em parents « TAHER & FARIDA » qui mon toujours accompagne par
leur DOUAA.*

*A mes proches amis et camarade KHADIDJA, MERIEM, RAHMA, CHAIMA,
SARA et ASMA*

*Et enfin à Amine Benheddia merci d'être le point de force pour moi, pour
l'encouragement et d'être toujours à mes côtés aux moments difficiles que j'ai
passé durant la réalisation de ce mémoire.*

Merci à tous Qu'allah vous donne tout ce que vous désirez.

Sommaire

Introduction générale	1
Chapitre 1 :	2
Généralité Des Aciers Inoxydable	2
1 Généralité des aciers inoxydables :	3
1.1 Introduction.....	3
1.2 Historique des aciers inoxydable :	4
1.3 Principales nuances d'aciers inoxydables.....	4
1.4 Principales familles d'aciers inoxydables :	5
1.4.1 Ferritique.....	5
1.4.2 Martensitique	6
: fer-chrome, carbone > 0,1 %, ferromagnétique (« magnétique »), apte à la trempe[4].	6
1.4.3 Duplex.....	6
1.4.4 Aciers austéno-ferritiques	6
1.4.5 Les aciers austénitiques	6
1.5 Les diagrammes d'équilibre des aciers inoxydables.....	8
1.5.1 Les binaires Fe-Cr :	8
1.5.2 Les binaires Fe-Ni :	9
1.5.3 Les ternaires Fe-Ni-Cr :	10
1.6 Les notions de chrome et de Nickel équivalents :	11
1.6.1 Diagramme schaeffler :.....	11
1.6.2 Diagramme de Pryce et Andrew :.....	11
1.7 Influence des éléments d'addition :	12
1.7.1 Les éléments alphagènes :	13
1.7.1.1 Le chrome (Cr) :.....	13
1.7.1.2 Le molybdène (Mo) :	13
1.7.1.3 Vanadium :.....	13
1.7.1.4 Silicium :.....	14
1.7.1.5 Le Titane (Ti):.....	14
1.7.1.6 Le niobium (Nb) :	14
1.7.2 Les éléments gammagènes :	15
1.7.2.1 Le Nickel (Ni):	15
1.7.2.2 Manganèse (Mn) :	15
1.7.2.3 Le carbone (C):	16
1.7.2.4 L'azote (N) :	16

Sommaire

1.7.2.5	Le soufre (S) :	16
1.7.2.6	Le cuivre (Cu) :	16
1.8	Les Aciers inoxydables austénitiques :	16
1.8.1	Propriétés des aciers inoxydables austénitiques :	17
1.8.2	Composition chimique et additions :	18
1.8.3	L'acier inoxydable 316L :	19
1.8.4	Composition de l'acier inoxydable 316L :	20
1.9	Traitements thermiques des aciers inoxydables austénitiques :	20
1.9.1	Traitement d'hypertempe :	21
1.9.1.1	Choix de la température d'hypertempe :	21
1.9.2	Traitement antiferrite :	21
1.9.3	Traitement thermomécanique :	22
1.9.4	Traitement d'optimisation de la tenue au fluage des aciers inoxydables austénitiques : ...	23
1.9.5	Revenu de durcissement :	23
1.9.6	Aciers inoxydables à durcissement par précipitation : [10].....	23
1.9.7	Précipitation des carbures et carbonitrides :	24
1.10	L'acier inoxydable austénitique et ses applications :	24
1.10.1	Utilisation de l'acier inoxydable dans l'industrie agro-alimentaire : [25].....	24
1.10.2	Utilisation de l'acier inoxydable dans le domaine biomédical :	25
Chapitre 2 :		27
La corrosion des aciers inoxydables		27
2	LA CORROSION DES ACIERS.....	28
2.1	Introduction :	28
2.2	Comportement à la corrosion [2] :	28
2.3	Influence de divers milieux	28
2.4	LA PASSIVATION.....	29
2.4.1	DESCRIPTION DU PHENOMENE.....	29
2.4.2	NATURE DU FILM PASSIF :	30
2.4.3	Film passif sur l'acier inoxydable austénitique :	30
2.5	Les différents types de corrosion [30] :	31
2.5.1	Corrosion uniforme.....	31
2.5.2	Corrosion galvanique.....	31
2.5.3	Corrosion cavernueuse.....	31
2.5.4	Corrosion par piqûres La corrosion par piqûres : [31]	32
2.5.5	Corrosion inter granulaire :	32
2.5.5.1	Quand la corrosion inter granulaire se produit-elle ? [32].....	33
2.6	Résistance à la corrosion des aciers inoxydables :	33

Sommaire

2.6.1	Forme de la corrosion de l'acier inoxydable 316 L :.....	33
2.6.1.1	Corrosion par piqûres.....	33
2.6.1.2	Corrosion caverneuse.....	34
2.6.1.3	Corrosion sous contrainte.....	35
2.7	Résultat d'expertise (SKD spa):	35
2.7.1	Conditions nominales du site :.....	35
2.7.2	Pour quoi l'acier inoxydable 316L	35
2.7.3	Analyses des conditions de travail de la pièce :	36
	Conclusion	38
	Références Bibliographiques	40

Liste des figures et des tableaux

Liste de figures

Figure	Titre	Page
1	Diagramme d'équilibre des alliages binaires Fe-Cr	09
2	Diagramme d'équilibre des alliages Fe-Ni	09
3	Coupe du diagramme ternaire fer-chrome-nickel pour des teneurs Croissantes en nickel. Influence du nickel sur l'extension de la boucle γ	10
4	Section à 1000°C du diagramme ternaire Fe-Cr-Ni	10
5	Diagramme de Schaeffler	11
6	Diagramme de Pryce et Andrews donnant la structure des aciers	12
7	Diagramme Fer-Chrome – Influence de l'addition d'éléments gammagènes	12
8	L'Austénite	17
9	Corrosion par piqure (photo réel)	32
10	Corrosion par piqure (schéma)	32
11	Figure Vue schématique des zones appauvries en chrome aux joints de grains	32
12	Dégradation d'une soudure	33
13	Corrosion par piqûres	34
14	Courbe intensité-potentiel des aciers inoxydables dans certain milieux acides, en fonction de leur teneur en chrome.	34
15	Une caverne de corrosion	35
16	Soudure de nouvelle partie des tubes	36
17	Une fuite d'huile hydraulique à cause de la corrosion.	36
18	Grain de soudure déposé sur le tube d'huile hydraulique	37
19	Réparation temporaire d'un trou afin de ne pas causer a un arrêt de travail de l'unité	37

Liste de Tableaux

Tableau	Titre	Page
1	Équivalences des désignations	05
2	Gammes de nuances des aciers inoxydables austénitiques 304 et 316	19
3	Composition de l'acier inoxydable 316L	19
4	Caractéristiques des traitements thermiques des aciers inoxydables	20
5	Durcissement structural après traitement thermomécanique	22
6	Propriétés des quelques métaux et alliages utilisés en domaine médical	26

Introduction générale

Introduction générale

En raison des produits qu'ils peuvent contenir ou de l'environnement dans lequel ils fonctionnent, beaucoup d'équipements sont exposés à des risques de corrosion. Les zones généralement exposées à des corrosions importantes sont situées dans une atmosphère produite par une combinaison d'air marin et d'air pollué par des émanations industrielles. De ce fait, les entreprises en bordure de mer sont victimes de la corrosion au niveau de leurs installations, notamment les entreprises industrielles qui ont leurs infrastructures dans lesdites zones.

Parmi ces entreprises, nous mentionnons Sharikat Kahraba Koudiet Eddraouch s.p.a, par abréviation SKD Spa, est une société par actions, au capital social de 53 milliards de DA dont les actionnaires sont SONALGAZ à hauteur de 51% et HOLDING SONATRACH AIE à hauteur de 49%, ayant le siège social dans la wilaya d'El Taref.

Le site est situé dans la commune de Berrihane (daïra de ben m'hidi wilaya d'el taref), ville se trouvant à 30 km à l'Est Annaba. Le site à une superficie totale de 42 ha 50 a 45ca. Il est limité au Nord par la Méditerranée, et ailleurs par des terrains vagues.

La centrale thermique à cycle combiné comprend trois tranches single shaft (mono arbre avec configuration (Turbine à gaz –Alternateur-Turbine à vapeur) de production d'électricité d'une puissance totale est d'environ 1200 MW.

La centrale à cycle combiné comporte essentiellement une turbine à gaz, une chaudière de récupération à trois niveau de pression, une turbine à vapeur, un condenseur refroidi par l'eau de mer, un alternateur refroidi avec l'hydrogène et un système huile hydraulique qui fournit la puissance fluide nécessaire au fonctionnement des dispositifs de commande des systèmes d'alimentation en carburant et des VIGV. L'énergie produite est évacuée à travers un poste blindé.

Les puissances totales nettes maximales de la centrale (Borne Usine) aux conditions de site sont : 1200 MW (combustible gaz naturel) et de 1077 MW (combustible gasoil).

La puissance totale nette maximale de chaque tranche cycle combiné est de 400 MW (combustible gaz) et de 358 MW (combustible gas-oil) aux conditions site.

Ce travail de Master portera sur l'étude de la corrosion du tube de système hydraulique, observée lors de notre stage pratique, en essayant de proposer des solutions axées sur la protection dans la perspective d'augmenter la durée de vie de ces tubes.

Chapitre 1 :

Les Aciers Inoxydables

Généralités

Chapitre 1 : Généralités sur les Aciers Inoxydables

1 Généralités sur les aciers inoxydables :

1.1 Introduction

Les aciers inoxydables, couramment appelés inox, jouent un grand rôle dans d'innombrables domaines : vie quotidienne, industrie mécanique, agroalimentaire, chimie, transports, médecine, chirurgie, etc. [1]. Ce sont des aciers, alliages de fer et de carbone, auxquels on ajoute essentiellement du chrome qui, au-delà de 10,5 % en solution (selon la teneur en carbone) dans la matrice, provoque la formation d'une couche protectrice d'oxyde de chrome qui confère à ces aciers leur inoxydabilité. [2]

D'autres éléments peuvent être ajoutés, notamment le nickel qui améliore les propriétés mécaniques en général et la ductilité en particulier, et d'autres éléments comme le molybdène ou le titane qui améliorent la stabilité de l'alliage pour des températures autres que l'ambiante ainsi que des éléments à hauts points de fusion comme le vanadium et le tungstène accompagné en général d'une augmentation de la teneur en chrome, pour obtenir la résistance aux hautes températures au contact d'une flamme.

L'élément d'alliage auquel les aciers inoxydables doivent leur principale caractéristique est le chrome. Contrairement à ce que l'on croit généralement, ce métal est très réactif du point de vue chimique et il est en particulier très oxydable, mais son oxyde forme une véritable peau à la fois transparente et protectrice. Allié au fer et au nickel, il provoque la formation d'un composé de surface oxydé capable de ralentir ou même d'arrêter totalement la corrosion. [1]

Il existe de multiples nuances d'aciers dits <inoxydables> désignées, par la normalisation américaine AISI (American Iron and Steel Institute), «304», «304L», «316L», etc, qui correspondent à des compositions différentes. Chaque nuance est préconisée pour certains types d'environnements, son utilisation dans d'autres environnements serait déconseillée car ceci pourrait entraîner une corrosion du matériau.[2]

Les aciers inoxydables présentent une grande variété de structure et donc de propriétés physiques, mécaniques et surtout chimiques. Une des principales raisons est que le fer, élément principal, possède trois variétés de structures cristallines entre 0K et la température de fusion :

- De 0K à 910C° le fer α de structure cubique centrée (CC).
- De 910C° à 1400C° le fer γ de structure cubique faces centrées (CFC).
- De 1400C° à 1538C° le fer δ de structure cubique centrée.

Chapitre 1 : Généralités sur les Aciers Inoxydables

1.2 Historique des aciers inoxydables :

Chaque année, des quantités énormes d'acier sont perdues à cause de la corrosion. Pour y remédier, on a développé différents types d'alliages résistants à la corrosion à l'air ambiant, dans un milieu corrosif ou à haute température. Des groupes très importants de ces alliages sont les aciers inoxydables au chrome et chrome-nickel. Ceux-ci peuvent être alliés à d'autres éléments pour améliorer les propriétés sous conditions d'applications spécifiques.

Un matériau exempt de rouille n'est pas nécessairement inoxydable, c.-à-d. résistant à la rouille ou à la corrosion. La pratique montre que ces aciers peuvent rouiller dans des conditions spécifiques. Une autre propriété de ces alliages est qu'ils sont résistants à l'oxydation jusqu'à une certaine température. Une couche d'oxydes est formée à la surface qui protège le métal contre l'oxydation/attaque. Des additions d'autres éléments d'alliages peuvent augmenter la résistance à l'oxydation. Un descriptif de la création de ces aciers inoxydables nous mènerait trop loin. En voici donc un bref aperçu. Tout commence en 1797 quand Vauquelin a pu isoler l'élément chrome. Les premières publications sur les alliages fer-chrome datent de 1820. C'est en 1912 qu'on a eu connaissance de la structure et des propriétés mécaniques et chimiques. Un peu après la première guerre mondiale, donc après 1918, ces matériaux ont été développés pour des applications industrielles. Grâce aux nouvelles méthodes de production et aux nouveaux domaines d'application, un grand nombre de types ont été développés au cours des ans et... la recherche continue. [3]

1.3 Principales nuances d'aciers inoxydables

Pour être classé dans la catégorie inoxydable, un acier doit contenir au moins 10,5 % de chrome (Norme EN 10020).

