



**PROfil**

# **La corrosion dans l'industrie chimique**

**Enjeux-Impact**

**Yves Cêtre**

# PROfil

## La corrosion dans l'industrie chimique

### Enjeux-Impact

### Yves Cètre

**L**es livres consacrés à la corrosion spécifique à un domaine industriel – comme ici l'industrie chimique – sont peu nombreux et abordent principalement la définition des modes de corrosion et les principaux facteurs associés.

Cet ouvrage de référence présente le sujet de manière nouvelle et originale.

- Pendant longtemps, la corrosion a été abordée sous le regard de telle ou telle science, or ici l'approche est pluridisciplinaire. Si le livre apporte les bases nécessaires en termes de mécanismes de corrosion, il témoigne aussi de l'évolution de la discipline, la corrosion faisant en effet converger plusieurs disciplines (la chimie et le génie chimique, la physique, la métallurgie, la plasturgie, la mécanique, l'électrochimie...).
- Il considère également le choix des matériaux et leur compatibilité avec les procédés de l'industrie chimique, ces considérations ne concernant pas uniquement les matériaux métalliques, comme on pourrait s'y attendre en parlant de corrosion, mais toutes les classes des matériaux.
- Il s'attache aussi au suivi des équipements, de leur construction et de leur utilisation en service, maillon clé sur la sécurité des procédés chimiques.

Cet ouvrage à forte portée didactique est riche d'études de cas illustrant toute la complexité de la corrosion au sein de l'industrie chimique.

Le livre est destiné aux techniciens et ingénieurs de l'industrie chimique (techniciens et ingénieurs de maintenance, d'inspection, de bureau d'études, de procédés et de la sécurité des procédés).

*Yves Cètre est docteur ingénieur de l'INSA de Lyon dans le domaine des matériaux et de la corrosion et a consacré toute sa carrière professionnelle à l'industrie chimique. Le choix des matériaux et la lutte contre la corrosion ont toujours été au cœur de ses activités, d'abord en recherche et développement de nouveaux procédés chimiques puis au sein des opérations industrielles dans le cadre de la construction, de la maintenance et du suivi des équipements.*

978-2-7598-2583-7



**edp sciences**  
www.edpsciences.org

Les ouvrages de la collection PROfil ont pour vocation la transmission des savoirs professionnels dans différentes disciplines. Ils sont rédigés par des experts reconnus dans leurs domaines et contribuent à la formation et l'information des professionnels.

# La corrosion dans l'industrie chimique

Enjeux–Impact

Yves Cètre

 edp sciences

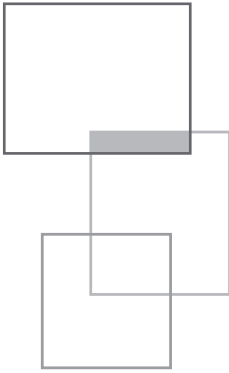
Photos de couverture : Yves Cètre.

Photo au microscope assez caractéristique des dégradations - Design d'installation.

Imprimé en France

ISBN (papier) : 978-2-7598-2583-7 – ISBN (ebook) : 978-2-7598-2584-4

Tous droits de traduction, d'adaptation et de reproduction par tous procédés, réservés pour tous pays. La loi du 11 mars 1957 n'autorisant, aux termes des alinéas 2 et 3 de l'article 41, d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective », et d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation intégrale, ou partielle, faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (alinéa 1er de l'article 40). Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles 425 et suivants du code pénal.



# Table des matières

---

<b>Preface</b>	VII
<b>Avant-propos</b>	XIII
<b>Chapitre 1 • Corrosion et sécurité</b> .....	1
1.1 Introduction .....	1
1.2 Qualité .....	1
1.3 Hygiène et sécurité .....	2
1.3.1 Sécurité des personnes .....	2
1.3.2 Sécurité des procédés .....	2
1.3.3 Sécurité des produits .....	3
1.3.4 Conditionnement et transport .....	3
1.4 Environnement .....	4
1.5 Accidents causés par la corrosion .....	4
1.6 Les manifestations de la corrosion et leurs impacts .....	8
Bibliographie .....	10
<b>Chapitre 2 • Approche économique de la corrosion</b> .....	19
2.1 Introduction .....	19
2.2 L'optimum technico-économique .....	21
2.2.1 Approche technique .....	21
2.2.2 Approche entreprise .....	22

