

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
École Nationale Polytechnique



Département de Maîtrise des Risques Industriels et Environnementaux

Mémoire de projet de fin d'études

pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'état en QHSE-GRI

**Méthodes de traitement et de minimisation des rejets dans un
contexte de développement durable. Application aux ateliers de
traitement de surface : Cas du centre de maintenance BHGE-
ALGESCO**

Soumeya AIT MESSAOUD

Fadya BENLAHCEN

Sous la direction de : M. Abdelmalek CHERGUI Professeur ENP

M. Mohamed BOUBAKEUR Maître Assistant A

Présenté et soutenu publiquement le 09/07/2019

Composition du jury :

Président	Mme. Chahrazed BOUTEKEDJIRET	Professeur	(ENP)
Promoteur	M. Abdelmalek CHERGUI	Professeur	(ENP)
	M. Mohamed BOUBAKEUR	Maître Assistant A	(ENP)
Examineur	Mme. Karima BITCHIKH	Maître Conférence B	(ENP)
	Mme. Souad BENTAALLA	Maître Conférence B	(ENP)
Invités	M. Kamel OUSSAADIT	Responsable EHS	(BHGE)

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
École Nationale Polytechnique



Département de Maîtrise des Risques Industriels et Environnementaux

Mémoire de projet de fin d'études

pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'état en QHSE-GRI

**Méthodes de traitement et de minimisation des rejets dans un
contexte de développement durable. Application aux ateliers de
traitement de surface : Cas du centre de maintenance BHGE-
ALGESCO**

Soumeya AIT MESSAOUD

Fadya BENLAHCEN

Sous la direction de : M. Abdelmalek CHERGUI Professeur ENP

M. Mohamed BOUBAKEUR Maître Assistant A

Présenté et soutenu publiquement le 09/07/2019

Composition du jury :

Président	Mme. Chahrazed BOUTEKEDJIRET	Professeur	(ENP)
Promoteur	M. Abdelmalek CHERGUI	Professeur	(ENP)
	M. Mohamed BOUBAKEUR	Maître Assistant A	(ENP)
Examineur	Mme. Karima BITCHIKH	Maître Conférence B	(ENP)
	Mme. Souad BENTAALLA	Maître Conférence B	(ENP)
Invités	M. Kamel OUSSAADIT	Responsable EHS	(BHGE)

Dédicace

À ma grand-mère,

À mes chers parents,

À mon frère Yazid,

À ma sœur Narimane,

À mes neveux Zakari et Wafa,

À ma Chère binôme et Amie Fadya,

À ma deuxième famille : mes chers amis,

À toute ma classe QHSE avec qui j'ai passé des moments inoubliables,

Je dédie ce modeste travail.

Soumeya

Dédicace

*À la mémoire de ma grand-mère,
À mes chers parents,
À ma chère sœur Manal,
À mes frères Fouad et Walid,
À mes tantes Hassiba et Katiba,
À ma chère amie et binôme... la souriante Soumeya,
À mes chères amies : Maha, Hadjer, Hind, Lyza,
À ma deuxième famille, la classe QHSE que je n'oublierai jamais,
Je dédie ce travail.*

Fadya

Remerciements

Ce travail a été réalisé dans le cadre de la préparation du mémoire de fin d'études pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'État en Qualité Hygiène, Sécurité, Environnement et Gestion des Risques Industriels (QHSE-GRI).

Nos vifs remerciements s'adressent en premier lieu à nos encadreurs Monsieur A. CHERGUI Professeur à l'école nationale polytechnique, Monsieur M. BOUBAKEUR Maître-assistant à l'ENP, pour leur disponibilité constante, leur suivi et leur rigueur scientifique qui ont contribué à l'exceptionnel encadrement dont nous avons bénéficiées.

Nous remercions aussi les membres du jury, Madame C. BOUTEKEDJIRET, Professeur à l'ENP, qui nous fait l'honneur de présider ce Jury, Madame S. BENTAALLA Maitre de conférences, Madame K. BITCHIKH Maitre de conférences, qui ont bien voulu accepter d'examiner et de juger ce travail.

Nous souhaiterions adresser nos chaleureux remerciements aux personnes qui nous ont apporté leur aide et qui ont contribué à l'élaboration de ce mémoire ainsi qu'à la réussite de cette année universitaire :

Monsieur R. BOURDJOUL, pour son dévouement, son aide, sa disponibilité et ses nombreux services.

Monsieur K. OUSSAADIT, notre promoteur de l'entreprise, pour nous avoir fait confiance et mis à notre disposition toutes les ressources nécessaires pour l'accomplissement de notre mission.

Monsieur B. BOUSBAI, EX HSE Leader à ALGESCO, pour nous avoir donné la chance d'effectuer notre projet de fin d'étude au sein d'ALGESCO.

Nos remerciements s'adressent également à toute l'équipe de GE Oil & Gas ALGESCO, avec qui, ce fut un plaisir de travailler avec, ils ont fait preuve d'une grande générosité et patience. Une pensée particulière à Lahlou, Abdenour, Fatma, Ahmed, Yassine, Hocine, Ahmed Saleh, Aziz et toute l'équipe engineering, pour leur disponibilité et leur veille au meilleur déroulement de notre travail.

Une pensée particulière est adressée aux étudiants et aux professeurs du département Qualité hygiène sécurité environnement et gestion des risques industriels que nous avons côtoyé quotidiennement durant nos années d'étude au département.

Enfin, nous adressons nos plus sincères remerciements à tous nos proches et amis, qui nous ont toujours soutenu et encouragé au cours de la réalisation de ce mémoire

À toutes ces personnes, nous présentons nos remerciements, notre respect et notre gratitude.

ملخص

الهدف من هذا العمل هو وضع نهج لإدارة النفايات السائلة الناتجة عن عمليات المعالجة السطحية على مستوى مركز صيانة آلات التوربين ALGESCO في سياق التنمية المستدامة. قمنا بتقييم المخاطر المتعلقة بهذه النفايات الصناعية عن طريق تطبيق شجرة العجز (AdD)، وقد مكنتنا هذه الطريقة من استخراج الأسباب التي تؤدي إلى حدوث تسرب وأن نقيم حواجز الحماية والإجراءات التصحيحية، بعد ذلك إقترحنا نهجا لتحسين إستهلاك المياه والحد من النفايات السائلة الناتجة. في النهاية حققنا و اقترحنا طرق معالجة فيزيائية وكيميائية للنفايات السائلة المترتبة عن أحواض التجريد الكيميائي (DC) و الإختبار غير المدمر (NDT).

الكلمات الدالة: المعالجة السطحية، التنمية المستدامة، شجرة العجز، تحسين معالجة، الإختبار غير المدمر، التجريد الكيميائي

Abstract

The aim of this work is to implement a management approach for surface treatment effluents (ST) at the ALGESCO Turbine Maintenance Centre in a sustainable context of development. We first studied the risks associated with these industrial effluents using the failure tree analysis (FTA). This method allowed us to identify the causes of an accidental spill and put in place safety barriers and corrective measures. Subsequently, we proposed an approach to optimize water consumption and the reduction of effluents generated. In the end, we realized and proposed a physical and chemical treatment of the effluents generated by the stripping and non-destructive test baths (NDT).

Key words: surface treatment, sustainable development, failure tree analysis, optimization, treatment, non-destructive test

Résumé

Le but de ce travail est de mettre en place une démarche de gestion des effluents de traitement de surface (TS) au niveau du centre de maintenance des turbomachines d'ALGESCO dans un contexte de développement durable. Nous avons en premier lieu étudié les risques liés à ces effluents industriels en appliquant la méthode de l'arbre de défaillance (AdD). Cette méthode nous a permis de ressortir les causes engendrant un déversement accidentel et de mettre en place des barrières de sécurité et des mesures correctives. Par la suite, nous avons proposé une démarche d'optimisation de la consommation en eau et de la réduction des effluents générés. À la fin, nous avons réalisé et proposé un traitement physique et chimique des effluents générés par les bains de décapage chimique (DC) et de test non destructif (NDT).

Mots clés : traitement de surface, développement durable, arbre de défaillance, optimisation, traitement, décapage chimique, test non destructif.

Table des matières

Listes des tableaux

Liste des figures

Liste des abréviations

Introduction générale	14
Chapitre 1. Présentation de la société General Electric	17
1.1 Introduction	17
1.2 ALGerian Engineering Services COmpany (ALGESCO)	18
1.3 Activités au sein des différents ateliers ALGESCO	19
1.3.1 Introduction	19
1.3.2 Les différentes étapes de maintenance.....	20
Chapitre 2. Description des process de traitement de surface	24
2.1 Introduction	24
2.2 Description des processus étudiés et les produits utilisés	24
2.2.1 Décapage chimique	24
2.2.2 Non Destructif Test (NDT), ou le contrôle non destructif :	30
2.3 Les espèces et les polluants.....	33
2.3.1 Provenance des polluants.....	33
2.3.2 Nature des polluants.....	33
2.4 État actuel de traitement des déchets liquides	34
2.4.1 Technique d'incinération	34
2.4.2 Procédé de traitement des fumées	36
2.4.3 Traitement des poussières par filtre à PTFE.....	37
2.4.4 Valeurs des émissions atmosphériques.....	37
2.5 Conclusion.....	38
Chapitre 3. Généralités sur les rejets industriels	41
3.1 Introduction	41
3.2 Notions sur les rejets industriels.....	41
3.2.1 Les différents types d'eaux	41

3.2.2	Définition des rejets : déchets et effluents.....	42
3.2.3	Déchets et effluents dans le cadre des travaux de maintenance.....	43
3.3	Limites et normes de rejets suivants la réglementation Algérienne.....	43
3.3.1	Rejets liquides.....	43
3.3.2	Élimination et contrôle des déchets.....	44
3.4	Conclusion.....	45
Chapitre 4. Analyse des risques liés aux produits et aux effluents aqueux		47
4.1	Introduction.....	47
4.2	Présentation de la méthode appliquée Add.....	47
4.2.1	Historique de la méthode.....	47
4.2.2	Concepts de base.....	48
4.2.3	Les étapes de l'analyse par Add	50
4.3	Analyse des risques dans la station de décapage chimique.....	52
4.3.1	Décomposition fonctionnelle	52
4.3.2	Application de la méthode Add.....	55
4.3.3	Réduction du risque de « fuite ».....	65
4.4	Analyse de risque dans la station NDT.....	67
4.4.1	Décomposition fonctionnelle	67
4.4.2	Application de la méthode Add.....	69
4.4.3	Réduction du risque de « fuite ».....	74
4.5	Conclusion.....	74
Chapitre 5. Minimisation des rejets en eau dans l'atelier NDT		77
5.1	Introduction.....	77
5.2	L'eau dans les ateliers de traitement de surface d'ALGESCO	77
5.2.1	Utilisation de l'eau.....	77
5.2.2	Étude des bains de rinçage	81
5.3	Méthodologie de gestion des rejets en eau	82
5.3.1	Agir sur l'entraînement.....	83
5.3.2	Agir au niveau de la fonction de rinçage.....	84
5.4	Conclusion.....	87
Chapitre 6. Traitement des effluents de traitement de surface.....		89

6.1	Introduction	89
6.2	Les procédés de traitement des rejets de traitement de surface	90
6.2.1	Précipitation	90
6.2.2	Cémentation.....	92
6.2.3	Échange d'ions	93
6.2.4	Électrolyse.....	93
6.2.5	Coagulation-floculation.....	93
6.2.6	La flottation.....	94
6.2.7	Les techniques membranaires	94
6.2.8	Adsorption	94
6.2.9	Oxydation	95
6.3	Détermination de l'Indice de permanganate	95
6.3.1	Introduction	95
6.3.2	Essai de traitement des bains usés de l'NDT	97
6.3.3	Précipitation des ions métalliques dans les bains acides du décapage..	104
6.4	Conclusion.....	106
	Conclusion générale	108
	Bibliographie	110
	Annexe A	113

Listes des tableaux

Tableau 2.1 Dimensions des cuves de stockage	27
Tableau 2.2 Propriétés des produits chimiques utilisés dans la station de décapage	29
Tableau 2.3 Composition chimique du pénétrant ZYGLO (MSDS ZYGLO Penetrant, 2015)	32
Tableau 2.4 Propriétés physico-chimiques du pénétrant ZYGLO (MSDS ZYGLO Penetrant, 2015)	32
Tableau 2.5 Nature des polluants	34
Tableau 2.6 Valeurs d'émission atmosphériques (CINTECH, 2013)	38
Tableau 3.1 Valeurs limites des rejets liquides	44
Tableau 4.1 Principales règles de l'algèbre de BOOLE	52
Tableau 4.2 Décomposition fonctionnelle de la station de décapage chimique (R. Redjem, F. Tchikiken, 2017)	53
Tableau 4.3 Probabilité des éléments de base de l'AdD	59
Tableau 4.4 Probabilités des éléments de base de l'AdD au niveau de la salle des opérations	64
Tableau 4.5 Résultats de l'AdD	65
Tableau 4.6 Décomposition fonctionnelle de l'NDT	68
Tableau 4.7 Probabilités des éléments de base de l'AdD de la fuite du pénétrant au niveau du stockage	71
Tableau 4.8 Probabilités des éléments de base de l'AdD de la fuite du pénétrant au niveau de la station NDT	73
Tableau 4.9 Résultats de l'AdD de la fuite du pénétrant ZYGLO	73
Tableau 5.1 Valeurs optimales des rapports de dilution par type de traitement (Breuil 1985).	80
Tableau 5.2 : Rapport de dilution par type de rinçage (e est l'entraînement (l/min, V_v est le volume vidangé (L), Q est le débit (L/h)) (V. Laforest, 1999).	85
Tableau 5.3 : Influence des structures de rinçage sur la quantité d'eau consommée (BARA 1988).	86
Tableau 6.1 Caractéristiques physico – chimiques des bentonites (Seghairi, 1998)	101
Tableau 6.2 Composition chimique (en %) des bentonites (Bendjama, 1982)	101
Tableau A.1 : Dangerosité des substances chimiques utilisées pour le décapage chimique	113

Liste des figures

Figure 1.1 Emplacement géographique d'ALGESCO (Google, 2019)	18
Figure 1.2 Turbine à gaz de centrale électrique (EIE ALGESCO, 2008)	19
Figure 1.3 Schéma général des étapes du procédé de maintenance des TG et CC (EIE ALGESCO, 2008)	20
Figure 2.1 Les étapes de décapage chimique des pales de turbine (ALGESCO O&G, 2010)	26
Figure 2.2 Disposition des bacs dans le local de stockage des produits chimiques (ALGESCO O&G, 2010)	27
Figure 2.3 Tour de lavage à remplissage statique (The Spray Nozzle People, 2019)	28
Figure 2.4 Principe de fonctionnement du phénomène de capillarité.	31
Figure 2.5 Bac des déchets solides (CINTECH, 2013)	35
Figure 2.6 Réacteur de neutralisation (CINTECH, 2013)	36
Figure 2.7 Filtre à manche PTFE (AIREX industries, 2014)	37
Figure 3.1 Place des rejets dans un système de production (Navaro, 1988)	43
Figure 4.1 Symboles des portes utilisés par la représentation graphique des événements de l'AdD (I. El Hassani, 2015)	48
Figure 4.2 Symboles des événements dans les AdD (I. El Hassani, 2015)	49
Figure 4.3 Exemple d'un AdD (Salvi,2003)	49
Figure 4.4 Démarche pour l'élaboration d'un arbre des défaillances (Salvi, 2003)	50
Figure 4.5 Fuite de l'acide au niveau du stockage	56
Figure 4.6 Arbre de défaillance de la fuite de deux acides	57
Figure 4.7 Fuite de la base au niveau du stockage	58
Figure 4.8 Fuite de l'acide au niveau de la salle des opérations	61
Figure 4.9 Fuite de l'acide à partir de deux solutions	62
Figure 4.10 Fuite de la base au niveau de la salle des opérations	63
Figure 4.11 Fuite du pénétrant ZYGLO au niveau du stockage	70
Figure 4.12 Fuite du pénétrant ZYGLO au niveau de la station NDT	72
Figure 5.1 Schématisation de l'entraînement entre un bain de traitement et un bain de rinçage (V. Laforest 1999).	78
Figure 5.2 Comparaison des entraînements en fonction des temps d'égouttage et la viscosité du bain (Breuil 1985).	83
Figure 5.3 Influence du nombre de rinçage éco sur le flux de pollution et le débit des rinçages (Breuil 1985)	87

Figure 6.1 Évolution du temps de contact sur l'indice de permanganate (pHi=7, T=45°C, [KMnO ₄] ₀ =1,3.10 ⁻³ mol/L)	97
Figure 6.2 Influence de la température et de la quantité du KMnO ₄ sur IP	98
Figure 6.3 Aspects externes des matériaux adsorbants utilisés.	101
Figure 6.4 Influence du temps de contact sur IP (charbon actif et bentonite)	102
Figure 6.5 Évolution de IP en fonction de la quantité de l'adsorbant	103
Figure 6.6 Variation du pH la conductivité de la solution en fonction du volume de la base du bain de décapage	105

Liste des abréviations

Add : Arbre de Défaillance.
ALGESCO : Algerian Engineering Services Company.
APS : Arc Plasma Spray.
BH : Baker Hughes.
CC : Compresseurs Centrifuges.
CMM : Control Measure Machine.
COD : Carbone Organique Dissous.
COV : Composés Organique Volatiles.
DBO : Demande Biologique en Oxygène.
DC : Décapage Chimique.
DCO : Demande Chimique en Oxygène.
EDTA : ÉthylèneDiaminétéTraAcétique
EIE : Étude d'Impact Environnementale.
ER : Évènement Redouté.
ETM : Éléments sous forme de Trace Métallique.
FTA : Fault Tree Analysis.
GE : General Electric.
GT : Gas Turbine.
HSE : Hygiène, Sécurité, Environnement.
HVOF : High Velocity Oxyfuel Flame.
IBC : Intermediate Bulk Container.
INS : Immédiates, Nécessaires, Suffisantes.
IP : Indice Permanganate.
MES : Matières En Suspension.
MRIE : Maîtrise des Risques Industriels et Environnementaux.
MSDS : Materiel Safety Data Sheet.
NBC : National Broadcasting Company.
NDT : Non Destructif Test.
OREDA : Offshore REability Data.
PE : PolyEthylène.
pHi : pH initial.
POA : Procédé d'Oxydation Avancé.
PTFE : PolyTetraFluoroEthylène.
PVC : PolyVinyl Chloride.
TG : Turnines à Gaz.
TIG : Tungsten Insert Gas.
TS : traitement de Surface
UV : Ultra Violet.
WW : Water Washable.

Introduction générale

Introduction générale

Le secteur du traitement de surfaces (TS) utilise dans ses procédés de fabrication des volumes importants d'eau et de produits chimiques, principalement des formulations à base de complexants, dégraissants, décapants, tensio-actifs et/ou de démétallisants. Il est considéré comme l'une des plus polluantes en matière de rejets dans les milieux naturels.

Le principal problème environnemental auquel est confronté le secteur TS est surtout celui de la forte charge polluante des eaux issues de leurs procédés industriels. Ce sont les bains de dépôts et de rinçage qui posent problème car ils donnent naissance à des effluents complexes chargés d'un cocktail d'éléments sous forme de traces métalliques (ETM).

General Electric, utilise des bains de traitement de surface, issu de la station de décapage chimique et de l'NDT, les substances provenant de ces procédés sont connues pour être toxiques pour l'Homme et l'environnement. De ce fait, ALGESCO, centre d'excellence de la maintenance des turbomachines en Algérie, se préoccupant de l'environnement, sous-traite ses déchets liquides et solides à une société d'incinération CINTECH, afin de respecter les normes de rejets industriels selon la réglementation Algérienne. Cependant, le traitement de ces effluents génère des coûts que l'entreprise souhaite réduire, le coût du traitement est de 130 DA/L, ce qui revient à une dépense de 5 070 000 DA par an. Pour toutes ces raisons, l'école nationale polytechnique, à travers son département MRIE, a été sollicité pour trouver une solution qui permettra de réduire ces déchets.

L'objet de ce présent travail est l'établissement des méthodes de traitement et de minimisation des rejets dans un contexte de développement durable appliqué aux ateliers de traitement de surface de l'entreprise ALGESCO.

Pour cela, nous avons subdivisé notre travail en six chapitres :

Le premier chapitre concerne la description de la société Algesco.

Nous abordons dans le 2^{ème} chapitre, une description détaillée des deux procédés, du décapage chimique et de l'NDT.

Dans le troisième chapitre, nous donnons quelques définitions sur les rejets industriels et sur les normes de rejets Algériennes.

Dans le quatrième chapitre, nous abordons l'analyse des risques par la méthode AdD concernant les deux procédés du décapage chimique et de l'NDT.

Le chapitre 5 concerne l'optimisation des déchets liquides, la mise en œuvre de cette optimisation nécessite la connaissance de nombreux paramètres dont le plus important dans notre étude est le rapport de dilution.

Nous citons dans le chapitre 6 les différentes méthodes de traitements des effluents issus des bains de traitement de surface, et les résultats de nos essais de traitement sur les bains de décapage et de NDT.

A la fin, une conclusion générale et perspective.

Chapitre 1. Présentation de la société General Electric

1 Présentation de la société General Electric

1.1 Introduction

General Electric Corporation (GE) a été créée en 1892, elle représente une des plus grandes multinationales dans le monde, ses activités commerciales couvrent un large éventail de domaines :

- La fabrication de moteurs d'avion,
- Les appareils électroménagers,
- Les équipements de santé,
- L'information à travers le réseau de télévision NBC.

GE possède de nombreuses entreprises de recherche et de fabrication dans le monde entier, l'impact que GE a eu sur l'ingénierie a permis de produire 67.000 brevets au fil des ans.

General Electric Company est un groupe diversifié organisé autour des activités suivantes :

- GE Power and Water
- GE Oil and Gas
- GE Energy Management
- GE Aviation
- GE Healthcare
- GE Transportation
- GE Capital
- GE Digital

Par l'intermédiaire de ces activités, GE participe à des marchés qui comprennent la production, le transport et la distribution d'électricité, l'éclairage, l'automatisation industrielle, l'équipement d'imagerie médicale, les moteurs, les locomotives ferroviaires, les moteurs d'avions à réaction et les services d'aviation, elle offre également une gamme de services financiers dans plus de 100 pays (W. Benaissa, 2015).

En Juillet 2017, une opération de fusion des activités de pétrole et de gaz de GE Oil&Gas a eu lieu avec Baker Hughes, troisième acteur mondial dans le secteur du forage et des services de l'industrie pétrolière, GE a acheté 62,5% des actions de Baker Hughes.

La nouvelle entreprise vise à intégrer le numérique au monde physique pour accroître la fiabilité et la disponibilité en se basant sur les techniques de fabrication de pointe et les solutions d'automatisation intelligentes tout en réduisant les risques et en améliorant la productivité des opérations. Dans la fusion citée, GE a gardé pratiquement tous ses principes et ses procédures, par contre, elle a pris comme exigences HSE, celles de BH, reconnu dans le milieu de l'industrie par sa performance en termes de sécurité industrielle.

1.2 ALGerian Engineering Services Company (ALGESCO)

Depuis plus de 40 ans, GE travaille en partenariat avec l'Algérie dans plusieurs domaines, à travers la filiale de GE Oil&Gas, ALGESCO, société mixte de contrôle et de maintenance de droits algérien, détenue par GE (General Electric) à hauteur de 52% et par Sonatrach et Sonelgaz à hauteur de 24% chacune.

L'entreprise est située à Guerouaou - Boufarik - Blida, elle représente l'unité de maintenance la plus grande de GE dans l'Afrique avec un effectif de 217 employés. Les domaines de compétence dans la maintenance sont les réparations des turbines à gaz, à vapeur, les compresseurs centrifuges et alternatifs ainsi que les turbo-expanders. Le centre est équipé des dernières technologies en matière de revêtement, de systèmes de réparation laser et de la technologie d'usinage. Algesco dispose depuis 2016 d'un centre africain de formation (EIE ALGESCO,2008).

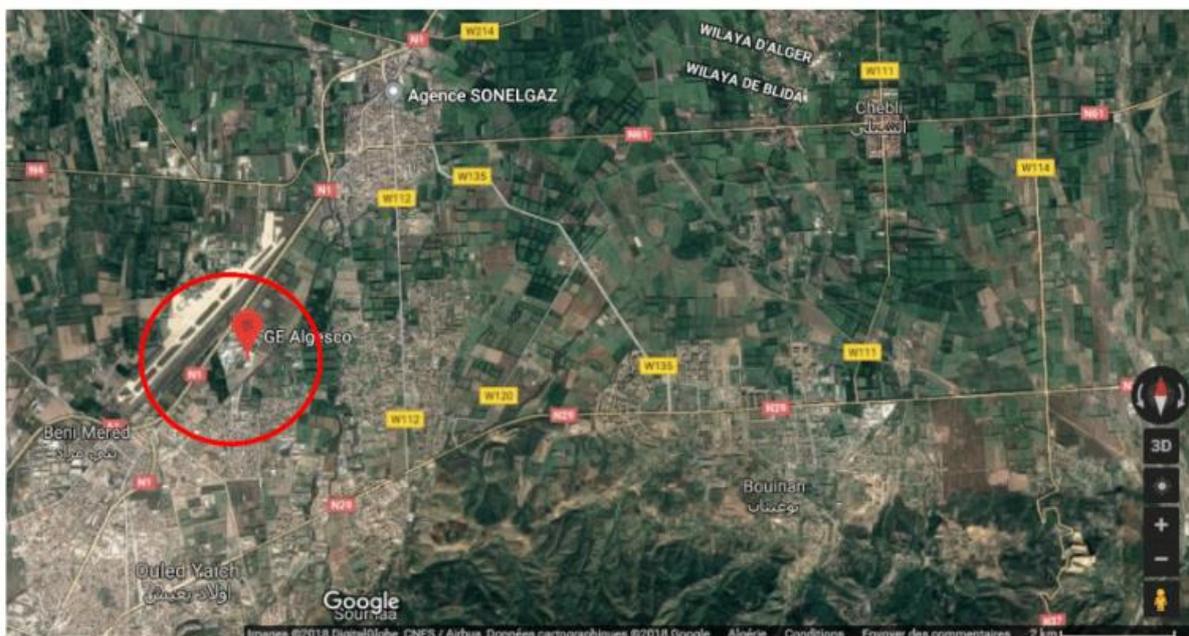


Figure 1.1 Emplacement géographique d'ALGESCO (Google, 2019)

1.3 Activités au sein des différents ateliers ALGESCO

1.3.1 Introduction

Les activités au sein des différents ateliers d'ALGESCO visent à réviser des Turbines Gaz (GT) et des Compresseurs Centrifuges (CC) qui équipent les centrales électriques.

La figure (1.2) donne un prototype des turbines sur lesquelles vont s'effectuer les opérations de maintenance. Elles peuvent atteindre une masse de 40 tonnes pour un encombrement de 110 m³.

