

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique



Département MRIE

Filière QHSE-GRI

Mémoire de projet de fin d'études

Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en QHSE-GRI

Maîtrise des risques industriels et environnementaux des incinérateurs de déchets ménagers

Réalisé par : **Mr. Kossai BOUKERKER**
Mr. Med Nadjib HEMICI

Sous la direction de : Me. K. BITCHIKH Docteur / E.N.P.
Me. M. FODIL Maître assistant / E.N.P.

Présenté et soutenu publiquement le (21/06/2018)

Composition du jury :

Président : Me C. BOUTEKEDJIRET Professeur / E.N.P.
Examineurs : Mr. A. CHERGUI Professeur / E.N.P.
Rapporteur : Me. K. BITCHIKH Docteur / E.N.P.
Me. M. FODIL Maître assistant / E.N.P.

ENP 2018

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique Ecole
Nationale Polytechnique



Département MRIE

Filière QHSE-GRI

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

Maîtrise des risques industriels et environnementaux des incinérateurs de déchets ménagers

Réalisé par : **Mr. Kossai BOUKERKER**
Mr. Med Nadjib HEMICI

Sous la direction de : Me. K. BITCHIKH Docteur / E.N.P.
Me. M. FODIL Maître assistant / E.N.P.

Présenté et soutenu publiquement le (21/06/2018)

Composition du jury :

Président :	Me. C.BOUTEKEDJIRET	Professeur / E.N.P.
Examineurs :	Mr. A. CHERGUI	Professeur / E.N.P.
Rapporteur :	Me. K. BITCHIKH Me. M. FODIL	Docteur / E.N.P. Maître assistant / E.N.P.

ENP 2018

DEDICACE

Je dédie ce mémoire à :

*Ma très chère mère pour tout son amour et son dévouement, à mon père
qui a toujours été là pour moi.*

*Mes deux frères **Bilel et Raouf***

*Ma chère sœur **Mounira** pour son soutien moral*

*Ma chère **Takoua Elkouloub***

Toute ma famille

Tous mes amis

KOSSAI

DEDICACE

Je dédie ce travail à :

A mes très chers Parents

Saida et Azzedine

*A ma Sœur : **Maria** et son mari **Lotfi***

*A mon Frère : **Amir** et son épouse*

A toute ma famille,

A mes professeurs,

A tous ceux qui m'aiment,

A tous ceux que j'aime,

NADJIB

REMERCIEMENTS

" الحمد لله الذي بنعمته تتم الصالحات "

Nous adressons nos remerciements aux personnes qui nous ont aidées dans la réalisation de ce manuscrit.

En premier lieu, nous exprimons notre reconnaissance à nos promoteurs le Docteur **Karima BITCHIKH** et le Maître-Assistant **Marya FODIL**, pour leurs encouragements, leur soutien académique et moral et leur contribution à l'exceptionnel encadrement dont nous avons bénéficié.

Un grand merci à **Mlle C. BOUTEKEDJIRET** Professeur à l'E.N.P d'avoir accepté de présider ce jury.

Nos remerciements s'adressent également à Mr **A.CHERGUI** Professeur à l'E.N.P d'avoir accepté d'examiner ce travail.

Enfin, nous remercions toute personne ayant participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail **Mr A.CHERGUI** Professeur à l'ENP et **Mr B. BOUBAKEUR** Maître-Assistant à l'ENP, pour le temps qu'ils nous ont consacré, pour avoir partagé leur expertise et pour tous les supports qu'ils ont mis à notre disposition.

ملخص:

يتعلق هذا العمل بالوصف المادي للنفايات الحضرية، ويشرح كيفية تسييرها من قبل الدولة. وكما يبين مختلف الطرق لإنهاء حياتها. وفي هذا السياق، تهدف هذه الدراسة إلى تحديد مختلف أبعاد محطة لحرق النفايات المنزلية وتحليل مختلف المخاطر الصناعية المتعلقة بها حيث حاولنا السيطرة عليها: الحرائق في حفرة التخزين؛ الانفجارات داخل فرن الحرق؛ انتشار الجسيمات السامة والمعادن الثقيلة في الجو.

كلمات مفتاحية:

حرق؛ نفايات حضرية؛ بقايا الحرق؛ فرن؛ حفرة؛ مصفاة كهربائية

Abstract

The current study concerns the physical characterization of household waste, and explains their management by the state. In addition, we have explained how to end the life cycle of this waste. On the other hand, we proposed a design of an incineration unit of household waste.

We have initially analyzed the risks of the incineration unit by using the process hazard analysis (APR), then we tried to control all industrial risks: fires in the pit, explosions in the kiln, dispersion of toxic particles and heavy metals in the atmosphere.

Keys words:

Incineration, household wastes, REFIOMS, clinkers, kiln, pit, electrofilter

Résumé

Le présent travail porte sur la caractérisation physique des déchets ménagers, et explique leur gestion par l'état. Comme nous avons expliqué comment mettre fin au cycle de vie de ces déchets. C'est dans ce contexte que nous avons mené notre design (conception) d'une unité d'incinération de déchets ménagers. Nous avons utilisé par la suite la méthode APR au niveau de l'unité d'incinération afin de déterminer les événements les plus redoutés. Nous avons finalement proposé des mesures de maîtrise des risques telle que : incendies au sein de la fosse, explosions dans le four et les émissions des métaux toxiques dans l'environnement.

Mots clés :

Incinération, ordures ménagers, REFIOM, mâchefers, four, fosse, électro filtre

TABLE DES MATIERES

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES FIGURES

LISTE DES ABREVIATIONS

INTRODUCTION	15
Chapitre 1.1. Définitions et concepts de l'étude	19
1.1.1. Définition	19
1.1.1.1. Déchets solides urbains	19
1.1.2. Origine de la production des déchets	19
1.1.3. Classification des déchets	20
1.1.3.1. La classification des déchets selon leur nature	20
1.1.3.2. La classification en fonction de l'origine du déchet	20
1.1.4. Gestion et caractérisation des déchets urbains solides	20
1.1.4.1. L'enlèvement des déchets solides urbains	21
1.1.4.2. Le transport des déchets ménagers.....	21
1.1.4.3. Fin de vie des déchets	22
Chapitre 1.2. Problématique en Algérie.....	27
1.2.1. Problématique	27
1.2.2. Flux des déchets en Algérie	27
1.2.2.1. Évolution de la composition des déchets en Algérie	29
1.2.2.2. Gestion des déchets ménagers en Algérie.....	29
1.2.2.3. Modes d'élimination des déchets en Algérie	31
1.2.3. Contraintes de gestion des déchets en Algérie.....	31
1.2.3.1. Contraintes économiques	32
1.2.3.2. Contraintes institutionnelles.....	32
1.2.3.3. Un cadre juridique insuffisant et un degré d'application limité.....	32
1.2.3.4. Contraintes financières.....	34
1.2.3.5. Les contraintes techniques	34
1.2.3.6. Les contraintes éducationnelles et sociales	35
Chapitre 1.3. Généralités sur l'incinération	38
1.3.1. Pourquoi l'incinération des déchets ménagers ?	38
1.3.2. Principe de fonctionnement.....	39
1.3.3. Les avantages de l'incinération	40
1.3.4. Inconvénients de l'incinération	40
1.3.5. Produits de l'incinération	41

1.3.6. Principaux types de fours	41
1.3.6.1. Four à grille	41
1.3.6.2. Fours tournants et/ou oscillants.....	42
1.3.6.3. Fours à lit fluidisé.....	43
1.3.6.4. Récapitulatif	44
1.3.7. Procédés de traitement	45
1.3.7.1. Dépoussiérage	45
1.3.7.2. Neutralisation des gaz acides	46
Partie 2. Dimensionnement et maitrise des risques.....	50
Chapitre 2.1. Dimensionnement de l'UIOM.....	50
2.1.1. Introduction	50
2.1.2. Critères de conception.....	50
2.1.3. Choix de la technologie.....	50
2.1.4. Spécifications	52
2.1.4.1. Évaluation de la production d'OM à Sétif	52
2.1.4.2. Hypothèses	55
2.1.5. Dimensionnement de l'unité	56
2.1.5.1. La fosse de réception.....	56
2.1.5.2. Le four à grille.....	57
2.1.5.3. Calcul de débit des fumées.....	63
2.1.5.4. Valorisation énergétique	69
2.1.5.5. Conclusion	72
Chapitre 2.2. Analyse préliminaire des risques.....	74
2.2.1. Introduction	74
2.2.2. Quelques définitions	74
2.2.3. Généralités sur APR.....	74
2.2.3.1. Présentation de l'analyse préliminaire des risques (APR).....	74
2.2.3.2. Objectifs de l'analyse préliminaire des risques	75
2.2.3.3. Différentes étapes de l'APR	76
2.2.3.4. Avantages et limites	79
2.2.3.5. Pourquoi APR ?	80
2.2.4. Analyse fonctionnelle de l'usine.....	80
Chapitre 2.3. Maîtrise des risques	87
2.3.1. Introduction	87
2.3.2. Principaux types d'accidents survenus.....	87
2.3.3. Les incendies	88
2.3.4. Les explosions.....	89
2.3.4.1. L'Arbre des défaillances	90

2.3.4.2. Modélisation de l'accident par PHAST	95
2.3.4.3. Interprétation des résultats	96
2.3.5. Traitement des fumées	97
2.3.5.1. Définition Electrofiltre	97
2.3.5.2. Principe Electrofiltre	97
2.3.5.3. Dimensionnement d'un électro filtre	99
CONCLUSION GENERALE.....	105
BIBLIOGRAPHIE	106
ANNEXE	109

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.2.1 : Évolution des ratios d'émission des DMA	28
Tableau 1.3.1 : Récapitulatif des caractéristiques principales	44
Tableau 1.3.2 : Tableau regroupant les avantages et inconvénients des différentes technologies.....	45
Tableau 2.1.1 : Les DM récupérés à setif	53
Tableau 2.1.2 : Composition chimique des OM	54
Tableau 2.1.3 : Valeurs de J à taux de conversion fixé.....	62
Tableau 2.1.4 : Composition massique des Gaz volatile	68
Tableau 2.1.5 : Caractéristiques courants turbine	69
Tableau 2.2.1 : La grille de fréquence X gravité	78
Tableau 2.2.2 : Échelle semi-quantitative d'occurrence	78
Tableau 2.2.3 : Échelle semi-quantitative de gravité	79
Tableau 2.2.4 : Exemple de grille de synthèse d'une APR	79
Tableau 2.2.5 : Tableau APR	82
Tableau 2.2.6 : Tableau APR	83
Tableau 2.2.7 : Tableau APR	84
Tableau 2.2.8 : Tableau APR	85
Tableau 2.3.1 : Principaux types d'accidents	87
Tableau 2.3.2 : Logique boolienne	93
Tableau 2.3.3 : Données input de la modelisation	95
Tableau 2.3.4 : Effet de suppression pour la vie humaine	96
Tableau 2.3.5 : Effet de suppression pour les structures	96
Tableau 2.3.6 : Débits massique des différents courants	99
Tableau 2.3.7 : Compostions et masse molaire des fumées avant traitement	100
Tableau 2.3.8 : Grandeurs caractéristiques de l'électrofiltre	104

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1.1 : Définition fonctionnelle des déchets	19
Figure 1.1.2 : Cheminement des déchets	21
Figure 1.1.3 : Illustration d'un lieu d'enfouissement	22
Figure 1.1.4 : Fabrication d'un compost	24
Figure 1.1.5 : Illustration d'une station d'incinération	25
Figure 1.2.1 : Evolution interannuelle de génération et de collecte de déchets en Algérie	28
.....	
Figure 1.2.2 : Évolution de la production des DMA en Algérie	29
Figure 1.2.3 : La composition des déchets en Algérie en 2010	29
Figure 1.2.4 : Modes d'élimination des déchets en Algérie	31
Figure 1.2.5 : Diagramme causes-effets appliqué au service de gestion des déchets ménagers en Algérie	36
Figure 1.3.1 : Schéma de principe de fonctionnement	39
Figure 1.3.2 : Schéma de principe d'un four à grille	42
Figure 1.3.3 : Schéma de principe d'un four oscillant	43
Figure 1.3.4 : Schéma de principe d'un four à lit fluidisé	44
Figure 2.1.1 : Schéma de principe	51
Figure 2.1.2 : Schéma bloc de l'unité d'incinération	52
Figure 2.1.3 : Schéma du four de combustion représentant les différentes zones de combustion des OM	52
Figure 2.1.4 : Caractérisation des déchets ménagers et assimilés dans la zone semi-aride	53
.....	
Figure 2.1.5 : Répartition de la réactivité des OM entrantes	54
Figure 2.1.6 : Répartition de la réactivité des OM sortantes	54
Figure 2.1.7 : Déchargement des véhicules de collecte	56
Figure 2.1.8 : Schéma de principe	57
Figure 2.1.9 : Dimensions du four de combustion	58
Figure 2.1.10 : Représentation de la géométrie 3-D de l'incinérateur	59
Figure 2.1.11 : Schéma modélisation du four de combustion	60
Figure 2.1.12 : Représentation de four à grille et la chambre de combustion	62
Figure 2.2.1 : Analyse fonctionnelle de l'usine	81
Figure 2.3.1 : Représentation schématique de la décomposition anaérobie	88
Figure 2.3.2 : Model de fosse – solidworks 2018	89
Figure 2.3.3 : Caisson de fosse – solidworks 2018	89
Figure 2.3.4 : Analyse fonctionnelle d'un bruleur	90
Figure 2.3.5 : Exemple d'un ADD	91
Figure 2.3.6 : Démarche pour l'élaboration d'un arbre des défaillances	92
Figure 2.3.7 : ADD : Perte de confinement de gaz dans le four – arbre analysis	94
Figure 2.3.8 : La surpression en fonction de la distance	96

Figure 2.3.9 : Schéma de traitement de fumée.....	97
Figure 2.3.10 : Schéma de principe électro filtre	98
Figure 2.3.11 : Passage des fumées dans l'électro filtre	98
Figure 2.3.12 : Modèle 3D de l'électrofiltre.....	104

LISTE DES ABREVIATIONS

A.

ADD : Arbre de défaillance

APR : Analyse préliminaire des risques

C.

CET : Centre d'Enfouissement Technique

C : Concentration (mol/m^3)

Cp : Capacité calorifique (J/kg/K)

D.

D (Electro filtre) : Distance fil-plaque (m)

D : Diamètre de l'élément (m)

DH : Chute enthalpique (kJ/kg)

E.

EI : Evènement indésirable

ER : Evènement redouté

G.

GD : Gestion des déchets

g : Accélération de pesanteur (m.s^2)

G : Fonction de transfert

H.

hi : Enthalpie d'une espèce i (kJ/kg)

J.

J : Nombre de réacteurs en série

K.

k_i : Constante cinétique de l'élément i

L.

L : Longueur de l'élément (m)

l : Largeur (m)

M.

MO : Matière Organique

MIOM : Mâchefers d'Incineration des Ordures Ménagers

MATE : Ministère de l'Aménagements du Territoire de l'Environnement

ṁ : Débit massique

M_i : Masse molaire de l'élément i (kg/mol)

N.

N_{rues} : Nombre de rues qui composent l'électro filtre

O.

OM : Ordures Ménagères

P.**PI** : Pays Industrialisé**PED** : Pays En Développement**P** : Puissance (W) **P_{asp}** : Pression à l'aspiration (Pa) **P_{ref}** : Pression de refoulement (Pa)**PCI** : Pouvoir Calorifique Inférieur**PCS** : Pouvoir calorifique supérieur**Q.** **Q_e** : Charge élémentaire **$Q_m = \dot{m}$** : Débit massique (kg/h) **Q_v** : Débit volumique (m³/h)**R.** **r** : vitesse de réaction**REFIOM** : Résidus d'Épuration des Fumées d'Incinération des Ordures Ménagères**S.****S** : Surface (m²)**T.** **t** : Temps**T** : Température (K) **t_{sm}** : Temps de séjour moyen**U.****U** : Energie interne (J)**UIOM** : Usine d'Incinération d'Ordures Ménagères**UVE** : Unité de valorisation énergétique**V.****V** : Volume (m³) **V_{asp}** : vitesse à l'aspiration (m/s) **V_{ref}** : Vitesse de refoulement (m/s)**X.****X** : Taux de conversion de réacteur limitée **x_i** : Fraction massique de l'espèce i

Lettres Grecques

ΔH_r : Enthalpie de réaction (kJ/kg)

ϵ_0 : Permittivité du vide (C²/N/m²)

ϵ_p : Constante diélectrique

η : Rendement

μ : Viscosité (Pa.s)

ρ : Masse volumique (kg/m³)

τ : Taux

ω : Vitesse de migration (m/s)

INTRODUCTION

La gestion des déchets urbains solides figure parmi les sérieux problèmes de propreté urbaine dans les pays en développement. Une part majoritaire de déchets solides collectés en Algérie est constituée de déchets ménagers qui, une fois sur la voie publique, deviennent une propriété de la municipalité qui organise sa collecte régulière.

De nos jours, chaque habitant en Algérie produit 300 kg de déchets par an. Durant les années qui précédèrent, ce volume de déchets a augmenté régulièrement avec les modes de vie liés à la société de consommation. L'augmentation du volume des déchets n'est qu'une conséquence de la modification de notre mode de vie.

La grande majorité des déchets ménagers est mise en décharge sans distinction de leur nature.

A Sétif, par exemple, dans l'Est Algérien, la solution de tri sélectif à la source auprès des ménagers est considérée incontournable pour le recyclage et la minimisation des quantités à mettre en décharge.

L'incinération apparaît en premier lieu comme un procédé permettant de traiter de grandes quantités de déchets en réduisant significativement leur volume. Cependant, elle ne doit pas être limitée à la réduction des déchets en cendres mais doit également prendre en compte les aspects de valorisation (récupération d'énergie sous forme d'eau chaude ou d'électricité et valorisation de certains résidus d'incinération : les mâchefers), de rentabilité économique et d'impact environnemental. Les rejets polluants de ce procédé font en effet l'objet d'une attention particulière, qu'il s'agisse des composés gazeux (CO, NOx, dioxines, furanes), solides (REFIOM, mâchefers) ou de constituants métalliques, car ils présentent un danger pour la santé.

Plusieurs préoccupations majeures dans le domaine de l'incinération des ordures ménagères concernent les risques industriels (Incendies, explosions et les émissions des métaux toxiques dans l'environnement).

L'étude que nous avons menée a pour objectif de pouvoir dimensionner une unité d'incinération sur grille des ordures ménagères (OM) et de mieux comprendre le comportement de ces OM et de leur entrée dans la fosse, jusqu'à la sortie de l'incinérateur. La revalorisation énergétique sera prise en compte.

Le présent mémoire est subdivisé en deux parties, dans la première partie, une étude bibliographique portera d'une part sur la gestion des déchets en Algérie et sur les différentes contraintes existantes. D'autre part, sur les notions de base relatives à l'incinération des ordures ménagères (OM). Nous parlerons aussi du fonctionnement d'un incinérateur, et sur les technologies diverses existantes.

La deuxième partie est consacrée au dimensionnement et à la maîtrise des risques industriels et environnementaux de l'unité d'incinération. Nous analyserons un peu plus en détail les données techniques de l'installation afin de pouvoir dimensionner les divers organes (four et fosse) qui composent l'unité d'incinération pour déterminer les grandeurs physiques (débit de gaz, température, pression, volume du four et débit des fumées de sortie) qui peuvent nous servir dans la maîtrise des risques au niveau de l'unité de l'incinération.

Partie 1 : Contexte de l'étude

Chapitre 1.1 : Définitions et concepts de l'étude

Chapitre 1.1. Définitions et concepts de l'étude

Ce chapitre introductif est consacré aux déchets urbains solides ; leur définition, composition, modes de gestion et traitement.

1.1.1. Définition

Un déchet désigne ordure, immondice, ou tout autre résidu rejeté parce qu'il n'est plus consommable ou utilisable et donc n'a plus de valeur. [1]

Les fonctionnalistes définissent les déchets solides urbains comme étant tout résidu inévitable ou toute matière ou objet provenant d'un processus de production.

De ce point de vu, le déchet est considéré comme un flux de matières issu d'une unité fonctionnelle, représentant une activité ou un ensemble d'activités. [1]

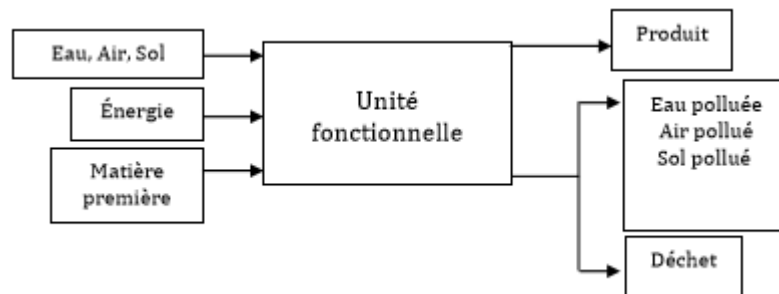


Figure 1.1.1 : Définition fonctionnelle des déchets

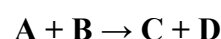
1.1.1.1. Déchets solides urbains [1]

Un déchet solide est défini comme un déchet qui n'est pas à l'état liquide. Le terme déchet solide peut se référer au déchet municipal qui contient sept catégories : résidentiel (ménager ou déchets domestiques), commercial, institutionnel, déchets de nettoyage des voies publiques, déchets de construction et de démolition, déchets hospitaliers, déchets industriels.

1.1.2. Origine de la production des déchets

La production des déchets est inévitable pour les raisons suivantes : [2]

- **Biologique** : Les déchets d'origine biologique sont définis par le fait que tout cycle de vie produit des métabolites (matière fécale, cadavre, etc.).
- **Chimique** : Toute réaction chimique est régie par les principes de la conservation de la matière et dès lors si l'on veut obtenir un produit C à partir des produits A et B par la réaction



D sera un sous-produit qu'il faut gérer si on n'en a pas l'usage évident.

- **Technologique** : Quelles que soient la fiabilité et la qualité des outils et procédés de production, il y a inévitablement des rejets qu'il faut prendre en compte tels que les chutes, copeaux, résidus, solvants usés, emballages, etc.
- **Économique** : La durabilité des produits, des objets et des machines a forcément une limite qui les conduits, un jour ou l'autre à leur élimination ou leur remplacement.
- **Écologique** : Les activités de dépollution (eau, air, déchets) génèrent inévitablement d'autres déchets qui nécessitent eux aussi une gestion spécifique et ainsi de suite.
- **Accidentelle** : Les inévitables dysfonctionnements des systèmes de production et de consommation sont à l'origine des déchets.

1.1.3. Classification des déchets

La classification des déchets n'est pas une chose universelle et facile. Ils peuvent être classés de différentes manières selon les objectifs et selon l'intérêt des informations qui peuvent en être tirées. [1]

1.1.3.1. La classification des déchets selon leur nature [3]

On spécifie trois catégories essentielles

- Déchets solides ;
- Déchets liquides ;
- Déchets gazeux.

Dans ce qui suit, il ne sera considéré que les déchets solides et semi-solides étant donné le contexte et l'objet de l'étude.

1.1.3.2. La classification en fonction de l'origine du déchet

- Déchets ménagers et assimilés (DMA) ;
- Déchets industriels banals (DIB) et spéciaux (DIS) ;
- Déchets de l'agriculture ;
- Déchets de la construction et de la démolition (déchets inertes) ;
- Déchets d'activité de soins (DAS) ou déchets infectieux (DASRI) ;
- Déchets des équipements électriques et électroniques (DEEE) ;
- Déchets de l'automobile.