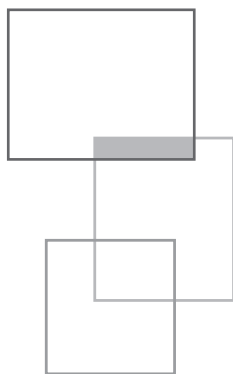
## Table des matières

2.2.3	L'industrie chimique : les conséquences de la corrosion et de sa prévention .....	23
	Bibliographie .....	27
<b>Chapitre 3</b>	<b>• Le choix des matériaux .....</b>	<b>29</b>
3.1	De la nouvelle molécule issue du laboratoire à sa production industrielle .....	29
3.2	Les conséquences du choix de matériau .....	31
3.2.1	Comportement à la corrosion .....	32
3.2.2	Propriétés physiques .....	36
3.2.3	Aspect économique .....	37
3.2.4	Cycle de vie et fin de vie des équipements .....	39
3.3	Le retour d'expérience .....	41
3.4	Le diagnostic et l'expertise .....	42
3.5	Conclusion .....	43
	Bibliographie .....	43
<b>Chapitre 4</b>	<b>• La dégradation des matériaux et les modes de corrosion .....</b>	<b>45</b>
4.1	Introduction .....	45
4.2	Les matériaux métalliques .....	46
4.2.1	Généralités .....	46
4.2.2	La dégradation à haute température et la corrosion à haute température .....	48
4.2.3	La corrosion humide .....	59
4.3	Les matériaux plastiques .....	105
4.3.1	Présentation .....	105
4.3.2	Vieillessement .....	105
4.3.3	Perméation (perméabilité) .....	109
4.4	Les matériaux céramiques .....	112
4.4.1	L'acier vitrifié .....	112
4.4.2	Les céramiques réfractaires .....	118
4.4.3	Les graphites .....	121
	Bibliographie .....	124

<b>Chapitre 5</b>	• Les matériaux utilisés dans l'industrie chimique . . . . .	151
5.1	Les matériaux métalliques . . . . .	151
5.1.1	Les alliages à base de fer . . . . .	151
5.1.2	Les alliages de nickel . . . . .	194
5.1.3	Les matériaux exotiques : titane, zirconium, tantale . . . . .	201
5.1.4	Autres matériaux . . . . .	213
5.2	Les matériaux plastiques . . . . .	222
5.2.1	Présentation . . . . .	222
5.2.2	Les thermoplastiques . . . . .	223
5.2.3	Les thermodurcissables . . . . .	233
5.2.4	Les élastomères . . . . .	242
5.2.5	Les peintures . . . . .	245
5.3	Les céramiques . . . . .	248
5.3.1	Présentation . . . . .	248
5.3.2	Les céramiques industrielles . . . . .	248
5.3.3	Les différentes formes des matériaux réfractaires . . . . .	252
5.3.4	Le carbure de silicium . . . . .	254
5.3.5	Le carbure de tungstène . . . . .	256
5.3.6	Le graphite . . . . .	258
5.3.7	L'acier vitrifié . . . . .	264
	Bibliographie . . . . .	267
<b>Chapitre 6</b>	• La surveillance des équipements . . . . .	271
6.1	Introduction . . . . .	271
6.2	La surveillance des équipements : inspection et contrôles . . . . .	273
6.3	EPR ( <i>Electrochemical Potentiokinetic Reactivation</i> ) . . . . .	276
6.3.1	Principe . . . . .	277
6.3.2	La méthode EPR appliquée aux matériaux moulés . . . . .	278
6.4	La surveillance des équipements : le suivi <i>on line</i> . . . . .	280

## Table des matières

6.4.1 Les sondes de corrosion .....	280
6.4.2 Émission acoustique et suivi de la corrosion .....	280
Bibliographie .....	289
Annexe .....	290



# Préface

---

L'expert en corrosion existe, je l'ai rencontré... Aujourd'hui, il nous donne à lire et à comprendre la corrosion dans l'industrie chimique. C'est peu dire que la tâche est ambitieuse.

Les ouvrages sur la corrosion sont nombreux pour qui s'y intéresse. Ils abordent principalement la définition des modes de corrosion et les principaux facteurs associés. Peu nombreux sont ceux dédiés à la corrosion spécifique à un domaine industriel, comme ici l'industrie chimique. La littérature anglo-saxonne est plus prolixe en la matière. S'agissant de l'approche francophone, il faut compter sur toute la collection des ouvrages collectifs, édités dans le cadre des écoles thématiques du Centre français de l'anticorrosion (CEFRACOR) en partenariat avec le CNRS. Cependant, dans ces ouvrages, chaque thématique industrielle concernée par la corrosion ne dispose que de quelques pages là où, comme le montre ici Yves Cètre, cela nécessite un ouvrage, voire plusieurs.