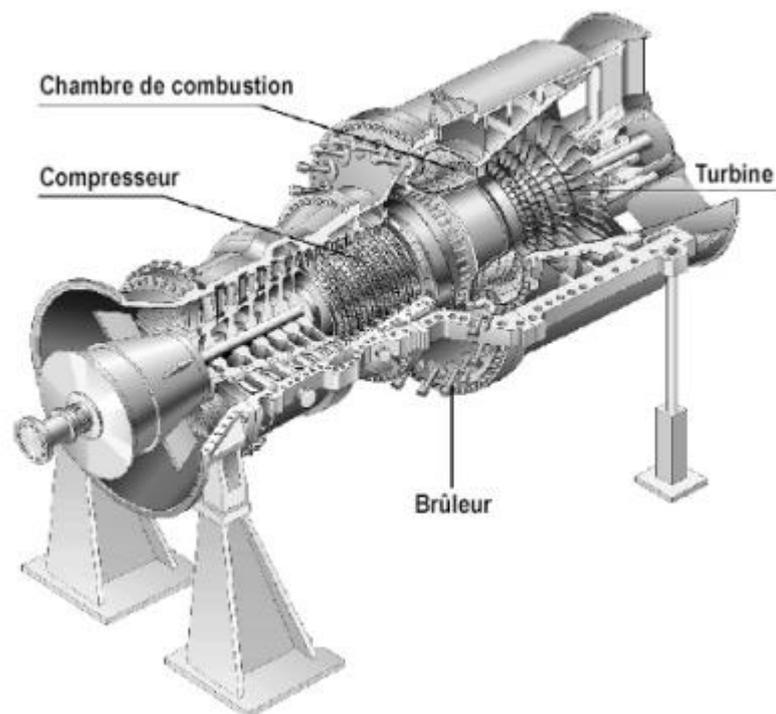


Figure 1.2 Turbine à gaz de centrale électrique (EIE ALGESCO, 2008)

Le procédé de maintenance consiste en une succession d'opérations en chaîne comme le montre la figure suivante (1-3).

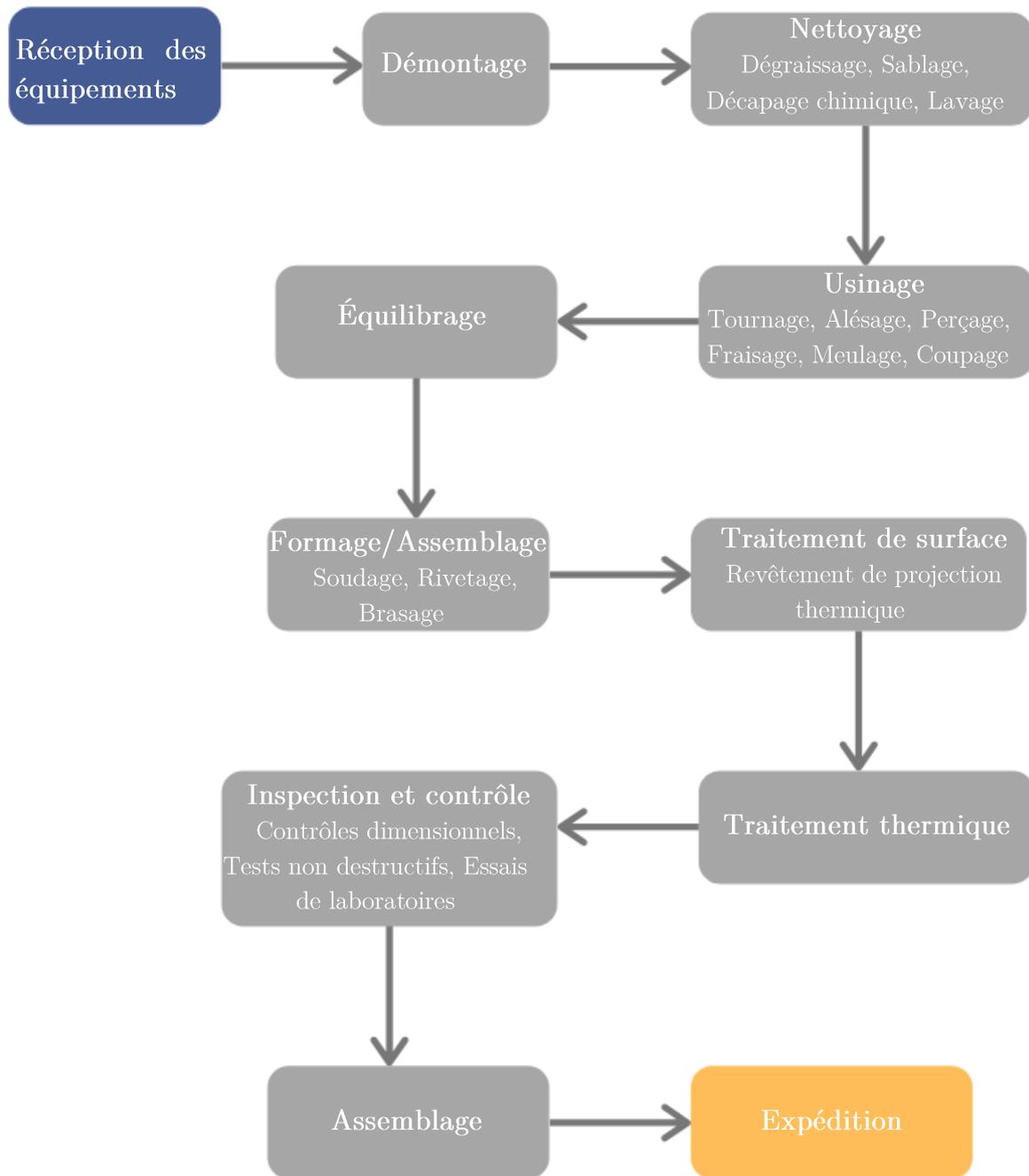


Figure 1.3 Schéma général des étapes du procédé de maintenance des TG et CC (EIE ALGESCO, 2008)

1.3.2 Les différentes étapes de maintenance

Les étapes de la maintenance des équipements électriques ou de compressions sont en général les mêmes étapes de la maintenance électromécanique et se résument comme suit :

Réception des équipements : Les turbines à gaz (GT) et les compresseurs centrifuges (CC) sont réceptionnés à l'aide de ponts roulants et sont entre-déposés dans les ateliers

d'ALGESCO, l'atelier reçoit également les outils, les pièces de rechange, les matériaux et les produits chimiques nécessaires à ses activités.

Démontage : Les GT et CC sont démontés en utilisant les outils spécifiques de fixation, parfois le four atmosphérique est nécessaire notamment pour le démontage des ailettes des rotors.

Nettoyage et sablage : Les composants sont nettoyés par immersion dans des solvants organiques ou minéraux ou par jet, sous pression d'air, de sable ou de corindon. Ces opérations ont lieu dans des cabines spécifiques raccordées à un réservoir de collecte des liquides de nettoyage pour éviter toute décharge dans l'environnement.

Usinage : Les procédés d'usinages utilisés dans l'unité sont le tournage, le fraisage, l'alésage, le perçage, le coupage et le meulage.

Équilibrage : Les pièces usinées sont destinées à équiper des machines tournantes, il est donc impératif d'effectuer des opérations d'équilibrage afin de garantir la stabilité de la machine tournante. Les rotors des GT et des CC sont équilibrés à faible vitesse (<2000 tr/mn), en accord avec la spécification de Général Electric.

Soudage : Les parties chaudes des GT sont soudées à l'aide de machine de soudage à TIG (Tungsten Inert Gas).

Le soudage électrique par résistance (Hot Spot welding) est parfois utilisé si c'est nécessaire.

Enrobage et peinture : L'atelier utilise les huiles protectrices seulement, la peinture n'est pas fréquemment utilisée.

L'enrobage est effectué par un procédé de projection thermique dans lequel un matériau d'apport est fondu ou porté à l'état plastique, grâce à une source de chaleur, puis est projeté à l'aide d'un gaz vecteur sur la surface à revêtir sur laquelle il se solidifie. La matière à déposer, sous forme de poudre, de fil ou de baguette est fondue totalement ou partiellement dans la source de chaleur qui peut être une flamme, un arc électrique ou un plasma. Les procédés HVOF et APS sont utilisés :

- **HVOF** : *High Velocity Oxyfuel Flame* ou projection à la flamme supersonique qui utilise une torche à flamme de géométrie spéciale qui permet à la flamme d'atteindre des vitesses supersoniques. Le matériau à projeter se

présente généralement sous forme de poudre. Il est injecté à l'aide d'un gaz neutre dans la flamme où il est fondu et accéléré à une vitesse de 300 à 600 m/s.

- **APS** : *Arc Plasma Spray*, la source de chaleur utilisée est un plasma thermique créé par l'ionisation partielle d'un gaz plasmagène (argon ou hydrogène). Les particules de poudre sont introduites dans le jet de plasma à l'aide d'un gaz porteur, généralement de l'argon.

L'enrobage par APS ou HVOF est appliqué moyennant un équipement robotique, pour augmenter la résistance thermique à l'usure des composants de la turbine.

Traitement thermique : Le traitement thermique est nécessaire pour quelques composants chauds des GT comme les pièces de transition. Le traitement thermique est assuré par un four sous vide.

Tests Non Destructifs : C'est un contrôle par ressuage (Penetrant Testing). Cette méthode permet de mettre en évidence des discontinuités débouchant sur la surface des pièces usinées. Dans cette méthode, on enduit la pièce à contrôler de pénétrant, par pulvérisation ou par immersion. On lave la pièce pour éliminer le pénétrant qui est déposé en surface sans éliminer celui qui a pénétré dans les éventuels défauts débouchant de la pièce. On sèche la pièce à l'air comprimé, on applique ensuite le révélateur, en poudre, en suspension ou en solution, et enfin on examine la pièce sous éclairage UV dans le cas de pénétrant fluorescent.

Contrôles dimensionnels : Il est réalisé par des machines de mesures digitales (CMM) à une température de chambre contrôlée ou directement dans la station d'assemblage, utilisant des appareillages et des micromètres appropriés (EIE ALGESCO, 2008).

Chapitre 2. Description des process de traitement de surface

2 Description des process de traitement de surface

2.1 Introduction

Après avoir donné une brève présentation de l'entreprise, nous allons présenter dans ce chapitre, les deux stations qui génèrent des déchets liquides, ces stations sont le décapage chimique générant des déchets acides, et la station NDT générant des déchets à base de matière organique et d'eau issue des bains de rinçage, nous allons aussi présenter le fonctionnement de l'incinérateur de la société CINTECH, où s'effectue le traitement contractuel avec ALGESCO et les coûts relevant de cette prestation.

2.2 Description des processus étudiés et les produits utilisés

2.2.1 Décapage chimique

Le décapage chimique est l'une des activités de traitement des pièces des turbines au sein du centre de turbo-machinerie de General Electric. Il implique l'utilisation de plusieurs substances chimiques, dont certaines sont à caractère dangereux.

Le décapage chimique est un procédé ayant pour but l'élimination des anciens revêtements thermiques d'une pièce. Il constitue l'une des premières étapes par lesquelles passe la pièce dans le procédé de maintenance ou de réparation (aubes, ailettes).

L'unité de décapage chimique est divisée en trois locaux :

- 1- Installation de décapage chimique.
- 2- Local de stockage des substances employées dans le processus.
- 3- Local de neutralisation des vapeurs.

2.2.1.1 Description du procès de décapage chimique

Il s'agit d'un stripping chimique sur pale de turbines qui se déroule dans une installation automatique en ligne robotisée. La productivité de l'installation est fonction du temps d'immersion dans la cuve de décapage. La puissance électrique nécessaire pour les équipements de l'installation est de 146.9 kW (ALGESCO O&G, 2010).

Le décapage chimique est un process d'élimination d'anciens revêtements thermiques et des oxydes couvrant la partie inférieure des ailettes des turbines. Ces dernières sont des pièces qui se fixent sur la partie statorique de la turbine et qui servent à comprimer les gaz chauds injectés. Leur revêtement composé de poudre de métaux (Nickel,

Aluminium, Chrome...) et censé résister à la chaleur, finit par s'user et perd de son efficacité avec le temps, d'où la nécessité de le retirer et de procéder à un nouveau revêtement afin de garantir la protection et la longévité de la pièce (ALGESCO O&G, 2010).

L'élimination des revêtements et des oxydes se fait par immersion des pièces dans des bains acides (acide phosphorique et acide fluorocilicique). Le décapage se fait par des réactions électrochimiques ayant lieu sur la surface de la partie immergée, le caractère corrosif de l'acide fragilise les liaisons entre la pièce et le revêtement et décompose ce dernier permettant ainsi de le retirer (ALGESCO O&G, 2010).

La pièce est ensuite introduite dans une cuve d'eau déminéralisée pour le rinçage, puis dans une cuve contenant une solution basique de soude caustique (NaOH), cette étape permet de neutraliser les résidus d'acide subsistant sur la surface de la pièce. Par la suite, la pièce subit un nettoyage par ultrason dans le but d'éliminer les résidus de métaux dans les microfissures de la pièce, là où l'acide n'a pas pu pénétrer (ALGESCO O&G, 2010).

En dernier lieu, la pièce est séchée dans une autre cuve dans laquelle se trouve deux ventilateurs dotés de résistances.

La figure (2.1) décrit les différentes étapes de décapage chimique des ailettes de turbine.

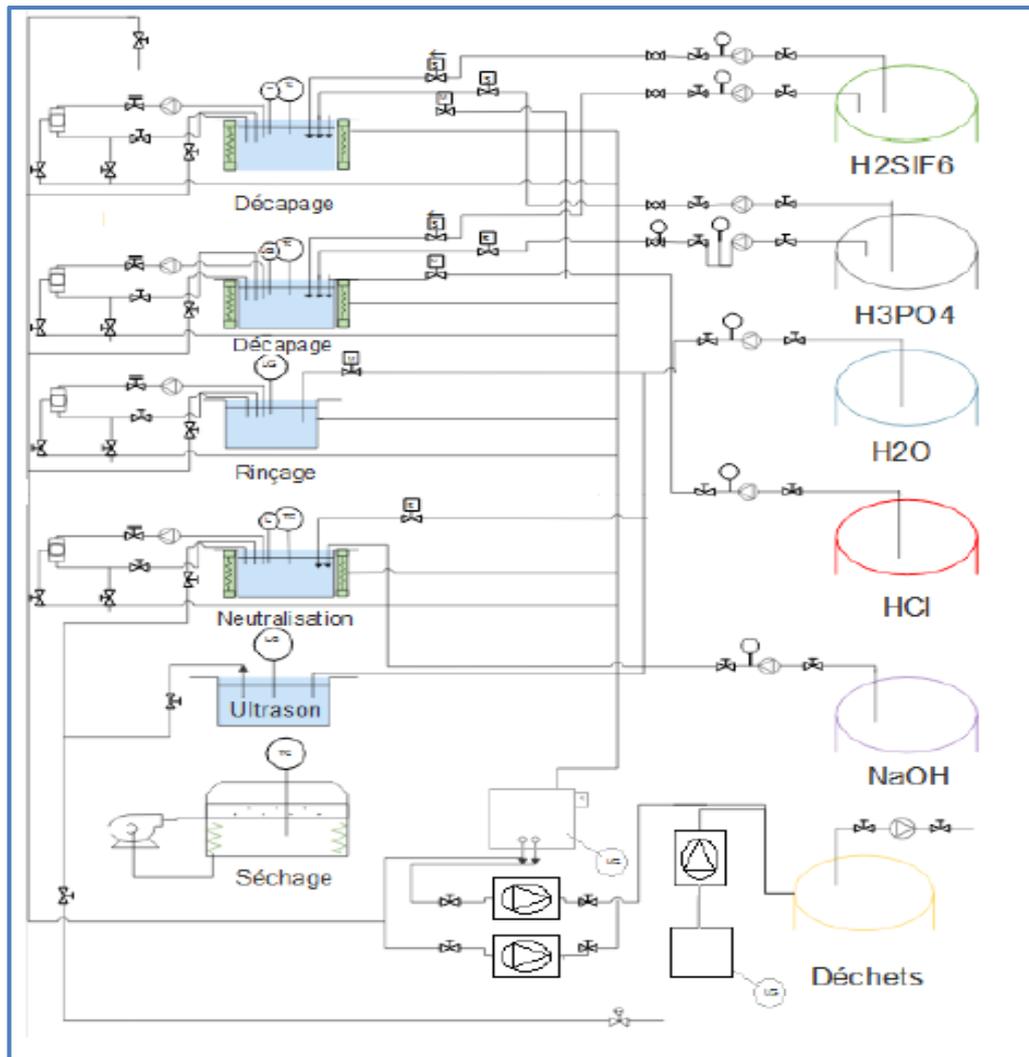


Figure 2.1 Les étapes de décapage chimique des pales de turbine (ALGESCO O&G, 2010)

2.2.1.2 Processus de décapage chimique

Le processus de décapage se fait par commande automatique à l'aide d'un robot sur lequel les pièces seront fixées manuellement. Le robot peut contenir jusqu'à 40 ailettes. Le tout est relié à un ordinateur qui assure le contrôle du robot, le contrôle des cycles, la gestion des accessoires (vérins, couvercles, aspirateurs, pompes...), l'arrêt d'urgence ainsi que l'affichage des données indiquées par les détecteurs (sondes thermiques, détecteurs de niveau, détecteurs de pression...) (ALGESCO O&G, 2010).

Le local de stockage des substances chimiques est situé à côté de la salle de décapage. Il comporte quatre grands bacs de stockage en polyéthylène (PE). Deux bacs contiennent des acides minéraux forts (Acide phosphorique H_3PO_4 (75%) ; Acide fluorosilicique H_2SiF_6 (40%)), un troisième et un quatrième contiennent respectivement la soude caustique

NaOH (50%) et les déchets liquides issus de la neutralisation des vapeurs, des acides usagés et de la soude caustique usagée (en quantité moindre).

La figure (2.2) représente la disposition des bacs dans le local de stockage des produits chimiques.

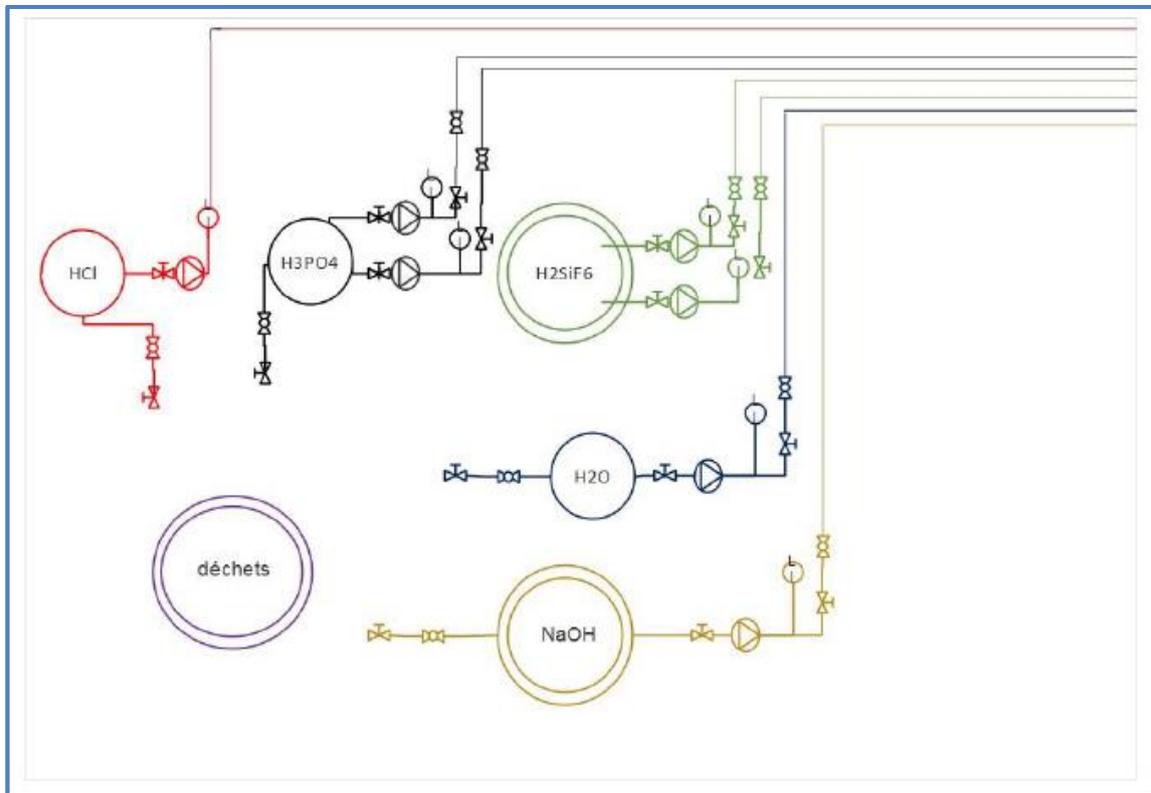


Figure 2.2 Disposition des bacs dans le local de stockage des produits chimiques (ALGESCO O&G, 2010)

Les dimensions des cuves de stockage sont données dans le tableau (2.1) :

Tableau 2.1 Dimensions des cuves de stockage(ALGESCO O&G, 2010)

Produit	Capacité de la cuve (L)	Matériau composant la paroi de la cuve
Acide Fluorosilicique	3000	Polyéthylène
Acide Phosphorique	2060	
Eau déminéralisée	3000	
Soude caustique	3000	
Bains usés	11470	

2.2.1.3 Neutralisation des vapeurs acides

Chaque opération de décapage chimique est précédée par un chauffage des bains acides et basiques. La température du bain varie entre 80° et 90°C. Par conséquent, un dégagement de vapeurs s'en suit. Ces vapeurs très toxiques pour l'homme et corrosives pour les équipements sont aspirées et orientées vers une colonne d'absorption, appelée tour de lavage, cette dernière est située de l'autre côté de la salle d'opération (la salle où s'effectue le décapage chimique) (ALGESCO O&G, 2010).

La tour de lavage schématisée dans la figure (2.3) sert à traiter les vapeurs nocives provenant de la ligne de traitement.

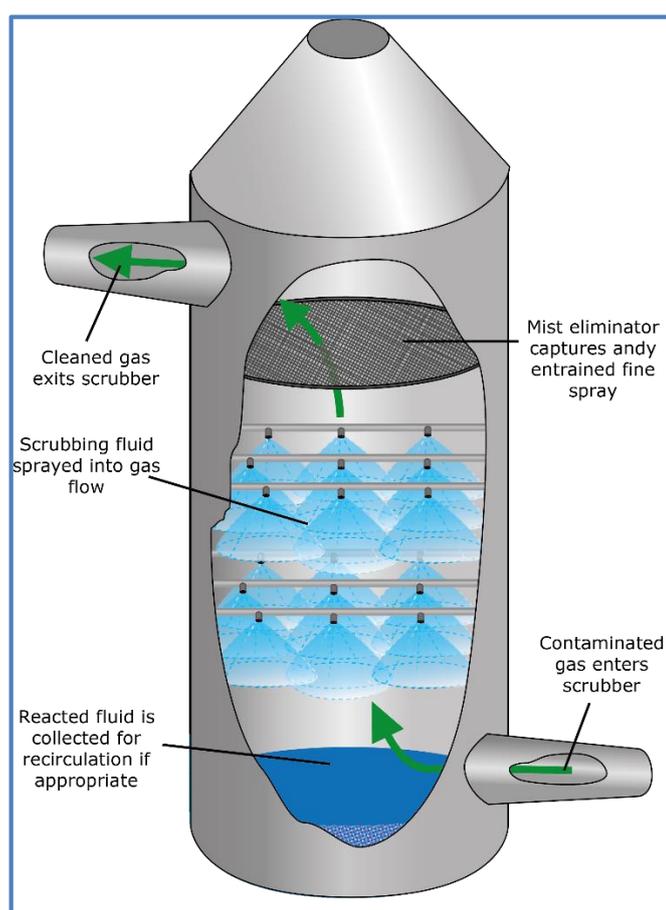


Figure 2.3 Tour de lavage à remplissage statique (The Spray Nozzle People, 2019)

La tour de lavage à remplissage statique est utilisée pour l'absorption sélective des gaz : le gaz entre par le bas, pendant que le liquide de lavage est pulvérisé par le haut au moyen de buses, le gaz remonte naturellement la tour à l'inverse du liquide de lavage qui s'écoule par gravité (on utilise l'eau déminéralisée comme liquide). Les deux fluides rentrent en contact dans le pack de remplissage, favorisant ainsi l'action d'échange liquide/gaz comme le montre la figure (2.3) (ALGESCO O&G, 2010).

2.2.1.4 Produits utilisés dans le décapage chimique

a) Nature des produits de décapage chimique

Le décapage chimique met en jeu des mécanismes complexes, le choix des réactifs est fortement dépendant de la nature du métal à traiter.

Le décapage chimique est basé sur la corrosion généralisée de ce métal, les solutions de décapage sont essentiellement acides et plus particulièrement composées d'acides minéraux forts et peu onéreux.

b) Propriétés physico-chimiques de décapage

Les produits chimiques utilisés dans la station de décapage sont les acides phosphorique et fluorosilicique, ainsi que la soude caustique comme base. Les propriétés de ces produits à pression et à température ambiantes sont résumées dans le tableau (2.2).

Tableau 2.2 Propriétés des produits chimiques utilisés dans la station de décapage (ALGESCO O&G, 2010)

	Acide phosphorique 75%	Acide fluorosilicique 33-42%	Soude caustique 50%
État physique (T=20°C) et (P=1013,25 hPa)	Liquide légèrement visqueux	Liquide	Liquide légèrement visqueux
Aspect/Couleur	Incolore	Incolore à un jaune pâle	Incolore
Odeur	Presque inodore	Piquante	Presque inodore
pH	0	1.2	14
Point/Intervalle d'ébullition	135 °C	105°C	145 °C
Point de congélation/fusion	-20 °C	-15°C	12 °C
Pression de vapeur	Non volatil	32 mbar	<0,1 kPa
Densité	1,57 - 1,59	1,27	1,51 - 1,54
Hydro solubilité	Entièrement soluble	Entièrement soluble	Entièrement soluble
Viscosité	16 cPoise (30°C)	6,5 cPoise (30°C)	cPoise (30°C)

c) Dangers des produits de décapage

La dangerosité des produits chimiques utilisés dans le décapage chimique est résumée dans le tableau (A.1) de l'annexe A.

2.2.2 Non Destructif Test (NDT), ou le contrôle non destructif :

Le contrôle non destructif a pour objectif, comme son nom l'indique, de contrôler l'état des pièces industrielles sans pour autant que les examens correspondants ne puissent nuire à leur utilisation future. Celui-ci correspond à la détection et à la caractérisation des différents défauts et imperfections qui menacent la sécurité de fonctionnement des systèmes soumis à des contraintes mécaniques, thermiques ou chimiques.

La qualité est devenue une nécessité vitale pour les entreprises confrontées à la concurrence internationale et à une clientèle exigeante. Cette étape du processus industriel est destinée à garantir la sécurité d'utilisation des pièces contrôlées. Elle joue un rôle économique non négligeable, dans le sens où elle permet une gestion optimisée de la maintenance (B. Ramdane, 2009).

Cette procédure de contrôle se produit souvent soit en cours de fabrication ou au cours de la vie d'une pièce.

Le procédé de l'NDT utilise comme produit de détection des défauts et imperfections, le ZYGLO comme Pénétrant Fluorescent. Ce procédé fonctionne efficacement dans une variété de matériaux poreux et non poreux à base d'aluminium, de magnésium, de laiton, de cuivre, de titane, de bronze, d'acier inoxydable, de carbure fritté, d'alliages non magnétiques, de céramiques, de plastique et de verre.