1.1.4. Gestion et caractérisation des déchets urbains solides

La réglementation algérienne (loi 01-19) définit la gestion des déchets comme «Toute opération relative à la collecte, au tri, au transport, au stockage, à la valorisation et à l'élimination des déchets, y compris le contrôle de ces opérations». [1]

Voici (la figure 1.1.2) qui exprime le cheminement des déchets :

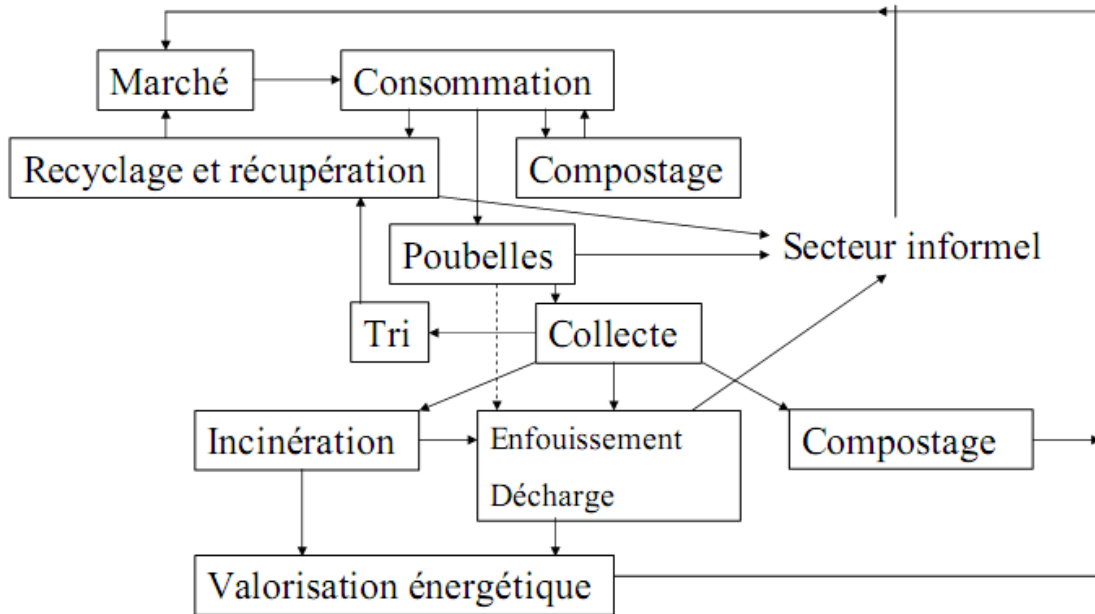


Figure 1.1.2 : Cheminement des déchets [4]

Plusieurs opérations se distinguent dans le mode de gestion des déchets :

1.1.4.1. L'enlèvement des déchets solides urbains

On entend par enlèvement, l'ensemble des opérations ayant pour objet l'évacuation des déchets urbains, lesquelles comprennent : [1]

- La pré-collecte.
- La collecte ou la collecte sélective.

1.1.4.1.1. La collecte des déchets

C'est l'opération de ramassage et/ou le regroupement des déchets en vue de les transférer vers un lieu de traitement. [5]

1.1.4.1.2. Le tri des déchets

C'est la séparation des déchets selon leur nature en vue de leur traitement, par exemple le papier, le plastique... [5]

1.1.4.2. Le transport des déchets ménagers

Le transport est la phase au cours de laquelle les ordures sont acheminées vers une destination appropriée : décharge, usine de traitement, etc. [1]

Pour mener à bien la collecte des déchets ménagers, il faut mettre en place un ensemble de moyens. Une flotte de camions est indispensable, mais il faut aussi distribuer des bacs aux usagers pour la collecte sélective en porte-à-porte et installer des conteneurs dans la ville, pour la collecte sélective en apport volontaire. [6]

Pour fonctionner dans des conditions normales, un service de collecte a besoin : [1]

- De moyens matériels appropriés et en nombre suffisant pour collecter tous les déchets urbains générés ;
- D'une infrastructure d'entretien et de réparation ;
- D'une organisation interne valable et efficace.

1.1.4.3. Fin de vie des déchets

Après leur collecte, les ordures ménagères sont actuellement soit mises en décharge, soit traitées par différents procédés.

Les principaux modes de traitement et d'élimination sont : [7]

- la mise en décharge contrôlée qui représente toujours le principal mode d'élimination des déchets municipaux ;
- l'incinération avec ou sans récupération d'énergie ;
- le compostage ;
- la thermolyse, la méthanisation, le recyclage...

1.1.4.3.1. L'enfouissement technique

L'enfouissement technique peut être représenté comme suit :

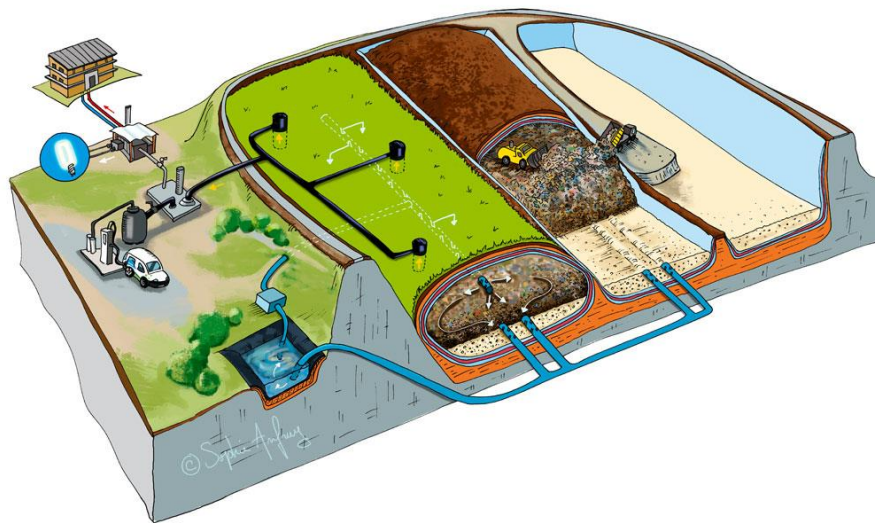


Figure 1.1.3 : Illustration d'un lieu d'enfouissement [4]

On en cite ici les principales étapes de l'enfouissement techniques : [4]

- **Choix du site et conception** : L'installation doit être située au moins à 200 m de toute zone d'habitation ou lieu susceptible d'accueillir du public et être conforme au plan d'occupation des sols.
- Les caractéristiques du sol et du sous-sol doivent répondre à une faible perméabilité (pour assurer la prévention de la pollution des sols et des eaux souterraines par le lixiviat) et à l'aptitude de garantir la stabilité des casiers. D'autres aspects doivent être pris en considération ; tels que la protection des ressources en eau, le patrimoine, l'inondation, les avalanches, etc.

- **Exploitation et suivi du site** : Le suivi des paramètres quantitatifs et qualitatifs relatifs aux flux entrants (déchets, eaux de pluie, etc.) et sortants (lixiviat, biogaz, etc.) permet d'avoir suffisamment d'informations pour une gestion efficace et durable du site. La surveillance doit s'effectuer sur les zones de stockage des déchets (alvéoles d'enfouissement), mais aussi sur les zones de stockage temporaire des déchets avant enfouissement. En plus, cette surveillance doit cibler d'autres lieux sensibles de l'ouvrage (stockage temporaire et traitement du lixiviat, dispositifs de traitement ou de valorisation du biogaz).

Les règles générales d'exploitation sont :

- ✓ Ne peut être exploité qu'un casier ou une alvéole par catégorie de déchet ;
 - ✓ Les déchets sont déposés en couches successives et compactés sur site ;
 - ✓ Les déchets sont recouverts régulièrement de matériaux inertes pour limiter les infiltrations et empêcher les nuisances (envols de déchets, émanations de gaz, etc.).
- **Fermeture des alvéoles** : Dès qu'un casier est rempli, une couverture finale de protection est mise sur les déchets. Ceci permet de réduire les volumes du lixiviat, de faciliter la gestion post-exploitation, de mieux contrôler la migration du biogaz mais surtout d'isoler le massif de déchets de l'environnement extérieur et de limiter ainsi les entrées d'eau.
 - **Suivi post-exploitation** : La production du lixiviat et du biogaz se poursuit très longtemps après la fermeture du site. Une période de suivi est donc prévue par la réglementation qui durera aussi longtemps que la décharge, elle est susceptible de représenter un danger pour l'environnement. Cette période varie selon les pays : elle est de 30 ans aux Etats-Unis et en France. Durant cette période, l'exploitant reste responsable de la gestion de la décharge et assure sa surveillance, son contrôle, son entretien, l'analyse des lixiviats, du biogaz ainsi que la qualité de l'eau souterraine et de ruissellement pour s'assurer de la pérennité du système. La fréquence des analyses physico-chimiques et bactériologiques est moindre par rapport à la période d'exploitation.
 - **Réhabilitation du site** : L'objectif de cette opération est d'intégrer le site dans son environnement paysager et de minimiser les risques d'érosion. Cette réhabilitation se fait par la replantation d'arbres ou d'autres végétations. Pour cela, les conditions pédologiques optimales doivent être fournies et une sélection des plants adaptés aux conditions du milieu doit être opérée.

1.1.4.3.2. Le compostage

C'est un procédé biologique contrôlé de conversion et de valorisation des substrats organiques (sous-produits de la biomasse, déchets organiques d'origine biologique ...) en un produit stabilisé, hygiénique, semblable à un terreau, riche en composés humiques : le compost. Le compostage est une méthode populaire de transformation de certains déchets provenant des jardins, des cuisines, des parcs et l'entretien de lieux publics ou privés, ainsi que les déchets issus de l'agriculture et des forêts.

Au fond, toute MO (matière organique) peut être compostée et le procédé d'élimination bénéfique d'un haut degré d'acceptation par le public aussi bien dans les Pays Industrialisé (PI) que dans ceux en développement. [4]

Le compostage reste cependant économiquement stable dans les pays en développement seulement pour une production minimale de 300 tonnes de compost par jour. Toutefois, le compostage n'est qu'une technologie de conversion de la MO parmi d'autres. Cette filière de traitement des OM, qui s'est beaucoup développée ces dernières années, est considérée aujourd'hui comme un mode de gestion complémentaire important dans la valorisation matière et énergétique essentiellement pour la fraction organique de ces déchets.

On assiste à la phase de compostage dont le principe est basé sur la biodégradation aérobie. Pendant cette phase, l'activité des bactéries aérobies est importante et elle est favorisée par l'oxygène encore présent dans le milieu. Avec le temps, la consommation totale de l'oxygène risque d'entraîner le système vers la méthanisation. En effet, l'absence d'aération (oxygène) entraîne la mort des microorganismes aérobies et l'apparition d'autres espèces bactériennes anaérobies qui achèvent la biodégradation en produisant du méthane ou phase de méthanisation.

En outre, le compostage libère dans l'atmosphère sous forme de gaz carbonique une partie du carbone organique. La méthanisation s'opère en milieu fermé et transforme une partie du carbone en méthane et en gaz carbonique (biogaz). [4]

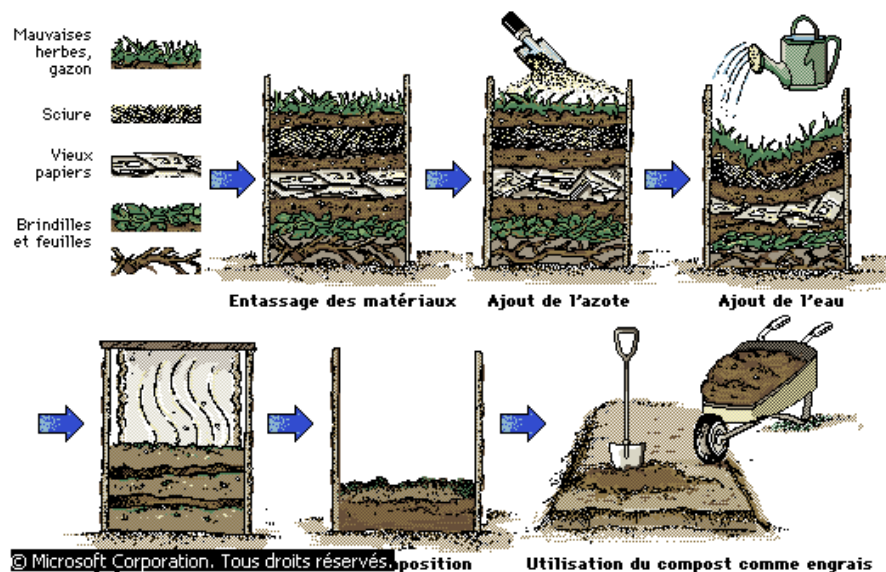


Figure 1.1.4 : Fabrication d'un compost [4]

A l'issue de ces transformations de la matière organique, on obtient un produit appelé **compost** qui peut servir, tel quel ou en mélange avec d'autres produits, d'amendement organique ou de support de végétation. Cependant, l'avenir de cette technique dépend de l'intérêt et de l'usage qui sera fait du produit.

En dehors de son impact positif pour la gestion des déchets, ce compost peut jouer un rôle très important en complément voire en concurrence avec les produits fertilisants habituellement utilisés (eaux usées brutes, fumier, bouses, etc.) en agriculture urbaine.

1.1.4.3.3. L'incinération

L'incinération est un mode de traitement et d'élimination des OM très répandu qui permet la réduction d'environ 90 % du volume et 75 % de la masse des déchets et la destruction complète des bactéries. Elle conduit à la formation de scories, appelés mâchefers d'incinération des OM (MIOM) qui ont l'avantage de pouvoir être valorisées, sous certaines conditions, en travaux publics (remblai et autres). [4]

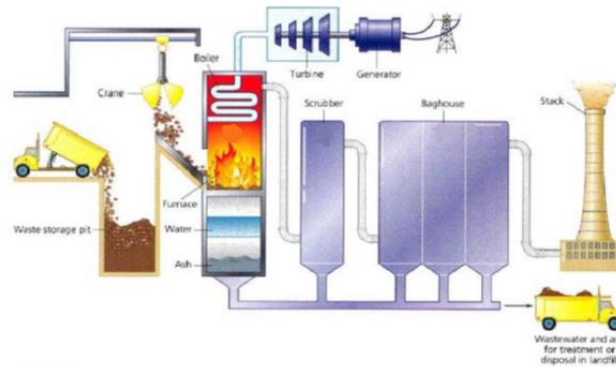


Figure 1.1.5 : Illustration d'une station d'incinération [4]

1.1.4.3.4. Autres techniques de gestion

Enfin, il existe d'autres techniques encore relativement très peu utilisées à cause notamment de la complexité et de la difficulté de la maîtrise de leur procédé. La pyrolyse et la gazéification consistent, respectivement à carboniser (ou chauffer sans brûler) les déchets, en l'absence d'air, à une température de 400 – 800 °C, pour la première, et en présence d'une quantité limitée d'oxygène à une température de 800 -1400 °C pour la seconde. Les gaz issus de la gazéification peuvent être utilisés comme source d'énergie. [4]

1.1.4.3.5. Opportunités et Contraintes

Les différentes techniques présentées montrent des avantages et des inconvénients les uns par rapport aux autres. Vu la complexité de la gestion des déchets en général, il est difficile de hiérarchiser les choix de technologie de traitement en vue d'une standardisation. Cette situation est rendue encore plus difficile dans les PED à cause de la méconnaissance de la quantité et la qualité des refus générés par les ménages de leur évolution, et par la difficulté d'évaluer le potentiel récupéré par le secteur informel qui par nature est peu documenté. Le choix du type de traitement est dicté par le choix politique de chaque pays. Dans les PI, ce choix est de plus en plus imposé par des impératifs environnementaux, plutôt que par contrainte financière comme c'est le cas aujourd'hui dans la majorité des PED. [4]

Chapitre 1.2 : Problématique en Algérie

Chapitre 1.2. Problématique en Algérie

Le développement urbain rapide dans les pays en développement est devenu parmi les sérieux défis environnementaux dans la mesure où il est synonyme de production accrue de déchet urbain. En effet, les déchets solides, résultat des activités domestiques, sociales et industrielles sont en augmentation dans la plupart des pays en développement, en quantité et en composition en raison de la croissance démographique et la hausse du niveau de vie. Parallèlement à cette croissance se pose la question de la gestion des déchets qui ne représente pas une priorité pour la plupart de ces pays, par rapport à d'autres problèmes aussi importants que sont l'éducation, l'approvisionnement en eau et la santé. [4]

1.2.1. Problématique

L'Algérie comme ses voisins africains connaît les mêmes problèmes mais pas avec la même intensité.

Avec l'apparition de nouvelles habitudes de consommation des populations, l'ensemble des villes algériennes doit faire face au phénomène d'une brusque augmentation des quantités de déchets produites. Une dégradation de l'environnement et un risque sur la santé publique en ont résulté. [8]

Pour faire face à cette situation, l'Algérie vise à travers le schéma national d'aménagement du territoire (SNAT) pour 2025 en matière de la politique de la ville à atteindre des objectifs en matière de sécurité et de qualité des services publics : eau, déchets, éducation, santé...

En effet, plusieurs objectifs ont été totalement ou partiellement atteints mais diverses contraintes et limites à cette nouvelle politique ont été relevées.

L'état de l'environnement actuel en Algérie est marqué par cinq facteurs : [5]

- Le problème de la propreté publique,
- L'insuffisance des moyens humains et matériels,
- La saturation des décharges,
- L'augmentation des coûts d'élimination,
- L'augmentation de la production totale par habitant.

1.2.2. Flux des déchets en Algérie

La génération des déchets solides urbains est déjà évaluée à environ 8.5 millions de tonnes par an, soit 23 288 tonnes par jour en 2005, et cette production connaît une progression sensible. Selon le MATE, le seuil des 12 millions de tonnes de déchets solides urbains est certainement franchi en 2010. [5]

La production des déchets DMA est passée de 2,25 millions de tonnes en 1980 à 7,27 millions de tonnes en 2000, pour dépasser le seuil des 12 millions de tonnes en 2007. Parallèlement à ce volume de production, nous constatons aussi une augmentation du volume de collecte qui couvre la totalité des déchets ménagers générés.

La forte progression des déchets collectés s'explique, en grande partie, par l'amélioration des moyens affectés par l'État à cette opération. [1]

En Algérie, les ordures ménagères (OM) représentent 67% des DMA en 2007.

Tableau 1.2.1 : Évolution des ratios d'émission des DMA

	Population en Millions selon ONS.	Ordures ménagères en kg/hab.	Émission totale des DMA en kg/hab.
1994	27,49	159	204
1995	28,06	178	228
1996	28,56	197	252
1997	29,04	201	257
1998	29,50	208	265
1999	29,95	225	285
2000	30,46	242	306
2001	30,91	252	317
2002	31,38	265	333
2003	31,86	277	350
2004	32,35	286	369
2005	32,85	308	391
2006	33,69	338	431
2007	34,40	363	465
Taux de variation annuel moyen	+1,61 %	6,07%	6,06%

Source : MATE, Metap, CNES

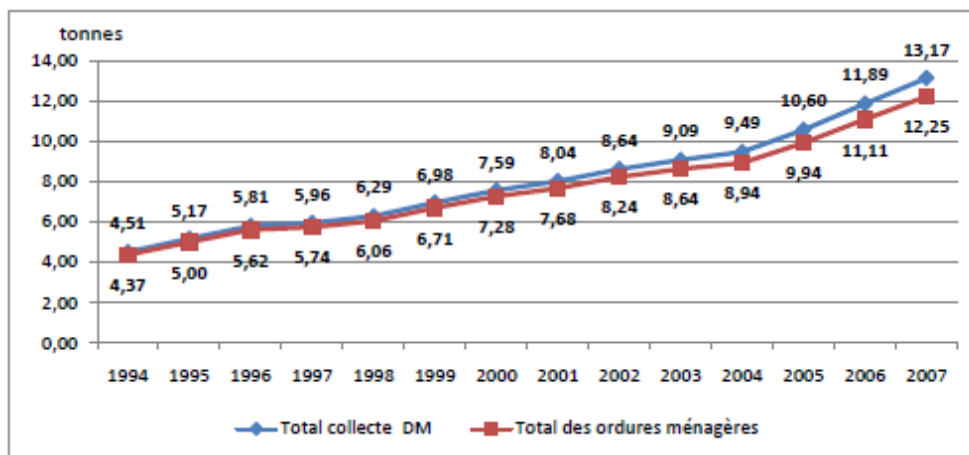


Figure 1.2.1 : Evolution interannuelle de génération et de collecte de déchets en Algérie

Dans l'étude du MATE sur l'état de l'environnement en Algérie, il est indiqué que la production de déchets par habitant dans le milieu urbain est passée de 0,76 kg/jour en 1980 à 0,9 kg/jour en 2002, pour arriver à 1,2 kg/jour en moyenne en 2005. Par contre, nous constatons un écart de près de 30% entre le taux de la collecte des déchets dans les villes moyennes et les grandes villes. [5]

1.2.2.1. Évolution de la composition des déchets en Algérie

Aujourd'hui, La matière organique enregistre en effet, depuis 1980, une baisse substantielle au profit d'autres produits d'emballages comme les papiers et cartons, les plastiques et l'apparition de textiles sanitaires. [5]

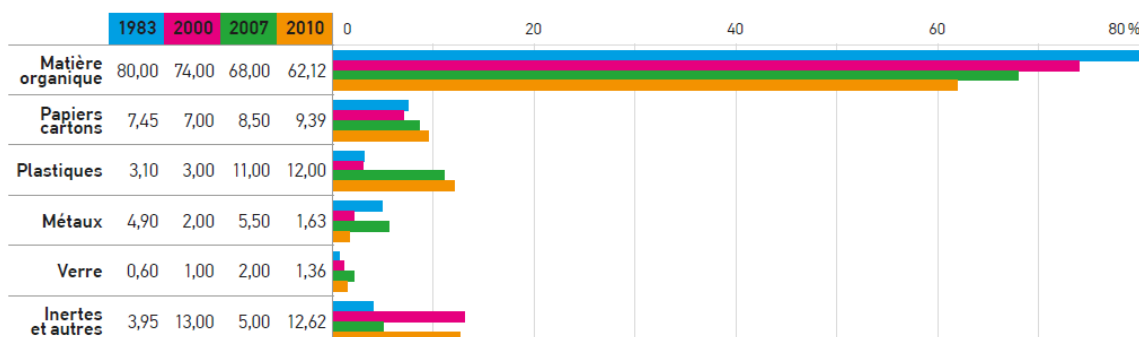


Figure 1.2.2 : Évolution de la production des DMA en Algérie [9]

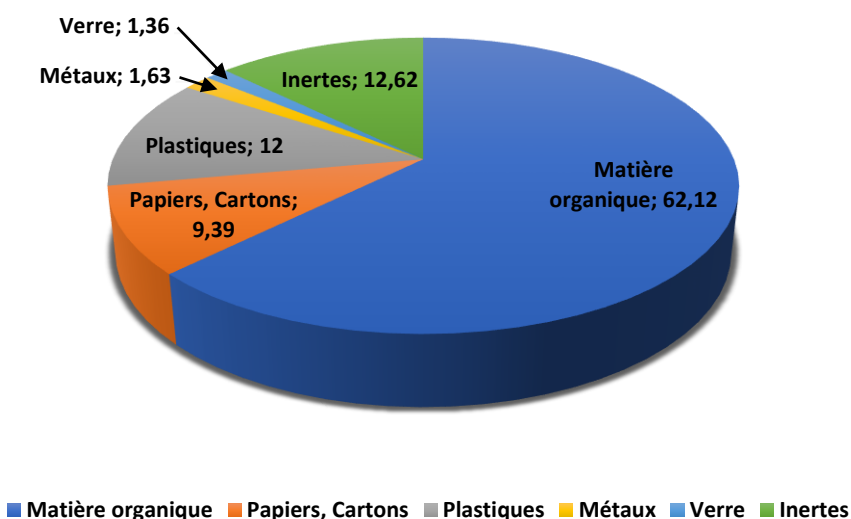


Figure 1.2.3 : La composition des déchets en Algérie en 2010

1.2.2.2. Gestion des déchets ménagers en Algérie

« Le déchet constitue le symbole de la consommation dans les pays développés, et les signes du désespoir (dans la prise en charge) dans les pays en développement » (Brousse, 2005).

Globalement, la politique de gestion des déchets est fondée sur trois types d'instruments : [1]

- Les instruments législatifs ou réglementaires,
- Les instruments économiques (incitation, taxation)
- Les instruments de sensibilisation et formation.

Pour répondre aux exigences auxquelles elle a souscrit, l'Algérie a signé beaucoup de protocoles et conventions visant à préserver la santé publique et l'environnement et notamment, la convention de Bâle. [1]

Par la suite, l'Algérie a adopté le Protocole de Kyoto sur les changements climatiques. La Convention de Stockholm qui a été signée le 22 mai 2001, vient compléter ces instruments pour combler le déficit concernant la production de certains polluants organiques persistants. [1]

S'agissant de la gestion des déchets municipaux, le programme national pour la gestion intégrée des déchets ménagers (PROGDEM), a été mis en œuvre par le Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement en 2001. Il a pour objet l'implémentation d'une nouvelle stratégie qui repose sur une série de principes ; le principe de précaution-prévention, le principe de pollueur-payeur, le principe de producteur-récupérateur, la promotion de l'information et de la sensibilisation du citoyen. Ce programme fixe des objectifs en matière d'amélioration du cadre de vie du citoyen, de la préservation de l'hygiène publique et la protection de la santé, ainsi que l'élimination saine et écologiquement rationnelle des déchets par la valorisation des déchets recyclables. [1]

Il a touché dans un premier temps les 40 grandes villes algériennes. Les principales actions concernées par PROGDEM sont les suivantes : [8]

- élaboration et mise en œuvre des plans communaux de gestion des déchets ;
- aménagement de sites de mise en décharge contrôlée ;
- promotion des activités de recyclage et de valorisation des déchets ;
- introduction de nouvelles formes de gestion ;
- adaptation graduelle de la taxe d'enlèvement des déchets ménagers et amélioration de son taux de recouvrement ;
- sensibilisation, formation et éducation.