Les plus courants (analyses chimiques : en % pondéral) :

- X2CrNi18-09 (AISI 304L ou A2) : C : 0,02 %, Cr : 17 à 19 %, Ni : 9 à 11 %, « inox alimentaires », utilisés pour la réalisation de matériel de collectivité, et d'ouvrages toutes qualités ;
- X2CrNiMo17-12 (AISI 316L ou A4) : C : 0,02 %, Cr : 16-18 %, Ni : 11-13 %, Mo (molybdène) : 2 %, dits « inox chirurgical » et « inox marine », utilisés dans les industries chimiques, pharmaceutique, pétrolières, agro-alimentaires (cuves...), mobilier urbain, et aussi intensément en milieu nautique ;
- X8Cr17 (AISI 430) : C : 0,08 %, Cr : 16-18 %, utilisés pour les articles de ménage, l'électroménager, les éviers ;

Chapitre 1 : Généralités sur les Aciers Inoxydables

- X6CrTi12 (AISI 409) : C : 0,06 %, Cr : 11-13 %, Ti (titane), utilisé dans les échappements automobiles, fourneaux, etc.

La plupart des aciers inoxydables utilisés sont conformes à des normes :

- européennes (norme EN DIN 10088 en particulier) ;
- américaines (normes de l'ASTM) ; L signifie lowcarbon (bas carbone), H signifie High carbon (haut carbone) ;
- d'autres pays également, mais ces normes sont peu connues internationalement.

Concernant le tableau d'équivalence ci-dessous il faut remarquer que la nuance américaine de type 316 autorise une teneur en molybdène de 3 % maximum ce qui peut poser un problème de conformité lorsque la spécification préconise une norme européenne qui limite la teneur en molybdène à 2,5 %. [2]

EN 10027 (européenne)	NF A 35573 (France)	AISI (États-Unis)	Composition								
			% C	% Cr	% Ni	% Mo	% Si	% Mn	% P	% S	Autres
X10CrNi18-08 1.4310	Z10CN18-09	302	0,12	16 à 18	6 à 8	—	1	2	0,04	0,03	—
X8CrNiS18-09 1.4305	Z10CNF18-09	303	≤ 0,12	17 à 19	8 à 10	0,6	1	2	0,06	≥ 0,15	—
X5CrNi18-10 1.4301	Z7CN18-09	304	0,05	17 à 19	8 à 10	—	1	2	0,04	0,03	—
X2CrNi18-09 1.4307	Z3CN18-10	304 L	0,02	17 à 19	9 à 11	—	1	2	0,04	0,03	—
X5CrNi19-11 1.4303	Z8CN18-12	305	0,05	17 à 19	11 à 13	—	1	2	0,04	0,03	—
X7CrNi23-14	Z12CNS25-13	309	0,07	22 à 25	11 à 14	—	1	2	0,04	0,03	—
X12CrNiSi25-20	Z12CNS25-20	310	0,12	23 à 26	18 à 21	—	1	2	0,04	0,03	—
X5CrNiMo18-10 1.4401	Z6CND17-11	316	0,05	16 à 18	10 à 12,5	2 à 2,5	1	2	0,04	0,03	—
X2CrNiMo17-12-02 1.4404	Z2CND17-12	316 L	0,02	16 à 18	10,5 à 13	2 à 2,5	1	2	0,04	0,03	—
X10CrNiMoTi18-10 1.4571	Z6CNDT17-12	316 Ti	0,1	16 à 18	10,5 à 13	2 à 2,5	1	2	0,04	0,03	Ti . 5 C ; Ti . 0,6
X10CrNiTi18-09 1.4541	Z6CNT18-10	321	0,10	17 à 19	10 à 12	—	1	2	0,04	0,03	Ti . 5 C ; Ti . 0,6
X7Cr13 1.4003	Z6C13	403	0,07	11,5/13,5	—	—	1	1	0,04	0,03	—
X10Cr13 1.4006	Z12C13	410	0,08/0,15	11,5/13,5	—	—	1	1	0,04	0,03	—
X12CrS13	Z12CF13	416	0,08/0,15	12 à 14	0,5	0,15/0,6	1	1,5	0,06	≥ 0,15	—
X20Cr13 1.4021	Z20C13	420	0,16-0,25	12	—	—	≤ 1	≤ 1,5	≤ 0,04	≤ 0,015	—
X30Cr13 1.4028	Z30C13	420 B	0,3	12 à 14	—	—	1	1	0,04	0,03	—
X6Cr17 1.4016	Z8C17	430	0,08	16/18	0,5	—	1	1	0,04	0,03	—
X12CrMoS17	Z10CF17	430 F	0,12	16/18	0,5	0,2/0,6	1	1,5	0,06	≥ 0,15	—
X22CrNi17 1.4057	Z15CN16-02	431	0,1/0,2	15/17	1,5/3	—	1	1	0,04	0,03	—
X105CrMo17 1.4125	Z100CD17	440 C	1	17	—	—	—	1	—	—	—

Tableau 1 :Équivalences des désignations

1.4 Principales familles d'aciers inoxydables :

1.4.1 Ferritique :

Fer-chrome, carbone < 0,1 %, ferromagnétique (« magnétique »). La nuance la plus courante est l'EN 1.4016 (AISI 430). Le chrome et le molybdène augmentent la résistance à la corrosion. Le titane et le niobium améliorent la soudabilité [4]. Les aciers inoxydables ferritiques sont caractérisés par une remontée de la température de transition α - δ du diagramme de phase, ce qui fait qu'en pratique leur structure reste ferritique dans tout l'intervalle de température de la gamme thermomécanique. Leur

Chapitre 1 : Généralités sur les Aciers Inoxydables

teneur en chrome varie de 12 à 20% pour les aciers inoxydables ferritiques et supérieure à 20% pour les aciers inoxydables super-ferritiques [5 ; 6]

1.4.2 Martensitique

Fer-chrome, carbone > 0,1 %, ferromagnétique (« magnétique »), apte à la trempe [4]. Ces aciers inoxydables sont d'une structure entièrement martensitique, la trempe confère à ces nuances une limite d'élasticité, une résistance à la rupture et une dureté très élevée. En principe, ces aciers contiennent une teneur maximale de carbone limitée à (1,2%). Leurs teneurs en chrome sont de (12 à 18%), et ils peuvent contenir jusqu'à (7%) de nickel, et jusqu'à (3%) de molybdène. [7]

1.4.3 Duplex

Fer-chrome-nickel, structure mixte austénitique-ferritique, magnétique (la nuance la plus connue est l'EN 1.4462). Ces aciers présentent en général des caractéristiques mécaniques supérieures et une meilleure résistance à la corrosion que la plupart des nuances courantes austénitiques et ferritiques [4].

1.4.4 Aciers austéno-ferritiques

Les propriétés des aciers austéno-ferritiques sont dues, pour la plupart, à la structure biphasée de l'alliage. Ils combinent favorablement les propriétés mécaniques et de corrosion des aciers austénitiques et ferritiques. Ils contiennent à la base du fer et du carbone avec des additions de Chrome et de Nickel dont les quantités sont déterminées pour obtenir un taux de ferrite situé aux environs de 50%. Les teneurs d'éléments d'addition sont : Cr (22 à 27%), Ni (4 à 8%).[8]

1.4.5 Les aciers austénitiques

Les nuances les plus utilisées sont caractérisées par des teneurs en chrome et en Nickel respectivement de 17 à 18% et 8 à 14%. L'addition de molybdène (de 2 à 3%) leur confère une bonne tenue dans les milieux acides et ceux générateurs de piqûres ou de corrosion caverneuse.

Ces aciers ont deux caractéristiques métallurgiques principales : ils contiennent suffisamment de chrome pour leur conférer un caractère inoxydable et suffisamment d'éléments gammagènes comme le Nickel pour conférer leur structure est cubique à face centrées selon leur composition chimique et leur caractéristiques d'utilisation.

Chapitre 1 : Généralités sur les Aciers Inoxydables

La forte proportion de Nickel sert à donner et à conserver la structure austénitique(γ) à ces aciers même à température ambiante, en plus d'augmenter leur résistance à la corrosion. Cette structure est thermodynamiquement instable à température ambiante. Elle est obtenue grâce à des trempes depuis 1000 ou 1150 C°.

Les aciers austénitiques associent une bonne résistance à la corrosion à une résistance mécanique élevée, ils sont ductiles, résistants au choc et non magnétique ; ils ne se trempent pas, mais peuvent acquérir une certaine dureté par déformation à froid. À l'état recuit, ils possèdent à ce moment une plus grande ductilité et une meilleure ténacité que les aciers ordinaires. [5]

Même si leur teneur en carbone est relativement faible, ces aciers sont très sensibles à la corrosion intergranulaire due à la précipitation de carbure. Ils sont utilisés dans les domaines de l'agro-alimentaire, du nucléaire, du bâtiment, des transports, de l'industrie chimique, de l'électroménager, etc [9]

Selon la teneur en carbone et les éléments d'additions, les aciers austénitiques se classent de la façon suivante :

- Aciers austénitiques sans molybdène : ces nuances sont très utilisées car elles assurent un bon compromis coût- résistance à la corrosion.
- Aciers austénitiques au molybdène : le molybdène améliore la résistance à la corrosion par piqûres (en présence de chlorures)
- Aciers austénitiques à très bas carbone : une teneur en carbone inférieure à 0,03% permet d'éviter la corrosion intergranulaire car le carbone reste en solution solide et ne se combine pas avec le chrome pour former des carbures de chrome.
- Aciers austénitiques stabilisés : l'addition de titane et/ou niobium empêche la précipitation de carbures de chrome consécutive à une opération de traitement thermique et/ou à des procédés de soudage. Ces aciers présentent en outre de bonnes caractéristiques mécaniques jusqu'à 600C°.
- Aciers super austénitiques : de teneurs enrichies en Nickel et azote procurent une structure entièrement austénitique à ces aciers initialement enrichie en chrome et molybdène, ce qui leur confère une excellente résistance à la corrosion dans un environnement agressif.

Chapitre 1 : Généralités sur les Aciers Inoxydables

1.5 Les diagrammes d'équilibre des aciers inoxydables

Les aciers inoxydables sont essentiellement des alliages Fe-Cr ou Fe-Cr-Ni à teneur en carbone variant de 0,02 à 1% selon les nuances. Bien qu'un certain nombre d'autres éléments tels que Mo, Cu, Si, Ti, Nb..... Soit ajoutés pour améliorer la tenue à la corrosion ou des propriétés mécaniques pour de alliages particuliers, l'essentiel des propriétés des inoxydables sont liées à la connaissance des diagrammes de phases et des diagrammes TRC des alliages ternaires Fe-C-Cr ou quaternaires Fe-C-Cr-Ni.[10]

1.5.1 Les binaires Fe-Cr :

Le chrome (CC) est un élément alphagène : il favorise l'extension du domaine ferritique comme le montre l'existence de la (boucle γ) sur le diagramme Fe-Cr **fig.** En contournant cette boucle on peut passer continument de la ferrite α à la ferrite δ .

On peut déterminer deux regions de teneur en chrome

- % Cr < 13 : Ces alliages ont la possibilité d'être austénitique totalement ou partiellement et peuvent donc subir la transformation $\gamma \rightarrow \alpha$ par refroidissement lent ou rapide.
- % Cr > 13 : Ces alliages sont toujours «ferritiques» et de ce fait ne peuvent pas subir de durcissement par trempe martensitique. Cependant pour des teneurs suffisantes en Cr, il y a possibilité d'apparition d'une phase intermédiaire, phase sigma (σ), qui pour des refroidissements lents précipite dans la matrice ferritique ou aux joints de grains entraînant une fragilisation importante de l'alliage.[10]

Chapitre 1 : Généralités sur les Aciers Inoxydables

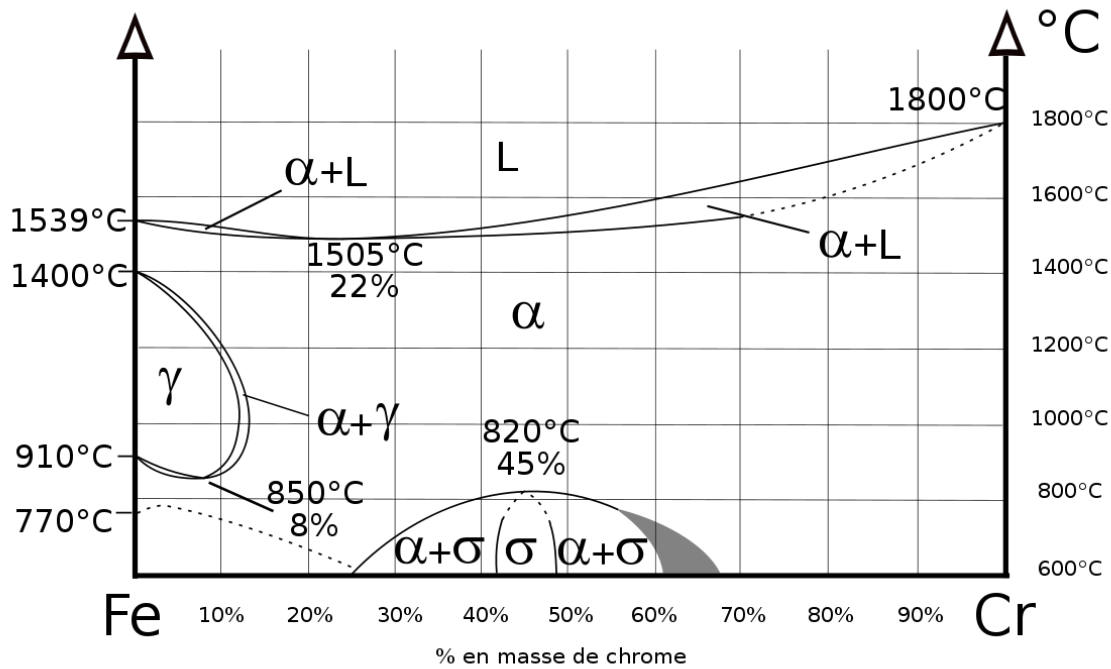


Figure 1 : Diagramme d'équilibre des alliages binaires Fe-Cr [39]