2.2.2.1 Principe de fonctionnement

Le principe résulte du phénomène de capillarité dont une application est la loi de Jurin qui précise les conditions de remontée d'un liquide dans un tube. Lorsqu'on plonge un tube de verre de faible diamètre intérieur (tube capillaire) dans une cuve large contenant un liquide mouillant, on constate, comme est indiqué sur la figure (2.4), que le liquide s'élève dans le tube au-dessus du niveau intérieur à la cuve (A. Tlili, S. Marzouki, M. Saidi, M. Karoui, 2006).

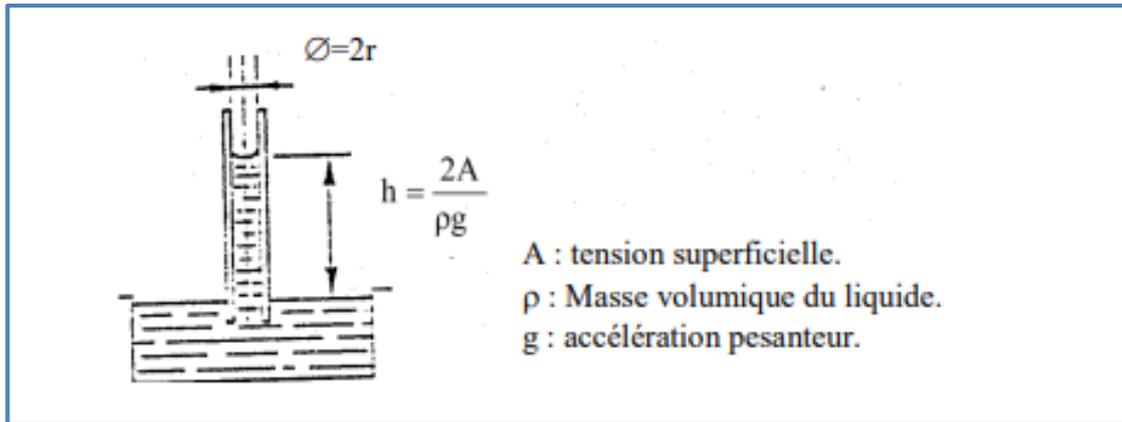


Figure 2.4 Principe de fonctionnement du phénomène de capillarité

2.2.2.2 Les étapes de l'NDT

En général, les étapes du procédé NDT sont :

- **Étape 1** : pré-nettoyage des pièces
- **Étape 2** : **Application du pénétrant** : Une fois que les pièces sont propres et sèches, le ZYGLO pénétrant est appliqué par immersion. Un temps de séjour du pénétrant de 10 à 30 min est nécessaire pour assurer une couverture complète de la zone à inspecter,
- **Étape 3** : **Enlever le pénétrant** : Il existe quatre méthodes primaires pour enlever ou nettoyer la surface. ALGESCO utilise la méthode WW (Water Washable), cette méthode utilise l'eau comme agent de lavage afin d'éliminer l'émulsifiant. Le lavage est généralement utilisé par pulvérisation, il s'agit du rinçage par aspersion, avec une température de l'eau de 10 à 30°C.
- **Étape 4** : **Séchage des pièces** : Le séchage se fait dans un séchoir à air chaud en circulation dont la température des pièces n'excède pas les 70°C. Les pièces sont prélevées du séchoir dès qu'il n'y a plus d'humidité en surface.
- **Étape 5** : **Inspection** : la détection des défauts des pièces est réalisée dans une chambre noire sous l'action des rayons UV.

2.2.2.3 Les produits utilisés

a) La composition

Le pénétrant ZYGLO est composé de 4 composants organiques avec différentes proportions indiquées dans le tableau (2.3) :

Tableau 2.3 composition chimique du pénétrant ZYGLO (MSDS ZYGLO Penetrant, 2015)

Composant	Alcools, C6-10, Ethoxyl	Alcools, C12-15, Ethoxyl	Phosphate Tri-butoxyethyl	Alcool Secondaire Ethoxylate
Pourcentage %	15-40	0-30	10-30	0-20

b) Propriétés physico-chimique

Les propriétés de ZYGLO à pression et température ambiantes sont résumées dans le tableau (2.4) :

Tableau 2.4 propriétés physico-chimiques du pénétrant ZYGLO (MSDS ZYGLO Penetrant, 2015)

Propriété physico-chimique	Valeur
État physique	Liquide huileux vert
Point d'ébullition	235°C
Point d'éclair	93°C
Limites d'inflammabilité dans l'air	1 à 6%
Composition en COV	356 g/L
Densité	0.92
Solubilité dans l'eau	0 (Émulsionne dans l'eau)
Ph	Neutre
Pression de vapeur 21 deg C	<0.1 mm Hg
Densité de vapeur	Plus lourd que l'air
Taux d'évaporation	Négligeable
Odeur	Douce

c) Dangerosité des produits utilisés

- Peut irriter en éliminant les huiles de peau naturelles lors d'expositions longues ou répétées.

- Lorsqu'elles sont chauffées ou vaporisées, les vapeurs peuvent causer des étourdissements ou des nausées.
- Cancérogénicité : Ne contient aucun cancérogène connu ou soupçonné (MSDS ZYGLO Penetrant, 2015).

2.3 Les espèces et les polluants

Les stations de l'NDT et du décapage chimique sont consommatrices de grandes quantités de réactifs (acides, bases et produits organiques) souvent toxiques pour l'homme et le milieu naturel. Ces réactifs donnent naissance à une quantité importante de déchets à caractère complexe et dangereux (un volume autour de 39 m³ par an), qui donnera lieu à une pollution industrielle toxique, sous forme liquide en cas de déversement dans le milieu naturel.

2.3.1 Provenance des polluants

Les polluants proviennent des bains des deux stations :

- **Décapage chimique**
 - Les bains d'acide : en raison de l'échauffement et des applications de traitement répétées, l'acide s'use et devient moins performant, de plus, il se charge avec des métaux lourds provenant d'anciens revêtements des pièces, de sable, de la rouille..., ce qui donne lieu à un mélange complexe à caractère acide.
 - Les bains de rinçage : l'eau devient riche en acide « une eau acidifiée ».
- **NDT :**
 - Le bain d'immersion des pièces à inspecter qui contient le ZYGLO perd son efficacité au cours du temps et devient un polluant organique toxique.
 - Bain de rinçage : l'eau de rinçage se mélange avec le pénétrant ZYGLO et donne naissance à une eau polluée de même caractéristique et de même composition que le ZYGLO.

2.3.2 Nature des polluants

Les différents polluants sont de natures très diverses suivant le procédé de maintenance que la pièce subit. Chaque procédé est composé de plusieurs bains, chaque bain possède sa propre composition, les bains de décapage peuvent être composés de solvants ou d'acides, la composition du bain de l'NDT contient de la matière organique,

les deux stations de décapage ainsi que l'NDT contiennent des résidus des pièces (anciens revêtements, huile, rouille...)

Le tableau (2.5) nous montre bien que la nature des espèces chimiques est très diverse et que leurs associations forment des solutions complexes.

Tableau 2.5 Nature des polluants

Procédé	Nature des polluants Potentiels	Commentaires
Décapage	Acidité ou alcalinité Métaux lourds Fluorures Phosphore	Bains généralement fortement acides, ils se chargent de métaux lourds provenant des pièces traitées.
NDT	Composants organiques Métaux lourds	Bains riches en matière organique, ils se chargent en résidus provenant des pièces à inspecter : sables, huiles, métaux lourds.

2.4 État actuel de traitement des déchets liquides

Deux modes de traitement des déchets et des effluents peuvent être choisis :

- **En externe** : Dans le cas où le traitement est effectué à l'extérieur de l'entreprise. Le producteur de déchet fait appel à une entreprise spécialisée.
- **En interne** : Dans le cas où le traitement est effectué directement sur le site de production du déchet.

ALGESCO sous-traite l'opération de traitement des déchets liquide à une entreprise extérieure CINTECH, une société d'incinération agréée par le ministère de l'environnement, spécialisée dans la collecte, transport et traitement des déchets spéciaux dangereux (produits chimiques, déchets d'activité de soin et médicaments périmés).

2.4.1 Technique d'incinération

L'incinérateur rotatif utilisé par la société contractuelle CINTECH élimine les différents déchets industriels de l'entreprise ALGESCO.

Un mouvement de rotation continu de la chambre primaire de combustion permet d'homogénéiser le déchet afin d'en assurer une parfaite combustion.

Le traitement de tous les déchets par incinération à haute température (1000 à 1200°C) permet la destruction complète de déchets industriels tels que les boues, les solvants, les produits chimiques, les réactifs de laboratoire, la peinture, l'encre, la résine, les médicaments périmés, les pesticides, les huiles... (CINTECH, 2013).

Les différents types des déchets sont introduits dans l'incinérateur par deux systèmes différents selon la nature des déchets :

2.4.1.1 Déchets solides

Les déchets solides sont préparés dans des bacs normalisés codifiés sous condition de compatibilité des produits :

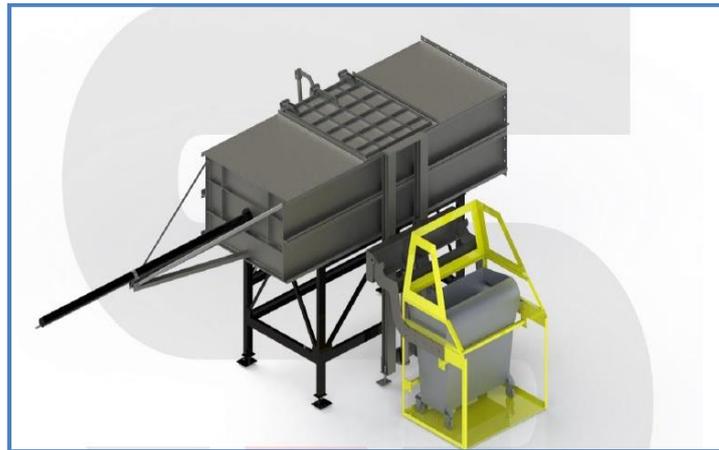


Figure 2.5 Bac des déchets solides (CINTECH, 2013)

Une fois les déchets sont mis en bac, une ligne de chargement automatique introduit les déchets dans le four.

2.4.1.2 Les déchets liquides

Les déchets sous forme liquide tel que les solvants, les réactifs, les huiles, les mélanges des hydrocarbures, sont préparés dans des réservoirs de 2000 Litres et sont séparés selon la nature des déchets et leurs pouvoir calorifique. Chaque déchet liquide est pulvérisé dans l'incinérateur par un atomiseur. Il existe deux types d'injecteurs :

- À haut pouvoir calorifique des déchets liquides (HPC > 8.000 kcal/kg),
- A moyen pouvoir calorifique des déchets liquides (MPC de 1,000 à 8,000 kcal/kg).

La pulvérisation se fait par l'air comprimé (CINTECH, 2013).

2.4.2 Procédé de traitement des fumées

Les fumées à la sortie des incinérateurs sont à une température très élevée entre 1000 et 1200°C. Pour les traiter ils doivent être refroidis par un échangeur de chaleur. À la sortie de l'échangeur de chaleur, les gaz sont à une température comprise entre 190°C et 210°C et contiennent des polluants composés de poussières, HCl, SO₂, HF, métaux lourds, dioxines et furanes.

Le principe d'épuration des fumées consiste à injecter deux produits neutralisants qui se composent de la chaux vive pour neutraliser les acides tels que HCl, SO₂ et HF et du charbon actif pour les dioxines, les furanes et les métaux lourds.

Ces produits neutralisants qui sont stockés dans deux trémies séparées, sont injectés dans deux réacteurs qui effectuent un mélange gaz/neutralisant afin de purifier ces polluants.

Le mécanisme réactionnel de captage des polluants par la chaux Ca(OH)₂ repose sur les réactions suivantes :

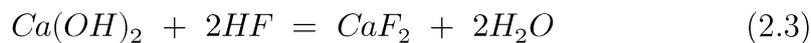


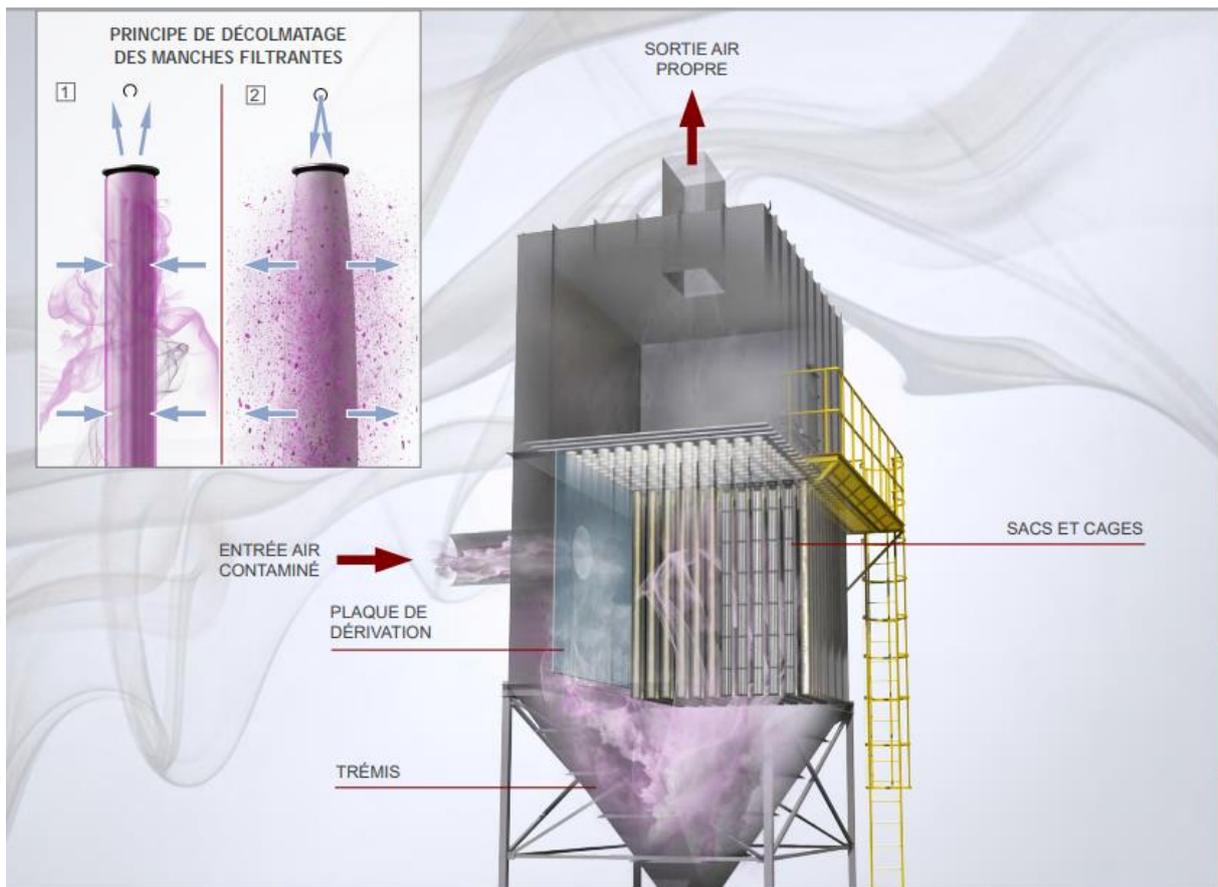
Figure 2.6 Réacteur de neutralisation (CINTECH, 2013)

Les principales particules polluantes sont captées sous forme de cendre, ensuite sont stabilisées par du ciment. Le courant gazeux est aspiré uniformément sur les éléments de

filtration. Le traitement des dioxines, furanes, COV et le mercure se fait par adsorption du charbon actif (CINTECH, 2013).

2.4.3 Traitement des poussières par filtre à PTFE

Le filtre à manche PTFE (polytétrafluoroéthylène) est l'unité qui permet d'éliminer les particules en suspension provenant du processus de combustion schématisé dans la figure (2.7). En cas de colmatage, les filtres sont auto-nettoyés par le mécanisme Jet Pulse. Le PTFE est un matériau de sac filtrant prêt à l'emploi pouvant supporter des températures supérieures à 250°C (CINTECH, 2013).



- 1 L'air vicié est filtré et forme un gâteau de poussière à la surface externe de la manche.
- 2 Le jet d'air pulsé provoque une expansion de la manche éjectant ainsi le gâteau de poussière accumulé vers la trémie.

Figure 2.7 Filtre à manche PTFE (AIREX industries, 2014)

2.4.4 Valeurs des émissions atmosphériques

Pour que les déchets liquides d'ALGESCO n'aient aucun impact sur l'environnement, les valeurs des émissions atmosphériques générés par ces déchets doivent être en-dessous des valeurs limites.

Nous avons pu avoir quelques données concernant les émissions atmosphériques au niveau de l'incinérateur, ces valeurs sont en dessous des valeurs limites autorisées par la réglementation Algérienne.

Tableau 2.6 Valeurs d'émission atmosphériques (CINTECH, 2013)

	Valeurs générées par ALGESCO	Valeurs limites des émissions atmosphériques
Température des gaz à la sortie du filtre	19,4°C	150°C.
Teneur en monoxyde de carbone	0	≤ 50 mgr/Nm ³ .
Teneur en poussière totale	--	≤ 10 mgr/Nm ³ .
Teneur en HCl	--	≤ 10 mgr./Nm ³ .
Teneur en HF	--	≤ 1 mgr/Nm ³ .
Teneur en SO ₂	0	≤ 50 mgr/Nm ³
Teneur en Dioxine + Furanes	--	≤ 0,1 mgr/Nm ³
Teneur en COV	--	≤ 10 mgr/Nm ³
Teneur en cadmium	--	≤ 0,05 mgr/Nm ³
Teneur en mercure	--	≤ 0,05 mgr/Nm ³
Teneur en autres métaux lourds	--	≤ 0,5 mgr/Nm ³
Teneur en NO _x	0	≤ 200 mgr/Nm ³

Un capteur est placé à la sortie des fumées pour indiquer les valeurs des polluants contenant dans la fumée libérée dans l'atmosphères

On observe clairement que les valeurs obtenues sont inférieures aux valeurs limites, toutefois, quelques paramètres exigés par la réglementation algérienne ne sont pas calculés et donc, nous ignorons leurs quantités dégagées par l'incinérateur, on ne peut donc pas savoir si les valeurs de ces paramètres sont inférieures ou pas des valeurs limites imposées par la réglementation, par conséquent on ne peut conclure sur l'impact des déchets d'ALGESCO sur l'environnement.

2.5 Conclusion

Le coût du traitement des déchets est de 130 DA/ litre, sachant que la quantité des déchets liquides générés par ALGESCO est de 39 m³/an, soit 39 000 Litres/an, le résultat des coûts est de 5 070 000 DA/an. Comme toute entreprise, ALGESCO cherche à minimiser les coûts du traitement, pour se faire, il faut tout d'abord minimiser les déchets générés en intégrant des modifications au niveau du procédé afin de les (déchet)

optimiser, ensuite, mettre en place un système de traitement propre à l'entreprise, et cela lui permettra de réduire les dépenses dues au coût du traitement.

Étant donné la haute technologie employée dans le procédé du décapage chimique et sa confidentialité, nous ne pourrions pas procéder à l'optimisation de ses déchets à cause des informations récoltées jugées insuffisantes, nous nous sommes donc limités à l'optimisation de la station NDT, qui est nettement plus simple à mettre en œuvre.

Dans ce présent mémoire, nous allons présenter les méthodes qui permettront d'optimiser les déchets de l'NDT ainsi que les traitements appropriés à chaque type de déchet liquide, à savoir : les acides et le bain du ZYGLO, mais avant de commencer ce travail, nous allons faire une analyse de risque liée aux produits et aux déchets liquides dans le but d'établir des barrières contre toute éventuelle fuite qui pourra nuire à l'Homme et à l'environnement.

Chapitre 3. Généralités sur les rejets industriels

3 Généralités sur les rejets industriels

3.1 Introduction

Afin de mieux cerner notre problématique, nous allons donner les définitions qui permettent de montrer l'étendue des problèmes à l'activité de traitement de surface en terme d'effluents toxiques, et d'autre part de faire le point sur les différents textes réglementaires auxquels sont soumises ces activités.

3.2 Notions sur les rejets industriels

3.2.1 Les différents types d'eaux

On distingue généralement plusieurs types d'eaux :

- Les eaux pluviales ou eaux de ruissellement ;
- Les eaux domestiques ou eaux ménagères ;
- Les eaux agricoles ;
- Et les eaux industrielles.

Parmi la famille des eaux industrielles, on trouve les eaux de refroidissement, les eaux de lavage, et les eaux de fabrication ou de procédé (B. Sancey, 2011).

La réglementation actuelle en matière de rejet d'eaux usées a incité puis contraint les industriels à traiter leurs effluents. Le traitement des eaux usées est ainsi progressivement devenu une obligation pour de nombreuses industries.

Contrairement aux autres types d'eaux, les eaux usées industrielles sont difficiles à traiter car elles sont de nature et de composition extrêmement variables. En général, ce sont les eaux de fabrications qui sont à l'origine des difficultés les plus importantes. En effet, certaines eaux usées (bains de traitement de surface, eaux de cokerie...) posent de sérieux problèmes de dépollution, alors que d'autres comme ceux des secteurs agro-alimentaires (laiterie, sucrerie...) sont, certes fortement chargés, mais facilement biodégradables et donc valorisables (B. Sancey, 2011).

Les substances chimiques présentes dans les rejets peuvent se retrouver dans le milieu aquatique sous plusieurs formes :

- Dissoutes dans l'eau ;
- Adsorbées sur les matières en suspension (MES) ;

- Adsorbées sur les sédiments ;
- Accumulées dans les tissus des organismes (animaux ou végétaux).

La majorité des rejets sont des mélanges très complexes, constitués à la fois de pollutions particulaire et dissoute, et dont la composition varie selon leur provenance (B. Sancey, 2011).

L'évaluation de la pollution peut être basée sur des classifications selon les propriétés globales de l'effluent. La classification la plus évidente est de répertorier les composés présents dans l'eau en fonction de leur taille. En effet, les eaux à traiter contiennent de nombreux composés qui forment quatre grandes catégories :

- 1) Les matières en suspension ou MES ;
- 2) Les matières colloïdales et/ou supra-colloïdales ;
- 3) Les matières dissoutes ou solubles ;
- 4) Les matières non-miscibles.

Une autre classification est fondée sur la capacité des substances à être dégradées.

On distingue deux classes principales :

- i) Les matières biodégradables et
- ii) Les matières non biodégradables. (B. SANCEY,2011).

3.2.2 Définition des rejets : déchets et effluents

Tout ce qui sort d'une opération industrielle excluant les produits finis et avant traitement ou valorisation est défini par le terme de rejet. La figure (3.1) représente l'ensemble des flux associés à une unité fonctionnelle illustre la notion de rejet qui peut être liquide, solide ou gazeux (V. Laforest, 1999).

La notion de déchet est très différente suivant l'approche que l'on adopte (réglementaire, environnementale, économique ou fonctionnelle) (V. Laforest, 1999).

Nous considérerons, dans notre approche générale du déchet, l'approche réglementaire qui définit le déchet comme « tout résidu d'un processus de production, de transformation ou d'utilisation » (V. Laforest, 1999). Une distinction toute particulière est faite concernant les rejets liquides et gazeux que l'on définit comme effluent lorsqu'ils sont plus ou moins pollués en sortie du process industriel et avant traitement ou valorisation (V. Laforest, 1999).

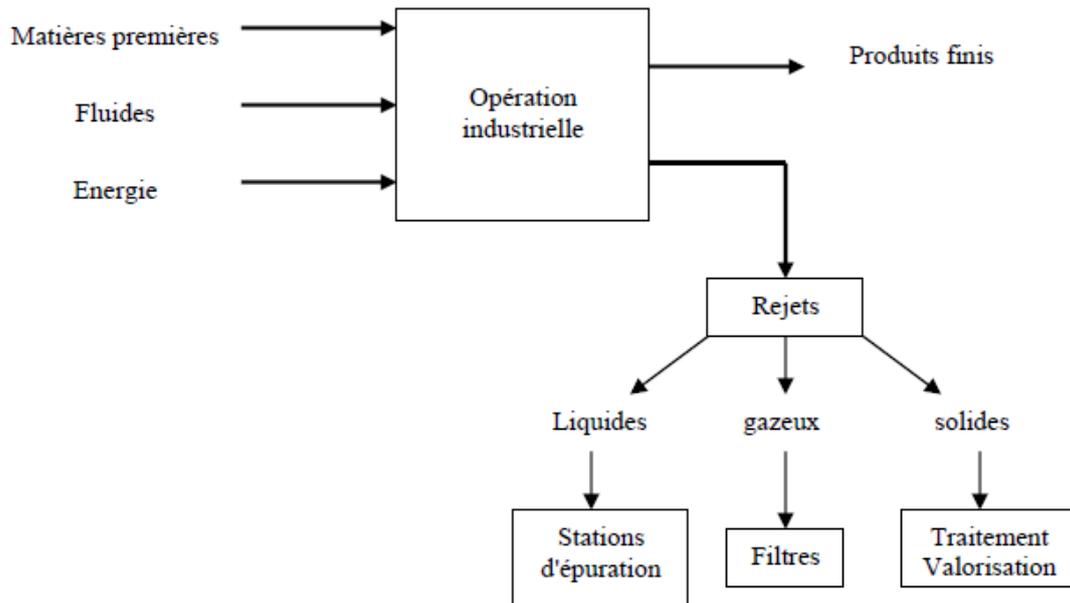


Figure 3.1 Place des rejets dans un système de production (Navaro, 1988)

3.2.3 Déchets et effluents dans le cadre des travaux de maintenance

En général, un atelier de maintenance des turbomachines est composé de chaînes de production et d'une ou plusieurs installations de traitement des eaux usées. Cette composition entraîne différents types de rejets qui nous ont amené à différencier la notion de déchet de la notion d'effluent.

Les rejets de l'atelier sont donc définis ainsi :

- Les rejets liquides et gazeux traités ou non en sortie d'atelier et rejetés dans le milieu naturel sont appelés effluents.
- Les rejets solides ou liquides, non rejetés dans le milieu naturel mais envoyés soit en centre de traitement agréé, sont désignés comme déchets liquides ou solides (V. Laforest, 1999).

3.3 Limites et normes de rejets suivant la réglementation

Algérienne

3.3.1 Rejets liquides

Le décret 06-141 du 19 avril 2006 définit les valeurs limites des rejets d'effluents liquides industriels. Les limites des rejets sont établies et consignées dans le tableau (3.1).