Malgré toutes les politiques installées par l'état on est loin de réaliser ces objectifs et cela est dû à plusieurs facteurs : [1]

- Croissance démographique.
- Négligence des citoyens.
- Manque des infrastructures.

Les objectifs nationaux de la stratégie environnementale attendus à moyen et long terme sont donc les suivants : [8]

- améliorer la santé et la qualité de vie du citoyen en diminuant la production de déchets et en introduisant leur gestion intégrée
- conserver le capital naturel et améliorer sa productivité
- réduire les pertes économiques et améliorer la compétitivité à travers l'augmentation du recyclage des déchets (matières secondes) et la récupération des matières premières
- protéger l'environnement global.

D'autres objectifs, ont été également avancés : la nécessité d'une planification intégrée de gestion des déchets municipaux (amélioration et professionnalisation des capacités de gestion, réalisation de CET, etc.), l'élimination des décharges sauvages et la réhabilitation des sites, le tri sélectif et la réduction à la source du volume des emballages. Un des principaux objectifs d'action énoncé en 2005 était de réduire le volume des déchets destinés à l'élimination et d'augmenter la capacité de récupération. [7]

1.2.2.3. Modes d'élimination des déchets en Algérie

Voici les différents modes d'élimination et de traitement des déchets existant en Algérie (graphique 1.2.4).

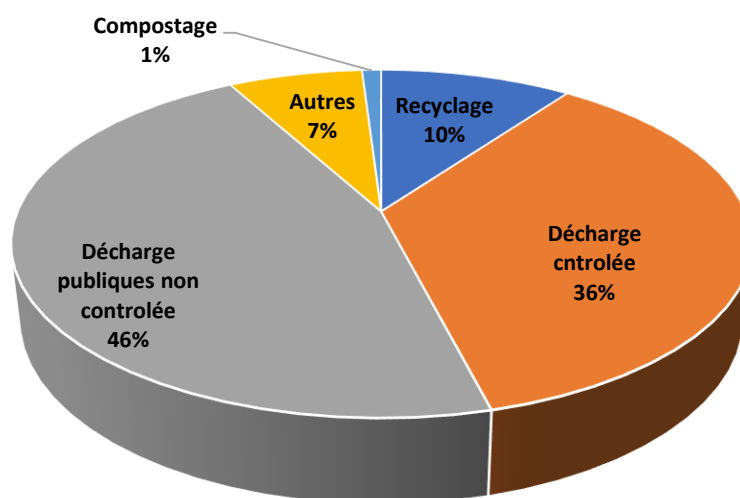


Figure 1.2.4 : Modes d'élimination des déchets en Algérie [9]

En général, l'élimination reste la solution appliquée à 89 % des déchets produits en Algérie. Les déchets destinés à l'élimination sont mis en décharges sauvages à 46 %, brûlés à l'air libre dans des décharges publiques ou communales non contrôlées, en décharge contrôlée et dans les CET (36 %). Le nombre de décharges sauvages est passé de 2 000 en 1980 à 3 130 en 2007. Par contre, les quantités destinées à être valorisées sont trop faibles : seulement 10 % par recyclage et 1 % par compostage. [9]

1.2.3. Contraintes de gestion des déchets en Algérie

Le territoire Algérien est un ensemble de données naturelles et humaines spécifiques influençant directement le processus de la gestion des déchets. Dans ce contexte, les contraintes auxquelles se heurte la gestion des déchets en Algérie en question peuvent être résumées comme suit :

1.2.3.1. Contraintes économiques

L'ampleur du problème des déchets et de l'environnement en général est étroitement liée au processus de développement économique et social du pays.

Les modèles préconisés et mis en œuvre dans le passé ont mené à des impasses aussi bien sur le plan économique et social que sur le plan écologique ; ils n'ont pas permis de mener une gestion efficace de déchets et de celle de l'environnement. [10]

Donc il est nécessaire de placer la problématique des déchets dans le contexte général du modèle de développement économique et social suivi par le pays.

1.2.3.2. Contraintes institutionnelles

Plusieurs institutions ont été créées dans le domaine de l'environnement. Au début, au niveau de chaque département ministériel ayant, à des degrés divers, des responsabilités environnementales sectorielles (notamment la santé publique, le transport, l'énergie, l'industrie, les ressources en eaux, etc.) se trouve une direction ou une sous-direction de l'environnement. Puis celles-ci se sont transformées en agences environnementales. [10]

A partir de 1995 dans le but de densifier le cadre institutionnel et d'améliorer les capacités de surveillance et de contrôle par l'état de l'environnement, des Directions Générales de l'Environnement et des Inspections de l'Environnement ont été créées au niveau de toutes les wilayas du pays.

De même, la création du Haut Conseil à l'Environnement et au Développement Durable (HCEDD) avait pour but d'initier une démarche globale et intégrée en matière de protection de l'environnement.

Malgré l'existence de multiples institutions, leurs capacités sont restées limitées notamment dans le domaine des déchets en matière de formulation de stratégie de coordination, d'étude d'impact, de contrôle et de surveillance de l'état de l'environnement.

Cependant, ces institutions restent sous-encadrées et sous-financées et ne disposent pas de crédibilité et du pouvoir nécessaires à l'exécution convenable de leurs missions. De plus, les liens intersectoriels entre départements ministériels et les institutions environnementales sont quasi-absents (absence de travail de coordination).

La création du Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement en l'an 2000 a ouvert des perspectives nouvelles avec un vaste programme de renforcement institutionnel qui est actuellement mis en œuvre. Ce cadre institutionnel déficient s'est projeté au niveau local. [10]

1.2.3.3. Un cadre juridique insuffisant et un degré d'application limité

Depuis longtemps, la gestion des déchets (GD) est régie exclusivement par le chapitre II du titre IV de la loi cadre n°83-03 du 05 février 1983 relative à la protection de l'environnement et par le décret n°84-379 fixant les conditions de nettoyage, d'enlèvement et de traitement des déchets solides urbains (DSU). [10]

A notre sens, aucun texte n'a été adopté avant ce décret pour gérer les déchets.

Le support juridique existant dans la législation algérienne en la matière est composé de deux catégories de règles : [10]

- Celles qui énoncent le principe de l'interdiction ou de la réglementation du dépôt des DSU dans le milieu naturel.
- Celles qui prévoient les conditions et les modalités de prise en charge de ces déchets et leurs effets.

Cependant, la réglementation est restée imprécise (floue) et insuffisante pour plusieurs raisons : [10]

- L'article 2 du décret en question ne définit pas les déchets mais il a plutôt énuméré certaines catégories sans préciser les modalités de traitement.
- L'article 22 du même décret prévoit six procédés de traitement (la décharge surveillée, la décharge contrôlée, la décharge compostée, la décharge broyée, le compostage et l'incinération) sans préciser la catégorie de déchets pour laquelle on doit utiliser tel ou tel procédé. Il ne précise pas encore la différence entre les différents types de décharges.
- La réglementation ne prévoit pas des méthodes de contrôle et de surveillance dans le domaine de la collecte, de transport, de traitement et d'élimination des déchets, même si elle a souligné l'importance de leur gestion.
- L'absence de la législation spécifique qui fixe les responsabilités de chaque acteur concerné par ce domaine.
- La quasi-absence de mesures de coercition.
- La réglementation ne prévoit pas ni de Schéma National de traitement des déchets en fonction de la taille des agglomérations, ni d'un cahier de charge pour préciser certaines modalités de collecte, d'évacuation et de traitement de déchets.
- L'absence de normes établies par l'autorité locale, même si elles existent, elles ne sont ni appliquées ni respectées en raison du désintérêt manifesté par la commune à l'égard de celles-ci.

L'ensemble de ces lacunes rend la législation difficilement applicable surtout pour les communes qui ne disposent pas de moyens techniques et des compétences nécessaires pour prendre en charge convenablement la GD. Dans tous les cas qui se présentent, il se peut que les acteurs concernés se trouvent dans l'incapacité d'assurer leurs tâches du fait que celles-ci ne sont pas clairement définies.

Ainsi, la réglementation actuelle s'avère insuffisante (ni appliquée, ni respectée dans la plupart des cas). Elle n'a pas évolué et n'a pas incité la commune à améliorer le service public. Néanmoins, une deuxième génération de la législation environnementale est mise en œuvre depuis 1998 en vue de définir les responsabilités de ceux qui génèrent les déchets envers ceux qui les récupèrent et les transforment, des obligations financières et des mécanismes de régulation.

1.2.3.4. Contraintes financières

D'une manière générale, les dépenses de protection de l'environnement qui regroupent les ressources économiques affectées aux mesures de lutte contre les pollutions et aux mesures de protection des ressources naturelles sont très faibles en raison :

D'une part du désintérêt de l'Etat pour la dimension environnementale et d'autre part, de la faiblesse des dépenses de l'Etat suite à la conjoncture actuelle caractérisée par une restriction importante des possibilités de financement public et d'éventuelles actions en matière de protection de l'environnement (en raison principalement du Programme d'Ajustement Structurel mis en place depuis 1994).

Selon les informations recueillies au niveau de Ministère de l'Aménagement de Territoire et de l'Environnement, pendant la décennie 1990-2000, les dépenses de la gestion des déchets représentent 9.14% des dépenses totales de la protection de l'environnement. Cette situation financière contraignante s'est répercutée sur les collectivités locales. [10]

1.2.3.5. Les contraintes techniques

La collecte des déchets est relativement satisfaisante, mais le traitement et l'élimination ne répondent pas aux normes environnementales. La mise en décharge non contrôlée des déchets, ne garantit ni la protection de l'environnement, ni celle de la santé publique, ni même la rentabilité économique.

D'autres facteurs négatifs influencent également le domaine, il s'agit essentiellement de : [10]

- L'absence de contrôle systématique ;
- L'insuffisance des études d'impacts ;
- L'absence des politiques de suivi et d'évaluation des systèmes de GD ;
- L'inexistence des statistiques fiables et officielles, hormis les données éparées figurants dans les rapports de la direction centrale compétente (M.A.T.E.) et les directions de wilayas (l'Inspection de l'Environnement) ainsi que quelques informations d'ordre générale disponibles auprès des associations.
- L'absence du schéma de wilaya de la collecte et de traitement des déchets ;
- Absence d'harmonisation des opérations de la GD avec les agglomérations limitrophes (l'intercommunalité).

Notons également que la fiabilité de la GD est soumise aux contraintes liées à la formation du personnel travaillant dans ce domaine. Dans ce cadre, les services techniques de la commune sont sous encadrés et ils n'ont aucune qualification. Ceci dit, ce secteur souffre d'un grand manque de personnel formé pour pouvoir participer à la conception et à la mise en œuvre des plans de gestion des déchets.

Ainsi, la recherche de l'efficacité dans ce secteur nécessite l'allègement de la contrainte technique en adoptant des techniques propices et écologiques de traitement et en formant les compétences convenables à cette fin.

1.2.3.6. Les contraintes éducationnelles et sociales

Le renforcement du volet éducatif constitue une voie incontournable pour assurer une amélioration pérenne de ce secteur. Toutefois, ce volet souffre actuellement d'un certain nombre de contraintes qui peuvent être résumées comme suit : [10]

- Absence de programme spécifique et continu d'éducation du public. Les différentes démarches entamées telles que les expositions, les journées portes ouvertes, les affiches un peu partout, etc., restent limitées. Ce sont principalement des actions isolées qui accompagnent parfois les activités de désinfection, d'éradication des dépôts anarchiques.

Donc, l'éducation environnementale reste encore très insuffisante.

- Manque de communication entre les citoyens et les communes pour deux raisons : d'une part, les citoyens ne se sont pas organisés (sous forme par exemple de comités de quartier) et d'autre part, les communes réservent une part très minime parfois nulle à l'information et à l'éducation.
- Insuffisance de la participation de la population dans l'amélioration de la qualité de la collecte et le maintien de la propreté des lieux publics.
- Manque d'évaluation des résultats et des moyens de sensibilisation des habitants.

Souvent, on donne la prépondérance aux facteurs techniques et financiers pour expliquer les défaillances de la GD. En fait, les dysfonctionnements sont dus à la convergence d'un ensemble de facteurs aussi divers que nombreux. On a cité : les aspects économiques, politiques, juridiques, sociaux, culturels, etc. Ce sont tous ces aspects conjugués aux contraintes techniques et financières qu'il faut prendre en compte au moment de la conception d'un système de la GD.

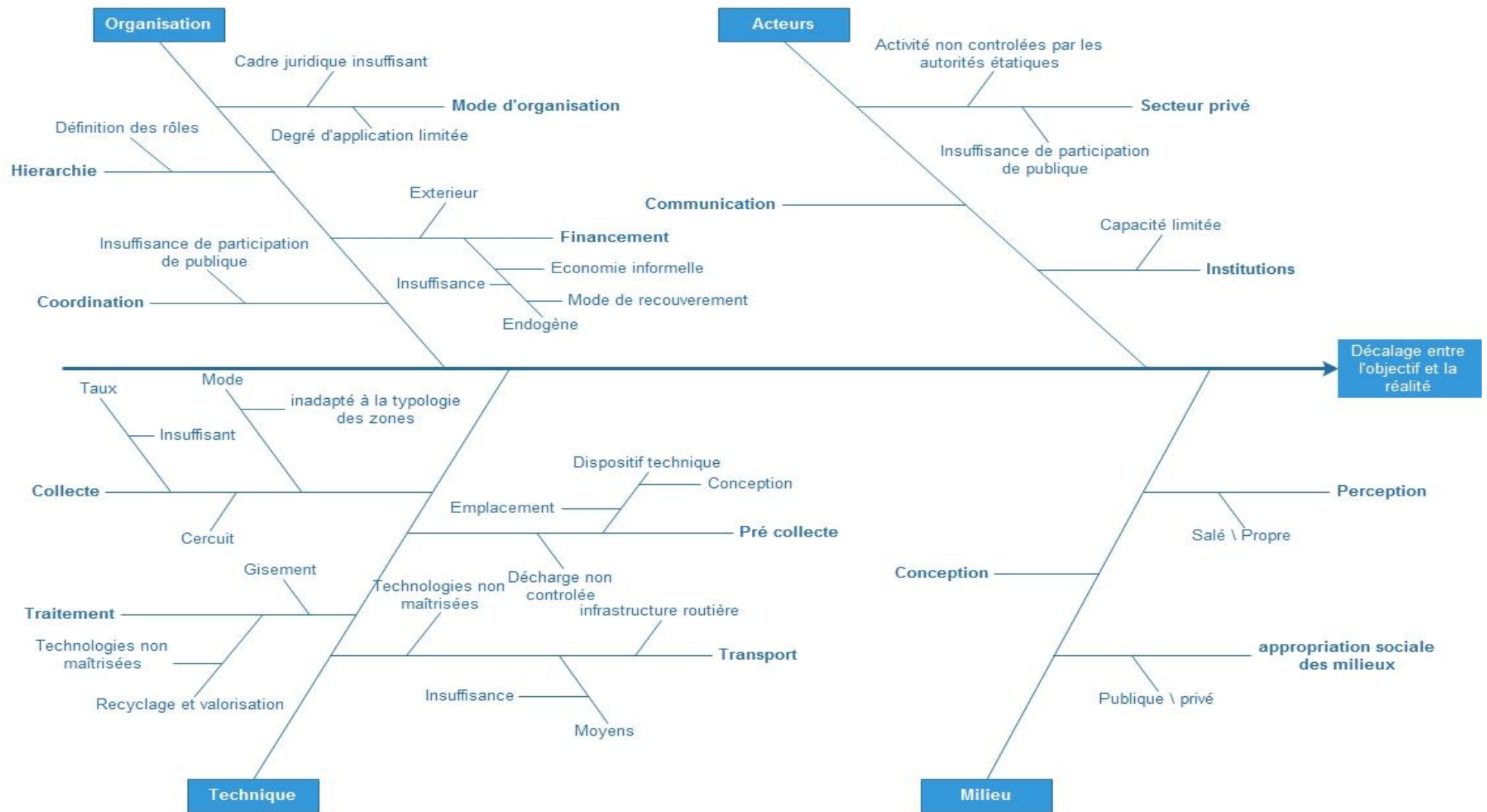


Figure 1.2.5 : Diagramme causes-effets appliqué au service de gestion des déchets ménagers en Algérie

Chapitre 1.3 : Généralités sur l'incinération

Chapitre 1.3. Généralités sur l'incinération

1.3.1. Pourquoi l'incinération des déchets ménagers ?

La réduction de la production des ordures ménagères ne se produira pas instantanément. La mise en place des programmes de réduction effective de déchets va prendre des années pour être développées au niveau national. [4]

La mise en place de plus de matériaux recyclables, et le déplacement des matériaux d'emballage inutile sont associés à une modification des habitudes actuelles du consommateur qui se produira également graduellement avec le temps. Les projets de recyclage ont été mis en place avec succès au niveau de la résidence individuelle, des complexes de bureau et des villes entières. Ces programmes ont été développés pour le verre, les bidons d'aluminium, le papier, l'huile de moteur et les plastiques ; mais ne contribuent à l'élimination des déchets que de 2 %. La méthode d'élimination qui va augmenter la durée de vie des décharges, produire de l'énergie utile et ne nécessite pas un changement immédiat des habitudes du consommateur est **l'incinération** des OM. [4]

L'incinération consiste à brûler les déchets dans des fours spécialement aménagés. En dehors des phases de démarrage et d'arrêt, une alimentation en déchets suffit à entretenir la combustion. L'incinération est aujourd'hui en France et en Europe le second mode de traitement des ordures ménagères après le stockage. [11]

Les installations permettant l'incinération des déchets sont appelées Usine d'Incinération des Ordures Ménagères (UIOM) ou Unité de Valorisation Energétique (UVE) pour celles qui valorisent l'énergie (chaleur ou électricité). [11]

Sur le plan environnement et technique, l'incinération est une méthode supérieure de disposition de déchets offrant : fiabilité, sûreté et efficacité.

L'incinération décompose thermiquement la matière par oxydation en réduisant au minimum les déchets, et détruisant de ce fait leur toxicité. [4]

1.3.2. Principe de fonctionnement

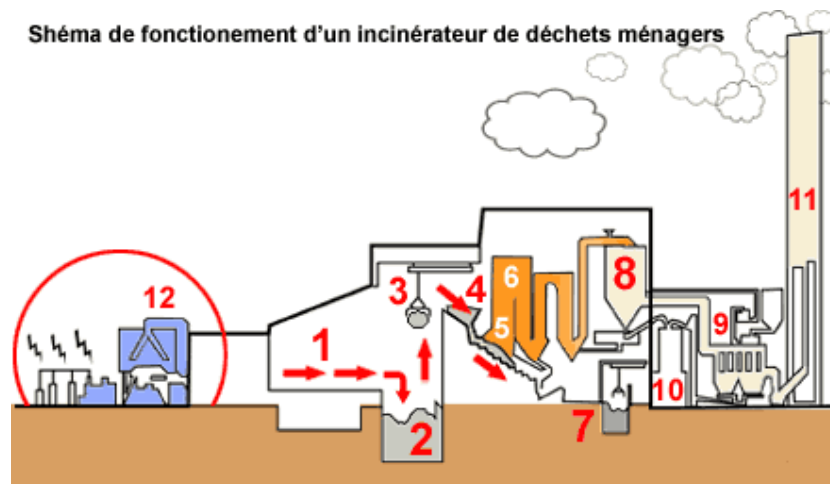


Figure 1.3.1 : 1.3.2. Schéma de principe de fonctionnement [4]

- (1) **Arrivée des ordures** : Les déchets mélangés (c'est à dire non triés) sont collectés dans les bennes des camions à ordures et amenés jusqu'à la fosse à déchets.
- (2) **Fosse à déchets** : La fosse est suffisamment grande pour alimenter l'incinérateur pour plusieurs jours.
- (3) **Grues de chargement** : De grandes pelles mécaniques prennent en vrac les déchets de la fosse et les déversent dans la trémie d'alimentation.
- (4) **Trémie d'alimentation** : Il alimente le four à un rythme contrôlé
- (5) **Grille d'incinérateur** : Température d'au moins 850 °C.
- (6) **Chaudière** : Les gaz à haute température sont utilisés pour produire de l'électricité ou distribuer de la chaleur. Des dioxines se forment quand les gaz se refroidissent.
- (7) **Mâchefers** : 30 % des déchets incinérés ressort sous formes de cendres, appelées Mâchefers, riches en métaux lourds nocifs comme le plomb ou le cadmium. Dans le meilleur des cas, ces restes nocifs sont stockés en décharges ordinaires. Dans le pire des cas, certains opérateurs d'incinérateurs les donnent à des entreprises de travaux publics ou bâtiments, qui les mélangent à leurs matériaux pour en faire des routes ou même des logements.
- (8) **Traitement des effluents gazeux** : De la chaux, de l'ammoniaque ou du carbone activé sont pulvérisés sur les gaz qui transitent par le système de purification. Cela permet en partie de neutraliser les gaz acides et d'absorber une partie des dioxines. En contrepartie, cet apport de matière crée une grande quantité de résidus fortement contaminés par les dioxines, les métaux lourds et autres substances toxiques. Ces résidus sont appelés **REFIOM**.
- (9) **Filtres à manche** : Un système de purification de plus dans le circuit destiné à piéger les dioxines, les métaux lourds et autres substances polluantes. Les filtres collectés s'ajoutent aux résidus de l'incinération contenant des substances toxiques.
- (10) **Cendres volantes** : Elles représentent 3 à 5 % du poids des déchets entrant dans l'incinérateur. Elles sont en principe acheminées en mélange avec les **REFIOM** vers les sites de stockage de déchets dangereux.

- (11) **Cheminée** : La hauteur de la cheminée, sur un tiers, contient des équipements destinés à mesurer les polluants qui s'en échappent.
- (12) **Turbines à vapeur** : La vapeur produite fait fonctionner des turbines qui produisent de l'électricité d'abord utilisée sur le site de l'incinérateur. Le surplus est exporté vers le réseau national. Les incinérateurs sont efficaces à environ 20 % dans la conversion de chaleur en électricité. Cette fraction médiocre ne représente qu'une très faible part de l'énergie qui sera de nouveau nécessaire pour produire des emballages et autres produits qui finiront leur vie dans l'incinérateur.

1.3.3. Les avantages de l'incinération [4]

- Traitement adapté à toutes sortes de déchets (dangereux et non dangereux, solides et liquides) contrairement aux autres modes de valorisation (traitement biologique par exemple) ;
- Diminue fortement le volume des déchets (90 % de réduction environ) et leur masse (70% environ).
- L'incinération permet de tirer le meilleur parti du contenu énergétique des déchets en produisant de la chaleur susceptible d'alimenter un réseau de chaleur urbain et/ou d'être transformée en électricité.
- L'incinération contribue à minimiser les consommations de ressources énergétiques et certains impacts environnementaux tels que l'effet de serre du fait notamment de la valorisation énergétique. L'incinération émet moins de gaz à effet de serre que le stockage, qui a inévitablement des fuites de méthane (puissant gaz à effet de serre) issu de la dégradation des déchets organiques.
- Selon les équipements mis en place, l'incinération permet de récupérer les métaux ferreux et non ferreux (contenu initialement dans les déchets) et de les valoriser.

1.3.4. Inconvénients de l'incinération [4]

- l'incinération contribue à l'émission de polluants dans l'atmosphère, dont les quantités sont limitées par la mise en place d'un système de traitement des fumées et suivies par la mise en place obligatoire d'un programme de surveillance ;
- l'incinération génère des déchets classés dangereux (résidus d'épuration des fumées) à éliminer dans des installations de stockage de déchets dangereux (classe 1) ;
- l'incinération génère des mâchefers qui sont les résidus solides obtenus après combustion. Les mâchefers sont des déchets non dangereux qu'il est possible de valoriser en remblai ou sous-couche routière dans des conditions strictes définies par la réglementation ;
- selon les techniques choisies (neutralisation des gaz acides des fumées par voie sèche ou humide, recyclage interne total ou non des rejets liquides), l'incinération contribue dans certains cas à l'émission de polluants liquides dans le milieu naturel, dont les quantités sont encadrées par la réglementation.

1.3.5. Produits de l'incinération

Après avoir incinéré nos déchets, voici les différents produits que nous trouvons en sortie d'incinérateur :

- Fumées et particules
- Mâchefers
- Ferrailles
- Cendres

Les ferrailles seront séparées des autres produits afin d'être acheminées vers des centres de métallurgie avant d'être recyclées. Ce sont les industriels de la métallurgie qui transformeront ces déchets en matière secondaire pour en faire de nouveaux produits.

Les cendres ne peuvent pas être recyclées. Elles sont destinées à finir dans des centres d'enfouissement conçus et dimensionnés pour le stockage de ces déchets.

Les mâchefers peuvent être recyclés. Ce sont des résidus composés de verre, silice, métaux ferreux et non ferreux, des sels ou encore du calcaire. Cependant, ils nécessitent un traitement particulier avant d'être réutilisés. Ils seront stockés à l'air libre pendant plusieurs mois afin d'être dépollués naturellement par voie microbologique.