1.5.2 Les binaires Fe-Ni :

Le nickel (CFC) est un élément gammagène : il favorise l'extension du domaine austénitique, conduisant à un domaine δ limité et formé (existence d'une transformation péritectique à 1512°C) [10]

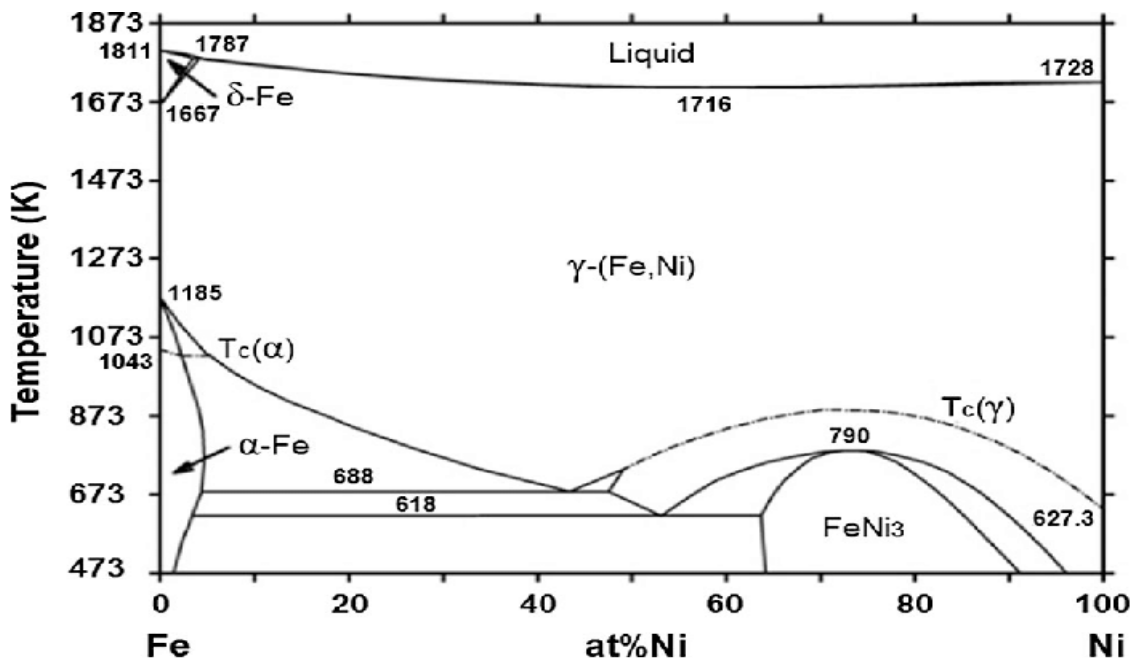


Figure 2 : Diagramme d'équilibre des alliages Fe-Ni [39]

1.5.3 Les ternaires Fe-Ni-Cr

La constitution d'équilibre des alliages Fe-Ni-Cr dépend des teneurs relatives en Ni (γ -gène) et en Cr (α -gène). La figure montre l'influence du nickel sur la boucle γ du diagramme Fe-Cr : l'addition de nickel élargit, en teneurs et températures, le domaine austénitique. En outre des coupes isothermes ternaires (refroidissements lents) montrent que la phase σ apparaît pour des teneurs en Cr inférieures à celles du binaire Fe-Cr : Ni favorise l'apparition de σ .[10]

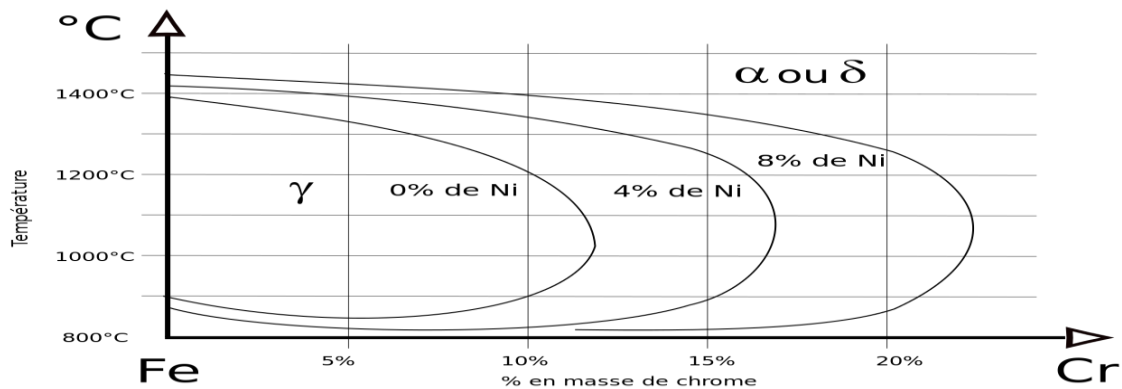


Figure 3 : Coupe du diagramme ternaire fer-chrome-nickel pour des teneurs Croissantes en nickel. Influence du nickel sur l'extension de la boucle γ [6]

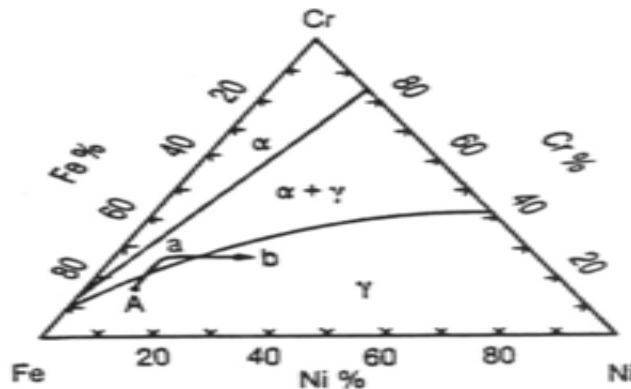


Figure 4 : Section à 1000°C du diagramme ternaire Fe-Cr-Ni.

Chapitre 1 : Généralités sur les Aciers Inoxydables

1.6 Les notions de chrome et de Nickel équivalents :

1.6.1 Diagramme schaeffler :

1.6.2 L'idée de distinguer entre éléments α gènes ou γ gènes a conduit Schaeffler en 1949 [11] à proposer un diagramme pour prédire la structure de l'acier en fonction du pourcentage en chrome (Cr) et nickel (Ni) équivalent (figure I.10).

Ces équivalents sont déterminés par des formules (équations I.1 et I.2) en fonction des différents éléments d'alliage. Chaque élément est affecté d'un coefficient qui représente son pouvoir α gène ou γ gène. Les coefficients d'équivalence sont définis par rapport au chrome et au nickel auxquels sont attribués arbitrairement le coefficient 1.

$$\text{Cr eq (\% massique)} = \% \text{Cr} + 1,5\% \text{Mo} + 0,48 \% \text{Si} + 2,3 \% \text{V} + 1,75 \% \text{Nb} + 2,5 \% \text{Al} \quad (\text{I.1})$$

$$\text{Ni eq (\% massique)} = \% \text{Ni} + \% \text{Co} + 0,1 \% \text{Mn} - 0,01 \% \text{Mn}^2 + 18\% \text{N} + 3 \quad (\text{I.2})$$

Ces équivalents permettent de déterminer à la température ambiante la structure d'un acier inoxydable à l'aide de diagramme de Schaeffler, qui détermine les domaines de l'austénite, de la ferrite ou de la martensite.

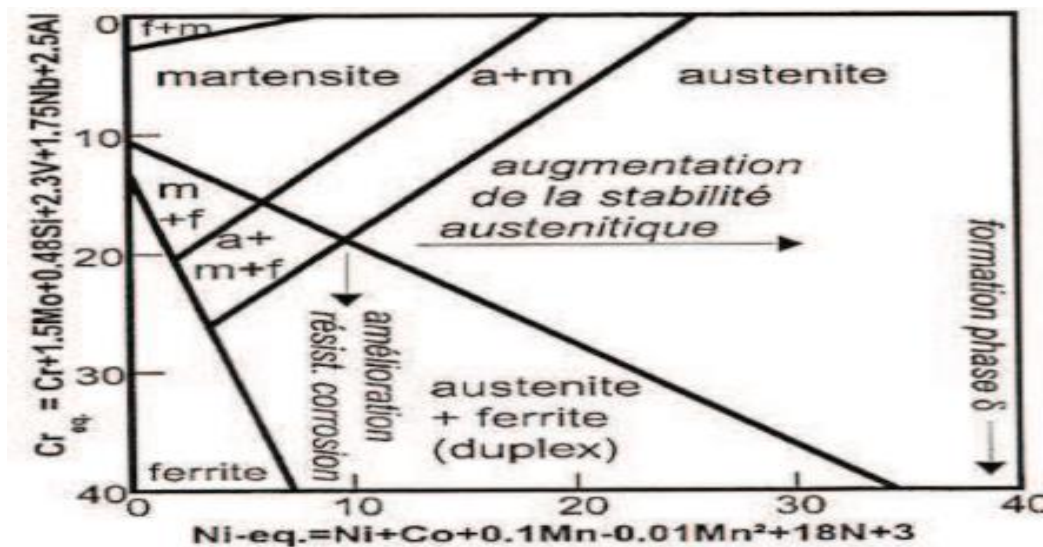


Figure 5 : Diagramme de Schaeffler [11]

1.6.3 Diagramme de Pryce et Andrew :

Pour les produits laminés, le modèle de Pryce et Andrew propose un diagramme pour prédire la structure de l'acier en fonction de sa composition chimique [12].

$$\text{Chrome équivalent : } (\text{Cr}_{\text{eq}} = (\% \text{Cr}) + 3(\% \text{Si}) + (\% \text{Mo}))$$

Chapitre 1 : Généralités sur les Aciers Inoxydables

Nickel équivalent : $(Ni_{eq} = (\%Ni) + 0,5(\%Mn) + 21\%C) + 11,5(\%N)$

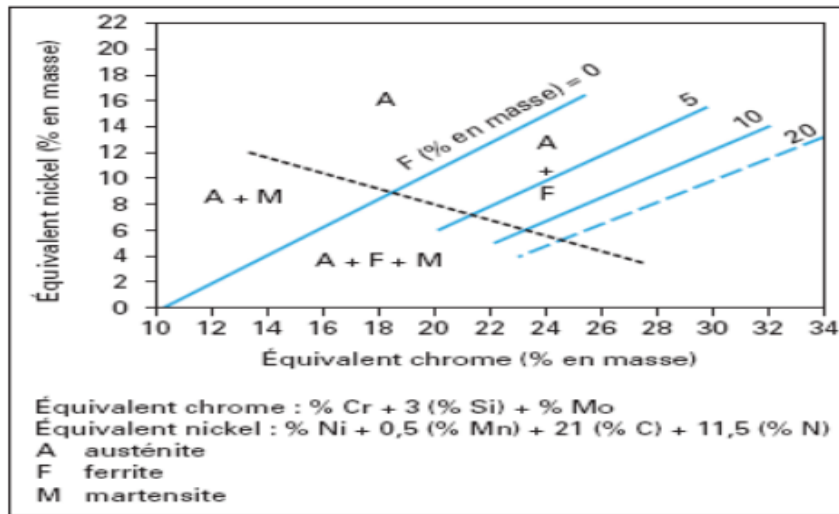


Figure 6 : Diagramme de Pryce et Andrews donnant la structure des aciers inoxydables [12]

1.7 Influence des éléments d'addition :

Les éléments additionnels sont divisés en deux familles : les éléments alphas (silicium, aluminium, chrome, molybdène, tungstène, titane, niobium) et les éléments gamma (Nickel, manganèse, azote, carbone, cobalt). Certains éléments ont des effets plus importants que d'autres, notamment l'azote et le carbone dont l'effet gamma est environ trente fois plus puissant que celui de Nickel. [13]

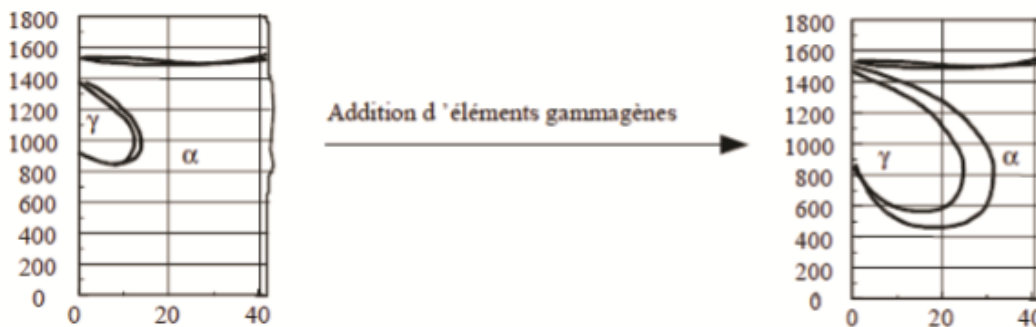


Figure 7: Diagramme Fer-Chrome – Influence de l'addition d'éléments gamma

Chapitre 1 : Généralités sur les Aciers Inoxydables

1.7.1 Les éléments alphagènes :

D'autres éléments comme le vanadium, l'aluminium, le titane, le tantale, le silicium, le molybdène, le chrome ou encore le tungstène tendent à déstabiliser l'austénite, au profit de la ferrite. On appelle ces éléments « alphagènes ».