Tableau 3.1 Valeurs limites des rejets liquides

N°	Paramètres	Valeurs limites (mg/L)
1	Température (°C)	30
2	pH (sans unité)	6,5-8,5
3	MES	35
4	Azote Kjeldahl	30
5	Phosphore total	10
6	DCO	120
7	DBO5	35
8	Aluminium	3
9	Substances toxiques biaccumulables	0,005
10	Cyanures	0,1
11	Fluor et composés	15
12	Indices de phénols	0,3
13	Hydrocarbures totaux	10
14	Huiles et graisses	20
15	Cadmium	0,2
16	Cuivre total	0,5
17	Mercure total	0,01
18	Plomb total	0,5
19	Chrome total	0,5
20	Étain total	2
21	Manganèse	1
22	Nickel total	0,5
23	Zinc total	3
24	Fer total	3
25	Composés organiques chlorés	5

3.3.2 Élimination et contrôle des déchets

La loi -0119 du 12 décembre 2001 est relative à la gestion, au contrôle et l'élimination des déchets. Dans son article 1, l'objectif de cette loi est de fixer les modalités de gestion, de contrôle et de traitement des déchets en général. Dans le second article, sont définis les principes de cette gestion à savoir :

- Prévention et réduction des déchets à la source ;
- Le tri à la collecte ;
- La valorisation et le recyclage ;
- Le traitement écologique et rationnel ;
- L'information et la sensibilisation des citoyens sur les risques des déchets.

Dans l'article 5 de la présente loi, les déchets sont classifiés comme suit :

- Déchets spéciaux y compris les déchets spéciaux dangereux ;
- Déchets ménagers et assimilés ;
- Déchets inertes.

Pour la gestion des déchets spéciaux, il est institué un plan national de gestion des déchets spéciaux (article 12). Les générateurs et/ou les détenteurs des déchets spéciaux sont alors tenus d'assurer ou de faire assurer, à leur charge, la gestion de leurs déchets (article 16). Le transport des déchets spéciaux est soumis à autorisation du ministère chargé de l'environnement après avis du ministère chargé des transports (article 24).

3.4 Conclusion

Ce chapitre nous a permis conclure que le traitement de surface est une activité polluante, dont les effluents générés sont souvent toxiques pour l'homme et pour l'environnement. Ils sont par conséquent, soumis aux textes réglementaires.

Deux objectifs vont être traités dans les chapitres à venir, à savoir :

- Réduction des rejets en eau.
- Traitement des effluents générés.

Chapitre 4. Analyse des risques liés aux produits et aux effluents aqueux

4 Analyse des risques liés aux produits et aux effluents aqueux

4.1 Introduction

Nous allons en premier lieu réaliser une analyse des risques liée aux produits et déchets dangereux. Cette analyse nous permet de suivre ces produits de l'état initial à l'état final (déchet), de limiter au maximum toute fuite qui est dans notre cas, l'évènement redouté central qui pourra impacter négativement sur l'environnement.

Dans cette partie nous nous sommes intéressés aux risques liés aux produits chimiques utilisés dans les stations de décapage chimique et de NDT. Nous allons mettre en évidence les scénarios qui mèneront à une fuite de ces produits en utilisant la méthode Arbre De Défaillance (AdD).

Les résultats de l'AdD vont nous permettre d'évaluer la criticité de la fuite et par la suite de vérifier les barrières existantes et d'en ajouter si ces dernières sont insuffisantes. Ces barrières limiteront l'impact engendré par le déversement de ces produits.

4.2 Présentation de la méthode appliquée AdD

L'arbre des défaillances ou autrement appelé « arbre des causes » est une méthode d'analyse de type déductif. Elle permet d'aller d'un évènement redouté vers les causes élémentaires qui sont à l'origine de ce dernier en passant par les évènements intermédiaires. Cet enchainement d'évènements est schématisé sous forme arborescente dont les éléments sont connectés entre eux par des portes logiques. (A. VILLEMEUR, 2001)

Les évènements élémentaires ou « éléments de base » doivent respecter les points suivants :

- Être indépendants les uns des autres ;
- Ne peuvent pas être décomposés en éléments plus simples ;
- Leur probabilité d'occurrence peut être estimée.

4.2.1 Historique de la méthode

L'analyse par arbre des défaillances fut historiquement la première méthode mise au point en vue de procéder à un examen systématique des risques. Elle a été élaborée au début des années 1960 par la compagnie américaine Bell Téléphone et fut expérimentée pour l'évaluation de la sécurité des systèmes de tir de missiles (salvi O. and E.,2003),

puis adoptée dans les autres domaines tel que : nucléaire, chimique, industrie automobile, etc. (Barbiroli, 1990).

4.2.2 Concepts de base

L'analyse par AdD est une méthode de type déductif qui est utilisée pour l'analyse prévisionnelle des défaillances de systèmes physiques et aussi pour l'analyse de risque. Elle utilise une symbolique graphique particulière qui permet de présenter les résultats dans une structure arborescente. (SUPERIEUR, 2008)

Cette méthode a pour objectif, à partir d'un Événement Redouté (Indésirable), défini a priori (appelé aussi Événement-sommet, car il est placé au plus haut niveau de l'AdD, racine de l'arbre), de déterminer les combinaisons d'évènements pouvant finalement conduire à cet Événement. Cette analyse permet de remonter de causes en causes jusqu'aux évènements de base susceptibles d'être à l'origine de l'Événement Redouté. Les évènements de base sont indépendants, et ne seront pas décomposés en éléments plus simples faute de manque de renseignement ou bien parce que cela est impossible.

Les liens entre les différents évènements identifiés sont réalisés grâce à des portes logiques standards telles que ET, OU, SI (porte conditionnelle). Aussi de nombreux symboles sont utilisés dans la méthode. Par exemple, les évènements sont représentés par un rectangle, un cercle ou un losange (Fig. 4.1) (Fig. 4.2).

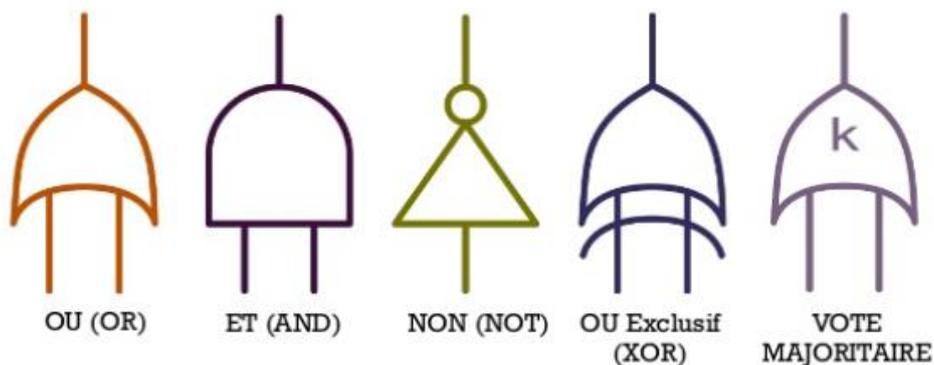


Figure 4.1 Symboles des portes utilisés par la représentation graphique des événements de l'AdD (I. El Hassani, 2015)

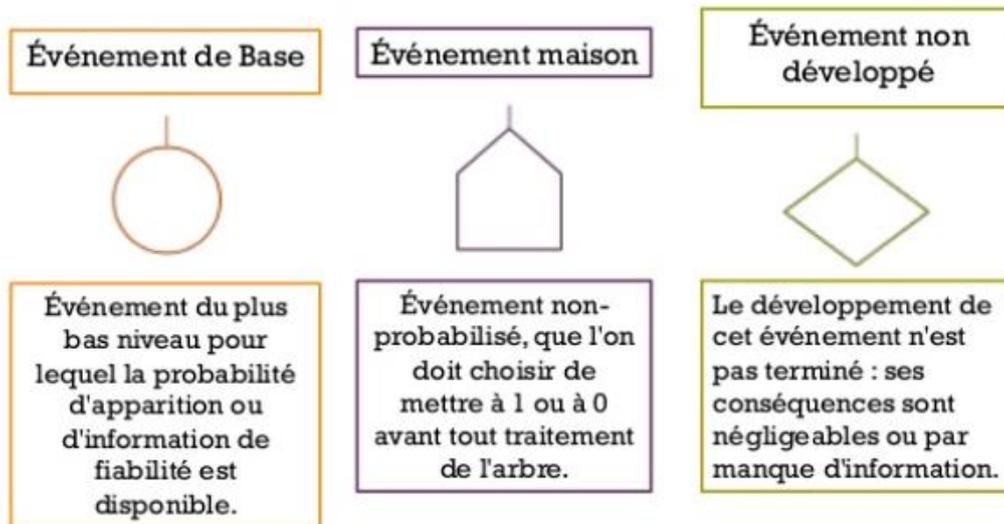


Figure 4.2 Symboles des événements dans les AdD (I. El Hassani, 2015)

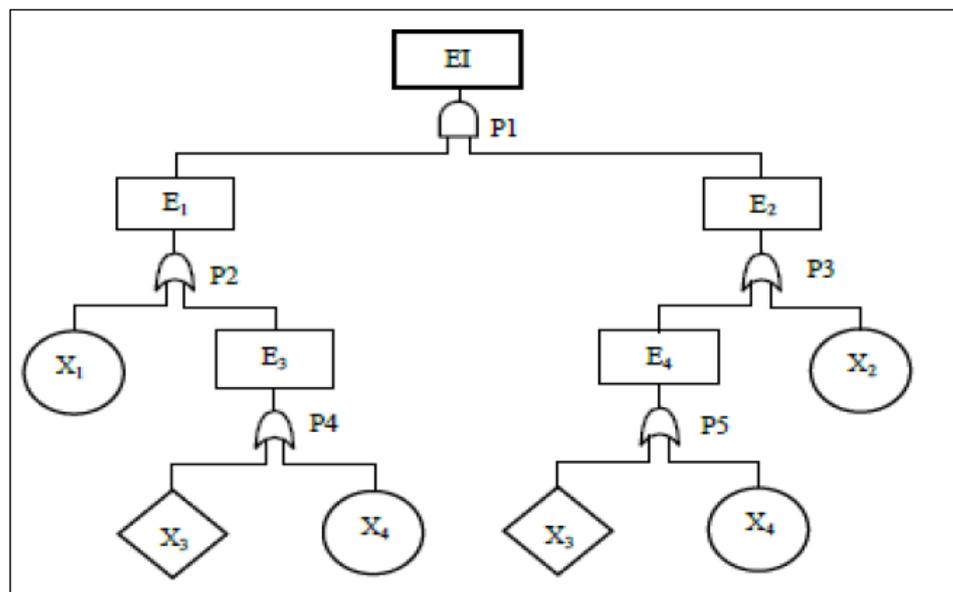


Figure 4.3 Exemple d'un AdD (Salvi,2003)

À titre illustratif, la figure (4.3) montre un exemple d'AdD. C'est un AdD simple. La description des éléments dans l'AdD de la figure ci-dessus est la suivante :

- L'événement-sommet : EI (le rectangle étant utilisé pour l'événement-sommet et les événements intermédiaires, nous faisons une différence en dessinant le premier avec un trait plus épais) ;
- Les événements intermédiaires : E₁, E₂, E₃, E₄ ;
- Les événements de base élémentaires : X₁, X₂, X₄ ;
- L'événement non développé : X₃
- P₁ : Porte ET ;

- P2, P3, P4, P5 : Portes OU.

La démarche de réalisation de l'arbre des défaillances est résumée dans la figure (4.4) (Salvi,2003).

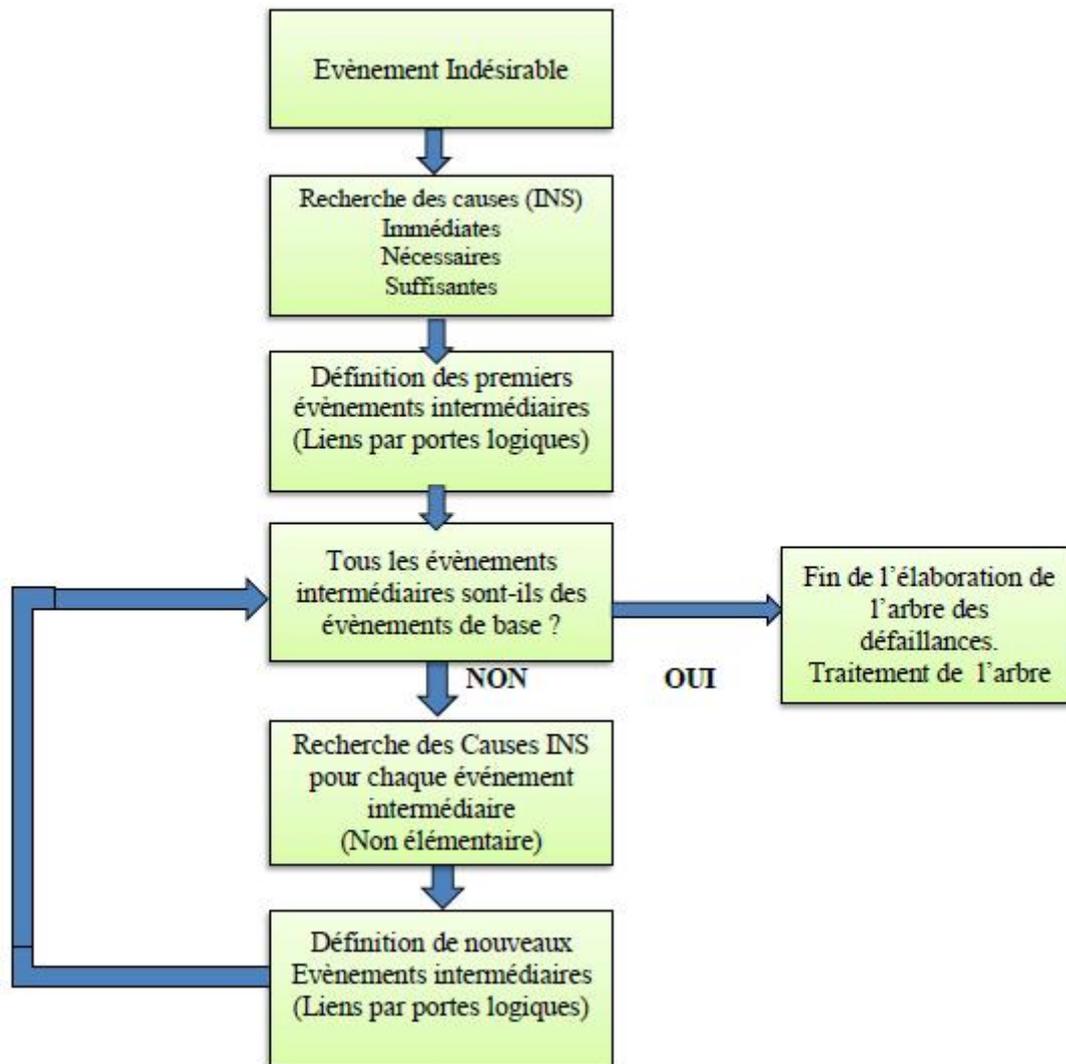


Figure 4.4 Démarche pour l'élaboration d'un arbre des défaillances (Salvi, 2003)

4.2.3 Les étapes de l'analyse par AdD

L'analyse par arbre des défaillances peut être décomposée en trois étapes :

Étape 1 : Définition de l'évènement redouté

L'évènement redouté est déduit à partir des méthodes d'analyses fonctionnelles précédemment établies.

Dans notre cas c'est l'analyse préliminaire des risques. L'évènement redouté est considéré comme étant à l'origine d'un accident significatif.

Étape 2 : Élaboration de l'arbre

Cette étape se caractérise par un ensemble d'étapes itératives qui permettent de rechercher les causes intermédiaires jusqu'à obtention des événements de base.

Pour construire l'arbre, les règles suivantes sont à suivre :

- Les événements d'une même ligne doivent être connectés par des portes logiques « ET » ou « OU » auxquelles on attribuera des symboles graphiques afin de représenter les résultats dans une structure arborescente ;
- Les entrées d'une porte doivent être des événements aléatoires (pas de porte à porte) ;
- Définir toutes les entrées d'une porte ;
- Le système doit être cohérent ce qui implique que la défaillance de tous ses composants doit entraîner la défaillance du système. (ISTIA, 2014).

Étape 3 : Exploitation de l'arbre

L'exploitation de la méthode de l'arbre des défaillances peut être qualitative et/ou quantitative :

- **Exploitation qualitative** : elle permet de dégager les chemins critiques menant à l'évènement redouté ainsi que les interactions à risque entre composants du système.
- **Exploitation quantitative** : l'AdD permettra non seulement l'identification des chemins critiques mais aussi le calcul de la probabilité d'occurrence de l'évènement redouté par des règles mathématiques. Ces calculs nécessitent tout d'abord l'évaluation de la probabilité de tous les événements élémentaires qui se trouvent en bas de l'arbre.

Le calcul des probabilités est effectué à partir des règles de l'algèbre de BOOLE et ceci en considérant que :

- À chaque événement de base correspond une variable booléenne ;
- L'évènement de sortie d'une porte « ET » est associé au produit des variables booléennes correspondant aux événements d'entrée ;
- L'évènement de sortie d'une porte « OU » est associé à la somme des variables booléennes correspondant aux événements d'entrée.

Les principales règles de l'algèbre de BOOLE sont résumées dans le tableau suivant :

Tableau 4.1 Principales règles de l'algèbre de BOOLE

Propriétés	Produit	Somme
Commutativité	$A \bullet B = B \bullet A$	$A + B = B + A$
Idempotence	$A \bullet A = A$	$A + A = A$
Absorption	$A \bullet (A + B) = A$	$A + A \bullet B = A$
Associativité	$A \bullet (B \bullet C) = (A \bullet B) \bullet C$	$A + (B + C) = (A + B) + C$
Distributivité	$A \bullet (B + C) = A \bullet B + A \bullet C$	$A + B \bullet C = (A + B) \bullet (A + C)$

En pratique, il est souvent difficile d'obtenir des valeurs précises de probabilités des évènements de base. En vue de les estimer, il est possible de faire appel à :

- Des bases de données,
- Des jugements d'experts,
- Des essais lorsque cela est possible,
- Au retour d'expérience sur l'installation ou des installations analogues.

À partir des probabilités des évènements de base, il s'agit de remonter dans l'arbre des défaillances en appliquant les règles booléennes. (R. Redjem, F. Tchikiken, 2017).

4.3 Analyse des risques dans la station de décapage chimique

4.3.1 Décomposition fonctionnelle

Le risque étudié « fuite des produits » concerne les équipements de l'installation de décapage chimique. Une décomposition fonctionnelle de l'installation s'avère utile, voire même nécessaire pour appliquer la méthode arbre de défaillance.

La décomposition fonctionnelle d'une installation donnée revient à disséquer le système global en plusieurs sous-systèmes. Chaque sous système est chargé d'accomplir une tâche ou une fonction bien précise. Cette démarche suivie d'une analyse fonctionnelle permet ainsi de parcourir le système en entier et de prendre en considération chaque équipement, dispositif, ou procédé qui peut, en cas d'accident ou de défaillance, avoir un impact préjudiciable sur le système, la vie humaine et l'environnement.

Le tableau (4.2) donne la décomposition fonctionnelle de la station de décapage chimique.

Tableau 4.2 Décomposition fonctionnelle de la station de décapage chimique (R. Redjem, F. Tchikiken, 2017)

Numéro de sous-système	Nom	Fonction	Composants
1	Déplacement des charges (Robot)	Le robot est un dispositif sur lequel seront accrochées les ailettes, il assure leur déplacement d'une cuve à une autre.	Support (porte ailettes)
			Roues
			Chemin de roulement
			Barre de préhension
2	Remplissage des bacs de stockage	Chargement des bacs de stockage en produits chimiques à partir des IBC.	Pompe électrique
			Tuyaux en PVC
3	Stockage des produits	Stockage des acides (HCl, H ₃ PO ₄ , H ₂ SiF ₆). Stockage de la base (NaOH).	Bacs de stockage
			Indicateurs de niveau
			Fosse de déchets
			Pompe électrique
4	Circuit d'alimentation	Alimentation des cuves de décapage à partir des bacs de stockage, alimentation des pompes de filtration à partir de la bêche à eau.	Pompes d'évacuation pneumatiques
			Canalisations
			Pompes doseuses
5	Vidange des cuves	Vidange manuelle et vidange automatique des baigns acides et basiques.	Vannes d'alimentation
			Vannes de vidange à bride
			Trop plein
			Pompe pneumatique
6	Traitement des pièces (cuves de traitement)	Enlèvement et élimination de l'ancien revêtement thermique couvrant les ailettes dans des cuves de traitement.	Canalisation
			Cuves de traitement en PVC
			Cuves de rétention métalliques
			Bassin de rétention
			Pompes de filtration
			Pompes d'évacuation

			Indicateurs de niveau
			Thermostats
7	Système de chauffage des cuves	Chauffage des solutions chimiques.	Thermoplongeurs
			Sondes de température
8	Nettoyage ultrason	Élimination des résidus de revêtement dans les microfissures des ailettes par des ondes ultrasons.	Cuve de nettoyage ultrason
			Générateurs électriques
			Plaques d'émission des ondes ultrasons
9	Séchage des pièces	Remise en état des ailettes par séchage.	Ventilateur
			Résistance
10	Système d'aspiration des vapeurs	Aspiration des vapeurs dégagées par les bains d'acides et de base chauffés.	Gaines d'aspiration au niveau des cuves
			Couvercle amovible
			Ventilateurs et collecteurs à soufflets
11	Traitement des vapeurs (tour de lavage)	Lavage des vapeurs nocives par réactions de transfert massiques.	Tour d'absorption
			Turbine
			Pompes centrifuges
			Réservoir d'eau
			Réservoir de soude
			pH mètre

4.3.2 Application de la méthode AdD

Nous identifions deux évènements redoutés critiques pour lesquelles nous élaborerons des arbres de défaillances quantitatifs ; les évènements redoutés critiques sont :

- ER1 : Fuite (acide/base) au niveau du stockage
- ER2 : Fuite (acide/base) au niveau de la salle des opérations

La quantification de l'AdD de chaque évènement redouté se fait par le calcul des probabilités de défaillance des équipements. Ceci est possible à partir de la base de données Offshore REliability DATA (OREDA) qui porte spécifiquement sur la performance des équipements en matière de fiabilité, disponibilité, maintenabilité et sécurité. Enfin, cette méthode fournit les moyens de calculs des probabilités et fréquences de défaillance des divers équipements qui composent le décapage chimique.

4.3.2.1 ER1 : Fuite (acide/base) au niveau du stockage

a) Fuite de l'acide

La Figure (4.5) permet de schématiser l'AdD menant à la fuite d'un seul acide au niveau du stockage.

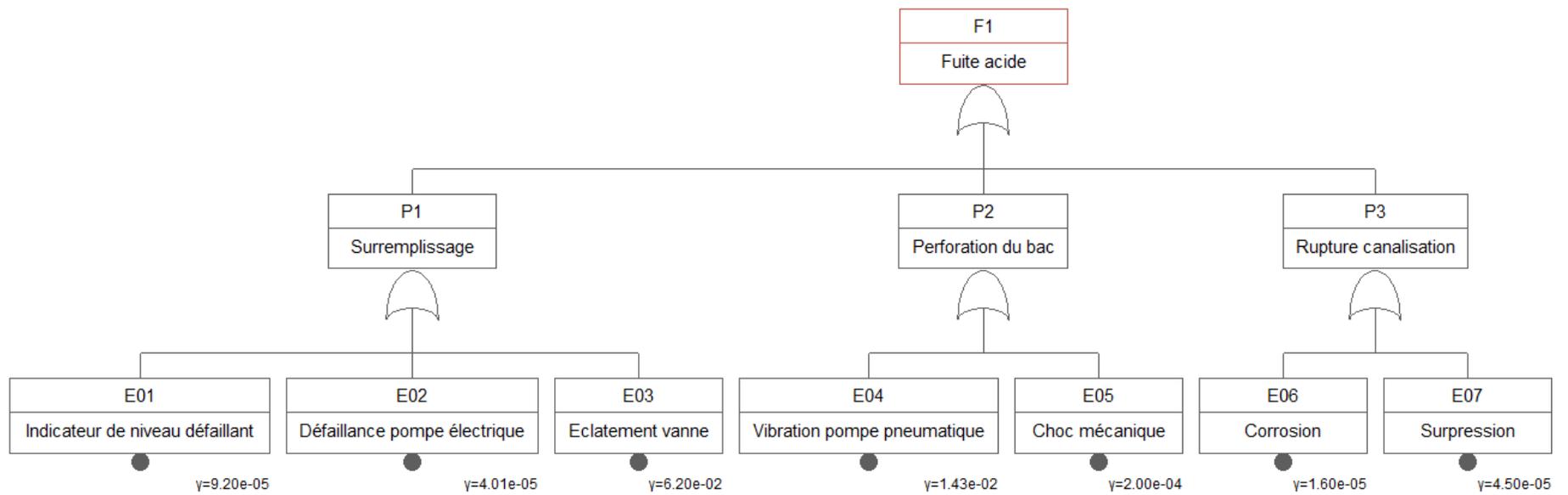


Figure 4.5 Fuite de l'acide au niveau du stockage

Comme il y a deux acides soumis aux mêmes conditions (même température, pression et type de bac de stockage), la probabilité de fuite d'un acide est la même pour tous les acides (qui est égale à F1).

La Figure (4.6) résume l'arbre de défaillance de la fuite de deux acides.