Yves Cètre propose un ouvrage à plusieurs niveaux de lecture. Il renseignera les étudiants, techniciens et ingénieurs débutants préoccupés de la corrosion, en leur apportant les bases nécessaires en termes de mécanismes de corrosion. Il sera un outil précieux pour les techniciens et ingénieurs plus expérimentés, en charge de conception, d'inspection, de méthodes, de procédés, de maintenance industrielle en général et de l'industrie chimique en particulier, en ce qu'il est riche d'études de cas illustrant toute la complexité (au sens synergique) de la corrosion. Enfin, cet ouvrage ne manquera pas d'apporter les éléments nécessaires aux chercheurs et enseignants-chercheurs en charge d'approfondir et de transmettre les connaissances dans le domaine de l'ingénierie des surfaces et de l'amélioration de la durabilité des structures.

Ainsi, cet ouvrage devrait contribuer à proposer, optimiser, choisir des matériaux et même permettre de concevoir de nouveaux matériaux aussi bien du point de vue microstructural, composition ou architectural.

Cet ouvrage témoigne aussi de l'évolution de notre discipline et rend hommage à ses prédécesseurs. La corrosion fait en effet converger plusieurs sciences : la métallurgie, la chimie, la physique, la mécanique, l'électrochimie, pour ne citer que les principales. Pendant longtemps, elle était abordée sous le regard de telle ou telle science. Un métallurgiste étudiait la corrosion ou elle était abordée par les mécaniciens... Vers les années 1960, une première génération d'enseignants-chercheurs et d'industriels développèrent une approche plus transverse, encore empreinte de la discipline scientifique de leurs maîtres respectifs, mais néanmoins évolutives. Cette évolution a permis de faire émerger des profils à haut potentiel fondamental qui ne dédaignèrent pas d'aborder la corrosion en collaboration avec des partenaires industriels tout aussi brillants scientifiquement et de surcroît visionnaires. Ce fut la première génération de scientifiques centrés sur la corrosion, précurseurs de l'ingénierie des systèmes pour résoudre des problématiques de corrosion sous contrainte, par piqûre, la passivation... C'est ainsi que très tôt, la corrosion abordait déjà l'approche pluridisciplinaire. C'est cette première génération qui du même coup a créé le CEFRACOR, les écoles thématiques de corrosion, les enseignements de la corrosion dans les écoles d'ingénieurs ou les universités et même des formations continues. Yves Cètre est l'un des premiers étudiants à avoir été formé par cette génération précurseurs. À ce titre, il fait partie de ceux à avoir mené une carrière entièrement dédiée à l'approche systémique de la corrosion en particulier et de la science des matériaux en général.

En outre, Yves Cètre a accompagné la création du premier laboratoire industriel sur la corrosion dans les murs de Rhône-Poulenc. Un laboratoire entièrement dédié à l'inspection des structures, l'accompagnement des bureaux d'études dans la conception des systèmes et les méthodes dans le suivi des installations. La création de ce laboratoire fut portée par une vision industrielle que soutenait toute une équipe d'industriels, accompagné en cela par un académique le Professeur Henri Mazille, un laboratoire dont le fonctionnement présageait les laboratoires communs d'aujourd'hui en somme. Ainsi, Yves Cètre, et ses près de quarante années d'activités centrées sur la corrosion, est mieux placé que quiconque pour nous restituer et recontextualiser les différentes études de cas rencontrées dans l'industrie chimique.

Enfin, cet ouvrage est particulièrement original en ce qu'il considère la compatibilité de la structure et de la chimie des matériaux avec les procédés de l'industrie chimique. Ces considérations ne concernent pas uniquement les matériaux métalliques, comme on pourrait s'y attendre en parlant de corrosion, mais toutes les classes des matériaux.

Cette publication caractérise le goût d'Yves Cètre pour la transmission des connaissances. Un trait de sa personnalité qui a donné lieu à l'émergence d'une génération d'experts dans les grands groupes industriels ou qui ont eux aussi créé des sociétés d'expertise en corrosion.

Il convient donc de recommander ce livre pour les formations sur la corrosion dans l'industrie chimique. Il devrait compléter avantageusement les formations d'inspecteurs et augmenter la collection des livres de corrosion de la bibliothèque Marie Curie de l'INSA de Lyon qui aura beaucoup de satisfaction à mettre à disposition

des futurs élèves-ingénieurs l'ouvrage d'un de leur prédécesseur qui a su poursuivre de belle manière la voie tracée par Henri Mazille, son directeur de thèse.

**Bernard Normand**

**Professeur des Universités**

**INSA de Lyon**

Cet ouvrage est à la fois le fruit d'une passion et l'illustration du goût d'Yves pour l'enrichissement des connaissances par le retour d'expérience.