Finalement, les fumées sont traitées selon un processus bien contrôlé avant de pouvoir être relâchées dans l'air en respectant des normes de sécurité. Leur composition dépend de la composition des déchets incinérés mais sont toujours accompagnés de résidus et poussières. Il faut donc mettre en place des procédés permettant d'éliminer tous les composants indésirables.

1.3.6. Principaux types de fours

L'incinération peut être mise en œuvre dans trois grands types de fours : les fours à grilles, les fours tournants et/ou oscillants et les fours à lit fluidisé, dense, rotatif ou circulant.

1.3.6.1. Four à grille

Ces fours peuvent être représentés comme suit :

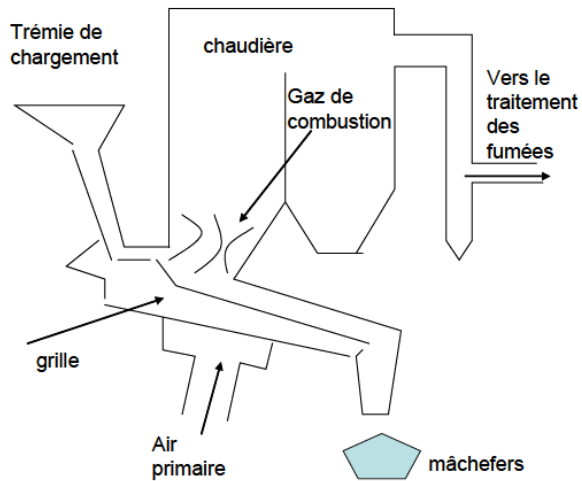


Figure 1.3.2 : Schéma de principe d'un four à grille [7]

Ce sont les fours les plus utilisés pour la combustion des OM. Les fours à grilles fixes fonctionnent généralement en discontinu et permettent de traiter des petites quantités de déchets. Parmi les fours à grilles mécaniques, on distingue les fours à barreaux animés d'un mouvement de translation (poussoir, grille à recul, grille à mouvements alternatifs), les fours à rouleaux fonctionnant à l'aide de cylindres en rotation et disposés en escalier et les fours à gradins. Tous ces systèmes ont pour objectif d'assurer le brassage du lit d'OM et sa progression sur la grille. La modélisation de la combustion dans un four d'incinération à grille mécanique fait l'objet du quatrième chapitre de ce mémoire, aussi, une attention particulière sera portée sur le fonctionnement de ce type de four dans la partie suivante. [7]

Les temps de séjour pour obtenir une combustion complète des déchets sur grille sont de l'ordre de 45 min à 1 h, à une température de l'ordre de 1100 °C.

L'ensemble de la chambre de combustion est équipé de matériaux réfractaires, permettant de supporter les températures typiques de l'incinération, comprises entre 850 et 950 °C. [12]

Les fours à grilles peuvent traiter de 5-40 t/h de déchets.

1.3.6.2. Fours tournants et/ou oscillants

Ce type de four peut être représenté comme suit :

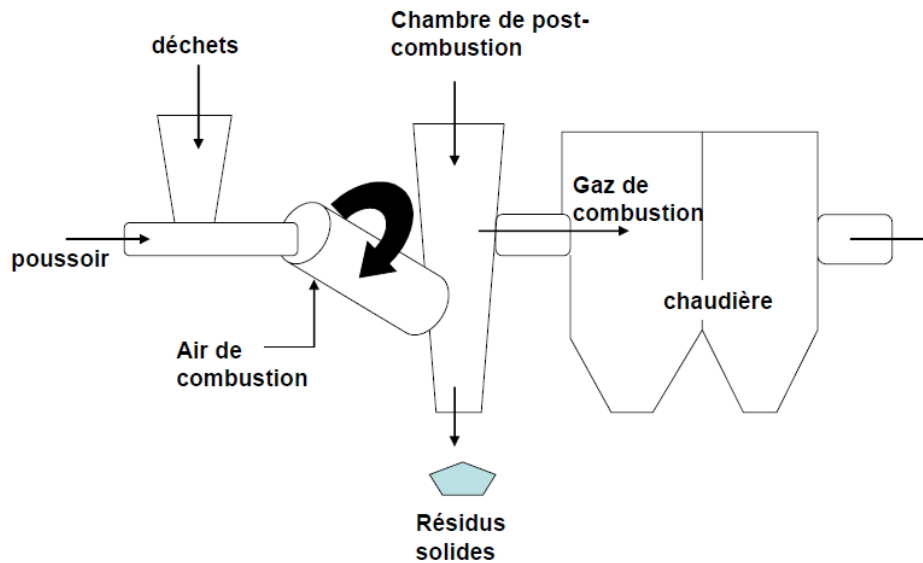


Figure 1.3.3 : Schéma de principe d'un four oscillant [7]

Ils sont constitués d'un cylindre incliné par rapport à l'horizontale dans lequel les déchets progressent sous l'effet de la gravité et de la rotation. L'efficacité du procédé repose sur le retournement et le brassage des solides et de l'air comburant. Les températures de fonctionnement avoisinent 1100°C – 1300°C. Ces fours peuvent traiter une grande variété de déchets et sont bien adaptés au traitement des déchets industriels et toxiques du fait du brassage permanent du combustible et de la présence de nombreux orifices d'injection d'air assurant une combustion efficace et la formation de mâchefers de bonne qualité (pauvres en carbone résiduel imbrûlé). [7]

Le temps de séjour moyen des déchets en four tournant peut être estimé par : [12]

$$t = \frac{0.19 * L}{N * D * P}$$

Avec :

- **t** temps de séjour du déchet (min),
- **D** diamètre intérieur de la chambre (m),
- **N** vitesse de rotation (tr/min),
- **P** pente du four (m/m).

1.3.6.3. Fours à lit fluidisé

Assurent la combustion des produits solides dans un lit de matériaux inertes mis en suspension par une injection d'air chaud. Il s'agit, le plus souvent, d'un mélange de sable auquel est ajoutée une petite fraction de déchets (5 %) qui forme la base du lit. L'ensemble est fluidisé par injection d'air (injection verticale, horizontale, à la base ou au niveau des parois du four). La technique du lit fluidisé, mise au point pour brûler du charbon, a été adaptée depuis quelques années au traitement des déchets ménagers.

Ces fours ont un rendement de combustion élevé (99 %) et acceptent des déchets de natures très différentes (même à bas pouvoir calorifique). Ils offrent l'avantage de fonctionner à plus basse température (650 – 850°C), avec un faible excès d'air par rapport aux autres systèmes de combustion, ce qui assure un meilleur rendement thermique et une émission limitée de **NOx**. La préparation (tri, dé ferrailage, broyage) des déchets avant incinération et l'émission importante de cendres volantes représentent les inconvénients majeurs de cette technique. [7]

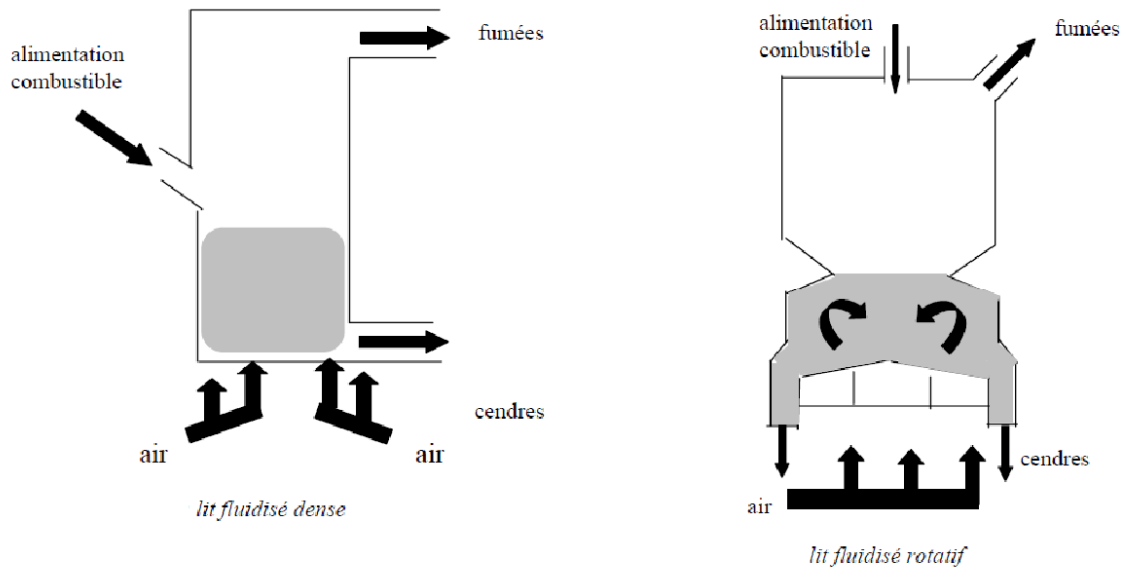


Figure 1.3.4 : Schéma de principe d'un four à lit fluidisé [7]

1.3.6.4. Récapitulatif

Le tableau qui suit représente les caractéristiques principales de chaque four

Tableau 1.3.1 : Récapitulatif des caractéristiques principales

Technologie	Four à grille	Four tournant	Lit fluidisé dense	Lit fluidisé rotatif	Lit fluidisé circulant
Temps de séjour (s)	~ 3600	3600 à 5400	60 à 120	~200	~600
Capacité de traitement (t/h)	5 – 40	2 – 10	5 – 30	2 – 12	< 15
Type de déchets PCI (MJ/kg)	7 à 32	4 – 25	6 – 21	5 – 15	5 – 16
$\eta_{(combustion)}$ (%)	30 – 40	50 – 60	95	70	< 99
Température (°C)	850 – 950	1100 – 1300	850	700 – 800	850

Par contre le tableau 1.3.2 regroupe les différents avantages et inconvénients de chaque technologie.

Tableau 1.3.2 : Tableau regroupant les avantages et inconvénients des différentes technologies

Technologie	Four à grille	Four tournant	Lit fluidisé dense	Lit fluidisé rotatif	Lit fluidisé circulant
Avantages	Procédé robuste, grande longévité, fourchette de PCI étendues. Production de CO ₂ réduite. Facile à mettre en œuvre.	Meilleure combustion des déchets par rapport au four à grilles, Facile à mettre en œuvre.	Faible taux d'imbrûlés, encombrement réduit, injection maîtrisée	Faible taux d'imbrûlés, encombrement réduit, injection maîtrisée	Excellent rendement, faible taux d'imbrûlés, faible émissions de NO _x et SO ₂
Inconvénients	Mauvais rendement de combustion, temps de séjour long.	Nécessite une grande chambre de postcombustion, temps de séjour long.	Prétraitement obligatoire pour les fours à lit fluidisé, faible taux de valorisation.	Eléments trop gros bloquent l'extraction des résidus, faible taux de valorisation.	Equipement de dépoussiérage important, spécification très stricte de la température

1.3.7. Procédés de traitement

Les polluants contenus dans les fumées de combustion se présentent sous la forme de solides particulaires (poussières) ou sous forme gazeuse (**HCl, SO_x, NO_x, ...**). Il convient donc, après refroidissement, d'effectuer des opérations de dépoussiérage et de neutralisation des fumées, avant leur rejet à l'atmosphère.

1.3.7.1. Dépoussiérage

Ce traitement permet d'éliminer les polluants particulaires : poussières issues de la combustion (cendres volantes) et les produits de neutralisation des gaz acides dans certains procédés. De nombreux métaux lourds, souvent particulaires, peuvent être captés lors du dépoussiérage. Il existe trois types de dépoussiérage : par électro filtre, filtre à manche et cyclone. Il peut être intéressant, dans le cadre de la valorisation des produits de neutralisation des acides, d'effectuer un dépoussiérage en amont : il s'agit alors d'une double filtration des fumées. [11]

1.3.7.1.1. Electrofiltre

Le principe de l'électro filtre fait intervenir les paramètres suivants : charges des particules, champ électrique appliqué, ré-envol et résistivité des poussières. Les fumées passent entre des électrodes soumises à une différence de potentiel de quelques dizaines de milliers de volts. Les particules se chargent négativement et s'accumulent sur les électrodes positives. Un dispositif de battage mécanique (petits marteaux qui frappent les électrodes) fait tomber les particules dans un collecteur avant d'être stockées puis évacuées. Le système de battage peut être électromagnétique mais le but recherché est le même.

Lors d'un traitement des fumées par voie humide, l'électro filtre est essentiel pour optimiser le lavage des fumées qui intervient juste après. Il est utilisé en amont d'une double filtration avec les procédés secs, semi-secs et semi-humides. [11]

1.3.7.1.2. Filtre à manches

Ce type de filtre est le plus souvent utilisé pour récupérer les produits de neutralisation des gaz acides avec les procédés secs, semi-secs et semi-humides. Les gaz à dépoussiérer passent à travers des manches en tissu (feutre ou membrane) capables d'arrêter les particules les plus fines. Pour décolmater et récupérer les résidus filtrés, la technique consiste à injecter de l'air à faible pression (pour ne pas remettre les particules en suspension) en sens inverse du flux principal et à récupérer les particules dans un collecteur avant de les stocker et les évacuer.

Couplée avec l'utilisation de filtres à manches, une nouvelle génération de filtres est apparue pour la destruction de dioxines et furanes : les filtres catalytiques (couplage de la filtration sur membrane et de la catalyse). Le catalyseur, intégré dans le feutre des manches, détruit la totalité des dioxines et furanes présentes dans les fumées. Ce procédé est plus efficace que le charbon actif car les dioxines et furanes sont détruites et non adsorbées (stockées) par le charbon. Ces filtres gardent, bien entendu, leur rôle de dépoussiéreur. [11]

1.3.7.1.3. Cyclones ou multi-cyclones

Cette technique consiste à mettre les fumées en rotation afin de les centrifuger. Les gaz arrivent de façon tangentielle dans le cyclone : les poussières sont rassemblées en périphérie par la force centrifuge et les gaz dépoussiérés sont évacués par le centre du cyclone. Les multi-cyclones sont composés de plusieurs petits cyclones au sein d'une gaine commune. C'est la technique la moins chère et la moins efficace pour dépoussiérer les fumées. Elle est de plus en plus abandonnée. [11]

1.3.7.2. Neutralisation des gaz acides

Les fumées doivent subir un traitement complémentaire visant à neutraliser les gaz acides qu'elles contiennent : HCl, HF, SO_x, etc.

Il convient de distinguer plusieurs grandes familles de procédés de traitement des gaz acides, Mais ces systèmes ont le même but : neutraliser les acides au moyen d'une base et séparer les produits de réactions. La quantité optimale de réactif nécessaire est calculée en continue en fonction de la composition des fumées brutes. Actuellement, la base la plus utilisée est la chaux. Mais le bicarbonate de sodium peut aussi l'être lors d'un traitement par voie sèche. [11]

Partie 2 :
Dimensionnement et
maîtrise des risque de
l'unité d'incinération
des ordures
ménagères

**Chapitre 2.1 : Dimensionnement
de l'unité d'incinération des ordures
ménagères**

Partie 2. Dimensionnement et maîtrise des risques

Chapitre 2.1. Dimensionnement de l'UIOM

2.1.1. Introduction

Les ordures ménagères sont d'abord collectées puis stockées dans une fosse. Elles sont alors introduites dans un four à l'aide d'un grappin puis subissent une combustion à haute température qui réduit leur masse et leur volume.

On récupère ainsi en sortie du four des fumées et des mâchefers. Les fumées sont collectées et passent à travers une chaudière afin de générer de la vapeur d'eau surchauffée utilisée ensuite pour alimenter une turbine couplé à un alternateur. Les fumées sont ensuite traitées et refroidies à nouveau avant d'être rejetées à l'atmosphère une fois dépolluées. Les mâchefers sont quant à eux récupérés et stockés à ciel ouvert où ils sont triés et valorisés pour certains d'entre eux.

2.1.2. Critères de conception

Dans toutes les agglomérations urbaines ou combinées rurales/urbaines, dont la population totalise plus de 20,000 habitants, il est possible d'implanter un incinérateur à ordures ménagères qui pourra produire de l'électricité et, selon sa localisation, vendre de la vapeur à des clients voisins.

Les critères de base de son implantation sont : [13]

- Population desservie : 20,000 habitants minimum
- Localisation :
 - ✓ A un endroit le plus central possible par rapport à la population desservie afin de minimiser le transport des ordures par camion, tout en évitant les zones urbaines, afin de minimiser les impacts communautaires.
 - ✓ Près d'une usine de papier si possible, pour vendre de la vapeur : ou près d'un consommateur de vapeur pour le procédé et non pour le chauffage en hiver. En effet, l'usage de la vapeur devra être le plus constant possible afin de favoriser une utilisation maximale de l'énergie.
- Objectifs :
 - ✓ Produire de l'électricité à l'aide de vapeur haute pression.
 - ✓ Vendre, si possible, la vapeur à pression moyenne (20 bar).

2.1.3. Choix de la technologie

De nos jours, la technologie des **fours à grilles** est le modèle le plus utilisé pour le traitement des OM, il permet en effet de traiter des **grandes quantités** sans tri préalable, ce qui en fait une **technologie très flexible** qui répond aux besoins réels.

C'est pour ces raisons que la combustion des OM s'opèrera dans un four à grilles qui permet une bonne homogénéisation ainsi qu'une combustion complète des OM.

Le procédé typique suggéré comprendra les éléments suivants : [13]

- Une aire de réception et de stockage des ordures dans un espace intérieur ventilé de manière à éviter la propagation des odeurs à l'extérieur de l'édifice.
- Un système d'alimentation manuel des ordures dans le ou les fours d'incinération.
- Un four d'incinération conçu pour traiter les ordures ménagères.
- Une chaudière de production de vapeur.
- Une turbine à vapeur.
- Un système de vidange des mâchefers et de séparation des métaux.
- Un système d'épuration des gaz de combustion avec contrôles des gaz acides, des poussières, des dioxines et des furannes.
- Un système de recyclage, évacuation des cendres volantes et des réactifs de neutralisation des gaz.

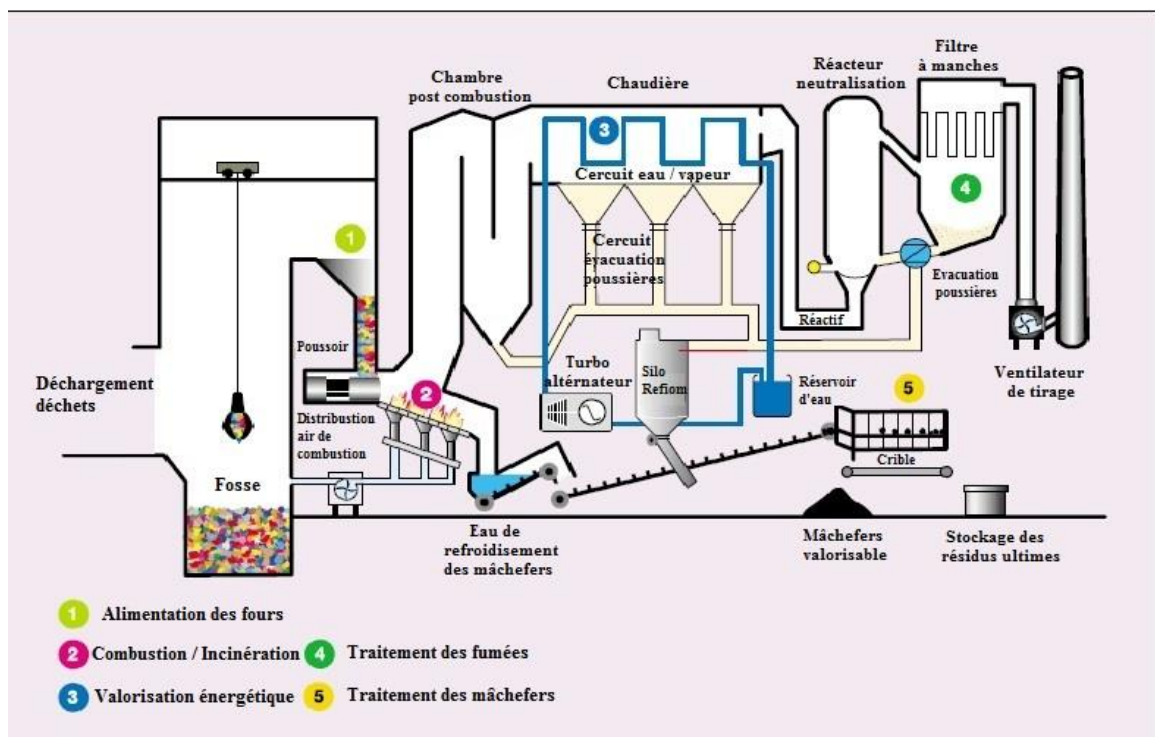


Figure 2.1.1 : Schéma de principe d'un incinérateur [14]

On peut représenter l'unité d'incinération avec un schéma bloc simple qui résume les différentes étapes qui vont s'opérer : [12]

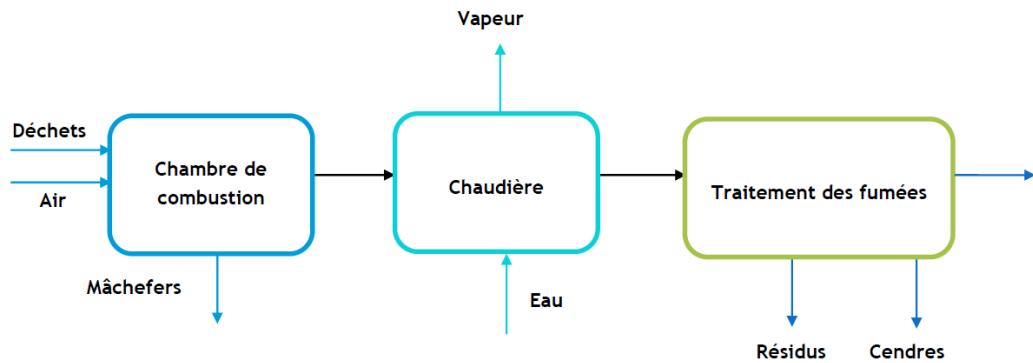


Figure 2.1.2 : Schéma bloc de l'unité d'incinération

La combustion est organisée le long de la grille de façon à réaliser : [12]

- En entrée, une zone de séchage des déchets par convection et rayonnement de la voûte ;
- Suivie d'une zone de pyrolyse des déchets avec inflammation des matières volatiles en phase gazeuse ;
- Puis d'une zone de combustion du carbone fixe résiduel ;
- et, enfin, une zone de refroidissement des mâchefers, avant leur évacuation en sortie de foyer, où ils subissent une extinction dans une garde à eau (extracteur à mâchefers), permettant également d'éviter toute pénétration d'air parasite.

On peut regrouper ces différentes informations sous la forme de schéma qui représente les différentes zones de combustion présentes à l'intérieur du four :

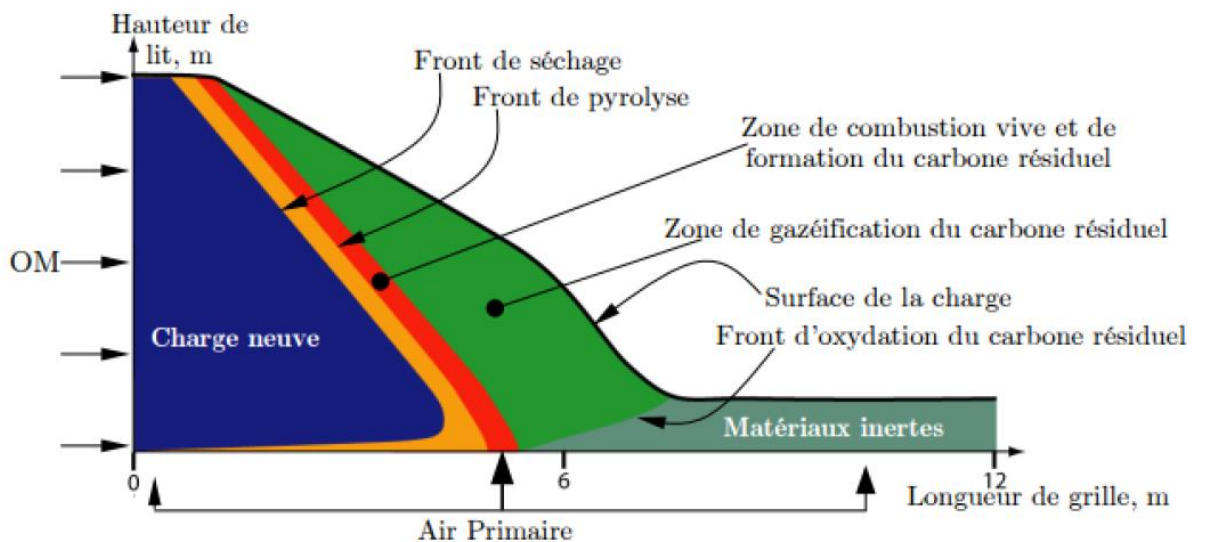


Figure 2.1.3 : Schéma du four de combustion représentant les différentes zones de combustion des OM [12]

2.1.4. Spécifications

2.1.4.1. Évaluation de la production d'OM à Sétif (Est Algérien).