1.7.1.1 Le chrome (Cr) :

Élément de base de tous les aciers inoxydables qui offre la résistance à la corrosion par la formation d'un film passif en se combinant avec l'oxygène et augmente la résistance à la corrosion (sauf en milieu sulfurique) et la résistance à l'oxydation à chaud. Lorsqu'il est associé avec le molybdène et le nickel, il confère de bonnes propriétés mécaniques à des températures allant jusqu'à 500°C.[13]

1.7.1.2 Le molybdène (Mo) :

C'est un élément alphagène qui ajouté à raison de quelques pourcents, améliore la qualité du film passif, en milieux chlorurés et acides, à l'exception des solutions nitriques bouillantes.

Le molybdène augmente la résistance au fluage des aciers au chrome. Il diminue la fragilité au revenu. Il améliore sensiblement la résistance à la corrosion intercrystalline et par pique. Il confère une plus grande sensibilité à la décarburation et au phénomène d'oxydation pour des maintiens entre 1000 et 1100°C. De plus, il augmente la résistance mécanique à chaud. L'effet du Mo sur l'acier inoxydable ferritique montre que la présence du Mo augmente la résistance à la corrosion sous contrainte [14]. Enfin le molybdène, élément alphagène, est fréquemment utilisé à des teneurs de 2 à 5% pour améliorer la résistance à la corrosion dans presque tous les milieux, à l'exception des solutions nitriques bouillantes. Cependant, lorsque ce type d'alliage est soumis à des températures comprises entre 500 et 1000°C pendant des durées allant de 1 à 1000 heures, on observe la formation de composés intermétallique dont la présence altère à la fois la résistance à la corrosion et des caractéristiques mécaniques. C'est le cas de l'alliage X2CrNiMo 17-13-5.

1.7.1.3 Vanadium :

Le Vanadium- Le vanadium forme après solidification une suite continue de solutions solides avec le fer α et le diagramme FeV s'apparente étroitement au diagramme Fe-Cr. Mais, à la différence de ce dernier, le domaine de la boucle γ est plus resserré et limité à une teneur en vanadium de 1% environ. Le vanadium compte parmi les éléments ayant le plus d'affinité pour le carbone. Il entre faiblement en

Chapitre 1 : Généralités sur les Aciers Inoxydables

solution dans la cémentite et forme principalement le carbure V_4C_3 . Ce dernier, qui se présente toujours sous la forme très divisée, ne se dissout que lentement et difficilement dans l'austénite. Il en résulte que, subsistant longtemps dans l'austénite à température élevée, ce carbure inhibe fortement le grossissement du grain γ , ce qui conduit les aciers au vanadium à présenter une grande finesse de structure, aussi bien à l'état coulé qu'après transformation à chaud et une grande résistance au grossissement du grain par surchauffe [7].

1.7.1.4 Silicium :

Le Silicium- Le silicium, bien qu'appartenant à la série des éléments alphas, ne forme pas, comme le chrome et le molybdène, de carbures stables. Les aciers à hautes teneurs en carbone et en silicium peuvent contenir du carbure de silicium. Celui-ci, en solution solide, contribue à produire un grain grossier dans les aciers, alors que sous la forme d'inclusions dispersées, il y a un certain effet pour gêner le grossissement du grain. Le silicium contribue à élever la résistance à l'oxydation à chaud et pour cette raison il est parfois ajouté à des aciers spéciaux au chrome-nickel. Compte tenu de son rôle sigmagène, qui augmente les risques de fragilisation, ses additions restent cependant limitées à des teneurs comprises entre 1 % et 2,5% [15].

1.7.1.5 Le Titane (Ti):

Titane est employé essentiellement e raison de leur très grande affinité pour le carbone. Il évite l'altération des structures métallurgiques lors du travail à chaud, en particulier lors des travaux de soudure ou il prend la place du chrome pour former un carbure de titane (TiC) évitant de ce fait la perte du caractère d'inoxidabilité dans les zones affectées par la chaleur (ZAC) du fait de la captation du chrome.

1.7.1.6 Le niobium (Nb) :

C'est un élément alphas, il se combine avec le carbone dans les aciers inoxydables et forme les carbures pour s'opposer à la corrosion intergranulaire. Il est utilisé dans les métaux d'apport pour soudage à l'arc électrique en lieu et place du titane qui serait volatilisé pendant le transfert dans l'arc électrique.

Chapitre 1 : Généralités sur les Aciers Inoxydables

1.7.2 Les éléments gammagènes :

Certains éléments (manganèse, nickel, azote, cuivre, zinc par exemple) augmentent la plage de stabilité de l'austénite ; ils sont dits « gammagènes ». Avec un dosage suffisant, ils permettent, grâce à une trempe, d'obtenir de l'austénite à température ambiante à l'état métastable. C'est le cas des aciers dits austénitiques. La grande majorité des aciers inoxydables sont austénitiques, car ils combinent de bonnes résistances à la corrosion avec des propriétés mécaniques plus élevées que l'acier ferritique.

1.7.2.1 Le Nickel (Ni):

Le nickel, élément gammagène, élargit le domaine d'existence de la phase austénitique. L'effet gammagène du nickel est cependant beaucoup plus faible que celui du carbone. Si par convention, l'effet gammagène du nickel est affecté d'un coefficient égal à l'unité, celui du carbone est généralement affecté d'un coefficient égal à 30 [15]. Le nickel a une vitesse de diffusion assez faible. Il est très utile pour retarder le grossissement du grain par chauffage à hautes températures [7,15]. Les aciers austénitiques au nickel, qui sont les plus employés, sont des aciers inoxydables résistants à chaud, contenant de fortes proportions de chrome en plus du nickel. Ils sont la base de la plupart des variétés d'aciers résistants à la corrosion et à la chaleur. Des additions plus fortes de nickel étendent le domaine de la résistance à la corrosion et permettent une large variété de propriétés mécaniques très intéressantes [15]. Le film protecteur formé sur les aciers, contenant seulement 12% de chrome, n'offre qu'une résistance permanente insuffisante aux acides minéraux non oxydants [16].

1.7.2.2 Manganèse (Mn) :

Le manganèse durcit légèrement la ferrite. Pour faibles teneurs en carbone (<0.20%), il abaisse la température de transition ductile-fragile des aciers, alors qu'il élève cette température pour les fortes teneurs en carbone (>0.50%). Il exerce également un effet marqué sur la trempabilité :

Avec 1% Mn, le diamètre critique idéal est en effet multiplié par 4 (le facteur d'augmentation de la trempabilité est donc $4/1\%Mn$). Par ailleurs sans former lui-même de carbures, le Mn se substitue en partie aux atomes de fer de la cémentite. En fin son action sur le revenu est négligeable.

On l'utilise surtout pour améliorer les propriétés des aciers d'usage général et la trempabilité des aciers de traitements thermiques, et ce à un faible coût.

Le Mn se retrouve rarement seul comme élément d'alliage, car il entraîne plusieurs inconvénients :

- sensibilité à la surchauffe au cours de l'austénitisation,

Chapitre 1 : Généralités sur les Aciers Inoxydables

- sensibilité qui provoque une croissance des grains;
- augmentation de la fragilité au revenu ;
- diminution de la ductilité et de la résistance mécanique.

1.7.2.3 Le carbone (C):

Il stabilise la structure austénitique introduit pour accroître les propriétés mécaniques de (duretés, charge à la rupture, fluage.....), particulièrement sous l'effet des traitements thermiques, le carbone joue cependant un rôle néfaste vis-à-vis de la résistance à la corrosion (précipitation de carbure de chrome lorsque la teneur en carbone dépasse 0.003% conduisant à la corrosion intergranulaire). Ceci a encouragé le développement de nuances d'aciers inoxydables à très faible teneur en carbone (inférieur à 0.03%).[17]

1.7.2.4 L'azote (N) :

Exerce aussi une influence considérable sur les aciers trempés. ... L'influence de l'azote sur les propriétés électriques et magnétiques de l'acier est également considérable. Dans le fer doux en particulier la force coercitive et l'hystérésis sont augmentées.

1.7.2.5 Le soufre (S) :

A des teneurs de l'ordre de 0.2%, il améliore considérablement l'usinabilité, mais cela se fait au détriment de la résistance à la corrosion par piqures.

Effet favorable du soufre, aussi bien pour faciliter l'usinage d'un acier, que pour accroître la durée de vie d'un outil. Enfin, un procédé pour fabriquer les aciers au soufre consiste à introduire cet élément à l'état pur dans la lingotière vers 1 100°C.

1.7.2.6 Le cuivre (Cu) :

Il est additionné aux aciers austénitiques dans des cas particuliers pour améliorer la résistance à la corrosion ou pour accroître l'aptitude à la frappe à froid, le cuivre aide aussi à la lutte contre la corrosion bactérienne [18]. En outre le cuivre améliore l'usinabilité des aciers inoxydables [19].

1.8 Les Aciers inoxydables austénitiques :

Chapitre 1 : Généralités sur les Aciers Inoxydables

L'austénite est une solution solide de carbone dans l'allotrope γ du fer, qui est stable entre 911 et 1 392 °C à la pression atmosphérique. Cet allotrope a une structure cristallographique cubique à faces centrées, notation Strukturbericht A1, qui permet une grande solubilité du carbone (jusque 2,1 % massique à 1 147 °C). Le fer γ est paramagnétique (on entend par là qu'il quitte le domaine de ferromagnétisme du fer à basse température – $T < T_c = 723 \text{ °C}$ – et rentre dans le domaine paramagnétique).

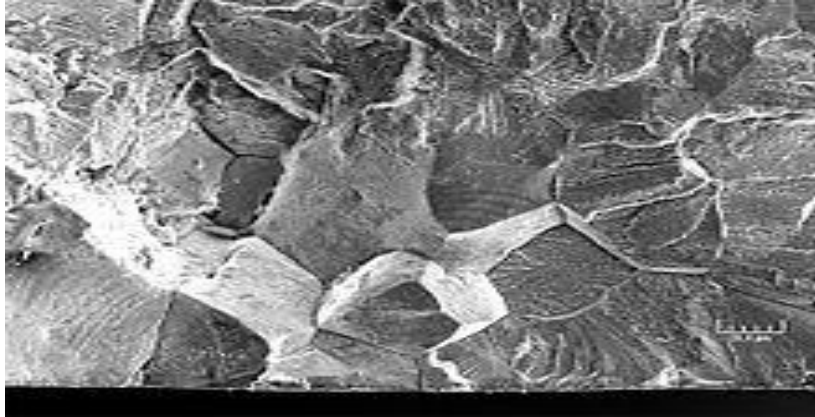


Figure 8 :L' Austénite.

Le nom d'austénite vient de William Chandler Roberts-Austen, métallurgiste connu pour ses recherches sur les propriétés physiques des métaux et de leurs alliages.

Les aciers inoxydables austénitiques contiennent de l'austénite, une forme de fer qui peut absorber plus de carbone que la ferrite. L'austénite est créée en chauffant de la ferrite à 912 degrés C, moment où elle passe d'une structure cristalline cubique centrée sur le corps à une structure cristalline cubique centrée sur le visage. Structures cubiques à faces centrées La ferrite peut absorber jusqu'à 2% de carbone.

Lorsque l'austénite se refroidit, elle revient généralement à sa forme de ferrite, ce qui rend les cristaux d'austénite difficiles à utiliser en dessous des températures extrêmes d'un four de fusion. L'austénite peut être forcée de conserver sa structure cristalline à basse température avec l'inclusion d'additifs chimiques, tels que le nickel et le manganèse trouvés dans de nombreux aciers inoxydables austénitiques.

Les aciers inoxydables austénitiques ne peuvent pas être durcis de manière significative par traitement thermique, mais peuvent être durcis par un travail à froid. Les aciers inoxydables austénitiques sont largement utilisés en raison de leur excellente résistance à la corrosion.[20]

1.8.1 Propriétés des aciers inoxydables austénitiques :

Chapitre 1 : Généralités sur les Aciers Inoxydables

La structure de ces aciers est une austénite γ (phase gamma amagnétique) avec présence éventuelle d'une phase ferritique δ (delta) résiduelle. L'austénite métastable peut se transformer en martensite par déformation plastique et/ou refroidissement à basse température. La stabilité de l'austénite peut être augmentée par addition d'éléments gammagènes : carbone, nickel, manganèse, azote, cuivre...

Les aciers austénitiques possèdent une bonne résistance à la corrosion en général. Ils ne présentent pas de durcissement après traitement thermique ; leurs caractéristiques mécaniques peuvent être augmentées par addition d'azote ou par déformation à froid. Ces aciers sont en général livrés à l'état hypertrempe : ils ont subi un réchauffage à environ 1050°C (mise en solution des carbures de chrome) puis un refroidissement rapide à l'air ou à l'eau (pour empêcher la précipitation des carbures de chrome) [18]. Ils sont caractérisés par une bonne soudabilité associée à une bonne résilience à basse température, et une bonne sécurité vis-à-vis du risque de rupture fragile, ce qui justifie leur emploi dans le domaine des équipements sous pression.

En principe, voici les principales propriétés des aciers inoxydables austénitiques :

- ductilité et résilience importantes, y compris à basse température,
- acier facilement écrouissable sans fragilité,
- pas de limite élastique
- léger fluage à température ambiante,
- bonne résistance mécanique à chaud,
- bonne soudabilité,
- faible conductivité thermique,
- coefficient de dilatation élevé.