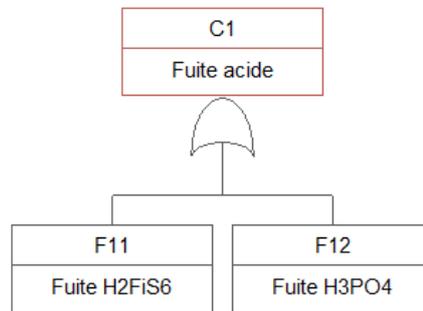


Figure 4.6 Arbre de défaillance de la fuite de deux acides

b) Fuite de la base

De même que pour la fuite de l'acide, la figure 4.7 donne l'AdD menant à la fuite de la base au niveau de stockage

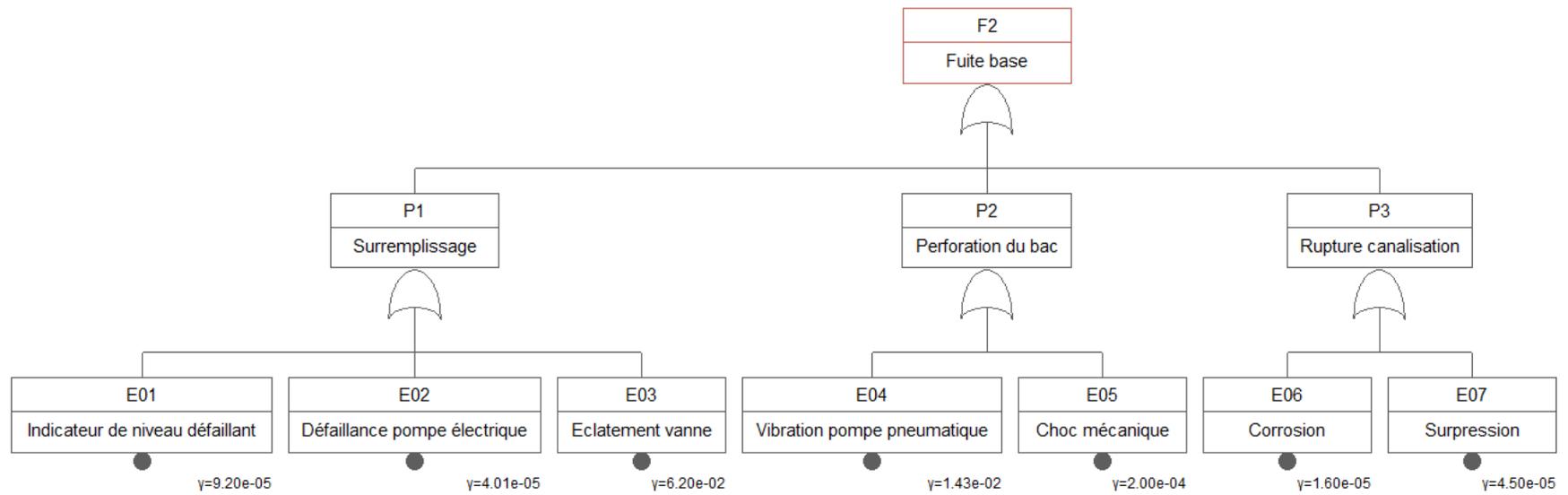


Figure 4.7 Fuite de la base au niveau du stockage

Les arbres de défaillances de la fuite de l'acide (F1) et la fuite de la base (F2) au niveau du stockage présentent les mêmes combinaisons des causes. Elles sont donc identiques. On en conclut que les probabilités d'occurrence des deux évènements sont égales. Il nous suffit alors de calculer la probabilité de la fuite de l'acide pour en déduire celle de la base.

c) Probabilité d'occurrence de la fuite au niveau du stockage

Les probabilités des éléments de base de l'AdD de la fuite au niveau du stockage sont données dans le tableau (4.3) :

Tableau 4.3 Probabilité des éléments de base de l'AdD

Équipements / Évènements	Codes	Probabilité
Défaillance de l'indicateur de niveau	<i>E01</i>	$9,2 \times 10^{-5}$
Défaillance de la pompe électrique	<i>E02</i>	$4,01 \times 10^{-5}$
Défaillance de la vanne	<i>E03</i>	$6,2 \times 10^{-2}$
Vibration de la pompe pneumatique	<i>E04</i>	$14,3 \times 10^{-3}$
Choc mécanique	<i>E05</i>	20×10^{-5}
Corrosion	<i>E06</i>	$1,6 \times 10^{-5}$
Surpression	<i>E07</i>	$4,5 \times 10^{-5}$

À partir de ces données, nous pouvons calculer la probabilité d'occurrence de la fuite d'acide au niveau du stockage, notée F1 :

$$F1 = P1 + P2 + P3$$

$$F1 = E01 + E02 + E03 + E04 + E05 + E06 + E07$$

$$F1 = 5,88 \times 10^{-3}$$

Cela implique que la probabilité d'occurrence de la fuite des acides au niveau du stockage se calcule comme suit :

$$C1 = 2 \times F1$$

$$C1 = 1,176 \times 10^{-2}$$

Par extension, la fuite de la base au niveau du stockage est donnée comme suit :

$$F2 = F1$$

$$F2 = 5,88 \times 10^{-3}$$

4.3.2.2 ER2 : Fuite (acide/base) au niveau de la salle d'opération

a) Fuite d'une solution acide

La Figure (4.8) schématise l'AdD de la fuite d'acide au niveau de la salle des opérations.

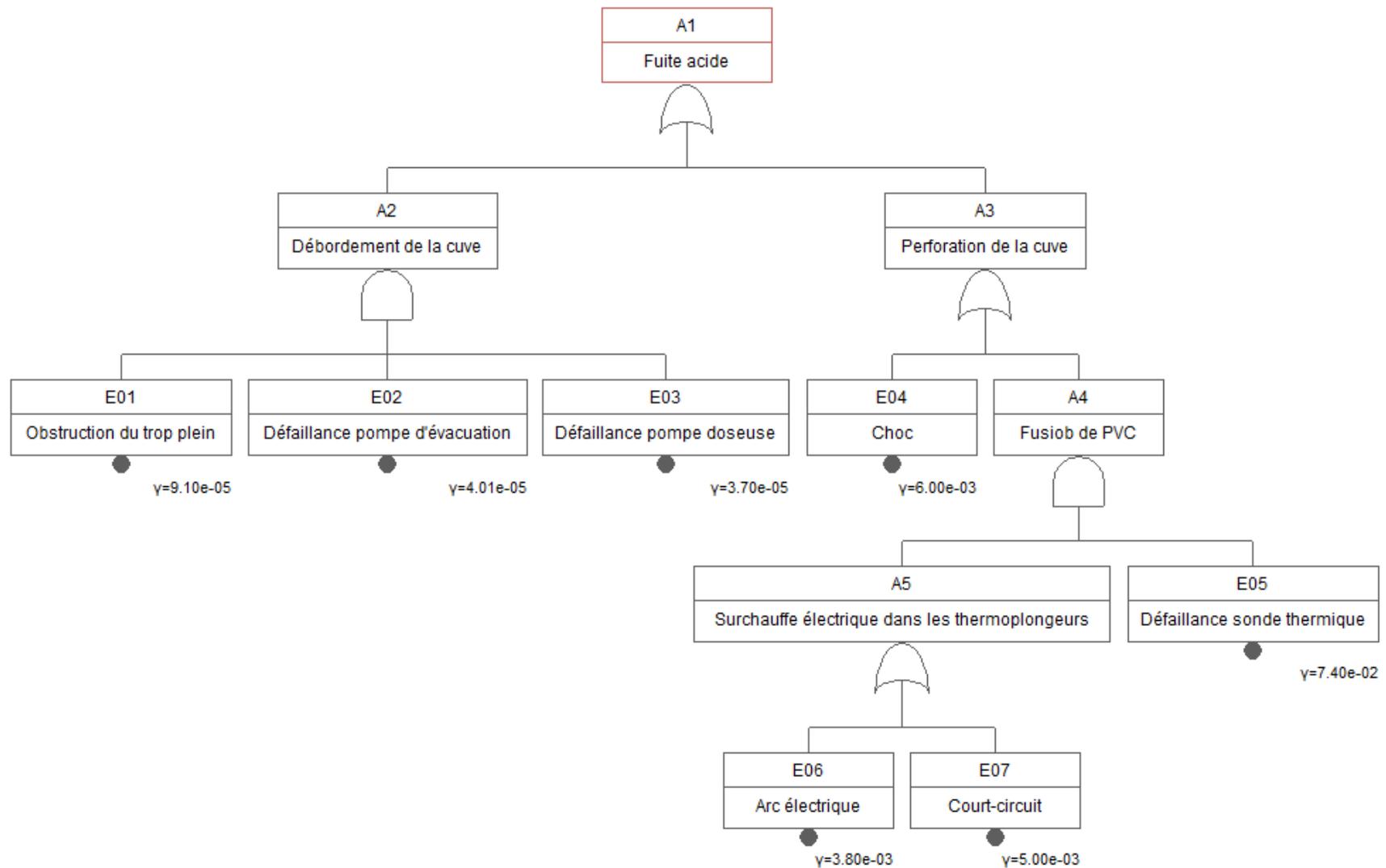


Figure 4.8 Fuite de l'acide au niveau de la salle des opérations

Au niveau de la salle des opérations, il y a deux cuves qui contiennent le mélange d'acide. Ces cuves sont soumises aux mêmes conditions (même température, contenu). La probabilité de fuite est la même au niveau des deux cuves et elle est égale à A1. La Figure (4.9) donne l'AdD de fuite de l'acide à partir des deux solutions, la probabilité étant notée C2.

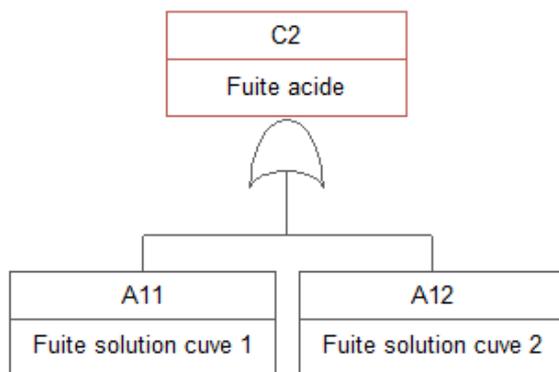


Figure 4.9 Fuite de l'acide à partir de deux solutions

b) Fuite de la base

De même que pour l'acide, la Figure (4.10) représente l'AdD menant à la fuite de la base.

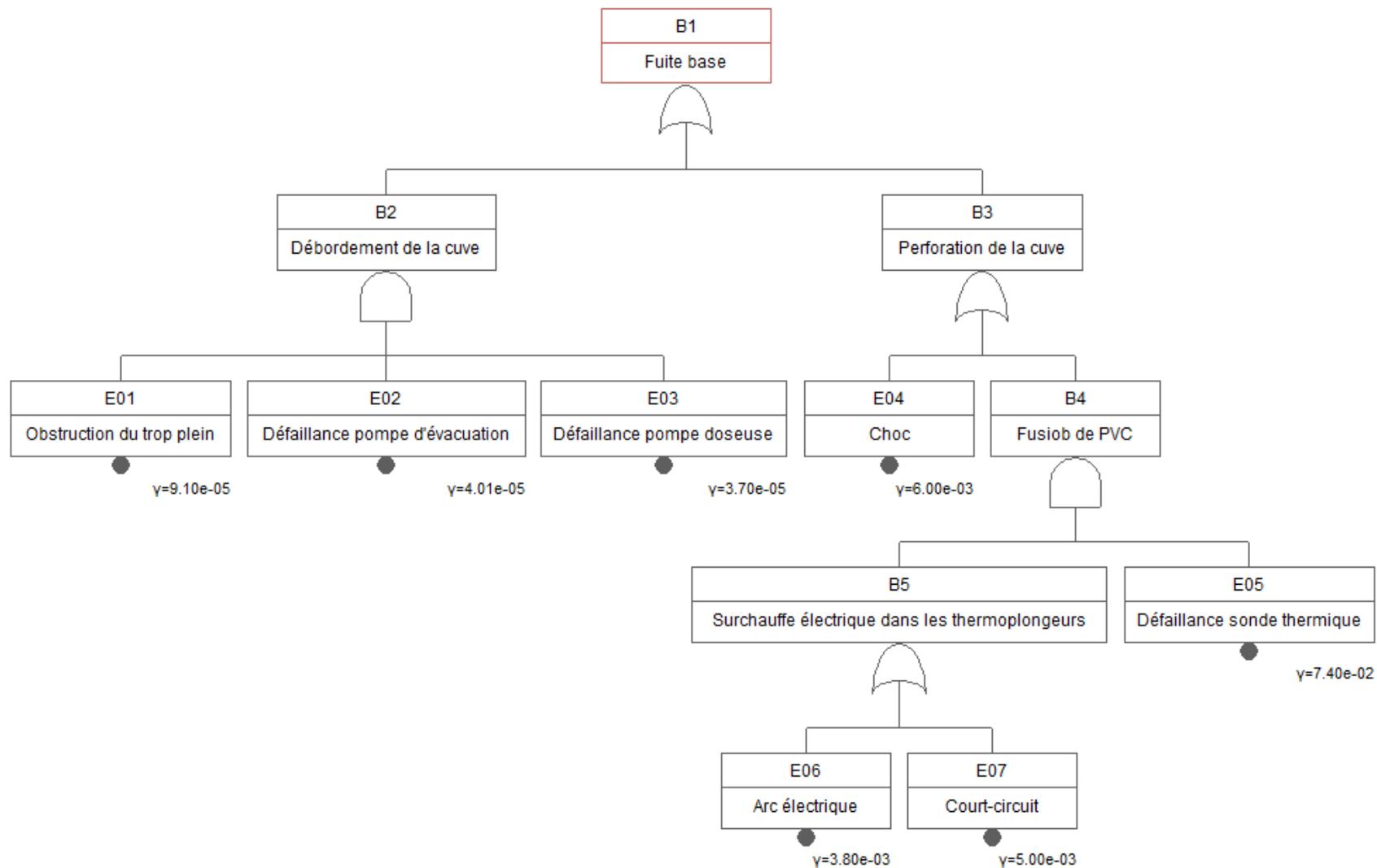


Figure 4.10 Fuite de la base au niveau de la salle des opérations

c) Probabilité d'occurrence de la fuite au niveau de la salle des opérations

Les probabilités des éléments de base de l'AdD de la fuite au niveau de la salle des opérations sont inscrites dans le tableau (4.4) :

Tableau 4.4 Probabilités des éléments de base de l'AdD au niveau de la salle des opérations

Équipements/ Évènements	Codes	Probabilité
Obstruction du trop plein	E01	$9,1 \times 10^{-5}$
Défaillance pompe d'évacuation	E02	$4,01 \times 10^{-5}$
Défaillance pompe doseuse	E03	$3,7 \times 10^{-5}$
Choc	E04	6×10^{-3}
Défaillance sonde thermique	E05	$7,4 \times 10^{-2}$
Arc électrique	E06	$3,8 \times 10^{-3}$
Court-circuit	E07	5×10^{-3}

À partir de ces données, nous pouvons calculer la probabilité d'occurrence de la fuite d'acide au niveau de la salle des opérations. On commence par l'acide :

$$A1 = A2 + A3$$

Avec

$$A2 = E8 \times E7 \times E6$$

$$A3 = ((E12 + E11) \times E9) + E5$$

Ce qui donne :

$$A1 = 6,65 \times 10^{-3}$$

La probabilité d'occurrence de la fuite des solutions d'acide est donnée par extension :

$$C2 = 2 \times A1$$

$$C2 = 1,33 \times 10^{-2}$$

Les arbres de défaillances sont également identiques au niveau de la salle des opérations pour l'acide et la base. Ce qui donne rapidement la probabilité de fuite dans la salle des opérations pour la base comme ceci :

$$B1 = A1$$

$$B1 = 6,65 \times 10^{-3}$$

4.3.2.3 Interprétation des résultats de l'AdD

Le tableau (4.5) regroupe tous les résultats de l'AdD obtenus précédemment, de l'évènement ayant la plus grande probabilité d'occurrence à celui ayant la plus petite probabilité d'occurrence :

Tableau 4.5 Résultats de l'AdD

Classification	Évènement Redouté	Probabilité
1	Fuite de l'acide au niveau du stockage	$1,176 \times 10^{-2}$
2	Fuite de l'acide au niveau de la salle des opérations	$1,33 \times 10^{-2}$
3	Fuite de la base au niveau de la salle des opérations	$6,65 \times 10^{-3}$
4	Fuite de la base au niveau de stockage	$5,88 \times 10^{-3}$

Les résultats obtenus permettent de déterminer l'importance de l'évènement redouté en termes de fréquence d'occurrence. Les événements les plus probables sont « les fuites d'un acide au niveau du stockage » et « les fuites d'un acide au niveau de la salle des opérations ».

4.3.3 Réduction du risque de « fuite »

Plusieurs scénarios peuvent mener au déversement de ces solutions, à la formation d'une nappe acide et à la dispersion d'un nuage toxique, ou à une réaction exothermique. Le déversement en grandes quantités des solutions acides est donc l'accident le plus redouté dans la station de décapage chimique.

Un tel accident nécessite fortement la mise en œuvre des barrières de sécurité pour minimiser son impact. Nous allons traiter des actions correctives qui pourraient réduire la gravité des accidents liés au décapage chimique.

4.3.3.1 Barrières existantes

Des barrières de sécurité ont été prises en considération et sont déjà en place. Ces barrières sont :

- Les trop-pleins dans les cuves d'opération de décapage.
- Les cuves de rétention : en dessous des cuves de décapage et des bacs de stockage.
- Le bassin de récupération : les solutions dans les cuves de rétention se déversent dans ce bassin en cas de fuite.

- Le Spill kit : (ou kit absorbant) utilisé en cas de déversement ou de fuite, il est composé d'absorbants sous forme de rouleaux, coussins, boudins. Ces derniers ont une capacité d'absorption maximale de 45 litres.
- Équipements de protection individuelle : Combinaison antiacide, masque de protection respiratoire pour les opérateurs du décapage chimique ;
- Pompes d'évacuations : en cas d'augmentation du niveau des solutions dans le bassin de récupération, deux pompes d'évacuation se déclenchent automatiquement et envoient l'excès de liquide vers le bac des déchets.

4.3.3.2 Barrières à ajouter

Les barrières de sécurité existantes sur le site concernent principalement les fuites et les petits déversements et ne couvrent pas le cas d'un déversement d'une grande ampleur.

Nous proposons ainsi des barrières de sécurité permettant la réduction des risques liés à la perte de confinement d'un grand volume de solutions acides ou basiques.

a) Plan d'intervention d'urgence

A ALGESCO, il n'y a pas de plan d'intervention d'urgence en cas de déversement d'un volume important de solutions acides. Le personnel n'est pas formé pour ce genre d'accident et l'intervention ne se fait qu'après arrivée de la protection civile sur les lieux.

La formation du personnel devant intervenir tout de suite après l'accident est nécessaire afin de minimiser les effets adverses pour les personnes et pour l'environnement.

La démarche à suivre lors d'un déversement d'une grande quantité d'acide est la suivante (R. Redjem, F. Tchikiken, 2017) :

1. Déclencher l'alarme ;
2. Évacuer le personnel vers le point de rassemblement qui se situe loin de la zone de déversement ;
3. Se munir de vêtements de protection pertinents incluant un respirateur et des gants en PVC ou en nitrile ;
4. Appliquer le neutralisateur de l'extérieur vers l'intérieur de la zone touchée (la nappe doit être neutralisée par un personnel formé) ;
5. Confirmer le pH à l'aide d'un papier tournesol ou de pH-mètre portatif, si ce dernier se trouve entre 6 et 8 arrêter la neutralisation ;
6. Récupérer le résidu ou les solutions neutralisés ;

7. Sceller les solutions dans des bacs ou dans des sacs de plastique dans le cas de résidus solides.

b) Neutralisation de la nappe

La neutralisation est l'étape la plus importante dans le plan d'urgence, Cette opération doit dépendre du produit en question, de ses caractéristiques physico-chimiques, et du risque qu'il représente pour les personnes et pour l'environnement (R. Redjem, F. Tchikiken, 2017).

4.4 Analyse de risque dans la station NDT

Nous allons procéder de la même façon que dans la station de décapage chimique, une décomposition fonctionnelle pour connaître le fonctionnement de chaque sous-système suivi d'un arbre de défaillance pour combiner toutes les causes possibles qui donnent une fuite de produit utilisé dans l'NDT, puis nous donnerons des mesures pour réduire le risque.

4.4.1 Décomposition fonctionnelle

Les sous-systèmes composant la station de NDT et leur fonctionnement sont résumés dans le tableau (4.6) :

Tableau 4.6 Décomposition fonctionnelle de l'NDT

Numéro sous-système	Nom	Fonction	Composants
1	Remplissage du bac de stockage	Chargement de bac de stockage en produit pénétrant ZYGLO à partir des IBC.	Pompe électrique
			Tuyaux en PVC
			Indicateur de niveau
2	Stockage de produit.	Stockage de produit pénétrant ZYGLO.	Bac de stockage
			Pompe électrique
			Pompes d'évacuation pneumatiques
3	Circuit d'alimentation	Alimentation de bain de traitement en produit pénétrant à partir de bacs de stockage.	Canalisations
			Pompes doseuses
			Vannes d'alimentation
4	Traitement de la pièce	Immersion totale de la pièce dans le bain de traitement. Application du pénétrant.	Réservoir en acier inoxydable
			Cuve de rétention métallique
			Support suspendu
			Pompe d'évacuation
5	Drainage	Enlever l'excès du pénétrant.	Conteneur en acier inoxydable
			Grille de vidange
6	Rinçage des pièces	Nettoyage des pièces des résidus du pénétrant avec un jet d'eau.	Réservoir de rinçage en acier inoxydable
			Tuyau à main
			Buse de pulvérisation
7	Séchage des pièces	Remise en état des pièces par séchage.	Séchoir
			thermostat à contrôler la sécheuse
8	Application de révélateur	Faire ressortir les défauts pour l'inspection visuelle des pièces.	Réservoir de révélateur en acier inoxydable
9	Inspection des pièces	Détecter les défauts de la pièce.	Cabine Autonome D'inspection (chambre noire).
			Lumière noire à tenir à main.
			Lumière blanche.

4.4.2 Application de la méthode AdD

Comme le risque étudié est la fuite des produits, on identifie deux évènements redoutés critiques pour lesquelles nous élaborerons des arbres de défaillances quantitatifs ; les évènements redoutés critiques sont :

- ER1 : Fuite produit pénétrant au niveau du stockage
- ER2 : Fuite produit pénétrant au niveau de la station.

4.4.2.1 ER1 : Fuite produit pénétrant au niveau du stockage

La Figure (4.11) schématise l'AdD de la fuite du produit pénétrant ZYGLO au niveau du stockage.

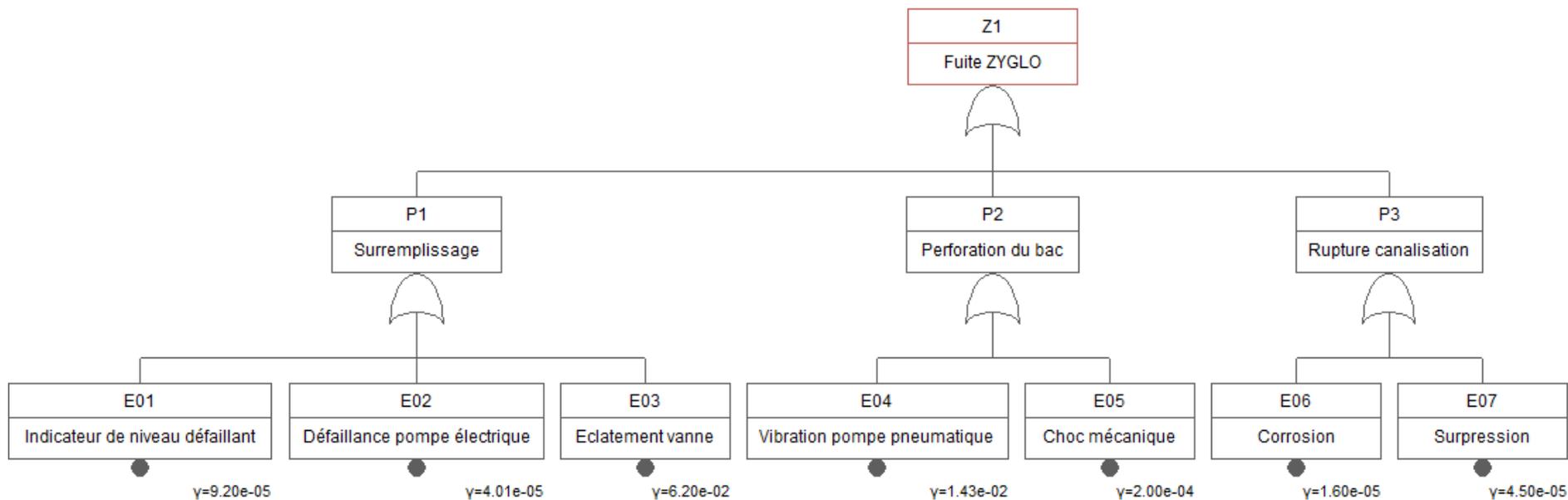


Figure 4.11 Fuite du pénétrant ZYGLO au niveau du stockage

Les probabilités des éléments de base de l'Add de la fuite au niveau du stockage sont données dans le tableau (4.7).

Tableau 4.7 Probabilités des éléments de base de l'Add de la fuite du pénétrant au niveau du stockage

Équipements / Évènements	Codes	Probabilité
Défaillance de l'indicateur de niveau	E01	$9,2 \times 10^{-5}$
Défaillance de la pompe électrique	E02	$4,01 \times 10^{-5}$
Défaillance de la vanne	E03	$6,2 \times 10^{-2}$
Vibration de la pompe pneumatique	E04	$14,3 \times 10^{-3}$
Choc mécanique	E05	20×10^{-5}
Corrosion	E06	$1,6 \times 10^{-5}$
Surpression	E07	$4,5 \times 10^{-5}$

À partir de ces données, nous pouvons calculer la probabilité d'occurrence de la fuite du produit pénétrant au niveau du stockage, notée Z1 :

$$Z1 = P1 + P2 + P3$$

$$Z1 = E01 + E02 + E03 + E04 + E05 + E06 + E07$$

$$Z1 = 5,88 \times 10^{-3}$$

4.4.2.2 ER2 : Fuite produit pénétrant au niveau de la station.

La Figure 4-12 schématise l'Add de la fuite du produit pénétrant au niveau de la station.

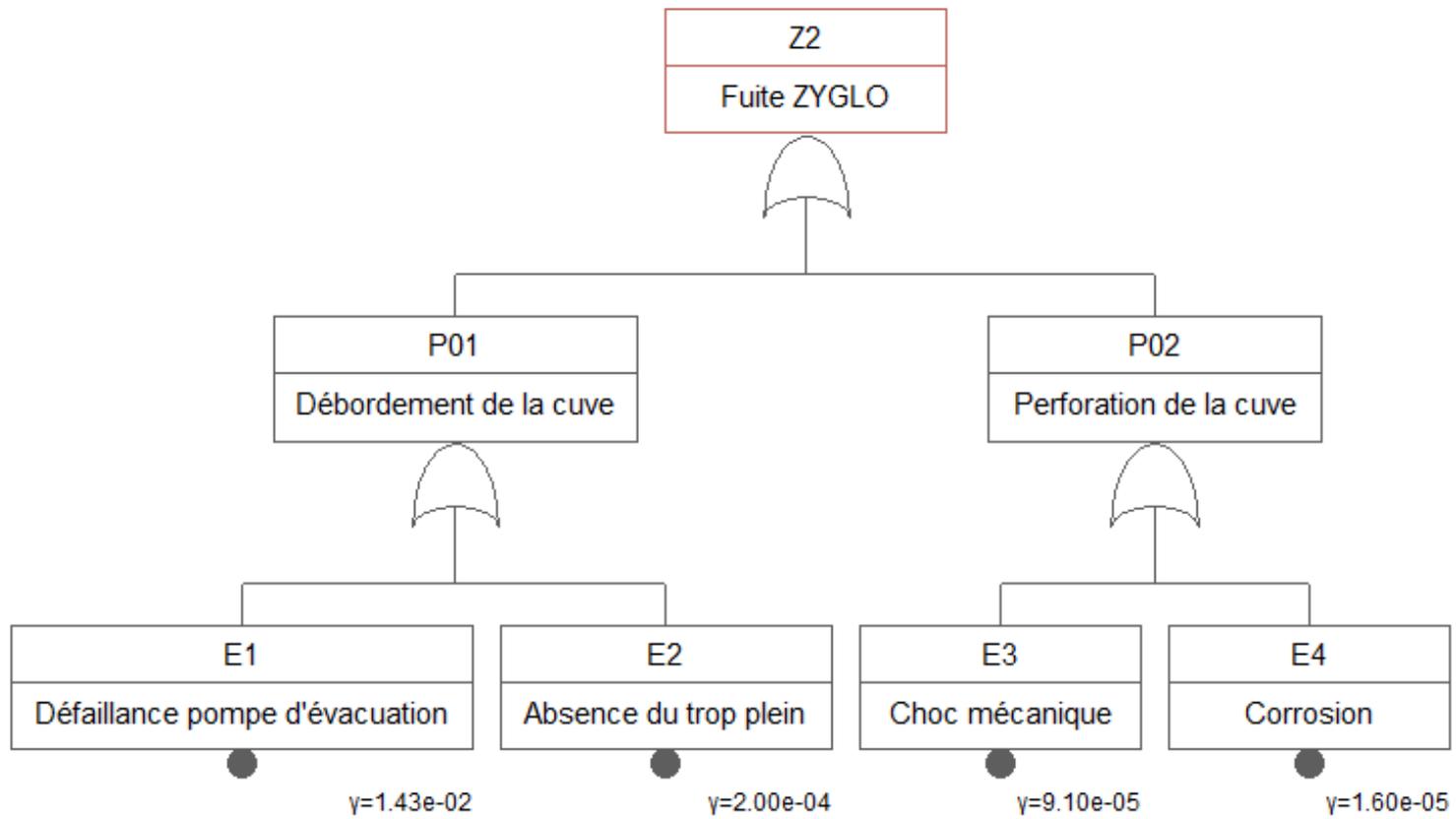


Figure 4.12 Fuite du pénétrant ZYGLO au niveau de la station NDT

Les probabilités des éléments de base de l'AdD de la fuite au niveau de la station sont données dans le tableau (4.8).