Afin d'évaluer le potentiel énergétique de l'incinération des ordures à Sétif, il faut d'abord en évaluer la production.

Les données de base sont les suivantes [15] :

- Superficie de 6550 km²
- Population de 1 661 798 habitants en 2012 avec une densité de 254 hab/km²
- Environnement :

Tableau 2.1.1 : Les DM récupérés à setif [15]

Centre d'enfouissement technique	Nombre de décharges		Volume des déchets (t/J)
	Contrôlées	Non contrôlées	
6	4	55	1011.2

En effet, en 2016, **369 088** tonnes d'ordures ménagères ont été produites à Sétif. Or, cette même année, la population était de **1 661 798** habitants, on obtient le résultat suivant (en t/h) :

$$m_{OM} = \frac{\text{quantité OM}}{\text{temp}(h)} = \frac{369\,088}{365 \cdot 24} = 42.13 \text{ t/h} \quad (2.1.1)$$

Pour notre cas, on veut incinérer une moyenne de 40% des déchets ménagers produits. Ce qui représente environ **17 t/h**, On choisira alors de dimensionner le four afin de répondre à cette demande.

Avant de s'intéresser aux différentes équations qui régissent le fonctionnement de l'unité, il convient de spécifier plus précisément les OM de zone semi-aride (Sétif, Bordj Bou Arreridj...) :

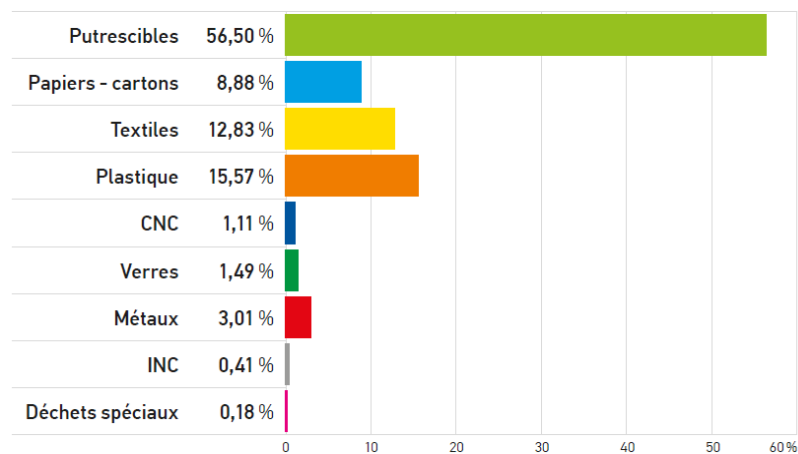


Figure 2.1.4 : Caractérisation des déchets ménagers et assimilés dans la zone semi-aride [4]

Voici les figures qui expriment la répartition de la réactivité des OM entrantes et sortantes :

OM en entrée

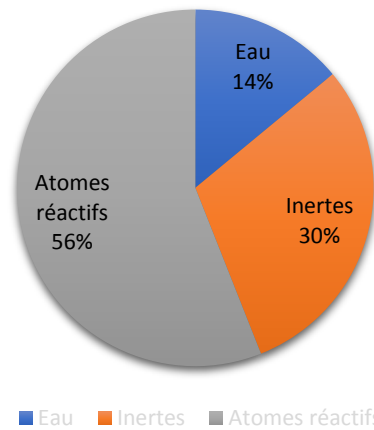


Figure 2.1.5 : Répartition de la réactivité des OM entrantes [12]

OM en sortie

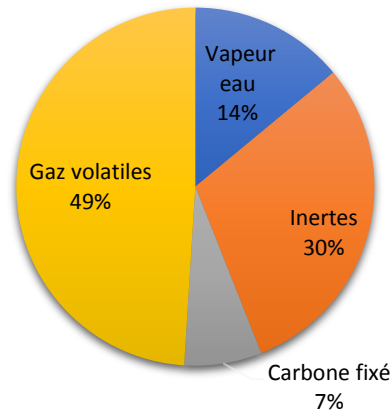


Figure 2.1.6 : Répartition de la réactivité des OM sortantes [12]

La définition des compositions massiques moyennes de chacun des principaux constituants chimiques des ordures ménagères sèches est représentée dans le tableau ci-dessous :

Tableau 2.1.2 : Composition chimique des OM [12]

Elément	C	H	O	N	Cl	S
Fraction massique	45,70	7,000	41,00	5,999	0,090	0,211

Enfin, on s'intéresse aux molécules produites par la réaction de combustion qui représentent les polluants et qui devront être traités par la suite :

- Fumées :
 - ✓ Méthane : CH₄
 - ✓ Dihydrogène : H₂
 - ✓ Monoxyde de carbone : CO
 - ✓ Dioxygène de carbone : CO₂
 - ✓ Chlorure d'hydrogène : HCl
 - ✓ Monoxyde d'azote : NO
 - ✓ Dioxygène de soufre : SO₂

2.1.4.2. Hypothèses

Pour l'établissement des différents bilans, plusieurs hypothèses seront prises en considération.

On suppose que l'unité d'incinération fonctionne en continu et en régime permanent ;

- On prendra un taux d'exploitation de l'usine d'incinération qui correspond à 8000 h/an, On obtient alors :

$$\tau_{\text{exploitation}} = \frac{\text{Nb heures fonctionnement par année}}{\text{Nb heures dans une année}} \quad (2.1.2)$$

$$\tau_{\text{exploitation}} = \frac{8000}{365 * 24}$$

$$\tau_{\text{exploitation}} = \mathbf{0.913 \text{ soit } 91.3\%}$$

- On négligera le rayonnement des parois du four, on les suppose négligeable comparé à la chaleur apporté par la combustion des OM ;
- On suppose les réactions de combustion totale, notamment grâce à l'apport d'un excès d'air qui favorisera ces réactions afin d'éliminer complètement les gaz inflammables et dangereux ;
- On suppose l'air comme étant un gaz parfait, cette approximation est assez faible pour l'air pris dans les conditions normales de pression et de température ;
- N'oubliant pas les 14% de l'eau qui s'évapore au début de l'incinération, donc on incinère qu'environ **15 t/h** et on suppose que la vapeur aussi n'est pas un produit de l'incinération.

2.1.5. Dimensionnement de l'unité

2.1.5.1. La fosse de réception

Une fois l'opération de pesage effectuée, les camions de collecte se dirigent vers la fosse de réception pour décharger leurs contenus par vidage direct (figure 2.1.7)

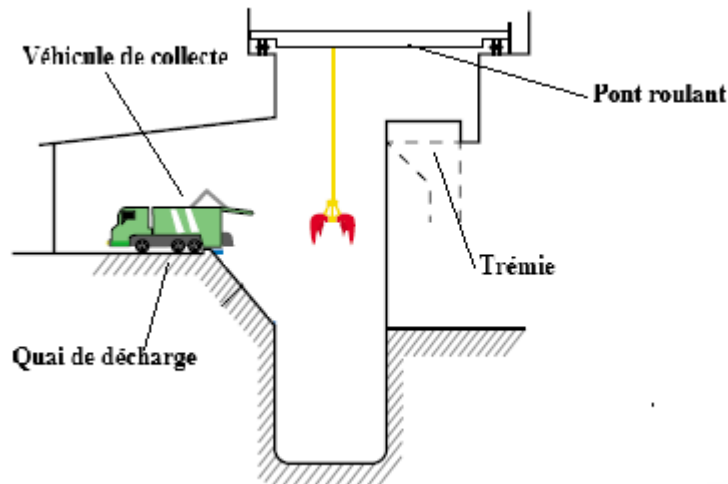


Figure 2.1.7 : Déchargement des véhicules de collecte [14]

La fosse est généralement en béton étanche. Les déchets sont empilés et mélangés dans la fosse en utilisant des grues équipées de grappins. Le mélange des déchets aide à réaliser une valeur de chaleur, taille, structure, composition, etc. équilibrées du matériau déversé dans les trémies remplissant l'incinérateur.

Les cabines de grue sont conçues de sorte que l'opérateur de la grue ait une bonne supervision de toute la fosse. [16]

La détermination du volume de la fosse dépend de plusieurs critères :

- La capacité journalière maximale d'incinération ;
- Les jours de collecte les plus chargés au cours de la semaine ;
- La masse volumique des ordures en fosse ;
- La capacité supplémentaire pour ne pas interrompre la réception en cas de panne de matériels.

A partir de là, on peut conclure qu'une alimentation continue de l'usine nécessite un volume géométrique correspondant, au moins, au triple du volume maximum d'ordures pouvant être collectées par jour.

Dans notre cas la consommation horaire d'ordures ménagères est fixée à 15 t/h soit 360 t/j d'où un volume géométrique de la fosse doit être supérieur à 2200 m³ (pour une masse volumique de 500 kg/m³)

On va prendre un volume de 4200 m³.

Le choix d'une profondeur et une largeur adéquates dépend des caractéristiques du pont roulant qui sera choisi (vitesse de translation, vitesse de direction, ...) [17]

La fosse doit être conçue avec un plan incliné représenté sur la figure 2.1.8.

Elle permet d'éviter les collisions entre le grappin et l'arrière des camions bennes.

Matérialiser des séparations minimales de 1 m entre chaque camion afin d'éviter l'écrasement de personnes entre deux camions.

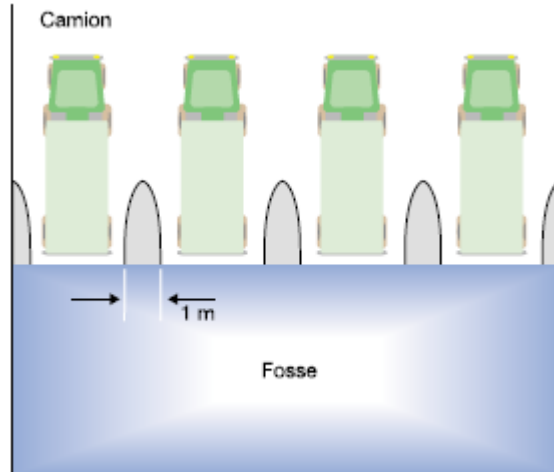


Figure 2.1.8 : Schéma de principe [14]

2.1.5.2. Le four à grille

Les déchets sont incinérés sur une grille oblique à une température de 850°C à 1000°C. Des tables d'alimentation et de dosage veillent à ce que les déchets arrivent régulièrement sur les grilles d'incinération, afin de permettre une incinération contrôlée.

2.1.5.2.1. Hypothèses

- t_{sm} (45min) temps de séjour des déchets à l'intérieur du four.
- On considère que les ordures ménagères sont relativement compactées dans le four, on peut alors définir leur masse volumique qui est de l'ordre de 500kg/m^3 .
- le volume actif du four et de chacun des réacteurs est donné par le modèle :

$$V_a = t_{sm} * Q \quad (2.1.3)$$

D'où

$$V_a = t_{sm} * \frac{\dot{m}_{OM}}{\rho_{OM}} \quad (2.1.4)$$

$$V_a = \frac{45}{60} * \frac{15000}{500}$$

$$V_a = 22,5 \text{ m}^3$$

Dans la littérature, la largeur des grilles est proportionnelle à la capacité nominale des fours.

Donc on trouve en moyenne qu'il faut **0.3m** de largeur de grilles par tonne de déchets brûlés en **1 heure**. [12]

Dans notre cas nous avons alors :

$$l_{grille} = 0,3 * 15 \quad ; \quad l_{grille} = 4,5 \text{ m}$$

Nous pouvons aussi trouver que le rapport entre la hauteur du lit et sa longueur est de l'ordre de $\frac{1}{12}$:

$$Va = l_{grille} * h_{lit} * L_{four} \quad (2.1.5)$$

$$V = 4.5 * \frac{1}{12} * L_{four}^2$$

$$L_{four} = \sqrt{\frac{22,5 * 12}{4,5}} \quad ; \quad L_{four} = 7,75 \text{ m}$$

Et :

$$h_{lit} = \frac{1}{12} * L_{four} \quad ; \quad h_{lit} = 0,65 \text{ m}$$

Si on représente le four de combustion par un pavé, il aura les dimensions suivantes :

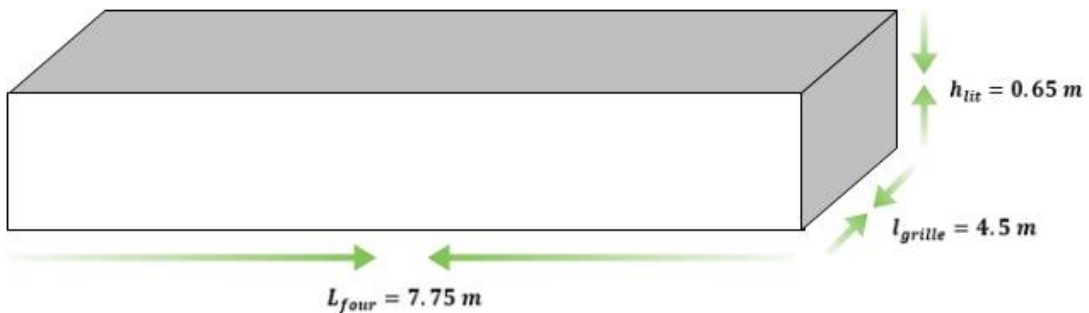


Figure 2.1.9 : Dimensions du four de combustion

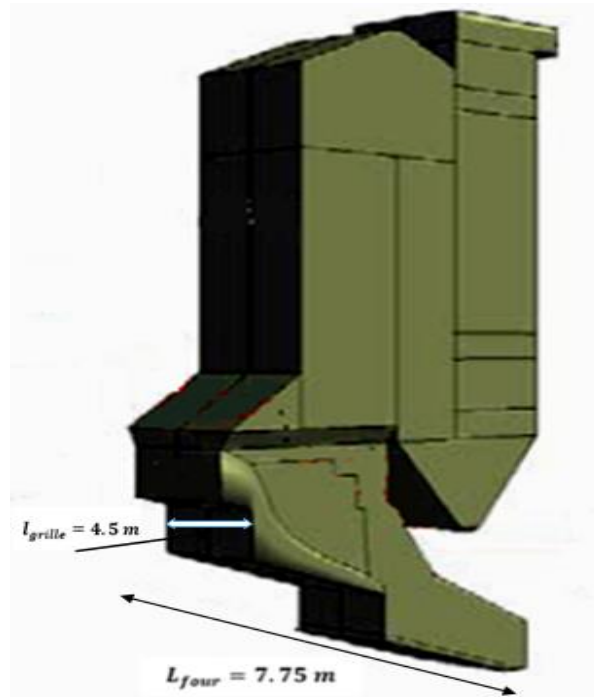


Figure 2.1.10 : Représentation de la géométrie 3-D de l'incinérateur [4]

2.1.5.2.2. Chambre de combustion

La chambre de combustion est située au-dessus des grilles et elle est formée de parois revêtues intérieurement de réfractaires.

Avant de dimensionner la chambre de combustion, il faut d'abord déterminer le nombre des brûleurs dans le four.

On suppose que les déchets à l'intérieur du four ont deux cinétiques différentes selon leur nature, on parle des déchets de nature cellulosique (papier, carton, bois...) qui se décomposent dans la même gamme de température et avec des vitesses comparables. La partie cellulosique des OM ne nécessite pas un traitement individuel de chacun de ses composants.

Et on parle aussi des déchets non cellulosiques comme les plastiques. Qui ont une cinétique lente par rapport aux déchets cellulosiques.

On note l'hétérogénéité des OM par la caractérisation de ces deux groupes de constituants : [12]

- Partie cellulosique (C)
- Partie non-cellulosique (NC)

Supposons que l'ordre de la réaction est de 1, on peut alors écrire les équations qui régissent la vitesse réaction :

$$\frac{dm_C}{dt} = -k_C * (m_C - m_{C,\infty}) \quad (2.1.6)$$

$$\frac{dm_{NC}}{dt} = -k_{NC} * (m_{NC} - m_{NC,\infty}) \quad (2.1.7)$$

Avec k_C et k_{NC} les constantes cinétiques des différents groupes de constituants et $m_{C,\infty}$ et $m_{NC,\infty}$ les masses résiduelles de chacun des groupes après leur pyrolyse ($t=\infty$).

Et :

$$k_i = A * \exp \frac{-E_i}{RT} \quad (2.1.8)$$

Les constantes de cinétique sont maintenant définies et **peuvent** être utilisées pour la caractérisation du four de combustion en lui-même. [18]

$$k_{C,1000 K} = 225,7 \text{ s}^{-1}$$

$$k_{NC,1000 K} = 0,045 \text{ s}^{-1}$$

Le nombre de réacteurs en série J ainsi que leur volume respectifs afin d'avoir un taux de conversion donné.

On peut donc représenter le four de la façon suivante :

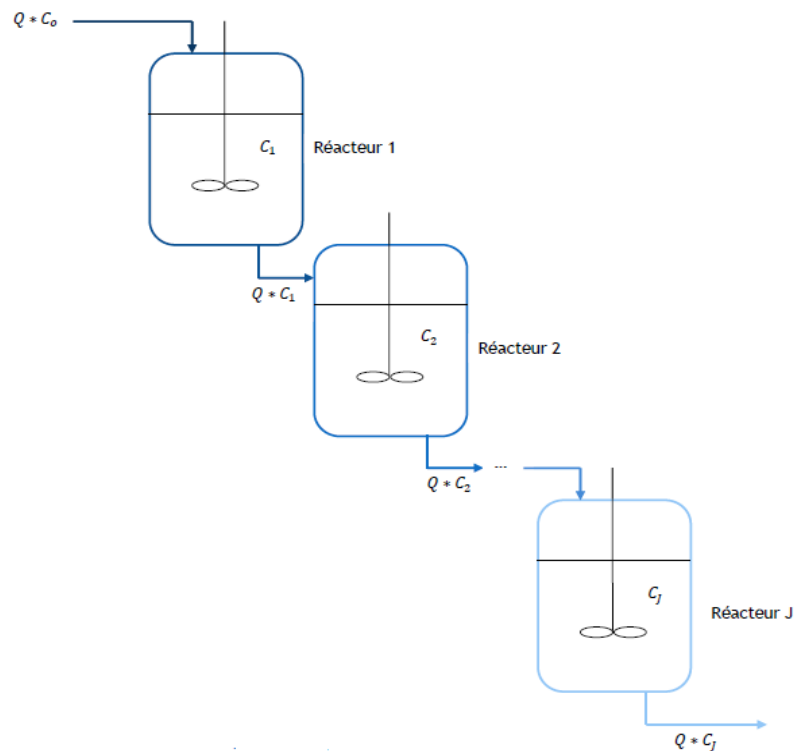


Figure 2.1.11 : Schéma modélisation du four de combustion [12]

Pour ce type de réacteur et de configuration on peut écrire :

- Réacteur 1 :

$$Q * C_0 - rV_1 = Q * C_1$$

- Réacteur 2 :

$$Q * C_1 - rV_2 = Q * C_2$$

- Réacteur J :

$$Q * C_{J-1} - rV_J = Q * C_J$$

Soit la forme de récurrence suivante pour $i^{\text{ème}}$ réacteur :

$$Q * C_{i-1} - rV_i = Q * C_i$$

Que l'on peut écrire de la façon suivante :

$$Q * C_{i-1} = Q * C_i + V_i * \frac{dC_i}{dt}$$

En introduisant la fonction de Laplace on obtient :

$$Q\bar{C}_{i-1} = Q\bar{C}_i + sV_i\bar{C}_i$$

La fonction de transfert est définie par :

$$G(s) = \frac{\bar{C}_j}{\bar{C}_0}$$

Ainsi on obtient par récurrence :

$$G(s) = \frac{1}{\left(1 + s * \frac{V_i}{Q}\right)^J} \quad (2.1.9)$$

On a X : fraction du réactif limitant, ou du réactif de référence, qui a réagi

$$X(t) = \frac{C_0 - C_t}{C_0} = 1 - \frac{C_t}{C_0} = 1 - G(s)$$

On aboutit à la relation suivante :

$$(1 - X) = \frac{1}{\left(1 + k * \frac{t_{sm}}{J}\right)^J} \quad (2.10)$$

En fixant alors la valeur de X, on peut déterminer le nombre de réacteurs parfaitement agité en série **J**.

Nous avons deux valeurs de constantes cinétique, qui correspondent aux deux groupes de constituants définis précédemment. On obtient alors deux résultats. Une valeur de **J** pour la combustion du groupe de constituants cellulosique et une autre valeur de **J** pour le second groupe de constituants.

Comme nous avons pu le voir précédemment, le temps de séjour moyen pour une technologie de type four à grilles est de l'ordre de 45 min à 1h, nous prendrons donc :

$$t_{sm} = 45 * 60 = 2700 \text{ s}$$

Soit **J** :

$$J = J_c + J_{NC}$$

Nous obtenons alors les valeurs présentées dans (le tableau 2.1.3) :

Tableau 2.1.3 : Valeurs de J à taux de conversion fixé

Taux de conversion	J _c	J _{NC}	J
0.9999	1	2	3

Les bruleurs monobloc gaz (NC1, NC2 et C1) sont des appareils à air soufflé à une ou deux allures de fonctionnement avec faibles rejets polluants (bas NO_x).et qui ont un débit moyen égal **14 kg/h** [4]

Donc le débit de gaz total égal :

$$F_{gaz} = 42 \text{ kg/h.}$$

Alors notre four est caractérisé par une surface de combustion constituée de trois grilles mécaniques à tapis mobile disposée en escaliers, offrant ainsi un moyen adéquat d'avancement et de retournement des ordures.

La première grille a pour fonction :

- Alimenter le four ;
- Permettre le séchage des ordures en les exposant le temps nécessaire au rayonnement des parois.

Les deux autres grilles servent à la combustion proprement dite.

Notons aussi que le four dispose d'un moyen de réglage du débit d'air ainsi que de la vitesse d'avancement des tapis en fonction de la charge.

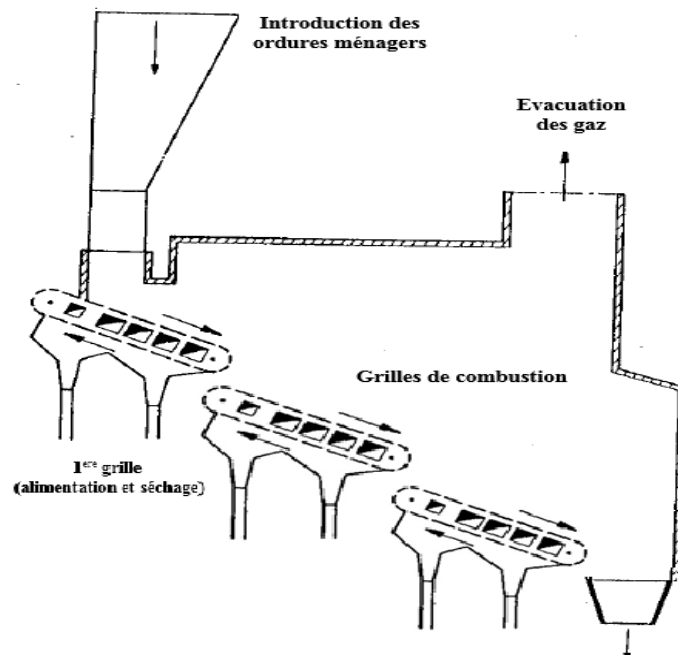


Figure 2.1.12 : Représentation de four à grille et la chambre de combustion [17]

Selon la réglementation, les fumées doivent passer un minimum de 2 seconds dans la chambre de combustion.

On prendra 3 m de hauteur de chambre pour être sûr de respecter la réglementation.

2.1.5.3. Calcul de débit des fumées

Le fonctionnement d'une usine d'incinération s'appuie sur des bilans de masses et d'énergie. Il est donc essentiel de connaître les différents flux de matière et énergie relatifs aux différentes étapes de procédé.

Le but étant par la suite de pouvoir estimer le débit des fumées.