C'est un grand honneur pour moi d'en témoigner, d'abord comme ingénieur de maintenance puis comme directeur d'un site chimique Seveso seuil haut exploitant des procédés très différents et atypiques qui ont apporté un très large champ d'expérience à Yves et ses équipes.

Grâce à son parcours professionnel démarré en laboratoire de recherche et de développement sur les matériaux et la corrosion puis en usine en charge successivement des services d'inspection puis de maintenance, Yves nous fait bénéficier de ses vastes connaissances et de son expérience pratique et pragmatique avec pour objectif le choix du bon matériau afin d'assurer la sécurité des procédés et la fiabilité des équipements. Ce sont là des conditions essentielles à la pérennité et à la compétitivité économique.

Voici donc un ouvrage à recommander à tout technicien et ingénieur de maintenance, d'inspection, de bureau d'études et de sécurité des procédés lorsqu'il sera confronté à un choix de matériau ou à la compréhension d'un mode de corrosion.

**Pascal Lecroq**

**Ancien directeur d'usine de l'industrie chimique**

La corrosion dans l'industrie chimique est un sujet prédominant pour opérer nos usines de façon durable, fiable et économiquement rentable. En effet, la corrosion est au centre d'un processus complet garantissant la création de valeur :

- en choisissant les matériaux les plus adaptés aux procédés chimiques de plus en plus exigeants ;
- en assurant la sécurité des personnels de production opérant les équipements ;
- en garantissant une durée de vie des équipements permettant un retour sur investissement acceptable dans une industrie nécessitant des investissements élevés et permanents, au travers d'expertises et de recommandations pointues.

J'ai eu la chance de connaître Yves Cètre au début de ma carrière professionnelle, jeune diplômé apprenant le développement de procédé industriel, et de le retrouver 20 ans plus tard dans mon rôle actuel. J'ai ainsi pu apprécier la palette large des compétences :

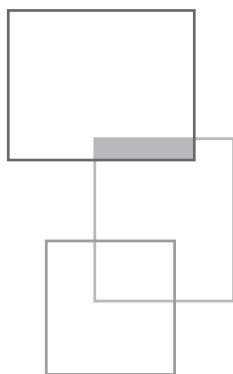
- depuis le design des équipements industriels à partir d'essais laboratoire ;
- en impliquant les équipes de production dans la meilleure manière d'opérer ces équipements (lien équipement / procédé) ;
- jusqu'à leur suivi au cours du temps en analysant leur corrosion et proposant des actions correctives ;
- en structurant sur la plateforme chimique du Pont-de-Claix un Service d'inspection reconnu.

Yves a toujours placé l'homme au sein de tout processus technique, privilégié la formation, le partage de sa grande connaissance et les retours d'expériences. Cet ouvrage permet de faire un point technique très complet sur un sujet complexe que peu de personnes maîtrisent, mais aussi donner des perspectives sur tous les sujets connexes. Cela en fait une référence inestimable et unique sur le sujet de la corrosion dans l'industrie chimique.

**Laurent Peyrot**

**Vice-président Global Operations and Supply Chain Vencorex Holding**





# Avant-propos

---

Les industries chimiques et parachimiques ont toujours été confrontées aux problèmes créés par la corrosion de leurs équipements. Il y a un siècle le choix des matériaux pour la construction des équipements de génie chimique n'était pas ce qu'il est de nos jours.

Les aciers inoxydables et les alliages de nickel par exemple n'existaient pas pour des applications industrielles. Les premières réalisations en acier inoxydable apparurent vers les années 1920 mais leur véritable essor pour l'industrie chimique vit le jour après la Seconde Guerre mondiale.

Auparavant, les matériaux qui étaient utilisés dans l'industrie chimique étaient peu nombreux : citons le verre, la porcelaine pour manipuler les acides, l'acier, la fonte et le bois. Ces derniers trouvaient des applications pour la réalisation de cuves de stockage, de réacteurs, voire de tuyauteries.

De tout temps, l'industrie chimique est confrontée à la réalité de disposer de contenants susceptibles de ne pas se détériorer et cela en particulier lors de la mise sur le marché de nouvelles molécules. C'est ainsi que le développement de nouveaux procédés chimiques doit intégrer le choix des matériaux dès la recherche et cela jusqu'à l'industrialisation. Les aspects sécurité et environnementaux, qui sont de nos jours les préoccupations quotidiennes de l'industrie chimique, jouent un rôle important lors du choix des matériaux et du design des équipements. Dans l'industrie pharmaceutique et la chimie fine, un autre volet lié à la qualité des produits fabriqués impose l'utilisation de matériaux « incorrodables » : la moindre trace de polluants dans les médicaments par exemple entraîne la non-mise sur le marché.