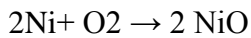
1.8.2 Composition chimique et additions :

Le chrome doit être supérieur à 16% pour assurer l'inoxidabilité et le nickel doit être supérieur à 8% pour obtenir la structure austénitique. Selon leur teneur en carbone, ces aciers peuvent être classés en trois catégories [14] :

- $C \leq 0,030 \%$: aciers dits à bas carbone;
- $0,03 \% < C \leq 0,08 \%$: aciers dits à carbone moyen ;
- $C \geq 0,08 \%$: aciers dits à carbone élevé.

Chapitre 1 : Généralités sur les Aciers Inoxydables

La présence de nickel dans ce type d'acier améliore les propriétés mécaniques du matériau, notamment sa ductilité (aptitude à la déformation), ainsi que la résistance à la corrosion, en participant à la formation de la couche passive d'oxyde de nickel [21], ce dernier s'oxyde par la réaction suivante



D'autres éléments (molybdène, manganèse, silicium, titane, niobium, tungstène, vanadium) sont ajoutés dans le but d'améliorer les propriétés de l'acier austénitique, notamment leur résistance à la corrosion et leur stabilité à température élevée.

Ces aciers sont amagnétiques et sont formables et soudables. Le procédé d'érouissage permet d'augmenter leur résistance mécanique, bien que cela rende parfois le métal légèrement magnétique et peut éventuellement réduire la résistance à la corrosion.

% pds	Cr	Ni	C _{max}	N _{max}	Mo
304	17-20	9-12	0.080	-	-
304L	17-20	9-12	0.030	-	-
304 L(N)	18.5-20	9-12	0.035	0.080	-
316	16-19	10-14	0.080	-	2.25-2.75
316L	16-19	10-14	0.030	-	2.25-2.75
316L(N)	17-18.2	10-14	0.035	0.080	2.25-2.75

Tableau 2 : Gammes de nuances des aciers inoxydables austénitiques 304 et 316

1.8.3 L'acier inoxydable 316L :

Le plus important par son volume est sans doute l'acier inoxydable, encore largement utilisé en chirurgie orthopédique. L'intérêt de l'acier inoxydable dans ce domaine réside dans ses propriétés mécaniques. Les aciers inoxydables austénitiques de type 316 de matériaux d'implant sont parmi les plus courants pour les applications orthopédiques. L'acier 316L est, à l'heure actuelle, un standard et est le plus important en volume. Malgré son coût de production relativement faible (son prix peut varier en fonction du coût d'achat des éléments d'addition – nickel, chrome, molybdène –). L'ajout de molybdène, comme dans l'acier 316L, améliore aussi la résistance à la corrosion perforante, étape terminale de la corrosion localisée par piqûres en milieu confiné. On peut ajouter de l'azote, ce qui permet aussi d'augmenter la stabilité de la phase austénitique.[22]

Chapitre 1 : Généralités sur les Aciers Inoxydables

1.8.4 Composition de l'acier inoxydable 316L :

%C ⁽¹⁾	%Mn ⁽²⁾	%P ⁽²⁾	%S ⁽¹⁾	%Si ⁽²⁾	%Cr ⁽²⁾	%Ni ⁽²⁾	%Mo ⁽²⁾	%N ⁽²⁾	%O ⁽²⁾	%Fe
< 0,03	< 2	< 0,01	<0,005	< 1	16-19	9-13	1,5-3	<0,003	<0,002	Compl

Tableau 3 : Composition de l'acier inoxydable 316L

1.9 Traitements thermiques des aciers inoxydables austénitiques :

Les aciers inoxydables peuvent subir différents traitements thermiques. Des traitements thermiques dits de qualité appliqués aux aciers Inoxydables, afin de leur conférer leurs propriétés d'usage : caractéristiques mécaniques ou résistance à la corrosion. Ces traitements de qualité sont pratiqués tard dans la gamme soit par le sidérurgiste, soit par l'utilisateur final de l'acier. Les traitements assurant une bonne résistance à la corrosion ont tous pour but de rendre la teneur en chrome du métal la plus homogène possible en évitant toute précipitation de phases riches en chrome (carbonitrides de chrome, ou phases intermétalliques riches en chrome) et donc toute diminution de la teneur en chrome dans les zones avoisinantes. En effet, c'est le chrome qui assure l'inoxidabilité des aciers inoxydables et une teneur en chrome supérieure à 10,5 % en tout point du métal est à cet égard indispensable [18].

Dans le tableau nous présentons les principaux traitements thermiques pour les aciers inoxydables : [23]

Traitements thermiques	Objectifs	Processus métallurgiques mis en œuvre
Homogénéisation	<ul style="list-style-type: none"> - Diminuer l'ampleur des ségrégations. - Obtenir une phase homogène. 	<ul style="list-style-type: none"> - Maintien à haute température (diffusion des éléments ségrégés) - Dissolution de précipités ou de phases intermétalliques.
Traitement superficiel	<ul style="list-style-type: none"> - Augmenter la dureté en surface. 	<ul style="list-style-type: none"> - Apports interstitiels.
Désensibilisation	<ul style="list-style-type: none"> - Supprimer la sensibilité à la corrosion intergranulaire due au carbure de chrome. 	<ul style="list-style-type: none"> - Homogénéisation de la teneur en chrome autour des carbures (diffusion)

Tableau 4 :Caractéristiques des traitements thermiques des aciers inoxydables

Chapitre 1 : Généralités sur les Aciers Inoxydables

1.9.1 Traitement d'hypertempe :

Ce type de traitement peut être classé dans les traitements d'homogénéisation. Il consiste en un maintien à haute température (de 1000 à 1150°C) suivi d'un refroidissement rapide [26].

Ce traitement a pour but d'obtenir à température ambiante une phase austénitique homogène où tous les éléments se trouvent en solution solide. Lors du chauffage de ces aciers permettant d'obtenir une phase homogène, on cherche à mettre en solution dans la matrice austénitique des précipitations telles que, par exemple, la ferrite, la phase σ , les carbures de chrome, la martensite d'écrouissage, etc, qui auraient pu se produire pendant les opérations de formage à froid, à chaud et /ou de soudage [14]. Cette dissolution exige un couple temps-température minimal qui ne doit pas être franchi car cela pourrait générer une croissance des grains non souhaitable (il faut rappeler que les propriétés mécaniques à l'ambiante sont plus élevées pour les structures possédant des grains austénitiques plus fins).

Ce traitement permet aussi d'adoucir l'acier dans le cas où le traitement suit une opération de formage à froid, et, en plus, la recristallisation, si le formage à froid a entraîné un écrouissage supérieur à 15 ou 20 % [14].

Le refroidissement suffisamment rapide du métal permet de garder la phase austénitique à l'ambiante. Pourtant cette phase n'est pas stable thermodynamiquement : l'austénite est dans un état dit métastable et peut se transformer en phase martensitique sous l'action d'une déformation plastique, et/ou d'un simple maintien à basse température [23,24].

1.9.1.1 Choix de la température d'hypertempe :

En distingue deux cas :

— Nuances sans molybdène : la température peut être choisie dans l'intervalle 1000-1100°C : 1000°C suffisent pour dissoudre d'éventuels carbonitrides de chrome (nuances non stabilisées) et il n'y a pas de phases intermétalliques très stables liées à la présence de molybdène ;

— Nuances au molybdène : la température sera choisie entre 1050 et 1150°C pour dissoudre les phases intermétalliques et le cas échéant les carbonitrides [18].

1.9.2 Traitement antiferrite :

Certaines nuances d'acier austénitique sont sujettes à une solidification partielle en phase ferritique. Le traitement antiferrite a pour but de limiter la teneur en ferrite hors équilibre due aux surconcentrations locales en éléments alphas, qui se manifestent pendant la solidification (ségrégation). Cette phase est généralement préjudiciable à la tenue à la corrosion et cause une fragilité de l'acier. Pour éliminer ce type de ségrégation, on utilise un traitement d'homogénéisation à une température entre 1150 et 1200 °C pendant lequel la diffusion achève son activité, suivi d'un

Chapitre 1 : Généralités sur les Aciers Inoxydables

refroidissement suffisamment lent jusqu'à la température d'hypertrempe pour transformer en austénite toute la ferrite mise hors d'équilibre par la baisse de température [23,24].

1.9.3 Traitement thermomécanique :

On peut augmenter les propriétés mécaniques à l'ambiante d'un acier inoxydable austénitique par laminage. Durant le laminage à chaud, on affine le grain par des cycles écrouissage-recristallisation, ce qui permet d'augmenter la limite d'élasticité.

Une autre possibilité d'augmentation des caractéristiques mécaniques à l'ambiante est de précipiter des carbures ou carbonitrides fins et répartis. Ces carbonitrides seront de niobium si l'on veut ne pas sensibiliser l'acier à la corrosion intergranulaire. Pour obtenir des carbonitrides fins, il faut préalablement mettre en solution ceux existants par un traitement d'hypertrempe. Ensuite, un écrouissage à froid ou à tiède de l'ordre de 10% par exemple permet de créer des germes pour la précipitation intergranulaire de carbonitrides lors du revenu ultérieur. L'addition de bore à des teneurs de quelques dizaines de p.p.m masse favorise également la précipitation intergranulaire. Le bore réduisant la solubilité du carbone dans l'austénite à chaud, il importe dans ce cas de réaliser le traitement d'hypertrempe au-dessus de 1200°C et d'adopter un refroidissement rapide (pour éviter de reprécipiter des carbonitrides entre 1200 et 800°C). **Le tableau** donne deux exemples de durcissement structural ainsi obtenu sur une nuance au niobium et au bore (C= 0.052%, Cr= 17.25%, Ni=12.90%, Mo=2.3%, N=0.051%, Nb=0.73%, B=75 p.p.m masse) avec ou sans écrouissage entre hypertrempe et revenu. On remarquera que le traitement thermomécanique est le plus efficace pour augmenter la limite d'élasticité.

Traitement	Rp 0.2 (MP)	Rm (MP)	A (%)
Hypertrempe 1150°C	285	587	47
Hypertrempe 1150°C+ revenu 100h à 700°C	353	655	51
Hypertrempe 1150°C+ écrouissage 6% à 600°C+revenu 150h à 720°C	434	644	33

Tableau 5 : Durcissement structural après traitement thermomécanique

Chapitre 1 : Généralités sur les Aciers Inoxydables

1.9.4 Traitement d'optimisation de la tenue au fluage des aciers inoxydables austénitiques :

Une précipitation intragranulaire fine et bien répartie de carbure ou de carbonitrides a également un effet favorable sur la tenue au fluage entre 650 et 750 °C de nuances du type X5CrNiMo 17-12-2 (1.4401). On peut donc appliquer à ces nuances, en vue d'une application à chaud, le traitement thermique ou thermomécanique de durcissement structural explicité au-dessus. Dans ce cas, la sensibilisation à la corrosion intergranulaire en milieu humide n'est pas un problème à prendre en compte et le durcissement structural peut être réalisé à l'aide de carbures de chrome. On peut donc employer des nuances avec ou sans niobium. Une autre facilité est que la précipitation des carbonitrides peut se dérouler durant l'utilisation de la pièce en température et que l'on peut donc supprimer le revenu volontaire de durcissement, en particulier pour les nuances contenant du Bore. [24]

1.9.5 Revenu de durcissement :

Des revenus effectués entre 450 et 600°C sur des aciers alliés peuvent provoquer des durcissements appelés durcissement secondaires (cas des aciers à outils à des au chrome ou des aciers rapides). Il y a d'abord précipitation des carbures complexes maintenu en solution dans un reste d'austénite résiduelle puis une déstabilisation de cette dernière qui se transforme en martensite au moment du refroidissement. Ces deux transformations successives vont donc nécessiter un second revenu pour éviter que la martensite secondaire ne provoque pas fragilité excessive [18]. Les modifications structurales au cours de revenu ont des conséquences importantes sur les propriétés mécaniques. La variété des structures obtenues explique que le revenu constitue un moyen efficace et très souple pour obtenir un ensemble de propriétés ajustées aux exigences de fonctionnement et il faut envisager des interférences possibles pour expliquer finalement les variations des propriétés obtenues. Les propriétés des aciers sont sensibles au revenu par l'influence de deux principaux facteurs : le premier est intrinsèque aux aciers et le deuxième leur est extrinsèque.

1.9.6 Aciers inoxydables à durcissement par précipitation : [10]

Ces aciers contiennent des éléments tels que Cu, Al, Mo, Nb. Les principales nuances retenues par norme sont :

Z 6 CNU 17-04 ; Z 6 CNUD 15-04 ; Z 8 CNA 17-7

Ce type d'alliage met en œuvre l'amélioration des propriétés de résistance par précipitation d'une seconde phase (mécanisme d'entrave au mouvement des dislocations). Cette seconde phase est constituée par une fine précipitation de composés intermétalliques. Le traitement thermique consiste en une hypertrempe conduisant à une solution solide saturée, suivie d'un revenu au cours duquel a

Chapitre 1 : Généralités sur les Aciers Inoxydables

lieu la précipitation de composés intermétalliques. Le processus sera détaillé lors de l'étude des alliages légers.

Trois groupes d'aciers à durcissement par précipitation sont reportés sur un diagramme de Pryce :

- Aciers austénitiques ;
- Aciers à transformation martensitique indirecte ;
- Aciers à transformation martensitique direct ;

Il est à noter que ces trois types sont dérivés de nuances classiques dont ils ont les propriétés de déformabilité à chaud et de transformation à froid indépendantes de l'opération de revenu finale.