2.1.5.3.1. Bilans de masse

L'incinération est alimentée d'une part en déchets et d'autre part en air, qui apporte l'oxygène nécessaire à la combustion des déchets. [19]

Bilan masse total sur le four de combustion :

$$\text{ENTREE} = \text{DECHETS} + \text{AIR}$$

L'incinération produit plusieurs types d'émissions et de rejets, principalement : [19]

- Les mâchefers ou MIOM, résidus solides restant en sortie basse du four (cendres, imbrulés)
- Les REFIOM (Résidus d'Épuration des Fumées d'Incineration des ordures ménagères), qui comprennent les poussières et cendres volantes, séparées par filtration, et les résidus solides de lavage des fumées, ayant piégé dioxines, NOx, gaz acides et métaux lourds.

$$\text{SORTIE} = \text{MACHEFERS} + \text{REFIOM}$$

Bilan masse total sur le four de combustion :

$$\dot{m}_{air} + \dot{m}_{OM} = \dot{m}_{fumees} + \dot{m}_{machefers} \quad (2.1.11)$$

Bilans masse partiel et matière sur le four de combustion :

- **Carbone :**

$$\dot{m}_{OM} * x_{OM}^C = \dot{m}_{fumees} * (x_{fumees}^{CH4} + x_{fumees}^{CO} + x_{fumees}^{CO2}) + \dot{m}_{machefers} * x_{machefers}^C \quad (2.1.12)$$

- **Hydrogène :**

$$\dot{m}_{OM} * x_{OM}^H = \dot{m}_{fumees} * (x_{fumees}^{CH4} + x_{fumees}^{H2} + x_{fumees}^{HCl}) \quad (2.1.13)$$

- **Oxygène :**

$$\dot{m}_{air} * \dot{x}_{air}^O + \dot{m}_{OM} * x_{OM}^O = \dot{m}_{fumees} * (x_{fumees}^{NO} + x_{fumees}^{CO} + x_{fumees}^{CO2} + x_{fumees}^{SO2}) \quad (2.1.14)$$

- **Azote**

$$\dot{m}_{air} * \dot{x}_{air}^N + \dot{m}_{OM} * x_{OM}^N = \dot{m}_{fumees} * x_{fumees}^{NO} \quad (2.1.15)$$

- **Chlore :**

$$\dot{m}_{OM} * x_{OM}^{Cl} = \dot{m}_{fumees} * x_{fumees}^{HCl} \quad (2.1.16)$$

- **Somme des compositions :**

$$x_{fumees}^{CH4} + x_{fumees}^{H2} + x_{fumees}^{CO} + x_{fumees}^{CO2} + x_{fumees}^{SO2} + x_{fumees}^{HCl} + x_{fumees}^{NO} = 1 \quad (2.1.17)$$

2.1.5.3.2. Bilan énergie

On peut maintenant définir les bilans énergie qui régissent la combustion dans le four comme suit :

Energie fournie par la combustion des déchets	+	Energie fournie par la combustion des gaz	+	Energie fournie par la combustion du carbone fixé	=	Energie nécessaire à la vaporisation de l'eau	+	Energie nécessaire à la pyrolyse des gaz.
--	---	--	---	--	---	--	---	---

Avec :

$$\frac{dU}{dt} = \dot{W} + \dot{Q} + \sum_i \dot{m}_i^{entrée} * h_i^{entrée} - \sum_i \dot{m}_i^{sortie} * h_i^{sortie} \quad (2.1.18) \quad [20]$$

Si on considère le système fonctionnant en régime permanent, sans apport de travail et un four adiabatique, on peut écrire :

$$\sum_i \dot{m}_i^{entrée} * h_i^{entrée} = \sum_i \dot{m}_i^{sortie} * h_i^{sortie} \quad (2.1.19)$$

D'où l'équation (2.1.20) :

$$\dot{m}_{OM} * PCI_{waste} + \dot{m}_{OM} * [\%_{gaz} * (x_{fumees}^{CH4} * PCI_{CH4} + x_{fumees}^{H2} * PCI_{H2} + x_{fumees}^{CO} * PCI_{CO})] + \dot{m}_{OM} * \%_{c.fixe} * PCI_{c.fixe} = \dot{m}_{OM} * h * L_{vap}(P, T) + \dot{m}_{OM} * \%_{gaz} * \Delta_r H_{pyrolyse}(T)$$

Pour ce bilan d'énergie il faut déterminer deux grandeurs :

- Pouvoir calorifique PCI_{waste}
- L'enthalpie de pyrolyse $\Delta_r H_{pyrolyse}(T)$

a) Calcul de pouvoir calorifique :

Afin de caractériser le mélange d'ordures ménagères sur le plan énergétique, il convient de définir le pouvoir calorifique supérieur **PCS** ainsi que le pouvoir calorifique inférieur **PCI**. On assimile alors les ordures comme un mélange constitué de différents composés chimiques comme définis précédemment.

La formule de Boie permet de déterminer les pouvoir calorifique supérieur et inférieur (en kJ/kg) comme suit [21] :

$$PCS_{waste} = 4.186 * (84\tau_C^S + 223.65\tau_H^S - 26.5\tau_O^S + 26\tau_S^S + 15\tau_N^S - 5.5\tau_{Cl}^S) * 100 \quad (2.1.21)$$

Où τ indique la teneur massique en l'élément considéré (C, H, O, S, N, Cl) dans les déchets secs. On obtient ainsi :

$$PCS_{waste} = 4.186 * (84 * 45.7 + 223.65 * 7 - 26.5 * 41 + 26 * 0.211 + 15 * 0.09 - 5.5 * 5.999)$$

$$PCS_{waste} = 17965 \text{ KJ/ Kg}$$

De la même façon, le PCI comme suit [21] :

$$PCI = PCS - \Delta H_{vap} * (h + 9 * \tau_H^S) \quad (2.1.22)$$

Où ΔH_{vap} est l'enthalpie de vaporisation de l'eau et h l'humidité du déchet brut exprimée par kg de déchet brut.

Ainsi si on prend ΔH_{vap} à 1bar pour l'eau et que l'on considère que les déchets ont une humidité de 20% on obtient :

$$PCI_{waste} = 17965 - 2257,92 * (0,14 + 9 * 0,07)$$
$$PCI_{waste} = 16226 \text{ KJ/Kg soit } 16,2 \text{ MJ/Kg}$$

b) Calcul de l'enthalpie de pyrolyse :

On appliquant la loi de **Kirchhoff** à **pression constante** [20] :

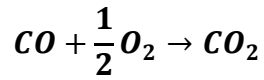
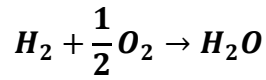
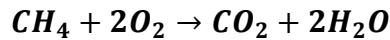
$$\Delta_r H_{pyrolyse}(T) = \Delta_r H_{pyrolyse}^{\circ}(T^{\circ}) - \sum_i \int_{T^{\circ}}^T h_i dT + \sum_j \int_{T^{\circ}}^T h_j dT \quad (2.1.23)$$

Et d'après la loi de **Hess** [20] :

$$\Delta_r H_{pyrolyse}^{\circ}(T^{\circ}) = \sum_j v_j \Delta H_{f,j}^{\circ}(T^{\circ}) - \sum_i v_i \Delta H_{f,i}^{\circ}(T^{\circ}) \quad (2.1.24)$$

Détermination de $\Delta_r H_{pyrolyse}(T)$ par résolution du bilan énergie :

On a les réactions de combustion suivante :



Ces réactions sont considérés comme totales.

De l'équation (2.1.23) et (2.1.24) » et d'après les réactions de combustion on obtient :

Pour $T^\circ = 298 K$:

$$\begin{aligned} \Delta_r H^\circ_{pyrolyse}(298) = \\ 3 * \Delta H^\circ_{f,CO_2}(298) + 3 * \Delta H^\circ_{f,H_2O}(298) - \Delta H^\circ_{f,C}(298) - 4 * \Delta H^\circ_{f,O_2}(298) \\ - \Delta H^\circ_{f,CH_4}(298) - \Delta H^\circ_{f,H_2}(298) - \Delta H^\circ_{f,CO}(298) \end{aligned}$$

Or l'enthalpie standard de formation à T d'un corps simple stable est nulle, puisque l'enthalpie de formation, c'est la réaction de formation à partir de lui-même.

D'où :

$$\Delta H^\circ_{f,C}(298) = * \Delta H^\circ_{f,O_2}(298) = \Delta H^\circ_{f,H_2}(298) = 0$$

Alors pour une valeur massique on obtient :

$$\Delta_r H^\circ_{pyrolyse}(298) = 3 * \left(\frac{-393.52}{44} \right) + 3 * \left(\frac{-285.10}{18} \right) + \frac{74.9}{16} + \frac{110.58}{28}$$

$$\Delta_r H^\circ_{pyrolyse}(298) = -65,72 \text{ KJ/Kg}$$

Aussi :

$$\sum_i \int_{T^\circ}^T h_i dT = \int_{T^\circ}^T C p_C dT + 4 * \int_{T^\circ}^T C p_{O_2} dT + \int_{T^\circ}^T C p_{CH_4} dT + \int_{T^\circ}^T C p_{H_2} dT + \int_{T^\circ}^T C p_{CO} dT \quad (2.1.25)$$

$$\sum_j \int_{T^\circ}^T h_j dT = 3 * \int_{T^\circ}^T C p_{CO_2} dT + 3 * \left[L v(T^\circ, P) + \int_{T^\circ}^T C p_{H_2Og} dT \right]$$

Avec Cp de la forme : (voir ANNEXE 3)

$$Cp(T) = a + 10^{-3} b * T + 10^6 c * T^{-2} + 10^{-6} d * T^2$$

Telle que les valeurs de a, b, c et d sont issus du [handbook of physics and chemistry].

Voici un exemple de calcul :

$$\int_{T^{\circ}}^T C_{p_{O_2}} dT = \left[\left(a_{O_2} * (T - T^{\circ}) + 10^{-3} * b_{O_2} * \left(\frac{T^2}{2} - \frac{T^{\circ 2}}{2} \right) - 10^6 * c_{O_2} * \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T^{\circ}} \right) + 10^{-6} * d_{O_2} * \left(\frac{T^3}{3} - \frac{T^{\circ 3}}{3} \right) \right) \right]$$

Les autres termes s'obtiennent de la même façon.

Si on suppose $T = 1100 K$, on obtient :

$$\Delta_r H^{\circ}_{pyrolyse}(1100) = -11060,4 \text{ KJ/Kg}$$

Afin de résoudre les équations précédentes dans le but de déterminer les compositions de chacun des constituants dans les fumées, on peut utiliser une technique de résolution de systèmes linéaires telle que le pivot de Gauss.

On considère ici que seules les espèces contenues dans les OM sont susceptibles de réagir, c'est-à-dire le pourcentage d'atomes réactifs contenus en entrée (noté $\%_{ato} = 0.56$) et le pourcentage de gaz volatiles en sortie (noté $\%_{gaz} = 0.49$). Le système à résoudre est donc :

$$\left\{ \begin{array}{l} \%_{ato} * x_{OM}^C = \%_{gaz} * (x_{fumees}^{CH_4} + x_{fumees}^{CO} + x_{fumees}^{CO_2}) + \%_{car.fixe} \\ \%_{ato} * x_{OM}^H = \%_{gaz} * (x_{fumees}^{CH_4} + x_{fumees}^{H_2} + x_{fumees}^{HCl}) \\ x_{fumees}^{CH_4} + x_{fumees}^{H_2} + x_{fumees}^{CO} + x_{fumees}^{CO_2} + x_{fumees}^{SO_2} + x_{fumees}^{HCl} + x_{fumees}^{NO} = 1 \\ \dot{m}_{air} * x_{air}^N + \%_{ato} * x_{OM}^N = \%_{gaz} * x_{fumees}^{NO} \\ \%_{ato} * x_{OM}^{Cl} = \%_{gaz} * x_{fumees}^{HCl} \\ \%_{ato} * x_{OM}^S = \%_{gaz} * x_{fumees}^{SO_2} \\ PCI_{waste} + [\%_{gaz} * (x_{fumees}^{CH_4} * PCI_{CH_4} + x_{fumees}^{H_2} * PCI_{H_2} + x_{fumees}^{CO} * PCI_{CO})] \\ + \%_{c.fixe} * PCI_{c.fixe} = h * L_{vap}(P, T) + \%_{gaz} * \Delta_r H_{pyrolyse}(T) \end{array} \right.$$

Avec

$$PCI_{CH_4} = 50,01 \text{ MJ/Kg}, PCI_{CO} = 10,09 \text{ MJ/Kg}, PCI_{H_2} = 119,93 \text{ MJ/Kg}, PCI_{c.fixe} = 33,3 \text{ MJ/Kg}$$

Ou encore :

$$\left\{ \begin{array}{l} 0.56 * 0.457 - 0.07 = 0.49 * x_1 * \frac{M_C}{M_{CH_4}} + 0.49 * x_2 * \frac{M_C}{M_{CO}} + 0.49 * x_3 * \frac{M_C}{M_{CO_2}} + 0.07 \\ 0.56 * 0.07 = 0.49 * x_1 * \frac{4 * M_H}{M_{CH_4}} + 0.49 * x_4 * \frac{2 * M_H}{M_{H_2}} + 0.49 * x_5 * \frac{M_H}{M_{HCl}} \\ x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5 + x_6 + x_7 = 1 \\ 28.84 * [4.7733 * \alpha] * 0.7905 + 0.56 * \frac{0.09}{100} = 0.49 * x_6 * \frac{M_N}{M_{NO}} \\ 0.56 * 0.0599 = 0.49 * x_5 * \frac{M_{Cl}}{M_{HCl}} \\ 0.56 * \frac{0.211}{100} = 0.49 * x_7 * \frac{M_S}{M_{SO_2}} \\ 16.1 + [0.49 * (x_1 * 50.01 + x_2 * 10.9 + x_4 * 119.93)] \\ + 0.07 * 33.3 = 0.14 * 2257.98 * 10^{-3} + 0.49 * (-11060.4 * 10^{-3}) \end{array} \right.$$

Avec

$$\alpha = [5.833 * 10^{-3} + 8.75 * 10^{-3} * (7 * x_{fumees}^{CH_4} + 14 * x_{fumees}^{H_2} + x_{fumees}^{CO})]$$

On obtient alors :

$$\left\{ \begin{array}{l} x_1 = 0,12032 \\ x_2 = 0,51864 \\ x_3 = 0,23738 \\ x_4 = 0,04571 \\ x_5 = 0,07069 \\ x_6 = 0,00240 \\ x_7 = 0,00493 \end{array} \right.$$

Tableau 2.1.4 : Composition massique des Gaz volatile

Gaz volatile	CH ₄	CO	CO ₂	H ₂	HCl	NO	SO ₂
Composition massique (%)	12,03	51,86	23,74	4,57	7,07	0,24	0,49

On peut désormais calculer le débit d'air nécessaire à la combustion [12] :

$$F_{air} = \left[15000 * \left(\frac{\%_{c.fixe}}{M_C} + \%_{gaz} * \left[\frac{7x_{fumees}^{CH_4} + 14x_{fumees}^{H_2} + x_{fumees}^{CO}}{56} \right] \right) \right] * \frac{100}{20.95} \quad (2.1.26)$$

$$F_{air} = \left[15000 * \left(\frac{0.07}{12} + 0.49 * \left(\frac{7 * 0.1246 + 14 * 0.0469 + 0.5205}{56} \right) \right) \right] * \frac{100}{20.95}$$

$$F_{air} = 1701,53 \text{ kmol/h}$$

$$Q_{air} = 2 * \frac{F_{air} * 8.314 * T_{air}}{P_{air}} \quad (2.1.27)$$

$$Q_{air} = 2 * \frac{1701. * 10^3 * 8.314 * 298}{1.013 * 10^5}$$

$$Q_{air} = 41615,63 \text{ Nm}^3/\text{h}$$

D'où le débit massique des fumées est calculé comme suit :

$$\dot{m}_{air} + \dot{m}_{OM} = \dot{m}_{fumees} + \dot{m}_{machefers}$$

$$\dot{m}_{fumees} = Q_{air} * \rho_{air} + \dot{m}_{OM} - \dot{m}_{machefers}$$

$$\dot{m}_{fumees} = Q_{air} * \frac{PM}{RT} + \dot{m}_{OM} * (1 - \text{Inertes} - \text{carbone fixe})$$

$$\dot{m}_{fumees} = 59888,62 \text{ kg/h}$$

2.1.5.4. Valorisation énergétique

Tableau 2.1.5 : Caractéristiques courants turbine

Grandeur	Avant turbine	Après turbine	
		Vapeur revendue	Eau liquide
Etat	Vapeur surchauffée	Vapeur revendue	Eau liquide
Débit massique (Kg/h)	17620,42	Variable selon la demande	Variable selon la demande
Température (°C)	360	325,5	114
Pression (bar)	40	20	5

La puissance électrique que nous pouvons récupérer grâce au courant vapeur sortant de la chaudière est liée à l'état de ce courant : sa température, sa pression, son débit et son enthalpie.

Afin de calculer la puissance électrique récupérée aux bornes de l'alternateur, nous allons procéder en deux étapes :

- Calcul de la puissance mécanique appliquée sur l'arbre de la turbine
- Calcul de la puissance électrique récupérée après l'alternateur.

2.1.5.4.1. Puissance mécanique appliquée à l'arbre de la turbine

La puissance mécanique récupérée est donnée par la formule ci-dessous :

$$P_{méca} = Q_m \cdot \eta_t \cdot DH \quad (2.1.27)$$

Avec :

$P_{méca}$ = Puissance mécanique transmise à l'arbre de la turbine (en kW)

Q_m = Débit massique du courant vapeur sortant de la chaudière (en kg/s)

η_t = Rendement de la turbine

DH = Chute enthalpique (en kJ/kg)

- **Détermination de la chute enthalpique :**

Pour cela il faut calculer tout d'abord l'enthalpie de la vapeur surchauffée entrant dans la turbine.

$$h(40 \text{ bars}, 350 \text{ }^\circ\text{C}) = 3092,5 \text{ kJ/kg}$$

$$h(40 \text{ bars}, 400 \text{ }^\circ\text{C}) = 3213,6 \text{ kJ/kg}$$

Ainsi, par régression linéaire, nous pouvons en déduire que :

$$h(40 \text{ bars}, 360 \text{ }^\circ\text{C}) = 3116,72 \text{ kJ/kg}$$

La chute enthalpique résulte de la perte de pression du fluide lors de son passage dans la turbine, donc de la détente isentropique subite par celui-ci. On peut déterminer la valeur de la chute enthalpique grâce au Diagramme de Molier de la vapeur d'eau. Une détente isentropique (lecture sur l'axe des ordonnées) jusqu'à une pression de **0,1** bars absolu, donnerait une vapeur dont l'enthalpie est de **2160 kJ/kg**.

La valeur du DH est donc directement déductible :

$$DH = 3116,72 - 2160,4 = 956,72 \text{ kJ/kg}$$

- **Débit massique de la vapeur d'eau :**

Le débit de vapeur sortant de la chaudière est de :

$$Q_m = 17620,42 \text{ kg/h.}$$

- **Rendement de la turbine**

Pour le calcul, nous avons besoin du rendement de la turbine.

Il a été fixé à :

$$\eta_t = 72 \%$$

- **Calcul**

Nous pouvons donc déterminer la puissance reçue par l'arbre de la turbine.

$$P_{méca} = Q_m \cdot \eta_t \cdot DH = \frac{17620,42}{3600} * 0,72 * 956,72$$

$$P_{méca} = \mathbf{3265,83 \text{ KW}}$$

2.1.5.4.2. Puissance électrique récupérée

Afin d'en déduire la puissance électrique récupérée après l'alternateur, on devra prendre en compte le rendement de cet alternateur ainsi que les pertes mécaniques du réducteur de vitesse (environ 1,5%).

La puissance électrique récupérée est donc de :

$$P_{elec} = P_{méca} * \eta_a * (1 - \%_{pertes}) \quad (2.1.28)$$

- **Rendement de l'alternateur**

Selon [13] Le rendement de l'alternateur est de l'ordre de :

$$\eta_{alternateur} = 0,6$$

- **Pourcentage de pertes**

En effet Il faut tenir compte des pertes mécaniques du réducteur de vitesse qui sont globalement évalué à **1,5%**. On devra donc déduire cette grandeur lors du calcul de l'énergie électrique récupérée.

- **Calcul**

Nous avons donc, aux bornes de l'alternateur :

$$P_{elec} = P_{méca} * \eta_a * (1 - \%_{pertes}) \quad (2.1.29)$$

$$P_{elec} = 3265,83 * 0,6 * (1 - 0,015) = 1930,08 \text{ kW}$$

Partant du principe que l'UIOM fonctionne durant 8000 h/an, on en déduit l'énergie créée par notre système en une année :

$$\text{Energie créée} = 1930,08 \times 8000 \simeq 16 \text{ GWh}$$

2.1.5.4.3. Courant après turbine

La turbine utilisée ici est une turbine à soutirage et à condensation. Ainsi, nous aurons deux sorties à notre turbine :

- Une sortie de vapeur surchauffée à une pression moyenne d'environ 20 bars que nous revendons à des professionnels du génie climatique
- Le reste de la vapeur sera détendue puis condensée et nous sortons un courant d'eau liquide que nous pouvons réinjecter dans la bache de rétention.

Cette technologie de turbine est utile lorsque la demande en vapeur moyenne pression est susceptible de varier fortement au cours du temps. Ainsi, si la demande est nulle, toute la vapeur entrante sera transférée vers la zone basse pression afin d'être condensée.

2.1.5.5. Conclusion

Ce chapitre a été consacré à la détermination de quelques paramètres tels que le volume de la chambre de combustion, le débit des fumées ainsi que la fraction massique des polluants, les résultats obtenus seront utilisés dans le chapitre qui suit.

Chapitre 2.2 : Analyse Préliminaire des Risques APR

Chapitre 2.2. Analyse préliminaire des risques

2.2.1. Introduction

L'analyse préliminaire des risques (APR) : permet de mettre en évidence et d'étudier les dysfonctionnements susceptibles d'apparaître du fait de l'existence de fonctions ou/et d'éléments dangereux du système :

- Identifier les fonctions et éléments potentiellement à risques, et les EI/ER associés (effet système).
- Caractériser et hiérarchiser ces EI/ER en termes de scénario d'apparition et de gravité.
- Déterminer les modes de traitement adaptés à chaque EI/ER.

Généralement, le processus de construction de la sécurité d'un système comporte plusieurs analyses complémentaires hiérarchisées : L'analyse préliminaire de risques, l'analyse fonctionnelle de la sécurité, et l'analyse de la sécurité du produit réalisé [28]

2.2.2. Quelques définitions

- **Danger** : Potentiel de nuisance (préjudice ou dommage) portant atteinte au système et à son environnement [25].
- **Situation dangereuse** : Etat d'un système en présence d'un danger [25].
- **Analyse fonctionnelle** : C'est une démarche qui « consiste à rechercher et à caractériser les fonctions offertes par un produit pour satisfaire les besoins de son utilisateur. »

Le mot produit peut prendre des sens très divers. Il peut s'agir d'un objet matériel ou immatériel (produit industriel, objet technique, programme informatique, service à la personne, services financiers...).

- **Un évènement redoutés /indésirable (EI/ER)** : C'est la conséquence d'un évènement initiateur se traduisant par une situation dangereuse, ou plus généralement, par l'échec de la mission du système
- **Risque** : Caractéristique d'un évènement, définie à la fois par sa probabilité de survenue et la gravité de ses conséquences [25]

2.2.3. Généralités sur APR

2.2.3.1. Présentation de l'analyse préliminaire des risques (APR)

L'analyse préliminaire des risques (APR) est une démarche, un processus dont l'objectif est d'évaluer les problèmes à résoudre en matière de maîtrise des risques. La méthode APR est dédiée à cette démarche [23]. Elle a pour objectif d'identifier et recenser les potentiels de danger concernant une installation, à l'exploitation de diverses sources de données [26].

L'analyse préliminaire des risques (APR) a été développée au début des années 1960 dans les domaines aéronautique et militaire [24] [27]. Selon la norme CEI-300-3-9 (CEI 300-3-9, 1995) : « L'APR est une technique d'identification et d'analyse de la fréquence du danger qui peut être utilisée lors des phases amont de la conception pour identifier les dangers et évaluer leur criticité ».

L'APR est généralement élaborée pendant la première phase de spécification du système. Les résultats de cette analyse permettent non seulement d'établir les grandes lignes des analyses de sécurité situées en aval (analyse fonctionnelle de la sécurité, analyse de la sécurité des logiciels, analyse de la sécurité des matériels) mais aussi de définir les exigences et critères de sécurité du système (de haut niveau) à prendre en compte lors des phases de conception et de réalisation des équipements matériels et logiciels. En effet, la constitution d'une liste d'accidents potentiels permet de recenser les points du système qui peuvent être critiques pour la sécurité et qui méritent une attention particulière dans la conception, la réalisation, la validation et la maintenance du système [28].

Pour identifier les entités et les situations dangereuses susceptibles d'en découler, l'analyste est aidé par des listes de contrôles (check-lists) d'entités dangereuses, de situations dangereuses et d'événements redoutés. Ces check-lists sont spécifiques au domaine d'étude concerné [24]. Comme son nom l'indique, cette méthode n'est pas destinée à traiter en détail la matérialisation des scénarios d'accident, mais plutôt à mettre rapidement en évidence les gros problèmes susceptibles d'être rencontrés pendant l'exploitation du système étudié. Cependant, l'APR peut aussi et même doit être complétée par la plupart des analyses de risques fonctionnelles telles que l'AMDEC ou l'Arbre de Défaillances.