La corrosion tout comme l'anticorrosion est une discipline indispensable à l'essor des industries chimiques et parachimiques. Mais au-delà du choix de matériau, il faut maîtriser la transformation et la mise en œuvre, et assurer un suivi du matériel ainsi construit au cours de sa durée de vie. La réglementation pour la construction des équipements permet aussi, si le choix du matériau est correct, d'assurer le bon

comportement des équipements au cours du temps. La sécurité des personnes et des procédés, ainsi que la protection de l'environnement sont alors préservées.

Lors de la construction de nouvelles unités, la composante économique est aussi un paramètre essentiel sur les prises de décision. C'est là que le fameux optimum technico-économique doit être trouvé. Pour cela, il faut connaître, dès la construction de l'unité, sa durée de vie estimée en lien avec la molécule fabriquée. C'est rarement le cas et, souvent, le choix peut s'avérer non optimisé. Cela génère des discussions autour des notions de CAPEX (*capital expenditure*) et d'OPEX (*operational expenditure*) avec des visions qui peuvent être parfois divergentes.

Enfin, autour du choix des matériaux dans l'industrie chimique, nous retrouvons un très grand nombre de disciplines techniques et scientifiques : le procédé chimique, la corrosion, le bureau d'étude et l'ingénierie, la réglementation, la maintenance et la mise en œuvre des matériaux. Sur ce dernier point, une très grande rigueur est nécessaire afin d'assurer la qualité des matériaux fabriqués en liaison avec les métallurgistes, les plasturgistes et les réfractoristes. La transformation des matériaux en matériel de génie chimique par les chaudronniers, fondeurs, tuyauteurs... devra être parfaitement maîtrisée.

Aujourd'hui, nous restons cependant confrontés à un certain nombre de problèmes et d'incidents avec des conséquences plus ou moins importantes. Les problèmes de dégradations peuvent avoir plusieurs origines :

- écart sur le procédé ou sur les matières premières (température, impuretés, pH...);
- choix de matériaux non optimisé;
- mise en œuvre défectueuse (soudage, fonderie, traitement thermique...);
- écart de procédure sur l'exploitation du matériel (assemblage, jointage...).

Souvent, il est plus facile de mettre en cause le matériau et de ne retenir que cet aspect. Il faut analyser et tirer tout le bénéfice du retour d'expérience (REX). C'est un point-clé qui permet d'assurer le lien entre les générations des personnels techniques de nos entreprises. Tirer profit de nos incidents est très important pour le futur de notre industrie. Il faut attirer et soutenir la curiosité de nos techniciens et de nos ingénieurs afin de maintenir un niveau d'exigence et d'expertise élevé. C'est là tout l'intérêt des métiers autour des matériaux et des équipements fabriqués.

Promouvoir une politique de prévention de la corrosion et de la préservation du matériel reste le cœur du métier de la maintenance et de l'inspection. Il existe différents types de maintenance, corrective, systématique, préventive... le choix de celle-ci se fait en fonction de nombreux paramètres dont la criticité des équipements, les matériaux utilisés, les aspects réglementaires...

L'industrie chimique, du fait des nombreux procédés mis en œuvre, est confrontée à une multitude de milieux que l'on peut considérer le plus souvent comme sévères. Citons l'utilisation d'acide ou de base concentrés dans des conditions de pression et de température élevées. Cela concerne les unités de production mais aussi, le transport et le stockage des produits et intermédiaires. D'autres milieux « non sévères voire non corrosifs » sont aussi utilisés et il n'est pas rare que face à cela, par manque de

vigilance et de perspicacité, des dégradations interviennent sur les matériaux. Il s'agit typiquement de cas de corrosion en « milieu non corrosif ».

Il existe de nombreux moyens pour lutter contre la corrosion, en lien avec les modes de dégradation rencontrés. En effet, lutter contre la corrosion généralisée nécessite des moyens différents que ceux utilisés pour lutter contre la corrosion localisée.

Le suivi des installations est un des moyens importants de lutte contre la corrosion. Pour cela, la maintenance des équipements sera adaptée selon la politique industrielle définie. Une maintenance conditionnelle avec le suivi en continu des équipements est un domaine à privilégier afin de prévenir tout incident potentiel. Les outils les plus habituellement utilisés pour cela sont les analyses d'huiles, les mesures de vibration, l'imagerie infrarouge, les mesures électrochimiques, les mesures acoustiques et tout le panel des contrôles non destructifs. À titre d'exemple, l'émission acoustique s'est développée ces dernières années pour le suivi *in situ* de la corrosion. Elle permet d'identifier différents modes de dégradation des matériaux.