Tableau 4.8 Probabilités des éléments de base de l'AdD de la fuite du pénétrant au niveau de la station NDT

Équipements / Évènements	Codes	Probabilité
Vibration de la pompe d'évacuation	E1	$14,3 \times 10^{-3}$
Choc mécanique	E2	20×10^{-5}
Absence de trop plein	E3	$9,1 \times 10^{-5}$
Corrosion	E4	$1,6 \times 10^{-5}$

À partir de ces données, nous pouvons calculer la probabilité d'occurrence de la fuite du produit pénétrant au niveau de la station, notée $Z2$:

$$Z2 = E1 + E2 + E3 + E4$$

$$Z2 = 1,4607 \times 10^{-2}$$

4.4.2.3 Interprétation des résultats de l'AdD

Le tableau (4.9) regroupe tous les résultats de l'AdD obtenus précédemment, de l'évènement ayant la plus grande probabilité d'occurrence à celui ayant la plus petite probabilité d'occurrence :

Tableau 4.9 Résultats de l'AdD de la fuite du pénétrant ZYGLO

Classification	Évènement Redouté	Probabilité
1	Fuite du produit pénétrant au niveau du stockage	$1,76 \times 10^{-2}$
2	Fuite du produit pénétrant au niveau de la station	$1,4607 \times 10^{-2}$

Les résultats obtenus montrent que les deux probabilités sont proches et la première « Fuite du produit pénétrant au niveau du stockage » est aussi redoutée en terme de fréquence d'occurrence que la deuxième « Fuite du produit pénétrant au niveau de la station », on dit que les deux évènements sont probables.

4.4.3 Réduction du risque de « fuite »

4.4.3.1 Barrières existantes

Des barrières de sécurité ont été prises en considération et sont déjà en place. Ces barrières sont :

- Cuve de rétention : en dessous des cuves des IBC de stockage et des déchets.
- Le Spill kit : (ou kit absorbant) utilisé en cas de déversement ou de fuite, composé d'absorbants sous forme de rouleaux, coussins, boudins. Ces derniers ont une capacité d'absorption maximale de 45 litres.
- Équipements de protection individuelle : Combinaison, chaussures de sécurité, gants.
- Un extracteur et des filtres au niveau de la chambre noire aspirants les solvants des pénétrants révélateurs, sauf que ces filtres sont saturés et doivent être remplacés.
- Pompe d'évacuation : en cas d'augmentation du niveau des solutions dans la cuve de rétention, une pompe d'évacuation se déclenche automatiquement et envoie l'excès de liquide vers le bac des déchets.
- Plan d'intervention d'urgence.

4.4.3.2 Barrières à ajouter

Les barrières de sécurité existantes sur le site concernent principalement les fuites et les petits déversements et ne couvrent pas le cas d'un déversement d'une grande ampleur. Nous proposons ainsi des barrières de sécurité permettant la réduction des risques liés à la perte de confinement d'un grand volume du pénétrant ZYGLO.

- Les trop-pleins dans les cuves d'opération de l'NDT.
- Le bassin de récupération : les solutions dans les cuves de rétention se déversent dans ce bassin en cas de fuite.
- Remplacer les filtres saturés par des neufs

4.5 Conclusion

Après avoir analysé les deux procédés à l'aide de l'AdD, nous avons pu vérifier et ajouter les barrières, à savoir : le plan d'intervention, la neutralisation des acides et de la base, les bassins de récupération, le remplacement des filtres saturés. Ces actions préventives nous permettront de limiter le risque de fuite d'une grande quantité de

produits et déchets, qui pourra engendrer la formation d'une nappe acide et la dispersion d'un nuage toxique, une réaction exothermique, ou encore une pollution de l'air, des eaux et du sol. Une fois ces conséquences évitées, nous pourrons passer à l'étape de l'optimisation des déchets qui nous permettra de les traiter.

Chapitre 5. Minimisation des rejets en eau dans l'atelier de contrôle non destructif NDT

5 Minimisation des rejets en eau dans l'atelier NDT

5.1 Introduction

Les ateliers de traitement de surface sont générateurs de grandes quantités d'effluents liquides chargés en produits chimiques souvent toxiques. Afin de limiter l'impact de cette activité sur l'environnement et d'aider les industriels, particulièrement ALGESCO, à respecter les contraintes réglementaires, nous avons mis au point une méthode d'optimisation des rejets en eau.

Pour cela, nous nous sommes intéressés aux postes contribuant le plus aux rejets : les bains de rinçage. Après avoir discuté avec les ingénieurs de process d'ALGESCO, nous avons trouvé que le process du décapage chimique n'accepte aucune modification des paramètres et les quantités générées sont optimales par rapport au référentiel GE. C'est pour cela, dans ce qui suit, nous nous intéresserons seulement au bain de rinçage de l'NDT.

5.2 L'eau dans les ateliers de traitement de surface d'ALGESCO

5.2.1 Utilisation de l'eau

5.2.1.1 Consommation et rejet en eau

La consommation en eau dans les ateliers de traitement de surface est importante et se traduit par la production d'une grande quantité d'effluents. Outre les besoins permanents, des besoins annexes en eau doivent être satisfaits :

- **Besoins permanents**
 - Alimentation des rinçages.
 - Montage des bains neufs.
- **Besoins annexes**
 - Lavage des filtres.
 - Lavage des sols.
 - Nettoyage des cuves.

La consommation en eau due à ces besoins est non négligeable et peut atteindre 10% de la consommation totale (Breuil, 1985).

Les rejets aqueux sont ainsi essentiellement composés de :

- Vidange des cuves (bains de rinçage et de traitement),
- Effluents de rinçages,

- Lavage des filtres,
- Nettoyage des cuves.

5.2.1.2 Relation entre la quantité d'eau et la qualité du rinçage

Afin d'obtenir des résultats conformes aux exigences des industriels, les bains de rinçage doivent être alimentés d'eau de bonne qualité. Malheureusement, une grande partie des industriels confondent qualité et quantité d'eau de rinçage. L'optimisation des rinçages passe par une rationalisation de l'outil de production en évitant une surconsommation d'eau qui est souvent opérée dans les ateliers.

Les notions d'entraînement et de rapport de dilution vont nous permettre de déterminer les caractéristiques d'efficacité et de rendement des rinçages statique ou courant.

a) L'entraînement

Une pièce, même après égouttage, passant d'un bain à un autre, entraîne une certaine quantité de liquide (Figure 5.1). Le volume entraîné par unité de temps est appelé entraînement et est noté e , il correspond à un débit et a souvent pour unité le litre par heure (L/h). Sa valeur peut également être donnée en litre par mètre carré de surface traitée (L/m²) (V. Laforest 1999).

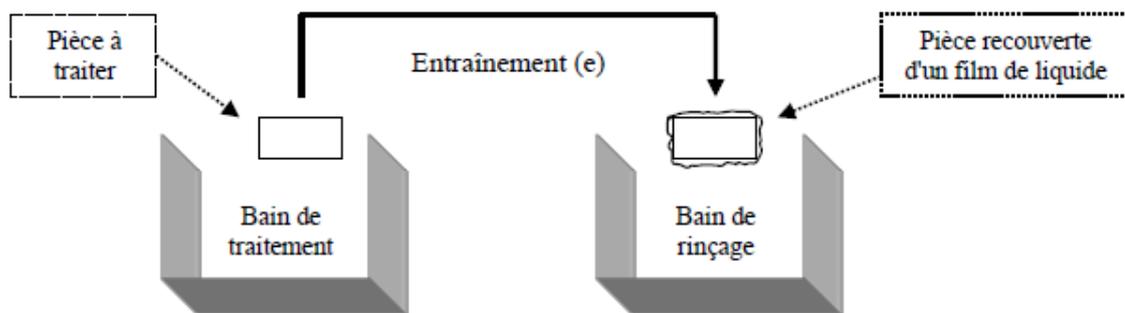


Figure 5.1 Schématisation de l'entraînement entre un bain de traitement et un bain de rinçage (V. Laforest 1999).

L'entraînement peut être mesuré sur une ligne de traitement de surface de la manière suivante :

- La concentration du bain de traitement est supposée constante : C_b en gramme par litre (g/L)
- La concentration du bain de rinçage de volume V en litre (L) varie pour un rinçage statique :
 - A l'instant $t = 0$, la concentration est C_{r0} en gramme par litre (g/L)
 - A l'instant t , la concentration est C_r en gramme par litre (g/L)

La surface de pièces rincées est S en mètre carré (m^2).

Si la concentration du bain de rinçage est uniquement due à l'entraînement, les expressions sont données par les équations (5.1) et (5.2) :

En litre par heure :

$$e = \frac{C_r - C_{r0}}{C_b \times t} \times V \quad (5.1)$$

En litre par m^2 :

$$e = \frac{C_r - C_{r0}}{C_b \times S} \times V \quad (5.2)$$

La valeur de l'entraînement (équation (5.1)) est variable de 0,2 à 1,2 L/ m^2 (V. Laforest 1999)., cette valeur dépend du temps d'égouttage, la forme et les caractéristiques de la pièce et les paramètres du bain de traitement tel que la viscosité.

Pour le calcul de l'entraînement du bain NDT de ALGESCO et pour une concentration du bain de traitement de $C_b = 705 \text{ g/L}$ de matière organique, sachant que :

- A $t = 0 \text{ min}$, la concentration du bain de rinçage est : $C_{r0} = 0.02 \text{ g/L}$,
- A $t = 10 \text{ min}$ la concentration est de $C_r = 0.09 \text{ g/L}$.

Pour un volume du bain de rinçage de $V = 1000 \text{ L}$, nous avons :

$$e = \frac{C_r - C_{r0}}{C_b \times t} \times V$$

$$e = \frac{0.09 - 0.02}{705 \times 10} \times 1000$$

$$e = 0.01 \text{ L/min}$$

b) Rapport de dilution

Le rapport de dilution, symbolisé par R_d (sans dimension), est une notion importante en traitement de surface car il est un indicateur de la qualité du rinçage. Plus la valeur du rapport de dilution est élevée, meilleur est le rinçage. Il existe néanmoins des valeurs optimales au-delà desquelles la quantité d'eau consommée est

trop importante par rapport à un rinçage optimal. Rd s'exprime par le rapport de la concentration d'une espèce dans le bain de traitement et la concentration de la même espèce dans le bain de rinçage associé (V. Laforest 1999).

L'expression du rapport de dilution est donnée par l'équation (5.3) :

$$Rd = \frac{Cb}{Cr} \quad (5.3)$$

Pour le cas de ALGESCO, on trouve :

$$Rd = \frac{705}{0.09}$$

$$Rd = 7833.33$$

$$Rd \approx 8000$$

En général, la valeur optimale pour les différents bains de rinçage dans les unités de traitement de surface sont données dans le tableau (5.1).

Tableau 5.1 Valeurs optimales des rapports de dilution par type de traitement (Breuil 1985).

Type de traitement	Rapport de dilution
Préparation de surface (dégraissage, décapage...)	500 - 5000
Après la plupart des bains de dépôts	5000 - 10000
Après passivation (au Cr VI)	1000 - 2000
Après phosphatation, anodisation de l'Al...	2000 - 5000

Le bain de rinçage de ALGESCO présente les mêmes caractéristiques que les bains de dégraissage. Nous constatons que le rapport de dilution du bain de rinçage de ALGESCO est nettement supérieur à la valeur optimal donnée dans la littérature dans les conditions les plus défavorables. Ce qui se traduit par une surconsommation de l'eau de rinçage dans l'atelier de NDT.

c) Efficacité et rendement d'un rinçage

Afin d'évaluer le rinçage et la consommation en eau, nous avons défini les notions d'efficacité et de rendement.

L'efficacité permet d'évaluer la qualité du rinçage des pièces. Elle est définie comme étant la différence entre le rapport de dilution effectif et le rapport de dilution optimal expérimental (V. Laforest 1999) (Équation (5.4)).

$$E = R_{\text{effectif}} - R_{\text{expert}} \quad (5.4)$$

R_{effectif} : Rapport de dilution effectif du rinçage calculé à partir de l'équation (5.3)

R_{expert} : Rapport de dilution optimal (valeur donnée par la littérature).

Si :

- $E > 0$, le rinçage est efficace.
- $E < 0$, le rinçage n'est pas efficace (V. Laforest 1999).

D'après nos données, la valeur de E est positive quel que soit la valeur donnée par la littérature. Ce qui montre que le rinçage est efficace.

5.2.2 Étude des bains de rinçage

5.2.2.1 Introduction

L'étude des bains de rinçage a pour objectif de définir, d'une part, les différents types de rinçages existants et d'autre part de définir l'expression du rapport de dilution. Nous nous intéressons dans cette étude au type de rinçage, celui utilisé dans la station de l'NDT.

D'une manière générale, les types de rinçages sont regroupés en 5 grandes familles (V. Laforest 1999) :

- Les rinçages morts ou statiques qui ne sont pas alimentés en eau mais sont renouvelés périodiquement,
- Les rinçages courants qui sont alimentés par un courant continu d'eau,
- Les rinçages cascades qui sont des cuves à plusieurs étages dont le courant d'eau est commun à chacun d'eux et dans lesquels la pièce passe à contre-courant par rapport à l'eau,
- Les rinçages éco qui sont utilisés avant et après le bain de traitement. Ils ne sont généralement jamais vidangés,
- Les rinçages par aspersion de type douchette qui permettent de rincer très efficacement les pièces.

Le type de rinçage utilisé dans la station de l'NDT est le rinçage par aspersion.

5.2.2.2 Rinçage par aspersion

5.2.2.2.1 Description

Les rinçages par aspersion sont de type douchette ou spray avec des débits plus ou moins importants.

L'utilisation de cette technique permet d'une part d'améliorer le rinçage et d'autre part de réduire la quantité d'eau consommée par rapport à un rinçage statique.

Cette technique, très économique en consommation d'eau, est particulièrement efficace pour rincer les pièces dans un espace relativement restreint (V. Laforest 1999).

5.2.2.2.2 Indicateur d'efficacité du rinçage par aspersion : Rapport de dilution

En pratique, le rapport de dilution du rinçage par aspersion est assimilé à celui du rinçage courant (les rinçages courants : ils sont tous alimentés d'un courant d'eau brute et ne sont jamais vidangés) et il peut être associé à différents types de rinçages.

Suivant son association, il forme des rinçages courant cascade à n étages. Le rapport de dilution est alors de type (V. Laforest 1999) (Équation (5.6)) :

$$Rd = \left(\frac{Q}{e}\right)^n \quad (5.6)$$

Où Q est le débit d'eau, e l'entraînement et n le nombre d'étages.

5.3 Méthodologie de gestion des rejets en eau

Suite à la description du bain contribuant aux rejets et à la consommation en eau ainsi qu'à la détermination de rapport de dilution, nous allons définir les différents moyens de réduction des rejets en eau :

- Par action sur l'entraînement,
- Par action au niveau de la fonction de rinçage (débits, structure).

5.3.1 Agir sur l'entraînement

L'entraînement est la quantité de liquide entraîné par la pièce lors de son passage d'un bain à un autre (V. Laforest 1999). Ce liquide chargé d'espèces chimiques va polluer les bains suivants et cette pollution se retrouvera dans les rejets de l'atelier.

La première possibilité pour réduire les rejets en polluants et en eau est de limiter et/ou récupérer la quantité de produits entraînée par la pièce. Pour cela, nous proposons des actions suivantes :

- La position des pièces sur les montages,
- La viscosité du bain (qui peut être diminué soit par apport de faible dose de mouillants (tensio-actifs), soit par une augmentation de la température),
- La vitesse d'émersion des pièces (temps d'égouttage).

La figure (5.2) montre d'une part que plus le temps d'égouttage est élevé, plus l'entraînement est faible et, d'autre part, que cet entraînement peut être diminué soit par élévation de température soit, par ajout de mouillants.

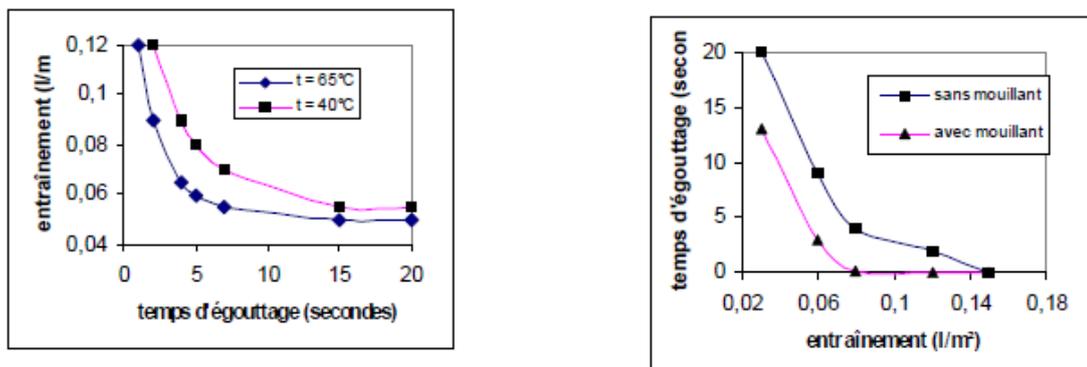


Figure 5.2 Comparaison des entraînements en fonction des temps d'égouttage et la viscosité du bain (Breuil 1985).

La modification d'un de ces facteurs influe fortement sur l'entraînement et peut le diviser par 2 à 5 induisant la réduction dans une proportion identique des consommations en eau (Bara 1988).

En effet, comme les bains de rinçage sont moins pollués, les vidanges peuvent être espacées, ce qui réduit les déchets.

Dans notre cas, nous ne pouvons réduire l'entraînement par l'action sur la température, car les exigences de qualité et de sécurité de ALGESCO ne le permettent pas. Par contre l'utilisation d'un agent mouillant est possible.

L'ajout d'un agent mouillant (ZYGLO) au bain de traitement va permettre de diminuer la viscosité du pénétrant et par conséquent la diminution de l'entraînement. Il est nécessaire d'optimiser la valeur de la viscosité afin d'assurer une meilleure pénétration du pénétrant dans les fissures des différentes pièces.

Des tests sont cours d'exécution en collaboration avec le groupe d'ingénieurs ALGESCO et devraient être finalisés prochainement durant le troisième trimestre de l'année 2019.

5.3.2 Agir au niveau de la fonction de rinçage

L'objectif premier de la fonction de rinçage est d'éviter la contamination des bains de traitement les uns par les autres (V. Laforest).

Il y a plusieurs facteurs de surconsommation en eau et plusieurs moyens pour réduire les effluents liquides :

- En optimisant l'efficacité des rinçages (modification des rapports de dilution effectifs),
- En ajustant les débits,
- En jouant sur la structure des bains.

5.3.2.1 Une approche économe

Il est commun de rincer plus que nécessaire. Par soucis d'économie d'eau, la première approche se situe alors au niveau des efficacités de rinçage. Il s'agit de réduire les rapports de dilution au strict minimum imposé par le procédé. Les valeurs optimales sont généralement dictées par l'expérience et évoluent au cas par cas. Des valeurs indicatives sont proposées par la littérature (Breuil 1985) (tableau 5-1). Les débits correspondant aux nouveaux rapports de dilution sont calculés à partir des formules données dans le tableau (5.2).

Tableau 5.2 Rapport de dilution par type de rinçage (e est l'entraînement (l/min, V_v est le volume vidangé (L), Q est le débit (L/h)) (V. Laforest, 1999).

Type de rinçage	Propriétés	Comportement en dilution
Rinçage statique	<ul style="list-style-type: none"> • Pas de courant d'eau. • Vidangé périodiquement. 	$Rd = \frac{1}{1 - \exp(-\frac{e}{V_v})}$
Rinçage éco	<ul style="list-style-type: none"> • Utilisé avant et après le bain de traitement. • Rinçage statique. • En général, un rinçage éco n'est jamais vidangé. 	$Rd = \frac{2}{1 - (-\frac{2e}{V_v})}$
Autres rinçages	<ul style="list-style-type: none"> • Rinçage à débit d'eau • Rarement vidangé • Rinçage cascade • Rinçage courant • Rinçage par aspersion 	$Rd = (\frac{Q}{e})^n$
Fonction de rinçage	<ul style="list-style-type: none"> • Ensemble des bains de rinçage suivant un bain de traitement 	$Rd = \prod Rd$

Pour une valeur de Rd est égale à 5000, on trouve :

$$Rd = \left(\frac{Q}{e}\right)^n$$

Pour un nombre d'étage égal à 1 : $Rd = \frac{Q}{e}$

Ce qui donne un débit de rinçage optimisé de : $Q_{\text{optimisé}} = Rd \times e = 5000 \times 0.01 = 50 \text{ L/min}$.

Le débit optimisé est $Q_{\text{optimisé}} = 50 \text{ L/min}$

Ce débit reste toutefois inférieur au débit opératoire qui est de 80 L/min soit une économie de 30L/min et qui représente un gain de 38%.

5.3.2.2 Ajustement des débits des rinçages courants

Dans le cas où la fonction de rinçage est composée de plusieurs rinçages courants, la répartition des débits de ceux-ci a une influence notable sur d'une part la qualité de l'eau en sortie et la quantité de l'eau consommée. Une fonction de rinçage dont l'efficacité est Rd peut être composée de rinçage statique dont le produit des rapports de dilution Rd s

est connu et d'un certain nombre de rinçages courants dont nous voulons déterminer le débit au plus juste. L'équation (5.7) permet d'ajuster les débits afin que ceux-ci soient minima pour une efficacité de rinçage optimale (V. Laforest, B. Debray, J. Bourgois, 1999).

$$q_i = ni \times R \times \left[R^{1-\sum n_i} \times \prod \left(\frac{e_i}{ni} \right)^{ni} \right]^{\frac{1}{\sum n_i}} \quad (5.7)$$

i : le numéro de rinçage courant.

q : le débit.

e : l'entraînement en L/m².

n : le nombre d'étage.

R : le rapport entre le rapport de dilution de la fonction de rinçage et le produit des rapports de dilutions des rinçages statiques.

Dans notre cas, ALGESCO dispose d'un seul bain de rinçage ($n = 1$), et par conséquent le débit de rinçage reste inchangé égal à $Q_{\text{optimisé}} = 50 \text{ l/min}$.

5.3.2.3 Aménager les structures des rinçages

La méthode la plus efficace pour réduire les rejets est la modification de la structure des rinçages. L'utilisation de rinçages cascade à contre-courant est, de loin, la solution la moins coûteuse en eau par rapport à un rinçage courant simple (V. Laforest, B. Debray, J. Bourgois 1999).

Le tableau (5.3) explicite bien ce phénomène. On peut noter que les gains deviennent très importants lorsque le nombre d'étages augmente. En effet, pour un même rapport de dilution, Q/e peut diminuer jusqu'à plus de 600 fois lorsque le nombre d'étages passe de 1 à 4, les consommations et les rejets en eau suivent aussi cette évolution.

Tableau 5.3 Influence des structures de rinçage sur la quantité d'eau consommée (BARA 1988).

Rd	1000				5000			
N	1	2	3	4	1	2	3	4
$\frac{Q}{e} = \sqrt[n]{Rd}$	1000	31.6	10	5.6	5000	70.7	17.1	8.4

Nous constatons, d'après la littérature que l'augmentation des étages de rinçage a un effet bénéfique sur le débit de rinçage.

Les rinçages éco permettent ainsi de diminuer notablement les entraînements, la réduction des débits peut aller jusqu'à plus de 80 % pour l'association de 4 rinçages éco (figure 5.3). En général, l'utilisation d'un seul rinçage éco permet de réduire suffisamment les débits des rinçages suivants ainsi que le flux de pollution.

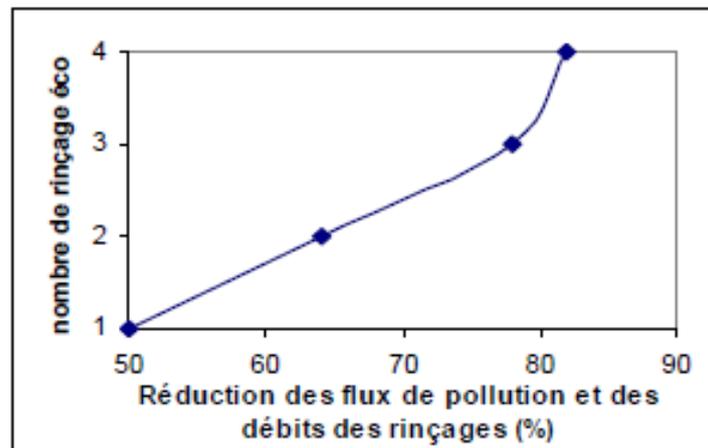


Figure 5.3 Influence du nombre de rinçage éco sur le flux de pollution et le débit des rinçages (Breuil 1985)

5.4 Conclusion

Les différentes méthodes de réduction des rejets en eau développées dans ce chapitre sont, pour la plupart, décrites dans les différents ouvrages relatifs à la réduction de rejets des ateliers de traitement de surface.

La méthode que nous avons proposée reprend les différents moyens de réduction des rejets en eau, et ce :

- En diminuant l'entraînement du bain de traitement,
- Par optimisation des rapports de dilution,
- Par ajustement des débits,
- Par modification de la structure des rinçages,

En faisant passer le rapport de dilution de 8000 à 5000, les rejets en effluents passent respectivement de 24000 L/an à 15000 L/an, soit une réduction de 38%.

Sachant qu'actuellement, le traitement de 1 litre d'effluent coûte approximativement 130DA. L'approche économe que nous proposons permet à l'entreprise un gain annuel de 1170000 DA.

Chapitre 6. Traitement des effluents de traitement de surface

6 Traitement des effluents de traitement de surface

6.1 Introduction

L'évolution récente des normes de rejets industriels, notamment dans le domaine de traitement de surface, a conduit au développement de nouveaux procédés de traitement. Ces normes sont particulièrement contraignantes pour les métaux lourds. La réglementation Algérienne impose des contraintes plus drastiques sur les rejets admissibles au milieu naturel.

L'élimination des composés oxydables particulièrement organiques par adsorption et par oxydation et la précipitation des hydroxydes métalliques a été largement privilégiée. La mise en œuvre de nouveaux procédés visant à réduire ou à supprimer tout rejet liquide est préconisée. Parmi ces nouveaux procédés alternatifs aux procédés conventionnels de précipitation ou à l'usage de résines échangeuses d'ions, l'utilisation de matériaux d'origine naturelle a été largement étudiée.