Les nuances normalisées sont essentiellement de type martensitique.

1.9.7 Précipitation des carbures et carbonitrures :

Les aciers inoxydables austénitiques sont susceptibles de connaître des évolutions microstructurales en fonction des traitements thermiques. L'évolution microstructurale importante est la précipitation des carbures et des carbo-nitrures. Les aciers non stabilisés comme le 304L et le 316 subissent une précipitation de carbures riches en chrome (du type M₂₃C₆) lors de vieillissements entre 500°C et 900°C. Comme cette précipitation s'effectue préférentiellement aux joints de grains, elle conduit à la chute de la teneur en chrome au voisinage des joints. Cet appauvrissement local en chrome appelé «sensibilisation» conduit au phénomène bien connu de corrosion intergranulaire. Pour éviter ce problème, les nuances stabilisées et les nuances bas carbone ont été successivement introduites. Les nuances stabilisées contiennent des éléments qui ont une forte affinité avec le carbone (titane pour la nuance 321 et niobium pour la nuance 347). La précipitation de carbures de titane ou de niobium limite la précipitation des carbures de chrome et limite donc également l'abaissement local de la teneur en chrome.

1.10 L'acier inoxydable austénitique et ses applications :

1.10.1 Utilisation de l'acier inoxydable dans l'industrie agro-alimentaire :[25]

Grace à leurs propriétés, les aciers inoxydables austénitiques constituent le principal matériau des équipements agro-alimentaires, plus particulièrement les nuances 304 et 316. Du fait de leur résistance à la corrosion, aux détergents et aux produits désinfectants, ils peuvent subir l'entretien, les séquences de nettoyage en place répétées et les procédures de stérilisation en voie humide et en voie sèche.

Leur utilisation est tout à fait compatible avec les conditions de pression, de température et de PH imposées lors de la fabrication de produits alimentaires. Leur grande résistance mécanique, associée à une longévité avérée et un coût relativement réduit en font un matériau idéal pour la réalisation de

Chapitre 1 : Généralités sur les Aciers Inoxydables

cuves, de conduites, de pompes, d'échangeurs thermiques, de tanks de stockage, d'outils de découpe, etc. Or, malgré les procédures drastiques de nettoyage et de désinfection, ces équipements peuvent être par une flore bactérienne et fongique très diversifiée. Ainsi que les aciers inoxydables austénitiques peuvent être utilisés dans une grande variété de la maison et des applications commerciales, y compris :

- Equipement de transformation des aliments, en particulier dans la fabrication de bière, la transformation du lait et la fabrication du vin.
- Bancs de cuisine, éviers, auges, équipements et appareils
- Garniture d'architecture et de moulage
- Automobile et aérospatiale usage structurel
- Matériaux de construction dans les grands bâtiments
- Conteneurs chimiques, y compris pour le transport
- Les échangeurs de chaleur
- Ecrus, boulons, vis et autres fixations dans le milieu marin
- L'industrie des machines de nourriture et les appareils
- Ecrans tissés ou soudés pour les industries extractives et la filtration de l'eau.

1.10.2 Utilisation de l'acier inoxydable dans le domaine biomédical :

L'acier inoxydable est considéré comme un matériau biocompatible, en raison de sa résistance à la corrosion (pas de relargage de nickel en l'absence de corrosion. Cet alliage est donc fréquemment utilisé pour fabriquer des dispositifs implantables. Toutefois, les caractéristiques des différents fluides corporels (sang, lymphes, salive), comme par exemple la concentration en chlorure, peuvent initier un phénomène de corrosion localisée (relargage de Cr^{3+} et Cr^{6+}), nécessitant un suivi rigoureux et régulier des implants et un retrait au bout de 6 à 12 mois. L'utilisation d'acier inoxydable austénitique est donc restreinte à la fabrication d'implants non permanents ou de matériel à usage unique (aiguilles, scalpels).

L'acier inoxydable 316L présente néanmoins une excellente tenue mécanique (résistance à l'usure due aux frottements, ductilité et élasticité). De plus, sa résistance aux forces de traction et de rotation et son usinabilité en font un matériau de choix pour la conception d'implants orthopédiques (vis, broches), pour la chirurgie osseuse et pour la fabrication d'outillages chirurgicaux (fraises, mèches).

Pour prévenir le phénomène de corrosion et améliorer la biocompatibilité, l'acier inoxydable est parfois recouvert d'un mince film d'or ou traité par un procédé de nitruration.

Chapitre 1 : Généralités sur les Aciers Inoxydables

Tout comme dans le cas des industries agro-alimentaires et malgré les procédures drastiques de stérilisation et de désinfection (matériau, patient, personnel et salles d'opération), les implants et outils chirurgicaux peuvent être colonisés par des microorganismes lors de l'intervention proprement dite ou dans les jours suivants [27].

Les conséquences peuvent être graves pour la santé du patient (inflammations, septicémies, dysfonctionnements de la prothèse) et nécessitent dans la majorité des cas un retrait de l'implant et un traitement antibiotique ou antifongique.

Métal ou alliage	Analyse nominale (% massique)	Module d'élasticité (GN/m ²)	La force de tension finale (MN/m ²)	Élongation à la fracture (%)	surface
Titane	99Ti	9Ti	240-550	>15	Oxyde de Ti (TiO ₂)
Titane, Aluminium, Vanadium	90Ti-6Al-4V	117	869-896	>12	Oxyde de Ti
Cobalt, Chrome, Molybdène	66Co-27Cr-7Mo	235	655	>8	Oxyde de Cr
Acier inoxydable 316L	70Fe-18Cr-12Ni	193	480-1000	>30	Oxyde de Cr
Zircone	99Zr	97	552	20	Oxyde de Zr
Or	99Au	97	204-310	>30	/
Platine	99Pt	166	131	40	/

Tableau 6 : Propriétés des quelques métaux et alliages utilisés en domaine médical

Parmi ces métaux et leurs alliages, l'acier inoxydable types 316L présente les meilleures caractéristiques, et forme une couche d'oxyde de Chrome quand il est en contact avec l'air, raison pour laquelle nous l'avons choisi comme substrat support dans cette étude.

Chapitre 2 :
La corrosion des aciers
inoxydables

2 LA CORROSION DES ACIERS.

2.1 Introduction :

Les aciers inoxydables sont des matériaux utilisés dans de nombreux domaines industriels du fait de leur très grande résistance à la corrosion généralisée. Celle-ci est due à la formation d'une couche protectrice, appelée film passif, de quelques nanomètres d'épaisseur à la surface de l'alliage. Ces aciers, en contrepartie, peuvent être sensibles à la corrosion localisée, en particulier la corrosion par piqûres (CPP) et la corrosion cavernueuse (CC), avec pour conséquence un endommagement et des dégradations parfois importantes. La détection de ces types de corrosion joue donc un rôle important dans la prévention des risques tant sur le plan économique, qu'environnemental et sécuritaire [28].

2.2 Comportement à la corrosion [2] :

Le comportement à la corrosion des aciers inoxydables varie selon le milieu d'étude (Acide ou basique).

2.3 Influence de divers milieux

- • **Eaux industrielle** : l'eau pure est sans effet mais les chlorures (et dans une moindre mesure beaucoup d'autres sels), même à l'état de traces, sont particulièrement néfastes pour les aciers inoxydables ; les nuances contenant du molybdène sont alors les plus indiquées.
- **Vapeur d'eau** : normalement sans effet, elle peut toutefois poser des problèmes si elle contient certaines impuretés.
- • **Atmosphères naturelles, à l'exception des atmosphères marines** : elles posent d'autant moins de problèmes que l'acier contient davantage d'éléments nobles et que la surface est mieux polie.
- • **Atmosphères marines et industrielles** : les aciers au chrome s'altèrent très lentement mais on préfère en général utiliser des aciers au molybdène.
- **Acide nitrique** : il attaque la plupart des métaux industriels mais l'acier inoxydable en général lui résiste particulièrement bien, par suite de la passivation de sa surface : le molybdène n'est intéressant que si l'acide contient des impuretés.
- **Acide sulfurique** : la résistance dépend beaucoup de la concentration et la présence d'impuretés oxydantes améliore la passivation. D'une manière générale les nuances austénitiques contenant du molybdène sont les meilleures.
- **Acide phosphorique** : la résistance est généralement bonne mais il faut surveiller les impuretés, en particulier l'acide fluorhydrique.
- **Sulfites acides** : la corrosion peut être catastrophique car ces solutions, que l'on rencontre souvent dans les papeteries, comportent beaucoup d'impuretés ; là encore les alliages au molybdène sont préférables.

Chapitre 2 : La corrosion des aciers inoxydables

- **Acide chlorhydrique** : la corrosion augmente régulièrement au fur et à mesure que la concentration augmente, l'association est donc à éviter.
- **Acides organiques** : ils ne sont généralement pas aussi corrosifs que les acides minéraux et ceux que l'on rencontre dans l'industrie alimentaire (acides acétique, oxalique, citrique, etc.) sont pratiquement sans effet.
- **Solutions alcalines** : les solutions froides n'ont pratiquement pas d'action mais il n'en est pas de même pour les solutions concentrées et chaudes.
- **Solutions salines** : le comportement est généralement assez bon, sauf en présence de certains sels comme les chlorures ; les nitrates au contraire favorisent la passivation et améliorent la tenue. L'acide nitrique en mélange avec des saumures saturées peut provoquer des destructions de l'acier inox (même des nuances en 316L).
- **Produits alimentaires** : il n'y a généralement aucun problème de corrosion sauf avec certains produits qui contiennent des composants sulfureux naturels ou ajoutés, comme la moutarde et les vins blancs.
- **Produits organiques** : ils sont généralement sans action sur les aciers inoxydables, sauf s'ils sont chlorés et à chaud (la javel à plus de 60 °C et à des concentrations élevées peut détruire (piques noires) l'acier inox. Les colles, savons, goudrons, produits pétroliers, etc. ne posent aucun problème.
- **Sels et autres produits minéraux fondus** : les produits alcalins corrodent tous les aciers inoxydables mais pas les nitrates, cyanures, acétates, etc. La plupart des autres sels et des métaux fondus produisent des dégâts rapides.

2.4 LA PASSIVATION

C'est une formation de la couche d'oxyde protectrice au contact de l'oxygène. Par ce moyen, le métal acquiert sa résistance à la corrosion.

2.4.1 DESCRIPTION DU PHENOMENE

Certains métaux et alliages, lorsqu'ils sont immergés dans un milieu électrolytique, vont certes, donner lieu à un phénomène de dissolution, mais celui-ci va être caractérisé par une vitesse d'attaque extrêmement faible : ces matériaux sont dans un état dit passif. Une expérience réalisée par Faraday en 1835 permet d'illustrer ce phénomène : un échantillon de fer plongé dans l'acide nitrique dilué donne lieu à une attaque importante accompagnée d'un dégagement d'hydrogène, l'échantillon est actif. Un échantillon identique, immergé dans une solution d'acide nitrique concentrée, va donner lieu dans un premier temps le même phénomène ; puis, la réaction s'arrête très rapidement et la vitesse de corrosion est quasiment nulle. Ce dernier échantillon immergé dans l'acide nitrique dilué ne donne alors pas d'attaque : l'échantillon est en effet passif, c'est-à-dire qu'il est recouvert d'une couche passive [29].

Chapitre 2 : La corrosion des aciers inoxydables

Le rapport des courants de corrosion correspondant à l'état actif par rapport à l'état passif est de 5×10^4 . Ceci montre tout l'intérêt de ce phénomène de passivation. Le fer est rarement utilisé dans de telles conditions de passivité, et il ne peut être passif que dans des conditions particulières ou lorsqu'il est allié de chrome par exemple. Si quelques matériaux purs ont cette propriété, ce sont essentiellement des alliages : les aciers inoxydables, les alliages de nickel, de cobalt et de chrome, les alliages de zirconium et de titane, par exemple, qui peuvent être passivés. [29]

2.4.2 NATURE DU FILM PASSIF :

Cette passivité est due à l'existence en surface d'un mince film protecteur, constitué d'oxyde ou d'hydroxyde formé à partir des produits de corrosion du matériau dans le milieu considéré. Ce film passif constitue une barrière vis-à-vis de la corrosion par ralentissement du transfert des cations depuis le métal vers le milieu. [18].

Dans le cas des aciers inoxydables, la bonne tenue à la corrosion est due à la présence du chrome. Une teneur au moins égale 11,5% en poids. Ceci favorise l'existence d'une couche d'oxyde de chrome Cr_2O_3 sur la surface de l'acier, qui se forme d'ailleurs spontanément. L'air en solution aqueuse, la composition de la couche passive se modifie : elle est alors constituée d'un mélange d'oxydes et d'hydroxydes de fer et de chrome. L'épaisseur de ce film formé sur les aciers inoxydables est très faible - Quelques nanomètres -. Par contre, pour d'autres matériaux comme le titane, le niobium ou encore le tantale, l'épaisseur de la couche passive est plus importante. Si ce film est protecteur, sa stabilité est toutefois précaire : son intégrité peut-être altérée par de nombreux agents chimiques, physiques et mécaniques ; il risque d'en résulter des attaques localisées alors que le métal est bien protégé vis-à-vis de la corrosion générale ou uniforme.