Cette première partie du livre « La corrosion dans l'industrie chimique. *Enjeux-Impact* » est destinée aux techniciens et ingénieurs de l'industrie chimique afin qu'ils puissent aborder le domaine de la corrosion et de l'anticorrosion, à partir de l'expérience acquise par les nombreuses personnes qui ont travaillé dans le domaine des matériaux et du matériel (inspection, maintenance, procédés).

La littérature est riche d'ouvrages sur la corrosion avec des approches plus ou moins académiques. Dans cet ouvrage, nous allons aborder les spécificités de la corrosion dans l'industrie chimique :

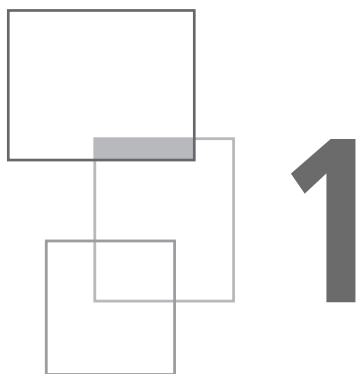
- dans un premier temps, l'impact que peut avoir la corrosion sur la sécurité des hommes, sur la sécurité des procédés chimiques, sur la qualité des produits fabriqués et sur les impacts environnementaux ;
- puis nous examinerons l'impact économique du coût de la corrosion sur les entreprises de la chimie afin de mieux comprendre les décisions qui peuvent être prises en terme d'investissement et de suivi du matériel au cours du temps ;
- les modes de dégradations des matériaux utilisés seront décrits en ne se limitant pas aux matériaux métalliques mais en abordant aussi les matériaux plastiques et les matériaux céramiques et réfractaires. Le choix des matériaux et ses conséquences seront analysés. Une description aussi complète que possible des matériaux utilisés dans l'industrie chimique sera faite avec quelques grands domaines d'application ;
- et nous terminerons par un chapitre sur la surveillance des équipements en lien avec le type de maintenance développée.

Dans une deuxième partie, seront abordés des exemples de corrosion dans des milieux complexes de l'industrie chimique. Le point important de la mise en œuvre des matériaux et des conséquences sur le comportement à la corrosion sera abordé. Les essais de corrosion, le rôle fondamental de l'expertise et la lutte contre la corrosion seront aussi développés.

Je voudrais remercier les très nombreuses personnes avec qui j'ai pu partager ma passion pour les matériaux et la corrosion au cours de ma carrière d'abord au sein

des laboratoires de recherche et développement puis au sein des équipes industrielles dans le domaine du matériel, de l'inspection, de la sécurité et de l'environnement.

Enfin, j'adresse un hommage particulier au Professeur Henri Mazille qui, par sa passion de la corrosion, a su au sein de l'INSA de Lyon et de nombreuses autres instances scientifiques donner un souffle nouveau à cette discipline avec une vision orientée vers l'industrie et en particulier la chimie.



# Corrosion et sécurité

---

## 1.1 Introduction

Dans l'industrie chimique, la qualité, l'hygiène, la sécurité et l'environnement (QHSE) sont et seront les domaines prioritaires pour tous les développements actuels et futurs de cette industrie. Si tel n'est pas le cas, l'industrie chimique disparaîtra et entraînera avec elle le déclin de beaucoup d'autres industries et de notre société. En effet, qui peut imaginer un monde sans produits pharmaceutiques, sans produits pour l'alimentaire, le bâtiment, l'automobile, l'habillement, la vie quotidienne...

Cependant, compte tenu de l'évolution de nos sociétés et des mentalités, l'industrie chimique se doit d'être exemplaire dans le domaine QHSE. Tout industriel de la chimie lors de la mise sur le marché d'un nouveau produit, et bien avant sa production, a l'obligation d'aborder, d'étudier et de traiter les aspects QHSE.

## 1.2 Qualité

Les produits fabriqués doivent respecter certaines contraintes pour répondre et satisfaire aux besoins du consommateur. Un produit et/ou un service doit être fiable, durable, performant et respecter certaines normes qui garantissent la sécurité et la conformité d'usage. La qualité des produits fabriqués assure la pérennité de l'entreprise et surtout face à une concurrence de plus en plus présente. La lutte contre la corrosion et le choix des matériaux sont les « fondamentaux » pour avoir des produits répondant à la qualité demandée.