2.2.3.2. Objectifs de l'analyse préliminaire des risques [24] [27]

L'analyse préliminaire des risques (APR) est une méthode d'identification et d'évaluation des risques au stade initial de la conception d'un système. À partir de l'ensemble des dangers auxquels le système est susceptible d'être exposé tout au long de sa mission, elle a pour objectif : l'identification, l'évaluation, la hiérarchisation et la maîtrise des risques qui en résultent. Elle peut être aussi utilisée avec profit pendant toute la durée de vie de ce système.

L'APR d'un système couvre l'identification :

- des incertitudes sur sa mission ;
- des dangers auxquels il peut être confronté ;
- des situations dangereuses dans lesquelles il peut se retrouver volontairement ou à son insu ;
- des scénarios conduisant à des événements redoutés ;
- des conséquences sur le système et son environnement ;
- des traitements de maîtrise des risques.

Les domaines d'applications sont nombreux, et l'APR peut être réalisée sur toute activité industrielle, militaire, financière, sanitaire, environnementale, à quelque niveau que ce soit (mission, système, composants, etc.).

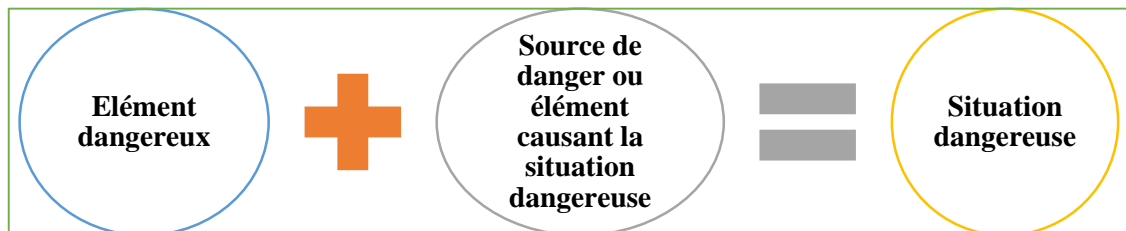
2.2.3.3. Différentes étapes de l'APR

Étape 1 : recueillir les informations

Analyse fonctionnelle du système ou de l'installation et description de son environnement. C'est une étape longue et essentielle puisqu'elle constitue la base pour déterminer les sources de danger.

Étape 2 : pour chaque fonction ou équipement, identifier les sources de danger

- Identification des éléments dangereux De chaque sous-système : substances, équipements et opérations dangereuses en utilisant une liste type.
- Énumération des situations dangereuses pour chaque élément dangereux, préalablement identifié par l'occurrence d'un événement libérateur de la source de danger.



On peut utiliser des listes de types de danger pour fil conducteur.

Exemples de dangers :

- **Produits** : toxicité, inflammabilité, explosivité, incompatibilités entre produits ;
- **Conditions opératoires** : atmosphères explosives, température, pression ;
- **Réactions chimiques** ;
- **Équipements de travail** : engins de levage, postes de soudure, etc. ;
- **Utilités** : conduites de gaz, transformateurs, circuits électriques, compresseurs, etc.

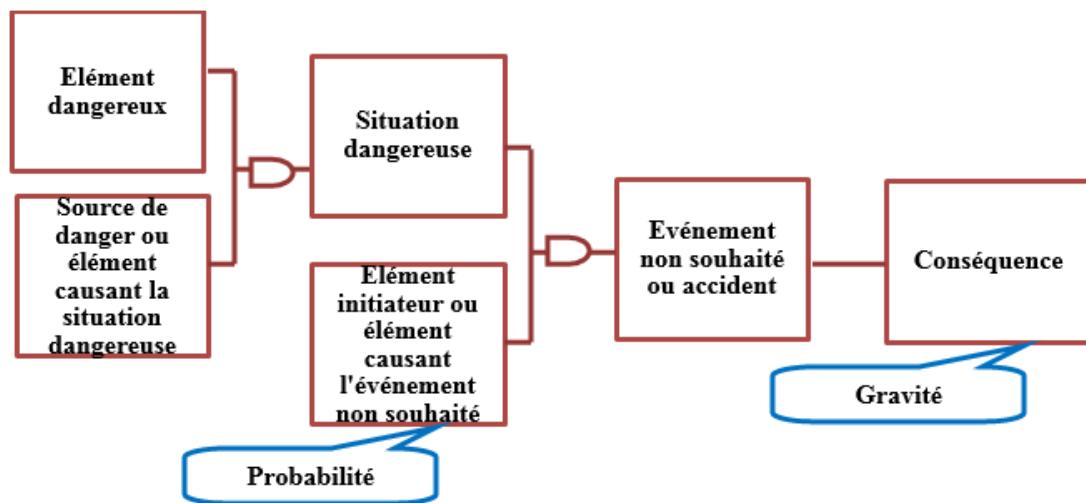
Étape 3 : pour chaque danger identifié, décrire la ou les situations de danger

- détermination des événements non souhaités résultant de chaque situation dangereuse et de l'occurrence d'un événement initiateur.



- détermination des causes et conséquences

Pour chaque situation de dangereuse, envisager toutes les causes et les conséquences possibles.



Les situations de danger doivent être examinées de façon systématique : faire appel à l'expérience et à la réflexion de tous les membres du groupe de travail ; utiliser l'analyse des accidents survenus soit dans l'installation, soit dans des installations similaires.

Etape 4 : pour chaque scénario (cause, situation de danger, conséquence), estimer le risque

Cette étape peut s'effectuer de deux manières :

- Soit réalisé une estimation du risque en groupe selon des critères globaux à définir : risque acceptable ou non acceptable. Dans le cas où le risque est considéré comme inacceptable, indiquer les propositions d'actions (penser à prendre en compte les barrières de sécurité) ;
- Soit estimé le risque à l'aide d'une grille de criticité est donnée selon [31] :

$$\text{Criticité } C = \text{Probabilité d'occurrence} \times \text{Gravité}.$$

Il s'agit d'une cotation simplifiée qui a pour objectif de mettre en lumière les risques nécessitant des analyses plus complètes (tableau 2.2.1).

Tableau 2.2.1 : La grille de fréquence X gravité [32]

		Gravité					
		1	2	3	4	5	6
Fréquence	1	1	2	3	4	5	6
	2	2	4	6	8	10	12
	3	3	6	9	12	15	18
	4	4	8	12	16	20	24
	5	5	10	15	20	25	30

On ressort avec des catégories de risques :

- **Gris : Risque acceptable**
- **Jaune : Risque acceptable dans des conditions**
- **Rouge : Risque inacceptable**

Tableau 2.2.2 : Échelle semi-quantitative d'occurrence [32]

Situations	Niveaux	Commentaires
Éventualité d'apparition négligeable pendant l'intervalle de fonctionnement du système.	1	Extrêmement rare (jamais vu mais potentiel)
Événement non identifié dans l'établissement, mais identifié pour une activité similaire	2	Très rare
Événement déjà observé dans l'établissement, mais restant rare car des mesures préventives sont prises	3	Rare
Événement observable au moins une fois pendant l'intervalle de fonctionnement du système	4	Possible
Événement observable périodiquement pendant l'intervalle de fonctionnement du système	5	Fréquent

Tableau 2.2.3 : Échelle semi-quantitative de gravité [32]

Situations	Niveaux	Commentaires
N'entraînant ni accident de personne ni dommage au système. Les effets ne sont liés qu'à un retard éventuel d'exploitation.	1	Négligeable
N'entraînant ni accident de personne ni dommage important au système. Des palliatifs sont à prendre éventuellement vis-à-vis de l'exploitation des installations.	2	Marginal
Effets potentiels localisés sur les structures de la zone concernée. Pas d'effets sur les individus	3	Sérieux
Effets potentiels localisés sur les structures de la zone concernée. Effets possibles sur quelques individus (blessures)	4	Très sérieux
Effets potentiels sur les structures de l'établissement Effets possibles sur les individus (personnel de l'établissement)	5	Majeur
Effets potentiels sur des structures externes à l'établissement (environnement). Effets possibles sur les individus (tierces personnes)	6	Majeur

Etape 5 : La synthèse de l'APR

La synthèse peut se présenter sous la forme d'un tableau général qui permet de visualiser facilement les points critiques. Ce tableau doit être adapté à l'installation et à la méthode de l'APR, notamment en matière de criticité et de prise en compte des barrières de sécurité dans une deuxième cotation.

Tableau 2.2.4 : Exemple de grille de synthèse d'une APR [oméga 7, maîtrise des risques industriel]

Fonction ou équipement	Source de danger	Situation de danger	Cause	Conséquence	P	G	Criticité	Barrières existantes	Actions recommandées
Stockage matières premières	Produit inflammable	Déversement de produit	Bidon renversé lors de la manipulation	Incendie du stockage	P	G	$P \times G$	Détection incendie	/

2.2.3.4. Avantages et limites

- Cette méthode n'est pas destinée à entrer dans les détails mais plutôt à mettre rapidement en évidence les gros problèmes susceptibles d'être rencontrés sur le système étudié.
- Cette analyse est généralement conduite dès le tout début de la conception du système, elle est ensuite mise à jour au fur et à mesure de l'avancement de la conception, voire de la vie du système en exploitation.
- Cette méthode est relativement économique en terme de temps passé et ne nécessite pas un niveau de description du système étudié très détaillé.

En revanche,

- L'analyse préliminaire de risque ne permet pas de caractériser finement l'enchaînement des évènements susceptibles de conduire à un accident majeur pour des systèmes complexes.
- Il s'agit d'une méthode préliminaire d'analyse qui permet d'identifier des points critiques devant faire l'objet d'études plus détaillées ; grâce à des outils comme l'AMDEC, l'HAZOP ou l'analyse par arbre des défaillances.

Toutefois,

- Son utilisation seule peut être jugée suffisante dans les systèmes simples ou lorsque le groupe de travail possède une expérience significative de ce type d'approche.

2.2.3.5. Pourquoi APR ?

L'analyse préliminaire des risques (APR) peut s'effectuer dès la phase exploratoire (conception) :

- Dès que l'on connaît les fonctions à remplir par le système.
- Dès que l'on connaît les grands choix technologiques.

2.2.4. Analyse fonctionnelle de l'usine

Approche matériel que se situe sur les différentes stations d'une usine d'incinération (annexe)

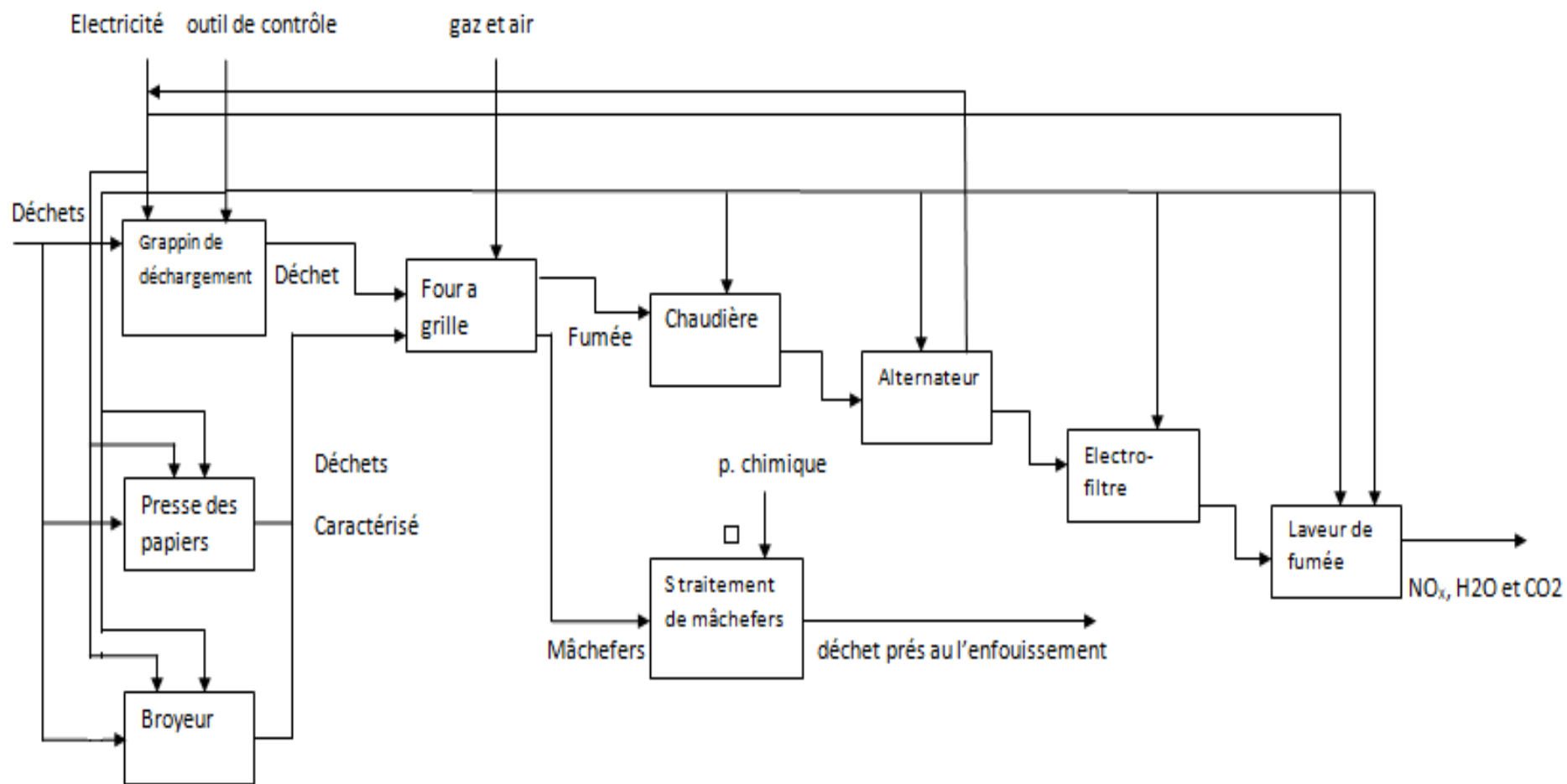


Figure 2.2.1 : Analyse fonctionnelle de l'usine

Tableau 2.2.5 : Tableau APR

N°	Source	système	Évènements redoutés	Causes	Conséquences	F	G	C	Synthèse
39952	ARIA	Cuve de fioul	Déversement de fioul de sa cuve	Inattention de l'exploitant	Incendie + Câble électriques endommagé	3	4	12	/
34988	ARIA	Canalisation de fioul au niveau four	Fuite au niveau de la canalisation de fioul dans le four	Corrosion	Explosion	2	6	12	Arrêt de l'usine
37225	ARIA	Caisson des déchets	Écoulement de produits combustibles au niveau de la jointure entre la table poussante des déchets et le caisson inférieur d'homogénéité	Mauvaise caractérisation de déchets (nom séparation des produits chimique incompatible)	incendie	2	4	12	Arrêt de l'incinération
34973	ARIA	Chambre de combustion	Évaporation brutale du combustible dans la chambre de combustion	Décrochage dans la chambre de post combustion d'un gros bloc de poussières porté à haute température	Explosion	3	6	18	Arrêt de l'usine
35439	ARIA	Fosse Ou quai de déchargement	Traitement des déchets radioactifs	- Passage d'un camion transportant des déchets radioactifs	- Cancer - Mutation génétique - Formation des tumeurs au niveau sur peau	2	5	10	/

Tableau 2.2.6 : Tableau APR

N°	ID	Système	Évènements redoutés	Causes	Conséquences	F	G	C	Synthèse
37494	ARIA	-Fosse des déchets	-Stockage de Déchets Commerciaux et Industriels Banals (DICB) sur le quai	-Mauvaise caractérisation des déchets	- Incendie	4	5	20	Arrêt de l'incinération
38180	ARIA	-Quai de déchargement	- Traitement des déchets radioactifs	-Passage d'un camion transportant des déchets radioactifs	- Cancer - Mutation génétique - Formation des tumeurs au niveau de la peau	2	5	10	/
39784	ARIA	-Quai de déchargement	-Dispersion de nuage toxique (gaz toxique)	-Mauvaise communication entre le prestataire et l'exploitant	-Pollution atmosphérique -intoxication	4	6	24	Arrêt de l'usine
38364	ARIA	-Fosse des déchets	-Stockage de produit chimique incompatible au niveau de la fosse	-Mauvaise caractérisation des déchets (présence des mousses combustible)	-Incendie	4	5	20	Arrêt de l'incinération
38493	ARIA	-Quai de déchargement	- Traitement des déchets radioactifs	-Passage d'un camion transportant des déchets radioactifs	- Cancer - Mutation génétique - Formation des tumeurs au niveau de la peau	2	5	10	/

Tableau 2.2.7 : Tableau APR

N°	ID	système	Évènements redoutés	Causes	Conséquences	F	G	C	Synthèse
35509	ARIA	-Station de traitement de lixiviat	-Fuite au niveau de la cuve de l'acide chlorhydrique	-Corrosion	-Intoxication -Irritation de la voie respiratoire	2	4	8	/
35991	ARIA	-Fosse des déchets	-Stockage de produit chimique incompatible au niveau de la fosse	-Mauvaise caractérisation des déchets	-Incendie	4	5	20	Arrêt de l'usine
36177	ARIA	-Four a gille	-Augmentation de la pression dans le four	-Augmentation de la température dans le four	-UVCE	3	5	15	Arrêt de l'usine
36506	ARIA	-Presse de papiers	-Présence d'étincelle au niveau de la presse de papiers	- Court-circuit électriques	-Incendie	2	5	20	Arrêt de la presse
36770	ARIA	-Laveur des fumées	-Formation d'un panache de fumées toxique	- Brusque coupure d'électricité - Défaillance eu niveau des ventilateurs	-Intoxication -Asphyxie -Trouble respiratoire	4	4	16	/
37425	ARIA	-Laveur des fumées	-Fuite au niveau de la cuve d'ammoniaque utilisé pour le traitement des fumées de l'incinération	- Corrosion	- Inflammation de la gorge et respiration sifflante. - Brûlures - Irritation	2	4	8	/

Tableau 2.2.8 : Tableau APR

N°	D		Évènements redoutés	Causes	Conséquences	F	G	C	Synthèse
39287	ARIA	-Quai de déchargement	-Chute des bennes des camions dans la fosse	-Surpoids	-Blessure -La mort	3	4	12	Arrêt de travail pour les blessés
39343	ARIA	-Entré de four	-Réaction chimique incontrôlé	-Non maîtrise de température et de pression	-Incendie	4	5	20	Arrêt de l'incinération
39541	ARIA	-Station de traitement de mâchefers	Déversement de produits chimique (acétylène C2H2)	-Inattention de l'exploitant	-Incendie	3	5	15	Arrêt de l'incinération
40605	ARIA	-Entré de four	-D'une accumulation de gaz de fermentation dans un tas d'ordure insuffisamment aéré en raison de son volume exagéré	Disfonctionnement au niveau des ventilateurs	-Incendie	3	5	15	Arrêt de l'incinération
40711	ARIA	-Quai de déchargement	- Traitement des déchets radioactifs	-Passage d'un camion transportant des déchets radioactifs	- Cancer - Mutation génétique - Formation des tumeurs au niveau de la peau	2	5	10	/
40923	ARIA	-Broyeur	-Présence de produits chimiques liquide (réactif)	-Mauvaise caractérisation des déchets	-Incendie	3	5	15	Arrêt de broyeur
41585	ARIA	- Four a grille	-Écoulement de l'eau dans le four qui va engendre un dégagement de vapeur (augmentation de la pression à l'intérieur de four)	-Fuite au niveau de la canalisation de refroidissement	-Explosion de four	3	6	18	Arrêt de l'usine

Chapitre 2.3 : Maîtrise des Risques

Chapitre 2.3. Maîtrise des risques

2.3.1. Introduction

La maîtrise des risques est d'empêcher que les travailleurs soient exposés à des risques professionnels. Certaines méthodes sont plus efficaces que d'autres, mais généralement une combinaison de méthodes différentes assure une plus grande sécurité sur le lieu de travail que le recours à une seule méthode. Certaines méthodes sont moins chères que d'autres mais ne sont peut-être pas nécessairement les plus efficaces pour réduire les risques.

Le moyen le plus efficace de maîtriser les risques est de les réduire à la source en éliminant le risque ou en remplaçant un agent ou une méthode de travail dangereux par un autre moins dangereux.

2.3.2. Principaux types d'accidents survenus

La répartition des types d'accidents est donnée en % du nombre d'accidents pour lequel le type d'événement est connu. Les indicateurs chiffrés correspondants sont à examiner avec prudence en raison du faible échantillon considéré (202 cas).

La répartition des 202 accidents étudiés en fonction de leur typologie est illustrée dans le tableau suivant.

Un même accident peut donner lieu à plusieurs types d'événements (incendie et explosion, incendie et pollution des eaux...).

Tableau 2.3.1 : Principaux types d'accidents (base de donnée ARIA consultée avril 2018)

Types d'accidents	Nombre d'accidents	% du total
Incendie	65	32.33
Explosion	32	15.92
Rejet de substances dangereuses	51	25.37
Chute d'équipement	10	4.97
Pollution chronique aggravée	2	0.99
Irradiation	14	6.96
Presque accident	18	8.95
Effets d'équipements,	7	3.48
Autres	2	0.99

On remarque que les trois premiers types d'accident représentent plus de 60 % des accidents cités dans ARIA, donc notre conception doit tenir compte de ces types.

2.3.3. Les incendies

Les incendies représentent 32 % des accidents saisis dans la base ARIA. Ils se déclinent en feux de fosse pour un grand nombre (n°ARIA 4439, 5070, 10340, 13017, 19164, 18971, 19389, 20940, 22683, 22883, 24066, 25578, 28982, 29968, 30524, 31308, 31626, 31678),

Afin de maîtriser les incendies au niveau de la fosse on va agir sur l'un des éléments du triangle de feu, on parle de l'oxygène qui va être réduit et limité si la fosse est fermée.

Cette fosse (4200 m³) est mise en dépression pour éviter les odeurs de déchets qui commencent leur fermentation (les déchets ne peuvent pas rester plus de 4 jours dans la fosse) [33]. La fermentation des produits organique se fait que après 10 jours' donc on va supposer que il y a pas de formation de CH₄ à l'intérieur de la fosse.

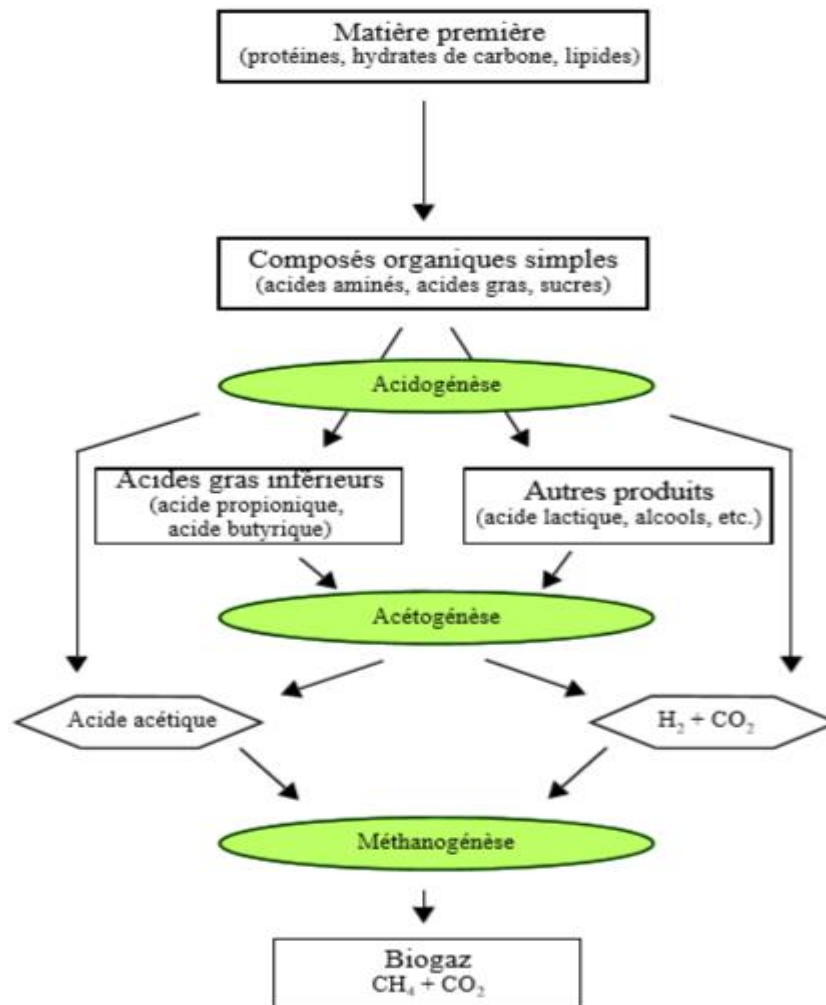


Figure 2.3.1 : Représentation schématique de la décomposition anaérobie [33]

L'air aspiré lors de la mise en dépression sert de comburant pour la combustion des déchets. Un grappin, manipulés par des pontiers, peuvent prendre 2,5 tonnes de déchet (4500 litres).