Parmi ces nouveaux matériaux adsorbants figure les biomasses fongiques, algales, bentonite ainsi que des biopolymères issus de ces supports (chitine, chitosane, alginate ...). Les propriétés complexantes ou d'échange d'ions de ces matériaux permettent d'expliquer l'intérêt de l'utilisation de ces nouveaux matériaux adsorbants. Ils constituent par ailleurs des matériaux renouvelables, biodégradables et biocompatibles avec l'environnement : cela s'inscrit dans une démarche de développement durable.

Ce chapitre est divisé en trois parties :

- La première partie de ce chapitre donne un aperçu sur les techniques de traitement des eaux métallifères ;
- La deuxième partie traite la méthode de détermination du paramètre Indice Permanganate IP ;
- Dans la troisième partie de ce chapitre, nous avons cité les conditions opératoires des essais d'adsorption, des essais d'oxydation et de précipitation des différents bains issus des opérations de décapage chimique et de l'NDT. Ces essais ont été réalisés en mode discontinu (batch) entre autre l'influence des différents paramètres tels que la dose d'adsorbant, la dose d'oxydant, le temps de contact, la température sur la matière oxydable par le permanganate de potassium.

6.2 Les procédés de traitement des rejets de traitement de surface

L'élimination des effluents de traitement de surface peut recourir à des techniques très diverses selon que l'on s'intéresse uniquement à l'épuration de la solution et/ou à la concentration et à la séparation des différents éléments dans le but de les recycler. Les techniques les plus employées sont présentées ci-après.

6.2.1 Précipitation

La précipitation consiste en une transformation de composés métalliques fortement dissociés (sels en solution) en composés très peu solubles qui peuvent être récupérés par des techniques classiques de séparation liquide-solide tels que la filtration, la sédimentation ou encore la flottation.

6.2.1.1 Précipitation des hydroxydes

Dans cette technique, les effluents contenant les métaux lourds sont traités par ajout de soude ou de chaux. Le pH de l'eau contaminée est ajusté pour permettre la précipitation des hydroxydes. La plage optimale de pH est déterminée en fonction des produits de solubilité.

Dans le cas de solutions contenant plusieurs métaux, le traitement peut nécessiter plusieurs étapes. La présence d'agent complexant gêne la précipitation (formation de complexes solubles). Ce traitement génère des boues (transfert de phase du polluant) qu'il faut déshydrater puis éliminer. Cette dernière contrainte est la plus pénalisante.

6.2.1.2 Précipitation des carbonates

La précipitation des carbonates est une technique efficace et alternative à la précipitation des hydroxydes. Cette technique peut être réalisée en utilisant le carbonate de sodium.

Parmi les principaux avantages de la précipitation par les carbonates par rapport à la précipitation par les hydroxydes on peut citer :

- Meilleure efficacité à des pH faibles
- Plus grande facilité de traitement des précipités

Contrairement à la précipitation par les hydroxydes, cette technique est peu appropriée dans le cas du nickel et du zinc. Le traitement du cadmium et du plomb par cette

technique est plus rentable et permet d'atteindre des concentrations résiduelles plus faibles.

6.2.1.3 Précipitation des sulfures

Il existe deux procédés de précipitation des sulfures (US EPA, 1980) :

- Précipitation par les sulfures solubles
- Précipitation par les sulfures insolubles

Les avantages de la précipitation des sulfures sont :

- La récupération élevée du métal
- La cinétique de la réaction
- La possibilité de séparation sélective
- La faible sensibilité à la présence d'agents complexants
- Le volume des précipités plus faible par rapport à la précipitation par les hydroxydes

Les limitations de cette technique sont la toxicité des sulfures et la nécessité de traiter l'excès avant le rejet au milieu naturel.

6.2.1.4 Précipitation des xanthates

Dans cette technique, les ions métalliques sont échangés par les ions sodium du xanthate pour former un complexe insoluble. Le xanthate est un composé organique sulfoné. Le processus de la précipitation du xanthate peut s'écrire :



Avec M^+ et M^{2+} des cations mono et divalents respectivement. Il faut noter aussi que cette technique est réalisée à pH élevé (milieu basique).

Les principaux avantages de cette technique par rapport à la précipitation des hydroxydes sont :

- La récupération plus élevée du métal
- La faible sensibilité aux fluctuations des valeurs de pH
- La faible sensibilité à la présence d'agent complexant
- La possibilité de récupération sélective des métaux

La principale limitation de cette technique est liée au coût de traitement, en particulier pour des concentrations élevées en métaux (par exemple supérieures à 100 mg/L).

6.2.1.5 Le procédé combiné

En général, le traitement du métal se fait en utilisant une combinaison de techniques de précipitation. Pour un agent précipitant donné, la précipitation est généralement effectuée à un pH fixé : la précipitation des hydroxydes est possible pour des pH supérieurs à 6, alors qu'en milieu acide seule la précipitation des sulfures est possible (éventuellement par les xanthates).

Pour améliorer la performance de la technique de précipitation pour le traitement des métaux lourds, plusieurs études ont été orientées vers la synthèse de nouveaux agents précipitants.

Esalah et coll. (2000) ont synthétisé un composé, le di-(n-octyl) phosphinate de sodium, pour le traitement d'effluents chargés en plomb. Ils ont identifié les principaux paramètres contrôlant les performances de précipitation (pH, concentration en chlorure, concentration en calcium) et proposé un modèle. Matlock et coll. (2001) se sont intéressés au traitement du mercure et du plomb, par le 1,3-benzènediamidoéthanthiol (BDETH2). Ce nouveau produit permet de former des précipités stables avec Pb et Hg dont la récupération excède 90 % pour $4 < \text{pH} < 6$.

6.2.2 Cémentation

La cémentation ou dépôt oxydo-réducteur est une application particulière des réactions chimiques d'oxydo-réduction. Un corps métallique noble, oxydé et dissous, est réduit par un autre corps métallique ajouté à la solution sous forme de suspension.

Le premier corps se dépose après réduction sur les particules du second dont une partie dissoute passe en solution sous forme oxydée.

La cémentation peut être utilisée dans le traitement des effluents des ateliers de cuivrage chimique (fabrication des circuits imprimés, etc.). Le cuivre qui est complexé par l'EDTA est récupéré sur des copeaux de fer.

6.2.3 Échange d'ions

Ce procédé est surtout utilisé pour les eaux métallifères originaires des traitements métalliques de surface, tel que la galvanoplastie qui produit des eaux chargées en cyanure, en cuivre, en nickel ou en cadmium ; ou originaires des industries électroniques et photographiques chargées en or ou en argent. Un échangeur d'ion est une résine ou matrice comportant à sa surface des ions déplaçables de même charge que l'ion que l'on désire éliminer.

On distingue 04 types de résine :

- SO_3^- qui caractérise une résine cationique fortement acide ;
- CO^- qui caractérise une résine cationique faiblement acide ;
- NR_3^+ qui caractérise une résine anionique fortement basique ;
- NR_2H et NRH_2^+ qui caractérise une résine anionique faiblement basique.

Cette technique présente quelques inconvénients qui limitent son champ d'application :

- Coût relativement élevé du traitement
- Colmatage éventuel des colonnes par des impuretés organiques ou colloïdales (huiles, graisses, argiles ..., nécessitant une préfiltration)
- Fonctionnement pseudo-continu en raison des cycles réguliers de régénération des résines
- Poste main-d'œuvre important si l'installation n'est pas automatisée.

6.2.4 Électrolyse

L'électrolyse sert à récupérer un métal à partir de sa solution ionique. Une cellule électrolytique comporte deux électrodes plongées dans la solution métallique, caractérisée par sa conductivité ionique. Si l'on applique aux bornes de cet ensemble une différence de potentiel, la dissociation des ions permet le passage d'un courant électrique.

Sous l'influence du champ électrique, les anions migrent vers l'anode tandis que les cations métalliques se dirigent vers la cathode.

6.2.5 Coagulation-floculation

Dans des eaux turbides, les colloïdes et particules forment entre elles et avec l'eau un système très stable grâce à des forces attractives et répulsives en équilibre. La déstabilisation de ce système est possible par l'ajout d'un coagulant, substance chimique qui permet le changement du contenu en électrolytes du système le rendant, ainsi instable.

Cette instabilité engendre l'agrégation des particules ou colloïdes en formant des floes facilement et rapidement décantables.

Le procédé de coagulation floculation est utilisé afin de piéger les matières en suspension (colloïdales ou particulaires) d'une eau pour qu'elles puissent y être séparées mécaniquement par une simple décantation.

Les coagulants généralement utilisés sont des sels métalliques de fer ou d'aluminium, qui permettent de neutraliser les charges de surface des matières en suspension, et donc de déstabiliser le système. Parfois on a recours à des additifs tels que l'alumine activée ou certaines argiles, qui améliorent l'agglomération des particules positivement ou négativement chargées. Sont aussi utilisés des polymères organiques, polyioniques ou neutres comme flocculant à l'exemple de l'amidon ou du chitosane.

En ce qui concerne la pollution métallique, ce procédé permet souvent d'éliminer les formes précipitées des métaux, ou celles liés aux matières en suspension en s'adsorbant sur les solides flocculés.

6.2.6 La flottation

Cette technique repose sur l'emploi de tensioactifs. Elle est particulièrement indiquée pour le traitement de grands volumes d'eaux faiblement à moyennement chargées. Il est, de plus, souvent bénéfique d'associer coagulation et flottation (Gouchet, 1990). Cette technique est principalement appliquée dans les procédés de concentration de l'industrie minière (hydrométallurgie).

6.2.7 Les techniques membranaires

Connues depuis longtemps, ces techniques tendent actuellement à être utilisées pour la récupération de cations métalliques. Elles ne nécessitent pas d'ajout de produits chimiques et ne détruisent pas les produits traités. Ces procédés sont intéressants pour le recyclage.

6.2.8 Adsorption

L'élimination des métaux dissous ou des composés organiques dans l'eau par adsorption requiert la mise en contact d'un matériau adsorbant avec les ions en solution ou adsorbats ; au bout d'un certain temps de contact l'adsorbant retient à sa surface les

adsorbats ; la rétention est assurée par différents mécanismes selon la nature du matériau : échange ioniques, complexation ou encore précipitation à la surface.

Les adsorbants utilisés industriellement pour l'adsorption des métaux lourds et/ou des composés organiques sont : le charbon actif, les oxydes et hydroxydes métalliques (alumine activée, oxyde de fer, hydroxydes d'aluminium...), ainsi que certaines zéolites.

Le recours à la biosorption ces dernières années est de plus en plus marqué. Il s'agit d'une adsorption sur des supports d'origines biologiques (biomasse ou biopolymères). Les nombreuses études faites dans le domaine sont favorisées par les bonnes capacités épuratoires, le faible coût, et la disponibilité de ces biosorbants.

6.2.9 Oxydation

Deux types d'oxydation pour le traitement des eaux et des effluents industriels :

- Par voie biologique
- Par voie chimique conventionnel

Actuellement, on s'oriente de plus en plus vers l'utilisation des procédés d'oxydation avancée (POA). Les POA peuvent être subdivisés en quatre groupes :

- Les procédés d'oxydation chimique en phase homogène ($\text{H}_2\text{O}_2/\text{Fe}^{2+}$ et $\text{H}_2\text{O}_2/\text{O}_3$),
- Les procédés photocatalytiques en phase homogène et/ou hétérogène ($\text{H}_2\text{O}_2/\text{UV}$, O_3/UV et $\text{Fe}^{2+}/\text{H}_2\text{O}_2/\text{UV}$; TiO_2/UV),
- Les procédés d'oxydation sonochimique,
- Et les procédés d'oxydation électrochimique.

6.3 Détermination de l'Indice de permanganate

6.3.1 Introduction

Ce test à caractère conventionnel a pour but d'approcher la teneur en matières organiques présentes dans les effluents.

Il est utilisé dans le suivi de la qualité des eaux superficielles, mais aussi pour celui des eaux potables.

Quelques substances réductrices non organiques peuvent s'interférer (NO_2^- , Fe^{2+} ...) et beaucoup de composés organiques ne sont que partiellement oxydés lors de ce test. Malgré cela, l'analyse des eaux naturelles fait souvent apparaître une relation entre l'indice

permanganate et la teneur en carbone organique dissous (COD) des eaux, qui varie entre 1 et 2 mg d'oxygène par mg de carbone.

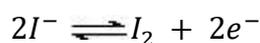
L'indice permanganate d'une eau est la concentration en masse d'oxygène en relation avec la quantité d'ions permanganate consommée par un échantillon d'eau, dans des conditions définies. Exprimé en mg/L d'oxygène, il correspond à une mesure conventionnelle pour évaluer la contamination d'un échantillon d'eau chargé en matière organique.

6.3.1.1 Principe

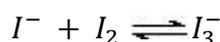
Le test consiste à mesurer en milieu acide la quantité d'oxygène utilisée pour la réduction du permanganate de potassium par les matières oxydables contenue dans une eau.

Le couple redox mis en jeu est I_2/I^- .

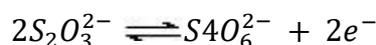
En présence d'un oxydant, les ions I^- incolores sont oxydés en I_2 de couleur brune :



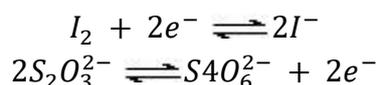
L'iode étant très peu soluble, il faut impérativement ajouter un excès de I^- qui forme un équilibre avec I_2 pour former I_3^- très soluble :



L'iode libérée est ensuite dosé par du thiosulfate de sodium :



Le bilan de la réaction est :



La réaction globale est :



Il est alors aisé de remonter à la concentration de l'oxydant initial qui est le $KMnO_4$.

La zone de virage (passage du jaune clair dû à I_2 à l'incolore) est mise en évidence grâce à l'ajout de quelques gouttes (3 à 4) d'empois d'amidon qui prend une teinte bleutée.

6.3.1.2 Réactifs

- Eau déionisée ou de qualité équivalente dont la consommation en permanganate est négligeable.
- Acide sulfurique 1N.
- Permanganate de potassium en poudre 0.01N.
- Iode de potassium en poudre 0.01N.
- Thiosulfate de sodium 0.01N.
- Amidon.

6.3.2 Essai de traitement des bains usés de l'NDT

6.3.2.1 Oxydation du bain NDT par le permanganate de potassium

6.3.2.1.1 Étude de l'effet du temps de contact sur la réaction d'oxydation de la matière réductrice par le permanganate dans le bain NDT.

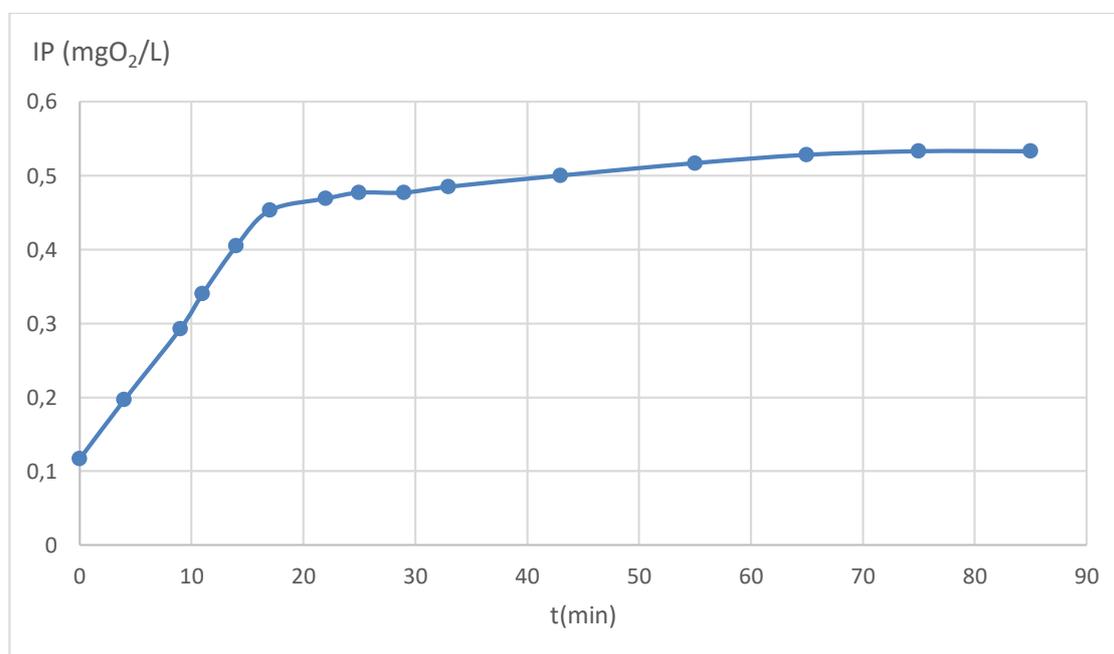


Figure 6.1 Évolution du temps de contact sur l'indice de permanganate (pHi = 7, T=45°C, [KMnO₄]₀=1,3.10⁻³ mol/L)

La cinétique de la réaction d'oxydation de la matière réductrice par le permanganate dans le bain NDT est influencée par la nature du substrat et les conditions opératoires. Il est important de déterminer le temps nécessaire à la réalisation de la réaction d'oxydation par les ions permanganate. Nous constatons d'après la figure (6.1) que la réaction d'oxydation est relativement rapide durant les 20 premières min et puis se

stabilise après 60 min de contact autour de IP égal à 0,54 mgO₂/L. cette réaction chimique reste toutefois lente en comparaison avec d'autres types de polluants, ce qui peut nous renseigner sur le degré de stabilité des polluants existants dans nos bains usés.

Le temps de 60 min sera retenu pour la détermination du paramètre indice IP pour la suite de nos essais.

6.3.2.1.2 Influence de la température et de la concentration en permanganate sur la réaction d'oxydation

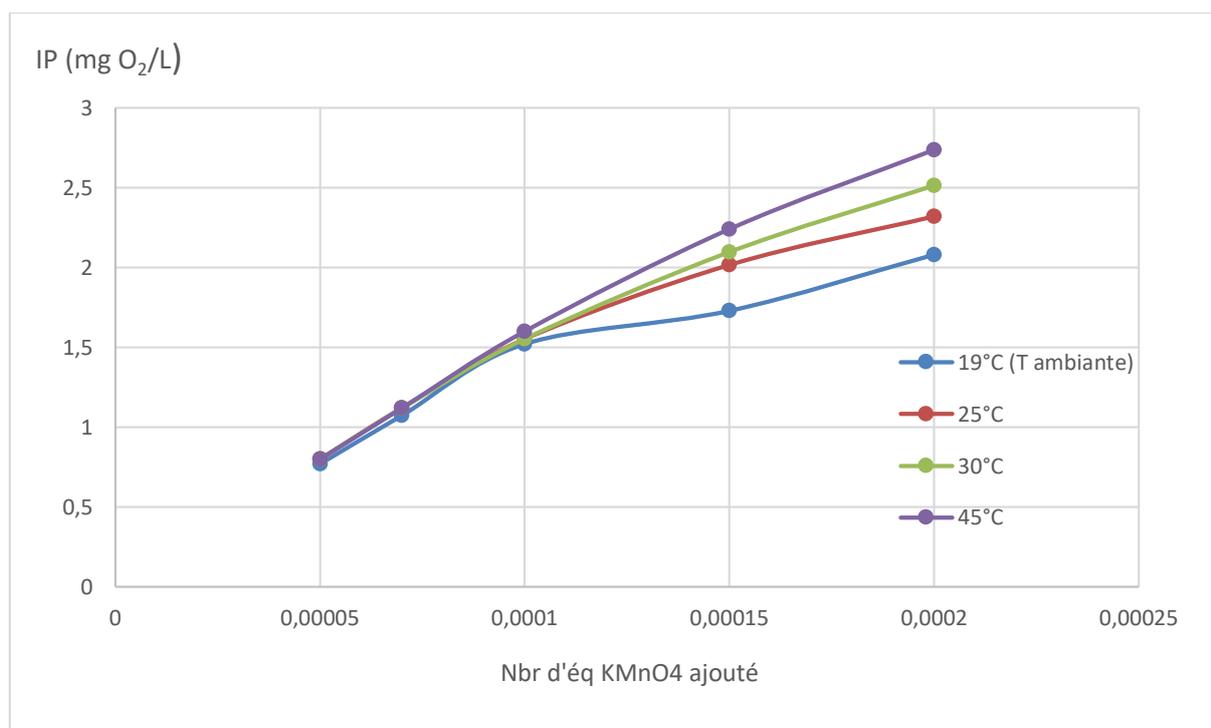


Figure 6.2 Influence de la température et de la quantité du KMnO₄ sur IP

La figure (6.2) montre l'influence de la concentration des ions permanganate et de la température sur l'indice IP pour un temps de contact de 03 heures. Nous constatons que plus la quantité des ions permanganate augmente et plus la quantité réagit en matière réductrice, particulièrement de la matière organique, augmente.

Notons que l'élévation de température influe de manière favorable sur la réaction entre le permanganate et la matière organique présente dans les effluents industriels, sachant que la réaction d'oxydation est une réaction exothermique et ne demande pas d'apport de chaleur, nous pouvons expliquer cela par le fait que l'élévation de la température entraîne une déstabilisation des polluants organiques présents dans les effluents, ce qui facilite la réaction d'oxydation.

On note que l'augmentation de température de 19 à 45 °C, IP passe respectivement de 2,2 à 2,7 mgO₂/L, soit une augmentation de 19%.

Nous constatons par ailleurs une augmentation de l'indice IP et ce quel que soit la quantité de l'oxydant ajoutée pour les différentes températures du bain.

Les matières organiques, sont des matières oxydables qui nécessitent pour leur décomposition une certaine quantité d'oxygène. Elles vont appauvrir le milieu naturel en oxygène, c'est pourquoi elles sont considérées comme des matières polluantes. Deux paramètres permettent d'évaluer la teneur en matières organiques : la DCO et la DBO₅.

La Demande Chimique en Oxygène s'exprime en milligramme par litre (mg/l) d'oxygène et correspond effectivement à la quantité d'oxygène nécessaire pour oxyder dans des conditions opératoires définies, les matières réductrices (organiques et inorganiques) présentes dans un échantillon donné.

La Demande Biochimique en Oxygène exprime le phénomène d'auto-épuration dans les eaux résultent par la dégradation des charges organiques polluantes par les micro-organismes. L'activité de ces derniers tend à consommer de l'oxygène et c'est cette diminution de l'oxygène dans le milieu qui est mesurée par la DBO₅.

La DCO représente l'ensemble des matières oxydables et la DBO₅ représente la part des matières organiques biodégradables.

La différence entre la DCO et la DBO₅ représente la charge en matières organiques peu ou pas biodégradable.

La DBO₅ d'une eau de surface non polluée varie entre 2 et 20 mg/L. Les mesures qui vont au-delà indiquent alors que l'eau est polluée. C'est le cas de nos bassins, la DBO₅ est supérieure à 30 mg/L.

Le rapport DCO / DBO₅ donne aussi un indice sur la provenance et l'origine de la pollution organique. On distingue :

- Un rapport DCO / DBO₅ proche de 1 indique une très bonne biodégradabilité (lait, yaourt).
- De 1 à 2 : eaux usées provenant d'industries agroalimentaires, qui contiennent des éléments dont les bactéries raffolent, se traduisant par une DBO₅ élevée.

- De 2 à 3 : eaux résiduaires urbaines.
- De 3 à 4 : Eaux usées moins facilement biodégradable.
- >4 : Effluent difficilement biodégradable

D'après les analyses effectuées sur les bains NDT, nous constatons que le rapport DCO/DBO₅ est supérieure à 10, ce qui indique que les eaux usées sont difficilement biodégradables et que les matières polluantes organiques sont réfractaires. Par conséquent, il y a nécessité d'utiliser d'autres procédés tels que les procédés d'oxydation avancée (POA) pour la destruction des composés organiques polluantes réfractaires.

Ces POA ont vu le jour vers les années 1970. Actuellement, ces procédés sont en pleine expansion dans le domaine des technologies environnementales. La plupart d'entre eux nécessitent en général moins de réactif et sont faciles d'automatisation par comparaison aux autres. De nombreuses études réalisées à différentes échelles ont clairement prouvé l'efficacité des POA pour le traitement de divers effluents.

Dans ce qui suit, nous allons réaliser les essais d'élimination des polluants à la température ambiante autour de 20°C qui est celle des bains usagés.

6.3.2.2 Essai d'adsorption des bains NDT

6.3.2.2.1 Les matériaux adsorbants utilisés dans nos essais

Deux types d'adsorbants ont été utilisés pour cette étude à savoir : Charbon actif en poudre et en grain et la bentonite sous forme de poudre.

Les argiles que nous avons utilisées sont des bentonites riches en montmorillonite et provenant du Nord – Ouest de l'Algérie.

Actuellement, l'Algérie dispose de deux gisements :

- La première bentonite provient du gisement de M'Zila (Mostaghanem). C'est une bentonite calcique, de couleur gris clair, légèrement bleuâtre à l'état sec et verdâtre à l'état humide.
- La seconde bentonite provient du gisement de Hammam Boughrara (Maghnia). C'est une bentonite sodique, de couleur blanche.

Les tableaux (6.1) et (6.2) présentent quelques caractéristiques de ces bentonites.

Tableau 6.1 Caractéristiques physico – chimiques des bentonites (Seghairi, 1998)

Bentonites	Surface spécifique (m ² /g)	pH	Cations échangeable (meq/100g)			
			Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺
Mostaghanem	65	9.1	46.7	8.1	7.8	6
Maghnia	80	6.2	30.6	12.8	36.2	9.5

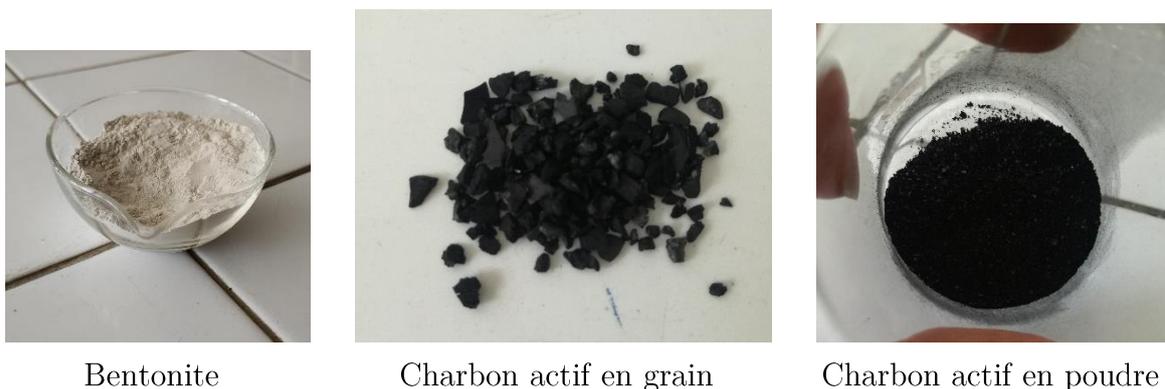
Tableau 6.2 Composition chimique (en %) des bentonites (Bendjama, 1982)

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O
Mostaghanem	64.63	14.35	3.44	4.02	3.35	1.5	1.01
Maghnia	58.61	21.18	2.22	1.23	5.33	1.5	1.05

La bentonite utilisée dans notre cas est celle provenant du gisement de Mostaghanem (figure 6.3).