Pour renforcer les caractéristiques du film passif, l'emploi d'éléments d'addition, judicieusement choisis, dans le métal, peut s'avérer fructueux : ainsi l'addition de molybdène va augmenter la résistance à l'attaque localisée par "piqûre" des aciers inoxydables austénitiques en milieu chloruré. [29]

2.4.3 Film passif sur l'acier inoxydable austénitique :

Le film passif formé sur l'acier inoxydable austénitique est duplex en nature, se composant d'une barrière intérieure à pellicule d'oxyde et d'un dépôt externe de film d'hydroxyde ou de sel. La passivation aura lieu par la formation rapide des complexes hydratés surface-absorbés des métaux qui sont suffisamment stables sur la surface d'alliage. [29]. Les trois éléments : le nickel, le manganèse et l'azote, les plus utilisés généralement comme stabilisateur de l'austénite, contribuent à la passivité. Le chrome un

Chapitre 2 : La corrosion des aciers inoxydables

ingrédient d'alliage important, est en soi très résistant à la corrosion et est trouvé dans une plus grande abondance dans le film passif que le fer, qui est l'élément principal dans l'alliage.

2.5 Les différents types de corrosion :

La corrosion est un phénomène qui ne peut être négligé, la sélection des matériaux pour une application particulière dans un milieu corrosif est faite en tenant compte de la résistance à la corrosion mais en plus de paramètres comme les propriétés mécaniques, les propriétés de mise en forme, le coût et la disponibilité.

Les principales sources de renseignement permettent d'estimer la durée de vie d'un matériau dans un environnement donné, néanmoins il arrive que les données acquises à partir d'expérimentations et du vécu permettent une meilleure sélection.

Des milliers d'essais de corrosion sont réalisés chaque année pour essayer de comprendre et de réduire les dommages causés par la corrosion.

Plusieurs méthodes ont été développées pour suivre l'évolution dans le temps de la dégradation des aciers dans différents milieux agressifs.

Généralement plus d'une méthode sont utilisées en même temps pour expertiser un seul phénomène lié à la corrosion.

Les types de corrosion varient en fonction des matériaux et des milieux et chaque type ne peut être évalué correctement que si la méthode de caractérisation utilisée est appropriée.

Pour ces raisons l'identification du type de corrosion est importante.

La littérature décrit plusieurs types de corrosion :

2.5.1 Corrosion uniforme

C'est une perte de matière plus ou moins régulière sur toute la surface. Cette attaque est observée, par exemple, sur les métaux exposés aux milieux acides.

2.5.2 Corrosion galvanique

Appelée aussi **corrosion bimétallique**, elle est due à la formation d'une pile électrochimique entre deux métaux qui diffèrent par leur potentiel de corrosion. Le métal ayant le potentiel de corrosion le plus négatif subit une corrosion accélérée par l'autre métal.

2.5.3 Corrosion caverneuse

Elle est due à une différence d'accessibilité de l'oxygène entre deux parties d'une structure, créant ainsi une pile électrochimique. Cette attaque sélective du métal est observée dans les fissures et autres endroits peu accessibles à l'oxygène.

Chapitre 2 : La corrosion des aciers inoxydables

2.5.4 Corrosion par piqûres La corrosion par piqûres :[31]

La corrosion par piqûres se produit lorsque la couche protectrice d'oxyde présente sur la surface de l'acier inoxydable se dégrade, le métal pouvant alors perdre des électrons. Cette réaction électrochimique déclenche la formation de petites cavités ou « piqûres ».

Ces piqûres, généralement décelables en procédant à un examen visuel approfondi, peuvent devenir suffisamment profondes pour perforer entièrement la paroi d'un tube. La corrosion par piqûres peut également faciliter l'apparition de fissures dans des composants soumis à des contraintes de traction. Une forte concentration en ions chlorures – créée notamment par l'évaporation de gouttelettes d'eau salée déposées sur une surface – favorisent la corrosion par piqûres, en particulier à des températures élevées.

Lorsque l'on examine un tube métallique pour y trouver les signes d'une corrosion par piqûres, on recherchera des dépôts bruns rougeâtres d'oxyde de fer ainsi que la présence éventuelle de cavités qui auront pu se former sur la surface du métal.

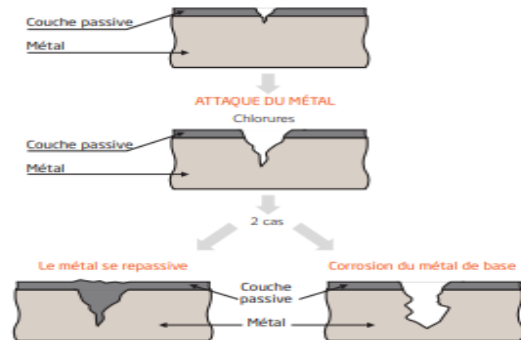
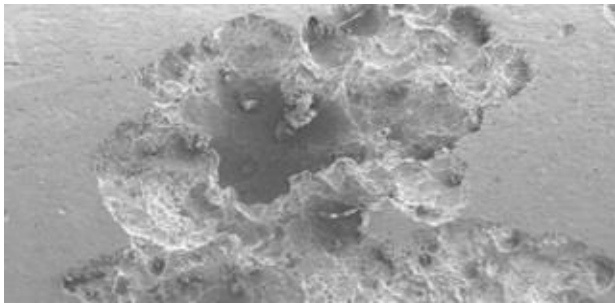


Figure 9 : Photo réelle

Figure 10 : schéma de corrosion par piqûre

2.5.5 Corrosion inter granulaire :

Une attaque inter granulaire est provoquée par la formation de carbures de chrome $(Fe, Cr)_23C_6$ aux joints de grains, réduisant localement la teneur en chrome et la stabilité de la couche passive. Dans les micrographies ci-dessus, les éprouvettes en acier inoxydable ont été polies puis attaquées par une solution d'acide puissante. Le réseau de lignes noires correspond à une attaque chimique importante aux joints de grains qui montrent une résistance à la corrosion beaucoup plus faible que les grains eux-mêmes.

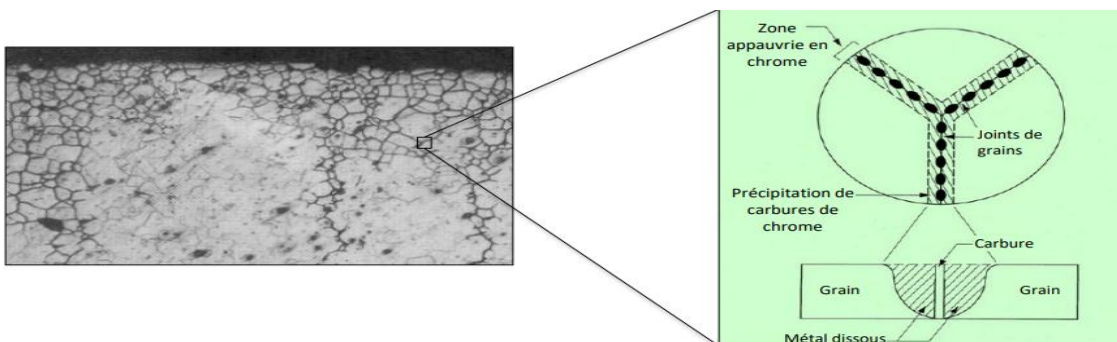


Figure 11 : Figure Vue schématique des zones appauvries en chrome aux joints de grains

Chapitre 2 : La corrosion des aciers inoxydables

2.5.5.1 Quand la corrosion inter granulaire se produit-elle ?

- ♣ Traités correctement, les aciers inoxydables ne sont pas sujets à la corrosion inter granulaire
 - ♣ Celle-ci peut se produire dans la Zone Affectée Thermiquement (ZAT) d'une soudure (de chaque côté du cordon) lorsque :
 - La teneur en carbone est élevée
 - Et que l'acier n'est pas stabilisé (par du Ti, du Nb ou du Zr* qui « piègent » le carbone présent en solution, le rendant indisponible pour la précipitation de carbures aux joints de grains) Lignes d'attaqueDégradation d'une soudure.
- * * C'est pourquoi il existe des nuances contenant du Ti (titane) et/ou du Nb (niobium) et/ou du Zr (zirconium), nuances qui sont appelées « stabilisées ».



Figure 12 : Dégradation d'une soudure

2.6 Résistance à la corrosion des aciers inoxydables :

2.6.1 Forme de la corrosion de l'acier inoxydable 316 L :

Les aciers inoxydables 316L (17% Cr ; 12%Ni ; 2%Mo ; 1.7%Mnet 0.02%C), comme la plupart des métaux passivables sont plutôt sensibles aux phénomènes de corrosion localisée [33]. Celle-ci est rendue possible par une rupture locale de l'intégrité de la couche passive sous l'action de contraintes mécaniques et/ou chimiques. Trois types de corrosion localisées sont répertoriés [34]

2.6.1.1 Corrosion par piqûres

C'est la manifestation classique de l'attaque des chlorures sur les aciers inoxydables. Seule une faible surface externe est affectée, mais l'attaque se prolongeant en profondeur, la résistance mécanique de l'équipement est rapidement affectée [35]. Elle dépend dans une large mesure de la présence d'ions

Chapitre 2 : La corrosion des aciers inoxydables

chlorures dans le milieu : c'est une forme d'attaque localisée induite par dépassivation locale dans des conditions localement réductrices (Fig. II.2).

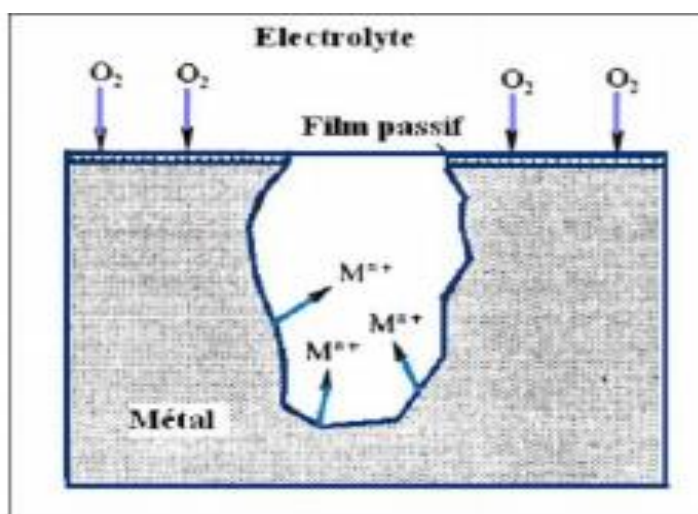


Figure 13 : Corrosion par piqûres [36].

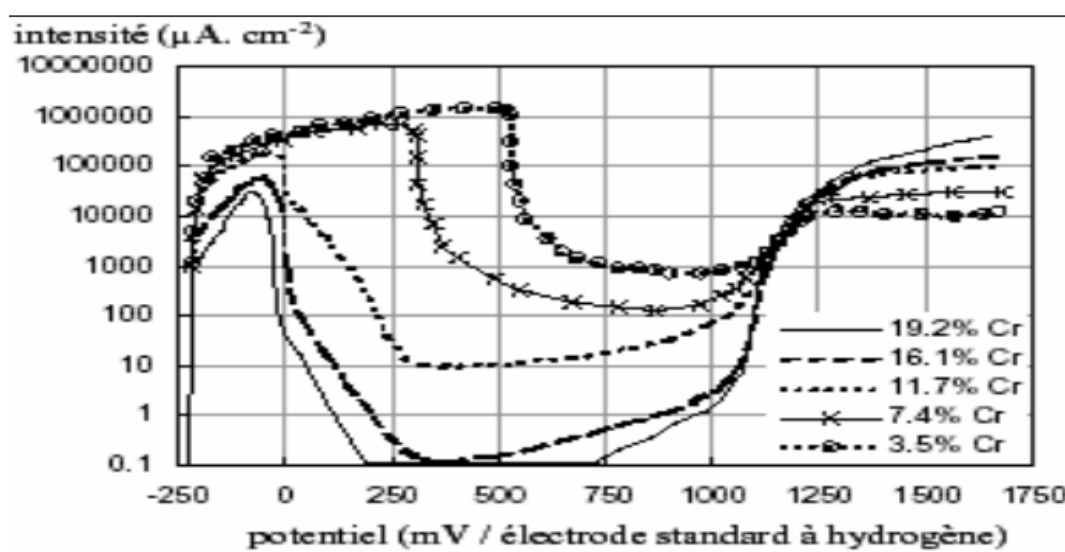


Figure 14 : Courbe intensité-potential des aciers inoxydables dans certains milieux acides, en fonction de leur teneur en chrome

2.6.1.2 Corrosion caverneuse

Tous les types d'aciers inoxydables sont susceptibles de subir une corrosion caverneuse (Joints, replis,...) [35]. Cette forme d'attaque est liée à des phénomènes d'hydrolyse et, en conséquence, à une diminution locale du pH, les ions Cl^- jouant un rôle important [37]. Dans la figure II.3, on observe une caverne de corrosion formée sous calorifuge à la surface d'un acier inoxydable.

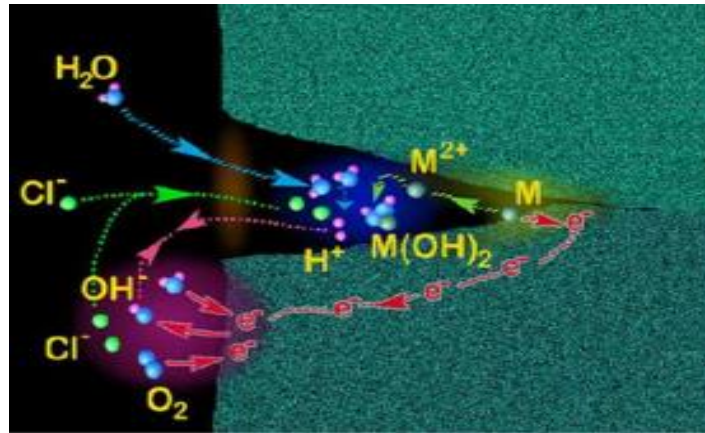


Figure15 : Une caverne de corrosion [38]

2.6.1.3 Corrosion sous contrainte

La dernière forme de corrosion est la corrosion sous contrainte, connue sous le nom de «stress-corrosion cracking» (SCC). Elle survient lorsqu'est combinée la présence d'un environnement corrosif à de fortes contraintes mécaniques. Dans le cas des milieux physiologiques, la résistance à la corrosion locale de l'acier inoxydable est sévèrement affectée sous l'application de contraintes mécaniques.