La pureté d'un produit fabriqué avec l'absence de trace de métaux dans les intermédiaires et produits pharmaceutiques est clé pour la santé des hommes et pour

la mise sur le marché d'un nouveau médicament. Dans le domaine alimentaire, la même réflexion est menée. Utiliser une soude caustique pour des « applications alimentaires » nécessite des procédés chimiques qui permettent de garantir l'absence de corrosion lors des différentes étapes de fabrication et de distribution. Disposer de fibres textiles qui ne se rompent pas ou qui ne jaunissent pas nécessite là aussi une pureté exemplaire ; les matériaux des filières et des guides doivent avoir un comportement excellent sans laisser de produits de corrosion sur les fibres.

## 1.3 Hygiène et sécurité

Différents aspects sont à aborder : la sécurité des personnes, la sécurité des procédés, la sécurité des produits et le transport des produits.

### 1.3.1 Sécurité des personnes

La sécurité des personnes est la priorité numéro une de l'industrie chimique : chaque employé travaillant dans les usines et les centres de recherches ne doit jamais être touché dans son intégrité physique.

La lutte contre les fuites accidentelles sur les tuyauteries (liaison brides et joints), les accessoires et les équipements doit être au cœur de toute démarche d'amélioration des équipes maintenance. L'absence de corrosion dans les points singuliers (supportage, sous calorifuge...) est une préoccupation à avoir au quotidien et en particulier au moment de la définition du matériel et de sa conception.

Le suivi au cours du temps des équipements permet de garantir l'absence de perte de confinement et d'assurer la protection du personnel.

### 1.3.2 Sécurité des procédés

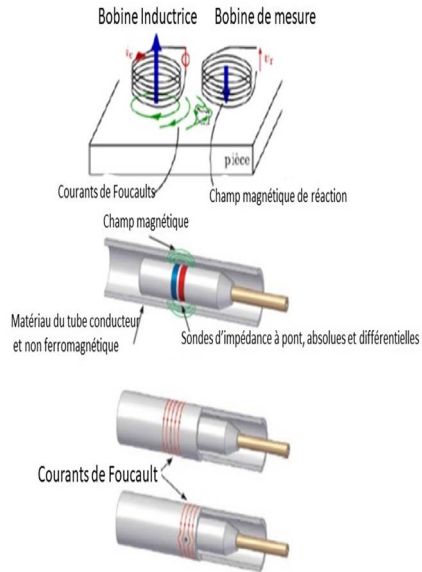
L'évaluation et la maîtrise des risques accidentels doivent être faites très tôt dans le développement d'un nouveau procédé.

Lors des études de dangers tous les scénarii divers et variés sont pris en compte, analysés et traités selon des méthodologies bien définies. Après la catastrophe de Toulouse, la réglementation (PPRT : Plan de prévention des risques technologiques) a été modifiée dans le but de rehausser le niveau de sécurité des établissements de production, de maîtriser l'urbanisation dans leur voisinage et de mieux protéger la population en cas d'accident. Les études de sécurité et les études de déviation des procédés chimiques permettent d'aborder l'impact de la corrosion des matériaux sur les différents scénarii de défaillance, et d'établir les barrières de protection à mettre en place.

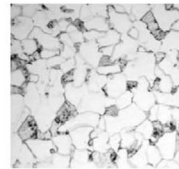
Tab A.3 Contrôles non destructifs [1].

**Courants de Foucault**

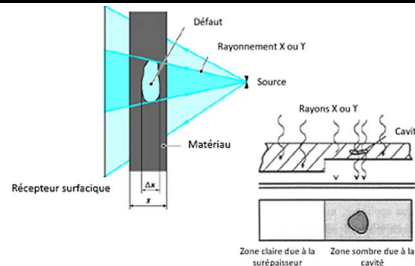
- La technique des contrôles par courants de Foucault (CF) consiste à soumettre une pièce métallique à l'action d'un champ alternatif créé par une bobine parcourue par un courant sinusoïdal. Ce champ alternatif donne naissance à des courants induits dits « courants de Foucault ».
- La répartition des courants de Foucault dans la pièce dépend de la conductivité et de la perméabilité magnétique du matériau, de sa forme et de sa position par rapport au bobinage. Les courants de Foucault créent un champ qui s'oppose au champ inducteur et qui, de ce fait, modifie l'impédance de la bobine.
- Lorsque le chemin des courants de Foucault est modifié par la présence d'une discontinuité physique (structure) ou géométrique (perte d'épaisseur, défaut de surface) de la pièce contrôlée, l'impédance de la bobine inductrice varie : la mesure de la variation de cette impédance est la base de la technique des CF.
- Les différentes discontinuités ou défauts : trou, piqûre, fissure, manque d'épaisseur provoquent des perturbations différentes qui peuvent être caractérisées par comparaison à des défauts « étalons ».
- L'interprétation des indications obtenues en CF nécessite des moyens informatiques de stockage et de traitement des données importants, et ceci d'autant plus que l'on souhaite obtenir des informations sur la localisation, la caractérisation ou la dimension, des défauts détectés. Cette interprétation ne peut être faite que par des personnes spécialement formées et entraînées.
- Courants Foucault multifréquence : *Eddy Current Testing* (ECT)