La structure du charbon actif est voisine de celle du graphite. Elle se présente sous la forme d'un empilement de couches successives planes d'atomes de carbone ordonnés en hexagones réguliers. La surface spécifique est la caractéristique essentielle pour permettre l'adsorption des solutés. Cette surface varie de 500 à 1300m²/g.

La figure (6.3) nous donne les aspects externes des matériaux adsorbants utilisés.

**Figure 6.3 Aspects externes des matériaux adsorbants utilisés.**

6.3.2.2.2 Effet du temps de contact adsorbant - adsorbé

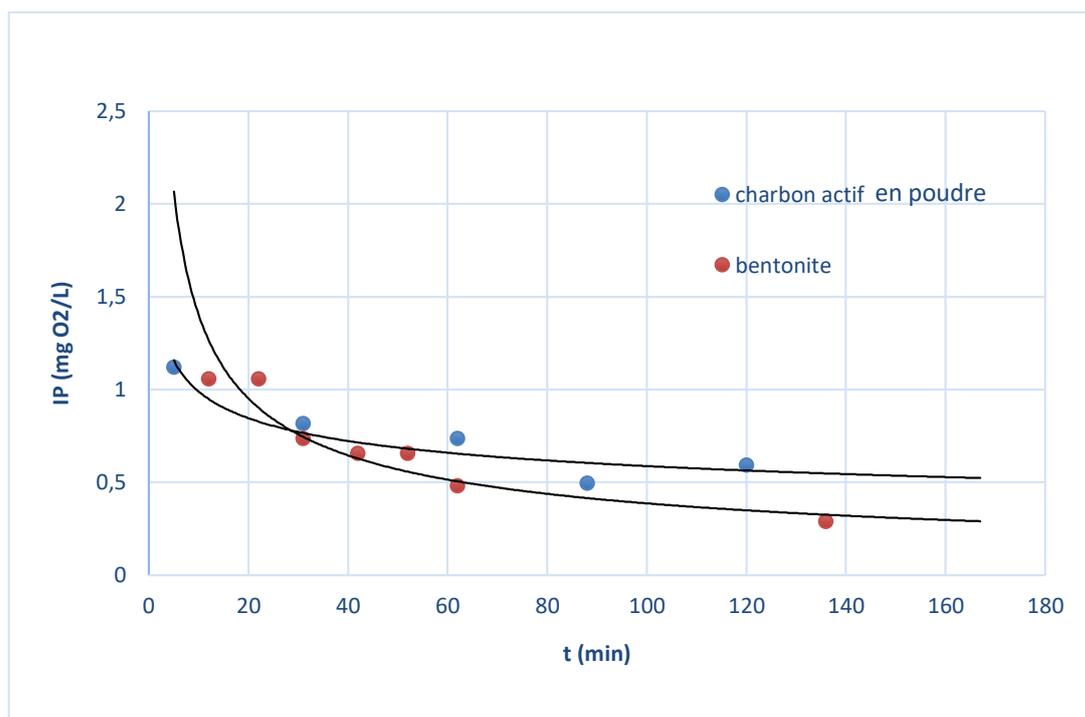


Figure 6.4 Influence du temps de contact sur IP (charbon actif en poudre et bentonite)

Afin d'étudier l'évolution de l'adsorption des composés adsorbés en fonction du temps de contact et de déterminer le temps nécessaire pour que l'adsorbant soit en équilibre avec la solution pour une concentration initiale donnée, l'adsorption des adsorbés sur les différents adsorbants charbon actif et bentonite a été mesurée en fonction du temps de contact.

Comme le montre la figure (6.4), nous voyons clairement que la quantité des ions adsorbés en utilisant les différents adsorbants augmente avec l'augmentation du temps de contact.

La figure (6.4) montre également trois phases importantes du processus d'adsorption. Dans la première phase, la vitesse d'adsorption a été rapide dans les 20 premières minutes pour les adsorbants. Dans la deuxième phase, la vitesse de l'adsorption commence à ralentir. Dans la troisième phase, l'équilibre est atteint après environ 60 à 90 min pour enfin l'IP se stabilise autour de 0,52 et 0,25mgO₂/L pour les adsorbants charbons actifs en poudre et bentonite respectivement.

6.3.2.2.3 Effet de la concentration d'adsorbant

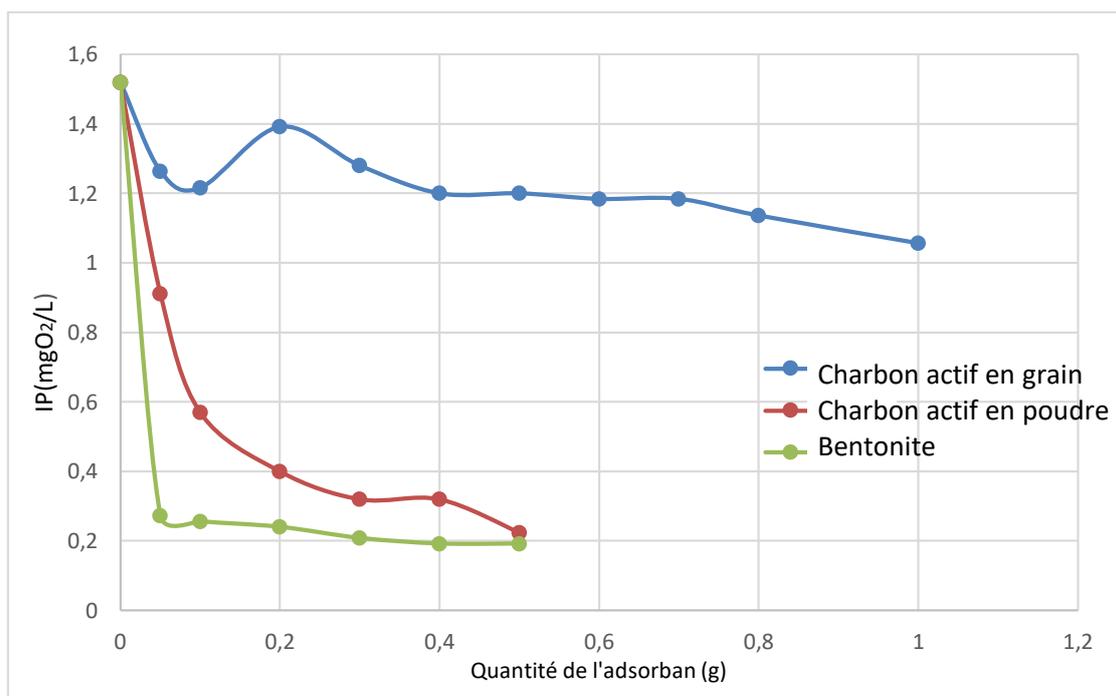


Figure 6.5 Évolution de IP en fonction de la quantité de l'adsorbant pour un volume de solution $V = 10 \text{ mL}$

L'effet de la dose d'adsorbant sur la capacité d'adsorption ou sur le taux d'élimination des composés organiques ont été étudiés sur les adsorbants charbons actifs en grains et en poudre et sur la bentonite.

La figure (6.5) montre que le taux d'élimination des adsorbats a augmenté avec l'augmentation de la dose d'adsorbant. Cela peut être dû à l'augmentation de la surface et du nombre de sites actifs disponibles pour la fixation des constituants organiques présents dans les effluents industriels.

Nous constatons que la bentonite donne des résultats meilleurs relativement aux charbons actifs.

À travers ces résultats, nous constatons que la bentonite donne des rendements d'élimination meilleurs que le charbon actif sous forme de grain et sous forme de poudre.

Par ailleurs, nous constatons que l'adsorption par le charbon en poudre est nettement meilleure que celle du charbon actif en grain. Elle est rapide dans la mesure où une grande partie de la surface de contact est directement disponible, bien que la surface spécifique du charbon en poudre soit inférieure à celle du charbon en grain.

Le charbon actif en poudre est 2 à 3 fois moins cher que le charbon en granulé mais présente un inconvénient technique quant à sa régénération.

6.3.3 Précipitation des ions métalliques dans les bains acides du décapage

Plusieurs ions métalliques sont présents dans les bains de décapage, tels que le cuivre, l'argent, le nickel, le cadmium et le cobalt. Ces ions présentent une forte toxicité dans l'environnement même sous forme de trace. Nous proposons une méthode simple de précipitation qui permet de réduire de manière considérable la teneur de ces éléments dans les eaux industrielles.

On dose une solution acide de M^{2+} (Ion métallique divalent) et ou M^{3+} (Ion métallique trivalent) par une solution de NaOH. Afin d'obtenir plus de renseignements sur la réaction, le dosage est effectué de deux façons : par conductimétrie et par pH-métrie.

Le mélange d'une solution contenant des ions hydroxydes et des ions métalliques tels que Ni^{2+} , Zn^{2+} , Cu^{2+} , Co^{2+} , Cr^{3+} conduit à une réaction de précipitation ; l'équation de réaction associée s'écrit :



L'ajout d'une solution d'hydroxyde de sodium $Na^+_{(aq)} + OH^-_{(aq)}$ dans une solution contenant des ions métalliques conduit à la précipitation des hydroxydes métalliques.

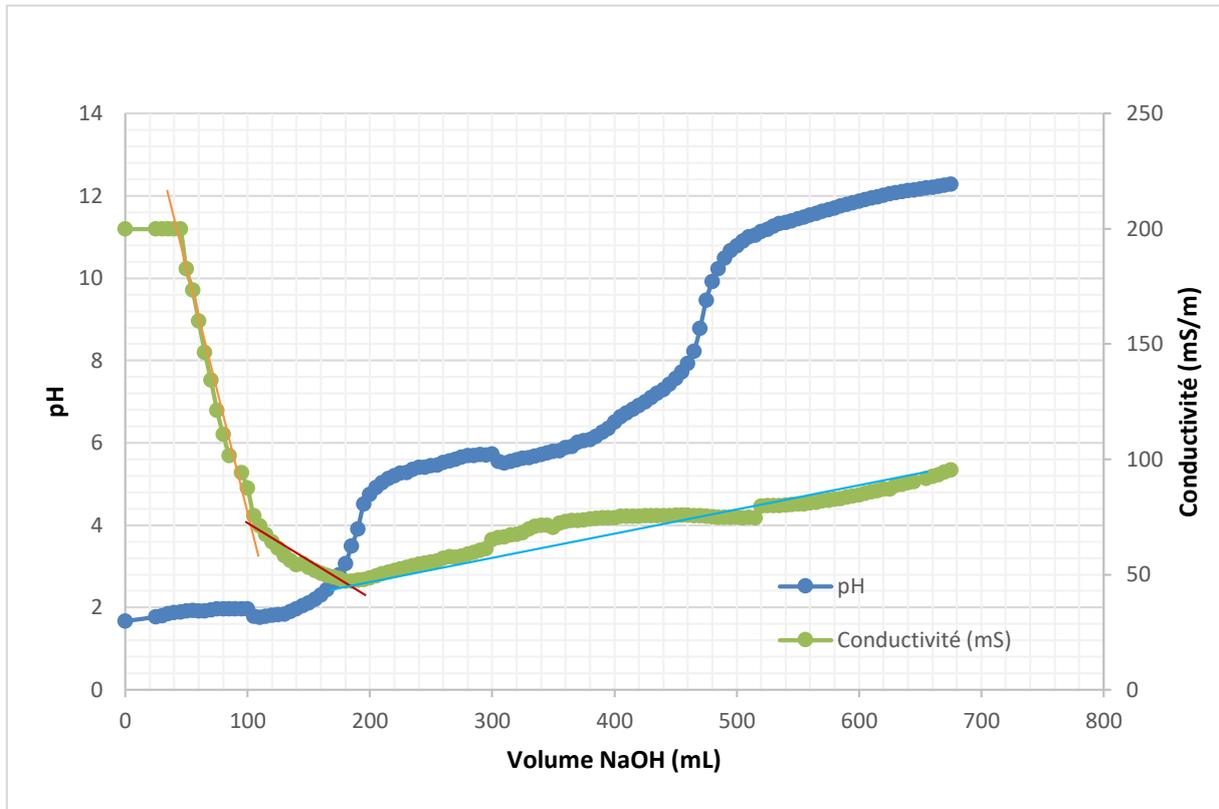


Figure 6.6 Variation du pH et de la conductivité de la solution en fonction du volume de la base du bain de décapage

Nous constatons, d'après la figure (6.6) que l'addition de solution de soude neutralise l'acidité initiale, provoque la formation de précipité (ce qui élimine des ions M^{2+}), et ajoute des ions Na^+ , d'où une variation de la conductivité. Nous constatons aussi que même sans précipitation, l'ajout d' OH^- et Na^+ cause une variation de la conductivité.

On peut prévoir cette variation de la conductivité du mélange réactionnel (donc une variation de la conductance G) due à cette réaction de précipitation.

La conductivité de la solution s'écrit : $\sigma = \sum(z_i c_i \lambda_i^\circ)$

Où

z_i est la charge de l'ion,

$\lambda_i^\circ = \mu_i F$ est la conductivité équivalente limite de l'ion i

c_i est la concentration (μ_i est la mobilité)

Avant l'équivalence, la conductivité varie d'une certaine façon, et après l'équivalence elle varie d'une autre façon.

On peut comparer les pentes des différentes courbes aux valeurs suivantes :

$\lambda_0(\text{Cl}^-) = 76.10^{-4} \text{ S.m}^2.\text{mol}^{-1}$; $\lambda_0(\text{Zn}^{2+}) = 108.10^{-4} \text{ S.m}^2.\text{mol}^{-1}$; $\lambda_0(\text{Na}^+) = 50.10^{-4} \text{ S.m}^2.\text{mol}^{-1}$; $\lambda_0(\text{H}_3\text{O}^+) = 350.10^{-4} \text{ S.m}^2.\text{mol}^{-1}$; $\lambda_0(\text{OH}^-) = 198.10^{-4} \text{ S.m}^2.\text{mol}^{-1}$.

On suit les variations des concentrations en ions (dont M^{2+} et OH^-) au cours de la précipitation des ions M^{2+} avec des ions hydroxyde, sachant pour certains ions métalliques, après précipitation peuvent donner naissance à la formation de complexes :



Nous constatons d'après la figure (6.6) que le domaine de précipitation des métaux présents dans le bain s'effectue dans la gamme de pH compris entre 2 et 3,8. Au-delà de ce pH, il y a augmentation de la conductivité, ceci est due l'augmentation des ions Na^+ et OH^- mais aussi à la redissolution de certains hydroxydes métalliques sous forme de complexes métalliques.

6.4 Conclusion

Après avoir fait ces expériences, nous aboutissons aux résultats résumés comme suit :

- La réaction d'oxydation de la matière organique contenue dans le bain NDT par le permanganate est lente et nécessite une durée de 60 min pour se stabiliser,
- L'augmentation de la température influe de manière favorable sur l'IP dans le bain NDT,
- L'adsorption des polluants contenus dans le bain NDT par le charbon actif et par la bentonite nous donne des résultats très satisfaisants, le taux d'élimination de l'adsorbat augmente en fonction du temps et l'équilibre adsorbat – adsorbant s'établit entre 60 à 90 min,
- La bentonite nous donne des rendements d'élimination meilleurs que le charbon actif sous forme de grain et sous forme de poudre.
- Le taux d'élimination de l'adsorbat augmente avec l'augmentation de la dose de l'adsorbant,
- Pour 30 mL d'eau usée du bassin de décapage, il faut 0,0425 équivalent gramme de soude pour assurer sa neutralisation complète, soit 1,42 équivalent gramme de soude par litre d'effluent.
- La précipitation des ions métalliques contenus dans les eaux du bassin de décapage sous forme d'hydroxyde est possible dans l'intervalle de pH compris entre 2 et 3,8, ce qui peut faciliter la séparation des précipités.

Conclusion générale

Conclusion générale

La démarche mise en œuvre incluant à la fois, une analyse de risque liée à une fuite des produits et/ou déchets, une minimisation considérable de la quantité d'eau de rinçage, et enfin, le traitement physique et chimique des déchets liquides, nous a permis de répondre aux attentes de l'entreprise.

Ce travail avait, en effet, a pour objectif de minimiser la quantité des effluents aqueux générés par les deux stations de décapage chimique et de l'NDT, souvent toxiques pour l'environnement, et de les traiter. Pour se faire, nous avons commencé par une analyse des risques liée à la fuite de produits et/ou déchets liquides par la méthode Add, afin d'établir les causes menant à la fuite de ces liquides et enfin de proposer des barrières de sécurité et des mesures correctives permettant de réduire ces risques. Nous les résumons comme suit :

- Un plan d'urgence décrivant le comportement à adopter et les actions à entreprendre en cas de déversement accidentel des acides et des bases,
- Un bassin de récupération et un remplacement des filtres de manière systématique au niveau de la station NDT.

Nous avons, par la suite, adopté une démarche de gestion de la consommation de l'eau et du polluant (ZYGLO). Cette démarche nous a permis de minimiser la quantité de rejet et ce par :

- La réduction du débit de l'eau de rinçage de $Q = 80 \text{ L/min}$ jusqu'à $Q = 50 \text{ L/min}$, soit un gain de 38%,
- Une augmentation du nombre d'étages des bains de rinçage,
- Ajout d'un mouillant permettant de réduire l'adhésion du pénétrant sur les pièces, et par conséquent la réduction de la quantité d'eau de rinçage,

Nous avons réalisé des essais de traitement de chaque bain (NDT et décapage chimique) :

- Un traitement des bains NDT chimique par permanganate de potassium et physique par adsorption sur charbon actif (en grain et en poudre) et sur la bentonite.
- Un traitement chimique par la soude permettant la neutralisation des acides du bassin de décapage chimique.

Les résultats ont été très concluants quant à l'utilisation de la bentonite, et ce au vu de son efficacité, mais aussi de son prix et de son abondance. Toutefois, La bentonite est disponible sous forme de poudre, ce qui peut poser le problème de sa régénération.

Les essais réalisés par le permanganate de potassium et aussi la détermination des paramètres de pollution (DCO et DBO₅), ont montré que les effluents sont difficilement biodégradables, ce qui nécessite l'utilisation d'un traitement avancé.

Pour les bains de décapage, une neutralisation complète nécessite 1,42 équivalent gramme de soude par litre d'effluent. La récupération optimale des ions métalliques doit se faire dans l'intervalle de pH compris entre 2 et 3,8.

En Perspective :

- Adopter les meilleures techniques disponibles pour la réduction de toutes sortes de déchets ;
- Analyse qualitative et quantitative des éléments métalliques contenus dans les bains de décapage,
- Utilisation des techniques d'oxydation avancée pour l'élimination des composés organiques présents dans les bains NDT,
- Couplage des techniques d'oxydation avancée avec l'adsorption pour l'élimination des composés organiques.
- Récupération des métaux nobles tel que Ni, Cd, Co, Cu, par voie électrochimique.

Bibliographie

BENAISSA, Wassim. EID Internship Report, ALGESCO. Boufarik: 2015. 17 p.

Étude d'impact sur l'environnement. Atelier d'entretien et de maintenance de matériels pétroliers ALGESCO/GE, ALGESCO, 2008.

<https://www.google.com/maps/place/GE+Algesco/@36.5390621,2.8840721,15z/data=!4m12!1m6!3m5!1s0x0:0x2dae8756a7186ab3!2sGE+Algesco!8m2!3d36.5390621!4d2.8840721!3m4!1s0x0:0x2dae8756a7186ab3!8m2!3d36.5390621!4d2.8840721>. Consulté le 23/03/2019, à 00:07.

Test Equipment and procedures, ALGESCO O&G, 2009/2010.

<https://www.spray-nozzle.co.uk/misc-content/about-us/company-info>, consulté le 01/07/2019, à 10:15.

RAMDANE, Brahim. Contribution à la modélisation tridimensionnelle de la technique thermoinductive de contrôle non destructif : Développement d'un outil de conception, d'analyse et d'aide à la décision. 193 p. Thèse de doctorat : électronique et génie électrique : Nantes, Université de Nantes : 2009.

TLILI, Adnene. MARZOUKI, Sofien. SAIDI, Mohamed Najib. KAROUI, Mohamed Faouzi. Cours contrôle non destructif. Institut supérieur des études technologiques de Jendouba, Tunisie, 2006, 52 p.

MATERIAL SAFETY DATA SHEET ZYGLO PENETRANT - ZL-60 D, MAGNFLUX, ITW India, 2015.

CINTECH, Documents propres à CINTECH, 2013.

<https://www.airexindustries.com/fr/produits/depoussiereur/manches-filtrantes>, consulté le 05/03/2019, à 00:35. (AIREX industrie, 2014).

SANCEY, Bertrand. Développement de la bio-adsorption pour décontaminer des effluents de rejets industriels : abattement chimique et gain environnemental. 322 p. Thèse de Doctorat : Écologie, Environnement : France, Université de Franche-Comté : 2011.

NAVARRO, Alain, Gestion et traitement des déchets, Techniques de l'ingénieur, traités Généralités et Construction, 1988.

VILLEMEUR, Alain, Sûreté de fonctionnement des systèmes industriels : fiabilité - Facteurs humains Informatisation. Eyrolles, 2001. 822 p. Direction des études et recherches d'Electricité de France (EDF).

BARBIROLI, Giancarlo. A new method to evaluate the specific and global advantage of a technology. Technovation, 1990. 10(2) : p. 73-93.

BARRAGAN SANTIAGO, Israel. Élaboration de propriétés formelles de contrôleurs logiques à partir d'analyse prévisionnelle par Arbre des Défaillances. 154 p. Thèse de doctorat : Électronique Électrotechnique Automatique, CACHAN, École Normale Supérieure de CACHAN : 2008.

I. EL Hassani, 2015, <https://fr.slideshare.net/ibtissamelhassani13/management-des-risques-ibtissam-el-hassanichapitre8>, consulté le 25/06/2019, à 9:58.

Salvi, O. and E. Bernuchon, Outils d'analyses des risques générés par une installation industrielle. Rapport Ω7, INERIS DRA, 2003.

ISTIA. Arbre de défaillance. s.l. : POPE, 2014. 17 p.

REDJEM, Rania Hassina. TCHIKEKEN, Fahima. Évaluation des risques et amélioration de la prévention dans la station de décapage chimique au niveau d'ALGESCO GE. 140 p. mémoire d'ingénieur : QHSE-GRI : Alger, École Nationale Polytechnique : 2017.

LAFOREST, Valérie. Méthodes de minimisation des rejets et de choix des procédés de valorisation des effluents. Application aux ateliers de traitement de surface. 284 p. Thèse de doctorat : Science et technique de déchets : Saint-Etienne, École Nationale Supérieure Des Mines De Saint-Etienne : 1999.

BREUIL J.N. Ministère de l'environnement, Cahiers techniques de la direction de la prévention des pollutions n°18, Traitement de surface et dépollution à la source, 112 p. Agence de bassin Loire-Bretagne, 1985.

BARA Jean-Claude, Traitement de surface, Environnement et compétitivité, Éditions Eyrolles, 193 p, 1988.

LAFORST Valérie, DEBRAY Bruno, Jacques BOURGOIS. Méthode de réduction des rejets aqueux des ateliers de traitement de surface. ENSM.SE, Centre Simade, Département ingénierie de l'environnement, Saint-Étienne, 1^{er} trimestre, 1998, n° 13, p. 41-46.

Design manual onsite wastewater treatment and disposal systems, united states environmental protection agency,1990,391 p.

GOUCHET Arnaud, Techniques de traitement des effluents, Galvano-organe-traitement de surface, 1990, 981-984 p.

SEGHAIRI Nassima, Possibilités de rétention des matières organiques par adsorption sur la bentonite, Thèse de Magister en Sciences Hydrauliques, Université de Biskra, Algérie, 1998.

BENDJAMA Amar, Étude de la bentonite Algérienne : Application à la décoloration des huiles. Thèse de Magister : Génie chimique : Alger, École Nationale Polytechnique :1981.

Annexe A

Tableau A.1 : Dangerosité des substances chimiques utilisées pour le décapage chimique

	Acide phosphorique	Acide fluorosilicique	Soude caustique
Classe de risque	<ul style="list-style-type: none"> - Corrosif (C) : R34 Provoque des brûlures. 	<ul style="list-style-type: none"> - Corrosif (C) : R34 Provoque des brûlures. 	<ul style="list-style-type: none"> - Corrosif (C) R35 provoque de graves brûlures.
Réactivité	<ul style="list-style-type: none"> - Corrosif ; - Le contact avec des substances métalliques peut libérer de l'hydrogène gazeux inflammable ; - Peut présenter des propriétés comburantes à des températures élevées. 	<ul style="list-style-type: none"> - Très corrosif ; - Peut dégager des quantités importantes en cas de réactions incompatibles ; - Le contact avec les métaux génère de l'hydrogène gazeux inflammable ; - Réagit violemment avec les bases et dégage de la chaleur ; - En réaction avec des cyanures, dégage du gaz de cyanure toxique, en réaction avec des sulfures, dégage du gaz de sulfure d'hydrogène toxique ; - La décomposition thermique par oxydation génère des vapeurs de chlore toxiques et de l'hydrogène gazeux explosif. 	<ul style="list-style-type: none"> - Le produit réagit avec de nombreux métaux pour dégager du gaz d'hydrogène, inflammable et explosif ; - Incompatible avec les comburants puissants, Verre, Combustibles, Substances basiques puissantes, les métaux ; - Les produits libérés au cours de la décomposition thermique sont toxiques et peuvent comprendre : fluorure d'hydrogène, du gaz hydrogène inflammable.

<p>Risque pour les personnes</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Toxicité aiguë - Corrosif pour les voies respiratoires ; - L'inhalation de vapeurs/fumées peut - Causer des difficultés respiratoires. (Edème du poumon) ; - Provoque des brûlures au contact de la peau DL50 (Lapin, voie cutanée) : 2740 mg/kg ; - irritant pour les yeux. 	<ul style="list-style-type: none"> - Les solutions et les brouillards avec un pH de 3 ou moins posent des questions significatives de santé ; - Peut être fatal s'il est inhalé ou avalé ; - Cause de sévères brûlures à la peau et aux yeux ; - Les vapeurs et les brouillards sont extrêmement irritants pour les yeux et les voies respiratoires ; - Peut se décomposer pour donner des gaz toxiques ; - Les contenus peuvent développer de la pression à la suite d'une exposition prolongée à la chaleur. 	<ul style="list-style-type: none"> - Corrosif pour les voies respiratoires ; - Provoque des brûlures chimiques graves au contact de la peau ; - Corrosif pour les yeux (rougeur, mauvaise vue) ; - Très irritant pour le système digestif.
<p>Pour l'environnement</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Le produit cause une baisse considérable de la valeur du pH de l'eau et du sol ; - Le produit provoque une croissance non désirée des algues. 	<ul style="list-style-type: none"> - Le produit peut être nuisible pour la vie aquatique. La toxicité est principalement associée au pH ; - Danger possible en cas d'infiltration des sources d'eau potable. Contamine les eaux domestiques et d'irrigation, les lacs, les étangs, les ruisseaux et les rivières. 	<ul style="list-style-type: none"> - Le produit cause une hausse considérable de la valeur du pH de l'eau et du sol.