2.7 Résultat d'expertise (SKD spa)

2.7.1 Conditions nominales du site

- Altitude : moyenne +40.00 m NGA.
- température ambiante : 35°C.
- température eau de mer : 23°C.
- humidité relative moyenne : 73%.
- température maximale : 45°C (pour le dimensionnement de la climatisation et le système réfrigération à l'air ambiant, les équipements et matériels électriques non abrités ou se trouvant dans des locaux non climatisés).
- Choix de la pièce : tube huile hydraulique
- Nuance d'acier utilisée pour la confection de la pièce, acier inoxydable de type 316 L

2.7.2 Pourquoi l'acier inoxydable 316L ?

L'acier inoxydable AISI 316L est excellent et coûte beaucoup plus que le 304 car il a des éléments dans l'alliage qui le rendent beaucoup plus résistant à la corrosion marine. Ses principales caractéristiques sont :

- Faible teneur en Carbone (C). Pour cette raison, il est pratiquement insensible à la corrosion intergranulaire. Le traitement après soudage n'est pas nécessaire. Il ne se produit pas le phénomène de

Chapitre 2 : La corrosion des aciers inoxydables

précipitation de carbures de chrome dans la matrice et par conséquent la couche protectrice d'oxyde reste inchangée.

- Il y a la présence d'un pourcentage (2-2,5%) de molybdène (Mo). La présence de cet élément augmente la stabilité de la couche passive dans des environnements contenant des concentrations élevées de chlorures. Il est un élément "ferritizante" et donc augmente la résistance à la corrosion (corrosion caverneuse) et à la fissuration de corrosion.

- Le pourcentage élevé de chrome (Cr) augmente la résistance à la corrosion par "pitting".

- Le contenu de nickel (Ni) fournit une excellente ductilité et ténacité élevée, une bonne résistance à la corrosion dans les environnements peu oxydants (corrosion caverneuse).

- La présence d'autres éléments de stabilisation dans l'alliage en tant que silicium (Si), le manganèse (Mn), le phosphore (P), le soufre (S) et d'azote (N) donnent à la structure moléculaire un excellent équilibre entre les différents composants.

2.7.3 Analyses des conditions de travail de la pièce :

- Une pièce fixe.
- Absence de contrainte.
- Absence de soudure sauf dans le cas où une partie de l'installation se dégrade dans ce cas on la remplace par une nouvelle partie ont utilisant de soudage par TIG.



Figure16 : Soudure de nouvelle partie des tubes



Figure17 : Une fuite d'huile hydraulique due de la corrosion.

- La durée de vie de la pièce : au cours de ses 7 ans l'entreprise a changé 70% à 80% de l'installation 2 fois, et presque 10 fois ou plus (Chaque unité) quand une partie de 2 à 3 mètres se corrode et se perfore.

Chapitre 2 : La corrosion des aciers inoxydables

- Absence de toute type de protection (cathodique, anodique).
- Ya pas d'autre type de protection comme revêtement ou peinture.
- Les pièces de l'assemblage : Même type d'acier des tubes (316L)
- Coût de la pièce : le cout de changement de l'installation est à peu près 1468248,39 DA
- Réparation au sein de l'entreprise : La réparation peut varie de 20000DA jusqu'à 2000000DA selon la panne.
- Origine des aciers utilisés : importé.
- Pendant les travaux de soudure auprès de l'installation des tous petits grains de soudure se dépose sur les tube et pénètre avec le temps et la va percer le tube on causant une fuite.

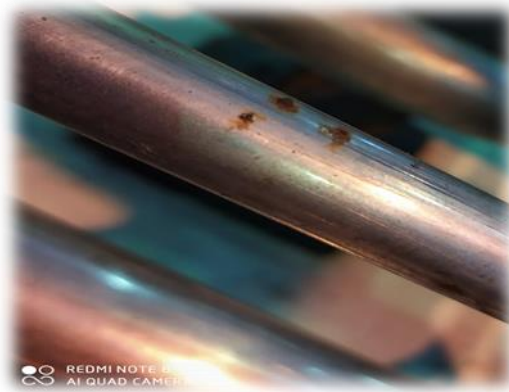


Figure18 : Grain de soudure déposé sur le tube d'huile hydraulique



Figure 19 : Réparation temporaire d'un trou afin de ne pas causer un arrêt de travail de l'unité.

Conclusion

CONCLUSION

Cette étude bibliographique portant sur les aciers inoxydables, a été pour nous une occasion de renforcer nos connaissances sur ces aciers spéciaux qui trouvent leur application dans divers domaines, allant de l'agroalimentaire, au domaine médical en passant par l'industrie nucléaire, la construction navale et autres. Il nous été permis de mettre au jour les spécificités de leurs compositions chimiques et surtout de connaître l'influence des éléments d'alliage sur les transformations de phases à l'origine de leur tenue à la corrosion dans différents milieux.

Les variations des teneurs en Ni, Cr et en carbone offre alors la possibilité d'élaborer plusieurs nuances d'aciers inoxydables parmi lesquelles certaines subissent des traitements thermiques et même thermochimiques comme la nitruration par exemple. Outre cela, il nous a été donné de comprendre l'influence néfaste du carbone sur la tenue à la corrosion, du fait de la précipitation au joint de grain du carbure $(Fe, Cr)_{23}C_6$ et la création de zones adjacentes au joint de grain, pauvres en chrome, donc facilement corrodables.

Ce qui explique la mise au point de l'acier inoxydable 316L, à faible teneur en carbone, avec effet de fixation de ce carbone sous forme de carbure de titane, précipité en position intragranulaire, sans risque de formation du carbure de chrome, cité précédemment.

L'importance de ces aciers nous a été révélée lors de notre stage pratique au sein de la centrale électrique Kahraba Koudiet Eddraouch s.p.a, par abréviation SKD Spa. Les équipements de cette centrale sont constamment soumis aux effets de la corrosion marine, du fait de la proximité de la mer et de l'utilisation de son eau dans le système de refroidissement des générateurs électriques. Les pièces affectées par une corrosion sous forme de piqûres de surface, sont les tubes en acier inoxydable du système hydraulique. Après maintes observations et investigations, nous avons pu cerner les causes plausibles de la dégradation prématurée de ces tubes :

- Utilisation d'une nuance riche en carbone, causant des piqûres de corrosion selon les joints de grain,

- Altération de la surface par des rejets de fines particules incandescentes dues à des opérations de soudage souvent réalisées dans un environnement très proches des tubes en question.

Conclusion

Références Bibliographiques

Références Bibliographiques

- [1] : P. Lours, G. Bernhart, T.Cutard, D. Delagnes, V. Velay. Axe «Comportement, Durabilité et structure des Matériaux(CDSM) »(2006).
- [2] : P. Lacombe, B. Baroux, G. Beranger : Les aciers inoxydables, Les éditions de Physique 1990.
- [3] : FICHES D'INFORMATION - ACIERS INOXYDABLES [PARTIE 1] / Métallerie 98 • Janvier 2007.
- [4] : https://fr.wikipedia.org/wiki/Acier_inoxydable.
- [5] : N. Lebozec, Thèse Docteur de l'université de Bretagne Occidentale (2000).
- [6] : C. Pierre-Jean, Acier inoxydable, Critère de choix et structure, In : Techniques de l'Ingénieur, traité matériaux métalliques, Vol, MB4, dossier M4540, Paris (2000).
- [7] : K.H. Lo et al. / Recent developments in stainless steels ./ Materials Science and Engineering R 65 (2009) 39–104
- [8] : Mémoire de magister «Effets des traitements thermiques sur la microstructure et le comportement à la corrosion d'un acier inoxydable de type 309» _ Présenté par : Kamel MADDOURI
- [9] : Dudogno Julien : étude des modifications structurales induites par implantation ionique dans les aciers austénitiques, thèse de doctorat de l'université d'Orleans, décembre 2006.
- [10] : Précis de Métallurgie «élaboration structures-propriétés et normalisation» 5^eEdition.
- [11]: M. Schaeffler: Constitution diagram for stainless steel weld metal, Metal Progress, 56, (1949), pp. 680-68
- [12] :J. Baralis& G. Maeder : Précis métallurgie, Nathan, Paris, 1997.
- [13]: Mémoire de magister (SPÉCIALITÉ : GÉNIE MÉCANIQUE OPTION : SCIENCES DES MATÉRIAUX THÈME Caractérisation de l'acier inoxydable X5CrNi18-10 et étude de son oxydation à température.) PRÉSENTÉ PAR AMY Zahia.
- [14] : Jean VARRIOT : Chaudronnerie en aciers inoxydables. Techniques de l'ingénieur,A 869.
- [15] : Hervé SASSOULAS /Techniques de l'Ingénieur, traité Matériaux métalliques M 1 155.
- [16]:A.S. Hamdy et al. / The corrosion behavior of niobium bearing cold deformed austenitic stainless steels in 3.5% NaCl solution /Materials Letters 61 (2007) 2827– 2832.
- [17]: S M Addasi, A Shokuhfar: Improvement of Mechanical properties of Cr-Ni-Mo-Cu-Ti stainless steel whit Addition of Vanadium journal of iron and steel research, International (2007).
- [18]: N. Bilardouh / Précipitation de la phase sigma et des carbures M23C6 dans les alliages Fe-Cr-Ni/ Thèse de doctor d'état. Université ANNABA 2005.
- [19] :JohanAndre : Optimisation des propriétés de conduction électrique et de passivité d'aciers inoxydables pour la réalisation de plaque bipolaires de pile à combustible de type PEMFC, thèse de doctorat,2007.
- [20] : <https://accu.group/fr/p/112-difference-between-ferritic-austenitic-and-martensitic-stainless-steels>

Références Bibliographiques

- [21]: Quentin Auzoux : Fissuration en relaxation des aciers inoxydables austénitiques- Influence de l'écrouissage sur l'endommagement intergranulaire, thèse de doctorat de l'Ecole nationale supérieure des mines de paris, janvier 2004.
- [22] :C. RITCHARD « Corrosion et Traitement de Surface des Biomatériaux », Techniques de l'ingénieur, 2010, Cor 140.
- [23] : Hervé Sassoulas : traitement thermiques des aciers inoxydables, techniques de l'ingénieur, M1160.
- [24] : Hervé Sassoulas : Traitements thermiques des aciers inoxydables, Techniques de l'Ingénieur, M 1155.
- [25] : G.A. DeQueiroz and D.F. Day ; Antimicrobial activity and effectiveness of a combination of sodium hypochlorite and hydrogen peroxide in killing and removing Pseudomonas aeruginosa biofilms from surfaces; journal of Applied.
- [26]:Malcolm D. Newson; Geomorphological concepts and tools for sustainable river ecosystem management Aquatic Conserv: Mar. Freshw. Ecosyst.12: 365–379 (2002) DOI: 10.1002/aqc.532.
- [27]: Khardori N, YassienM ; Biofilms in device-related infections. (J. IndMicrobiol. 1995 Sep; 15(3):141-7
- [28] DORLOT, J.M., Bâillon, J.P. et Masounave. J. Des Matériaux 2e édition Ecole Polytechnique de Montréal, 1986, pp. 445-452.
- [29]G. Béranger et J. C. Charbonnier/. Les aciers Inoxydables les edition de physique/ chapitre 11 PAGE 414.
- [30] Z. Ahmad, —Principles of Corrosion Engineering and Corrosion Control, Elsevier, (2006).
- [31] Corrosion par piqûres et corrosion caverneuse: savoir les différencier /25 juin 2019 | BehramGinwalla, directeur produit.
- [32] :Support de cours pour enseignants d'Architecture et de Génie Civil Module 5 : Résistance à la corrosion des aciers inoxydables.
- [33]: S.AM. Refaey, F. Taha, AM. Abd El-Malak, Applied surface science 236 (2004) 175-185.
- [34] : M. Haidopoulos, Thèse docteur de l'université de Laval (2005).
- [35]:L.L. Shreir, Corrosion, chap. Localized Corrosion, Ed. Newnes, pp. 1-130, (1976).
- [36] : A. Pourbaix, “Corrosion Localisée- B: Caractères généraux, Réactions en jeu Principe de protection” Les Editions de Physique, (1994), p. 17.
- [37]- H. Tsuchiya, S. Fujimoto, O. Chihara and T. Shibata, “Semiconductive behavior of passive films formed on pure Cr and Fe–Cr alloys in sulfuric acid solution”, ElectrochimicaActa, 47, (2002), pp. 4357-4366.
- [38]- G.T. Burstein, C. Liu, R.M. Souto, S.T. Vines, “Origins of pitting corrosion”, Corrosion Engineering Science and Technology, 39, (2004), p. 25.

Références Bibliographiques

[39]: M.Hansen, «Constitution of Binary Alloys », 2ndEdditionMcGraw Hill, New York, (1958).

[40]: La société RAUMER, Schio, Avril 2013, « LES ACIERS INOXYDABLES ET LEUR CORROSION »