**Répliques métallurgiques**

- Après préparation des surfaces à contrôler (par polissage mécanique et/ou électrochimique suivie d'une attaque chimique), des répliques de la surface peuvent être réalisées à l'aide de vernis pelable ou d'empreinte.
- Ces répliques sont souvent métallisées, ensuite examinées au laboratoire avec un microscope métallographique ou électronique (MEB).
- Le but de ces examens est de réaliser des macrographies ou des micrographies de la structure, et de visualiser des fissures ou microfissures débouchantes.

**Radiographie**

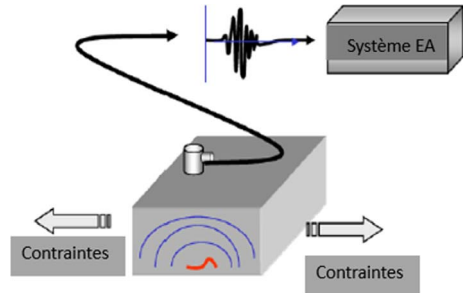
- La radiographie est une méthode qui utilise la propriété des rayons X ou  $\gamma$  de faible longueur d'onde, de traverser la matière.
- L'intensité du rayonnement est modifiée durant sa traversée selon qu'il rencontre le matériau sain ou les défauts.
- Le récepteur radiographique, film argentique ou écran photosensible, placé derrière l'objet enregistre les variations du faisceau émergent ce qui se traduit par une image comportant des différences de densité ou contraste, montrant les imperfections de la matière.
- Ce contraste entre l'image d'un domaine contenant un défaut et celle d'un domaine exempt de défaut permet à l'observateur de distinguer l'imperfection.



Tab A.4 Contrôles non destructifs [1].

**Émission acoustique**

- L'émission acoustique (EA) est un phénomène naturel qui se produit au sein d'un matériau soumis à l'action d'une sollicitation mécanique, thermique ou chimique. Elle se manifeste par une libération d'énergie sous la forme d'une onde élastique transitoire qui accompagne une transformation physico-chimique ou un endommagement irréversible.
- Les ondes émises sont généralement du domaine acoustique (entre 50 kHz et 1 MHz), d'où le terme d'émission acoustique.
- L'EA détecte les défauts évolutifs et l'endommagement actif dans le matériau sous l'effet de contrainte. Sa mise en œuvre nécessite d'appliquer à la structure un chargement excédant légèrement les conditions normales de service dans le but de faire propager les défauts d'une façon contrôlée. L'EA peut détecter aussi des phénomènes de corrosion sans sollicitation des structures.
- Les capteurs piézoélectriques sont disposés sur la surface de la structure à contrôler selon un maillage permettant d'obtenir une couverture globale ou zonale de l'appareil en tenant compte de l'influence de la nature du matériau et de la géométrie de l'appareil sur l'atténuation des ondes.
- La sensibilité de la méthode est influencée par les conditions liées :
  - au processus contrôlé ;
  - à l'onde émise ;
  - à l'instrumentation ;
  - à la procédure de contrôle.
- Le personnel qualifié est chargé d'analyser en continu les signaux afin d'évaluer en temps réel la nocivité des défauts. Le chargement (essai en charge) peut être arrêté dès l'apparition des premiers signaux associés à l'amorçage de l'endommagement. L'état d'endommagement de la structure n'est pas modifié par le contrôle.



**Recherche de fuite**

- La recherche de fuite consiste en un essai d'étanchéité d'une enceinte par mise sous pression de liquide ou de gaz, associée à une détection de liquide ou de gaz à l'extérieur de l'enceinte. La recherche de fuite peut également consister à mettre en dépression la zone ou l'équipement examiné.
- Les principaux fluides utilisés pour la recherche de fuite sont : l'eau, l'air, l'azote, l'ammoniac et l'hélium. Des recherches de fuites peuvent être réalisées sur des équipements en service.
- Les méthodes sans gaz traceur utilisent l'air (ou l'azote voire gaz process) comme gaz de test, la fuite est mise en évidence à l'aide d'un révélateur test à la bulle (eau savonneuse, 1000 bulles), ou par variation de pression.
- Pour les méthodes avec gaz traceur (ammoniac, les halogènes ou l'hélium), la fuite est mise en évidence par coloration d'une peinture révélatrice pour l'ammoniac, et par détection du gaz traceur pour les autres (renflage ou accumulation).