Ils servent à mélanger les déchets d'origine diverse (par gerbage sur les côtés de la fosse), à dégager les quais de déchargement (pour permettre aux camions de vider dans la fosse sans danger) et à charger les trémies qui amènent les déchets dans le four.

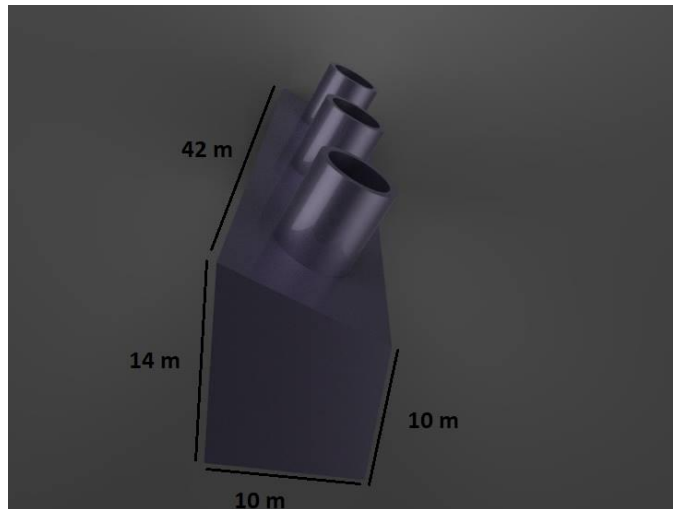


Figure 2.3.2 : Model de fosse – solidworks 2018

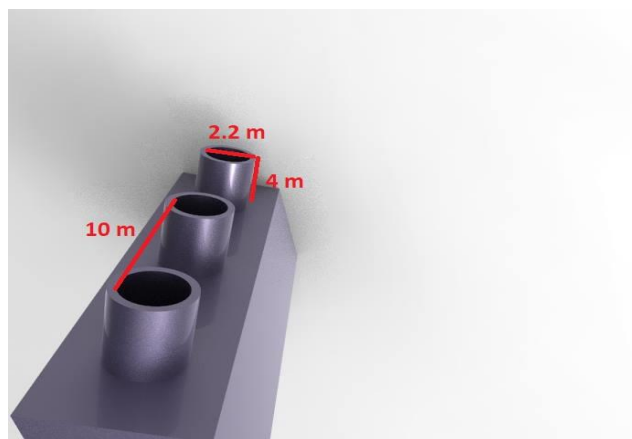


Figure 2.3.3 : Caisson de fosse – solidworks 2018

2.3.4. Les explosions

Les explosions concernent particulièrement les fours (n°ARIA 1372, 10953, 14365, 18940, 19945, 24911, 27700). Ce type d'événement peut affecter les fosses (n°ARIA 3196, 12158, 13017), les broyeurs (n°ARIA 436, 9300, 18392, 17505, 28981), les trémies d'alimentation (n°ARIA 10471, 15953, 18269), les sas d'introduction des déchets (n°ARIA 10206), les électro filtres (n°ARIA 16351), les installations de traitement des gaz (n°ARIA 28649), les chaudières (n°ARIA 20205), les sécheurs de boues (n°ARIA 23320) et les transformateurs électriques (n°ARIA 31264). Le bon dimensionnement des événements sur les fours permet d'évacuer au maximum le souffle de l'explosion et de réduire ainsi les dégâts. **[Accidentologie-ARIA]**

Dans notre cas on va prendre la perte de confinement dans le four comme événement indésirable parce qu'il est le plus fréquent dans l'accidentologie de la base de donnée ARIA.

Pour déterminer les causes principales qui peuvent causer la perte de confinement dans le four, une méthode déductive (de l'événement indésirable vers les causes) va mieux expliquer les causes de l'événement.

Scenario : une défaillance de bruleur conduit à la formation d'un nuage explosif sachant que la température à l'intérieur de four dépasse les 900 °C, donc une explosion violente peut se produire.

Afin de déterminer les principales causes on va modéliser les conséquences par logiciel PHAST. Un calcul de rayon va se faire et on doit le respecter lors de la conception de l'installation de production de BIOGAZ pour éviter l'effet domino en cas d'accident majeur dans le four.

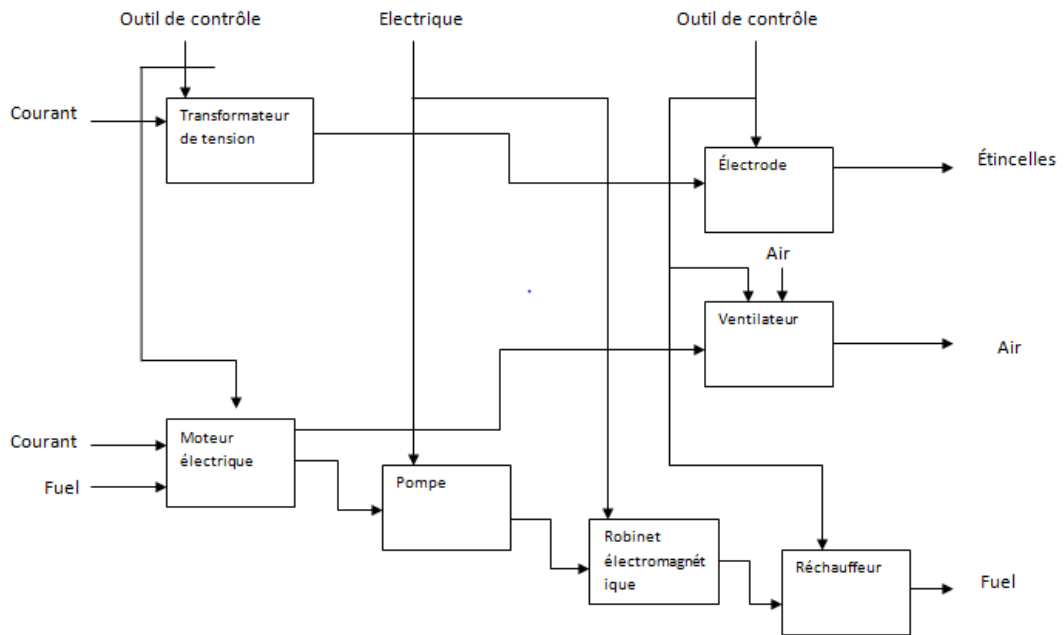


Figure 2.3.4 : Analyse fonctionnelle d'un bruleur

2.3.4.1. L'Arbre des défaillances

Un arbre de défaillances (aussi appelé arbre de pannes ou arbre de fautes) est une technique d'ingénierie très utilisée dans les études de sécurité et de fiabilité des systèmes statiques (un système statique est un système dont la défaillance ne dépend pas de l'ordre de défaillance de ses composants). Cette méthode consiste à représenter graphiquement les combinaisons possibles d'événements qui permettent la réalisation d'un événement indésirable prédéfini. Une telle représentation graphique met donc en évidence les relations de cause à effet. Cette technique est complétée par un traitement mathématique qui permet la combinaison de défaillances simples ainsi que de leur probabilité d'apparition. Elle permet ainsi de quantifier la probabilité d'occurrence d'un événement indésirable, également appelé « événement redouté ». [30]

2.3.4.1.1. Représentation

Un arbre de défaillances est généralement présenté de haut en bas.

La ligne la plus haute ne comporte que l'évènement dont on cherche à décrire comment il peut se produire.

Chaque ligne détaille la ligne supérieure en présentant la combinaison ou les combinaisons susceptibles de produire l'évènement de la ligne supérieure auquel elles sont rattachées.

Ces relations sont représentées par des liens logiques, dont la plupart sont des « OU » et « ET » ; on emploie généralement le terme de « porte OU » et de « porte ET ». [29]

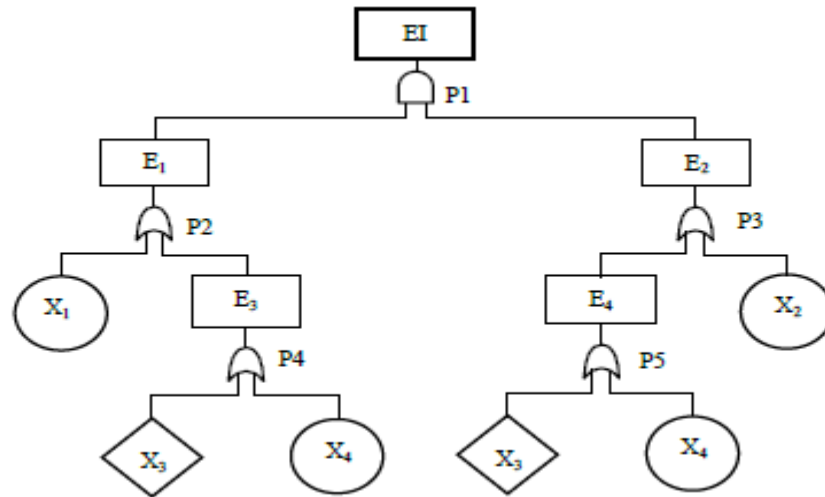


Figure 2.3.5 : Exemple d'un ADD [31].

La description des éléments dans l'ADD de la figure ci-dessus est la suivante :

L'évènement-sommet : EI (le rectangle étant utilisé pour l'évènement-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'évènement non développé : X3 ;
- P1 : Porte ET ;
- P2, P3, P4, P5 : Portes OU.

2.3.4.1.2. Méthodologie

L'arbre de défaillances est une méthode déductive [29], qui fournit une démarche systématique pour identifier les causes d'un événement unique intitulé événement redouté. Le point de départ de la construction de l'arbre est l'évènement redouté lui-même (également appelé événement sommet). Il est essentiel qu'il soit unique et bien identifié. À partir de là, le principe est de définir des niveaux successifs d'évènements tels que chacun est une conséquence d'un ou plusieurs événements du niveau inférieur. La démarche est la suivante : pour chaque événement d'un niveau donné, le but est d'identifier l'ensemble des événements immédiats nécessaires et suffisants à sa réalisation. Des opérateurs logiques (ou portes) permettent de définir précisément les liens entre les événements des différents niveaux [30].

Le processus déductif est poursuivi niveau par niveau jusqu'à ce que les spécialistes concernés ne jugent pas nécessaire de décomposer des événements en combinaisons d'évènements de niveau inférieur, notamment parce qu'ils disposent d'une valeur de la probabilité d'occurrence de l'évènement analysé. Ces événements non décomposés de l'arbre sont appelés événements élémentaires (ou événements de base).

Notons que [31] :

- Il est nécessaire que les événements élémentaires soient indépendants entre eux.
- Leur probabilité d'occurrence doit pouvoir être quantifiée (condition nécessaire seulement dans le cas où l'arbre est destiné in fine à une analyse quantitative).
- Contrairement à l'approche inductive de l'AMDE(C) (analyse des modes de défaillance, de leurs effets et de leur criticité) qui ne cible pas les conséquences des défaillances élémentaires, l'approche déductive de l'arbre de défaillances permet de se focaliser exclusivement sur les défaillances contribuant à l'événement redouté.

La démarche de réalisation de l'arbre des défaillances est résumée dans la figure.

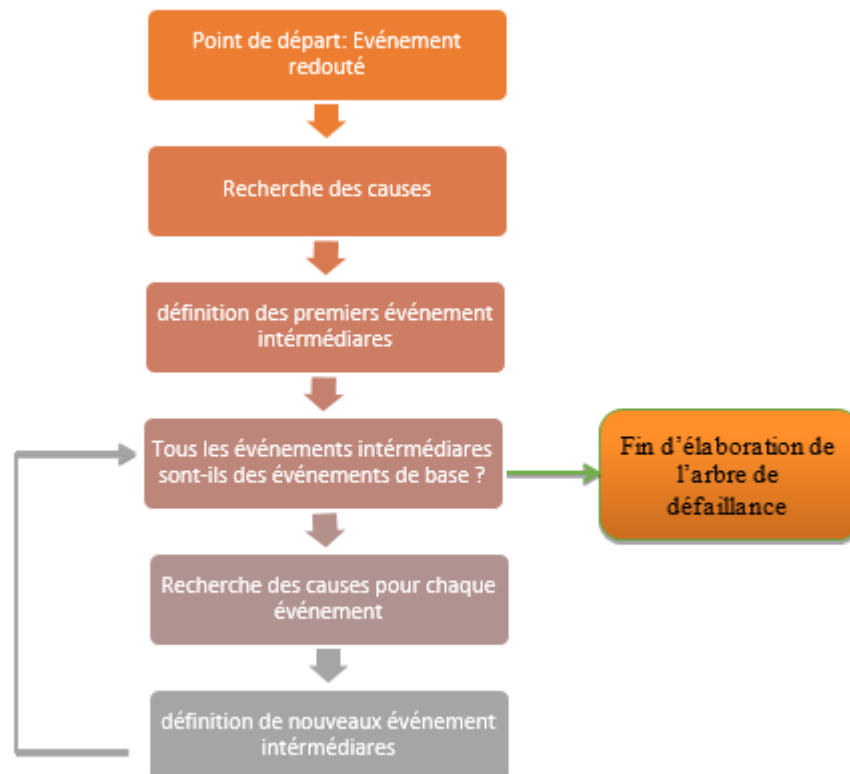


Figure 2.3.6 : Démarche pour l'élaboration d'un arbre des défaillances

L'analyse de l'ADD est surtout basée sur le concept de coupe minimale. Une coupe minimale représente la plus petite combinaison (intersection du point de vue logique) d'évènements de base pouvant conduire à l'événement indésirable. On appelle ordre d'une coupe le nombre d'évènements qui figurent dans la coupe. L'analyse de l'arbre comprend une analyse qualitative puis éventuellement une analyse quantitative. Ces concepts sont expliqués plus en détail dans ce qui suit.

a) Analyse qualitative

Le traitement qualitatif de l'arbre est double. Tout d'abord, il vise à déterminer les coupes minimales puis à examiner dans quelle proportion une défaillance correspondant à un événement de base peut se propager dans l'enchaînement des causes jusqu'à l'évènement indésirable. La recherche des coupes minimales se fait traditionnellement à partir de l'ADD en appliquant les règles classiques de simplification des expressions booléennes à la fonction logique représentée par l'arbre.

L'expression des coupes minimales pour l'EI peut être écrite dans sa forme générale comme suit : [34]

$$EI = C1 * C2 * C3 \dots * Cn$$

Ou **EI** est l'événement indésirable et $C1, C2, \dots, Cn$ sont les coupes minimales. Chaque coupe minimale est une fonction des événements élémentaires de la forme $Ci = \prod Xjj$

Ou Xj est un événement élémentaire.

Un arbre est composé d'un nombre fini de coupes minimales qui sont uniques pour son EI. Une coupe minimale comportant un seul élément représente une défaillance de composant qui toute seule produit l'EI. Pour une coupe minimale de n composants, le n-composants doivent tous être défaillants pour l'occurrence de l'EI.

Pour déterminer les coupes minimales, l'arbre est d'abord traduit en une équation booléenne équivalente. Les lois de l'algèbre de Boole s'appliquent ensuite pour éliminer les termes redondants.

Tableau 2.3.2 : Logique booléenne [34]

Propriétés	Produit (ET)	Somme (OU)
Commutativité	$A . B = B . A$	$A + B = B + A$
Idempotence	$A . A = A$	$A + A = A$
Absorption	$A . (A . B) = A$	$A + A . B = A$
Associativité	$A . (B . C) = (A . B) . C$	$A + (B + C) = (A + B) + C$
Distributivité	$A . (B + C) = A . B + A . C$	$A + B . C = (A + B) . (A + C)$

a) Analyse quantitative

L'analyse quantitative de l'arbre des défaillances vise à évaluer, à partir des probabilités d'occurrence des événements de base, la probabilité d'occurrence de l'événement indésirable.

La méthode la plus élémentaire est connue comme méthode directe. Pour l'appliquer, il faut commencer par le calcul des probabilités des portes de plus bas niveau dans l'arbre et puis remonter l'ADD en calculant, au fur et à mesure, les probabilités des événements intermédiaires, qui sont le résultat de portes. On continue jusqu'à arriver à l'événement sommet. Pour le faire, il faut au préalable déterminer les probabilités d'occurrences des événements élémentaires, par le retour d'expérience, les bases de données ou jugement d'experts.

Le calcul se fait de la manière suivante [31] :

Pour les portes ET on utilise la formule suivante : $(Ei) = \prod (Ei) k1$

Pour les portes OU on utilise la formule suivante : $(Ej) = 1 - \prod (1 - P (Ei))$

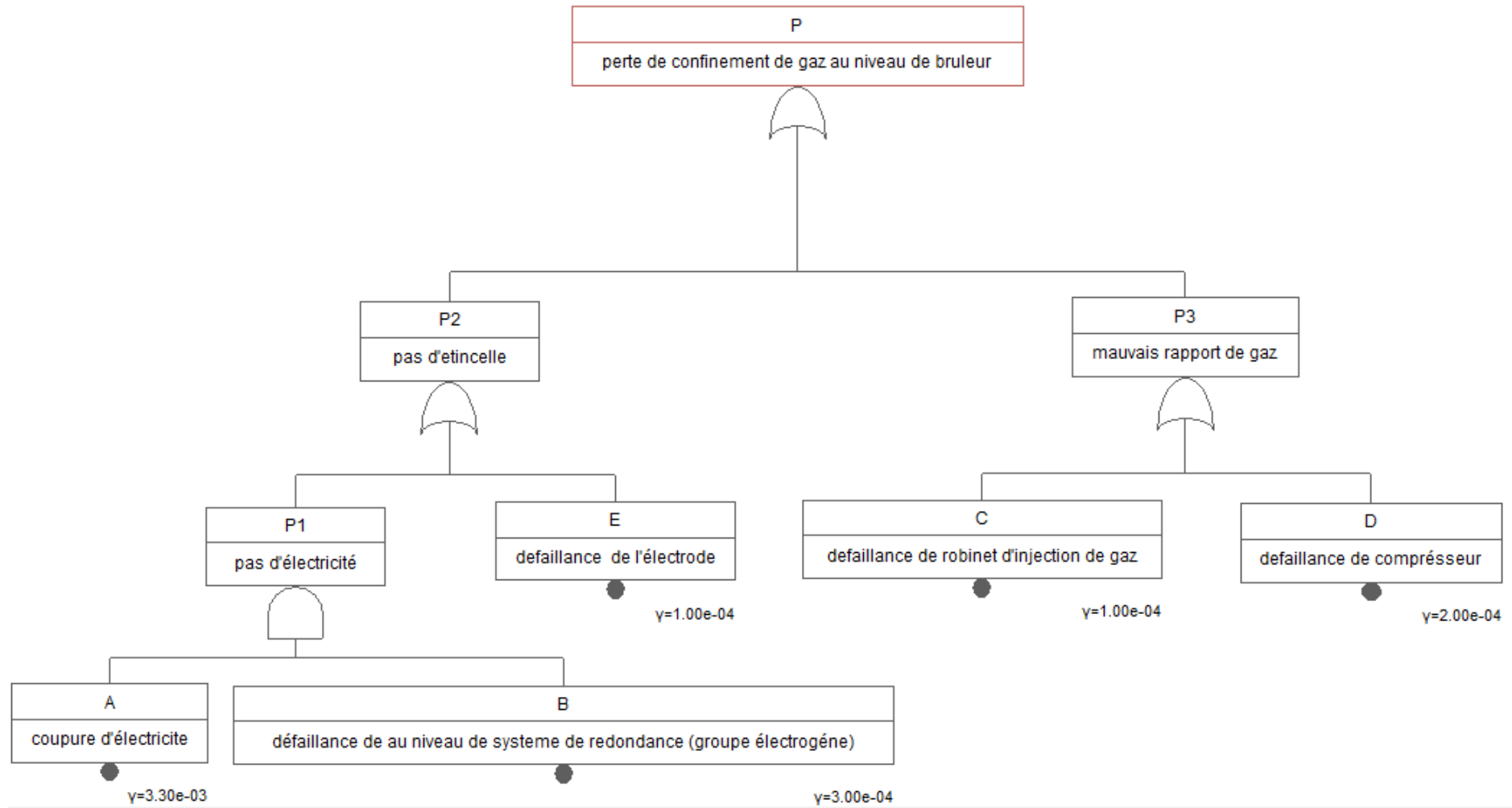


Figure 2.3.7 : ADD : Perte de confinement de gaz dans le four – arbre analysis

Pour notre cas la probabilité de l'événement indésirable (source OREDA)

$$EI = P = A.B + E + C + D \quad (2.3.1)$$

$$P = (33 * 0.3) * 10^{-4} + 4 * 10^{-4}$$

$$P = 1.39 * 10^{-3} \text{ ans}$$

Qualitativement c'est une faible probabilité, mais on ne peut pas la négliger car selon ARIA des explosions ont déjà produit ou la perte de confinement de gaz était l'événement redouté central.

Les couples A, B, C et E les taux de défaillance sont donnés par le fournisseur et ils sont de l'ordre $10^{-4}/\text{ans}$

Donc on doit s'intéresser au couple D car il introduit le facteur humain et sa nécessite un plan de maintenance préventive.

Plan de maintenance préventive de compresseur : (voir l'ANNEX 2)

2.3.4.2. Modélisation de l'accident par PHAST

Tableau 2.3.3 : Données input de la modélisation

Matériel	Méthane
Min distance	1 m
Max distance	100 m
Volume	22 m ³
Débit	40 kg/h
Step	2 m

Path	Scenario	Weather	Distance downwind to overpressure 1 (0.02068 bar) [m]	Distance downwind to overpressure 2 (0.1379 bar) [m]	Distance downwind to overpressure 3 (0.2068 bar) [m]
PhastConsequence\Study \Standalones	TNT explosion	Category 1.5/F	115.948	30.0219	23.2302
		Category 1.5/D	115.948	30.0219	23.2302
		Category 5/D	115.948	30.0219	23.2302

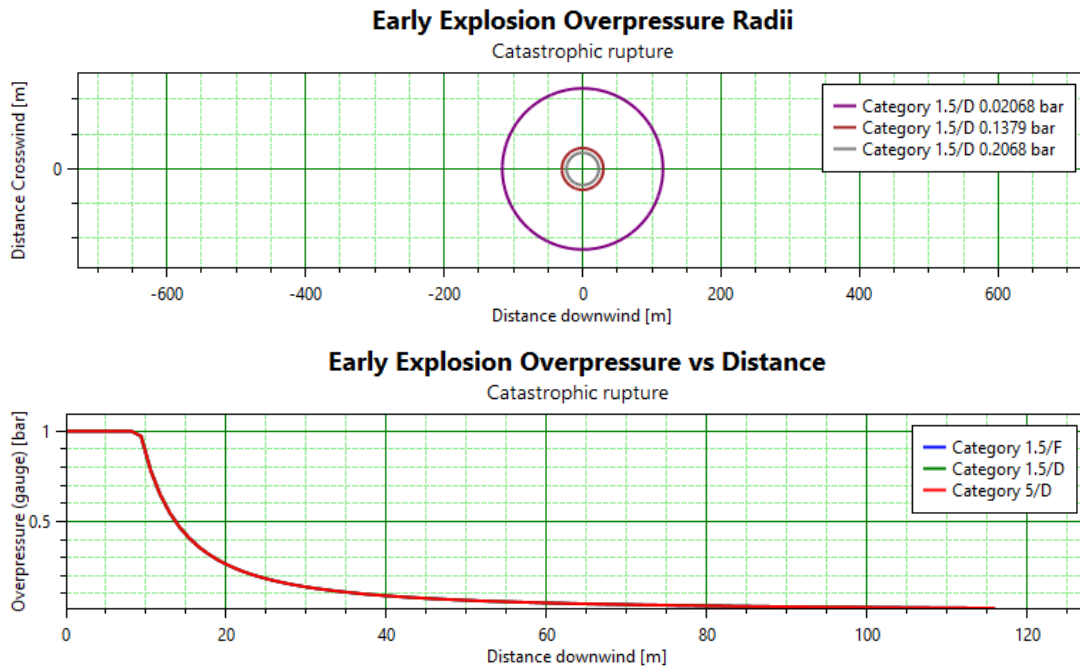


Figure 2.3.8 : La surpression en fonction de la distance

2.3.4.3. Interprétation des résultats

Effets de surpression : Conséquences sur les structures et sur l'homme
Quelques ordres de grandeur :

Tableau 2.3.4 : Effet de suppression pour la vie humaine [32]

Surpression	Effets
2 à 3 mbars	grand bruit (143 dB), "boum" sonique
50 mbars	Blessures indirectes par bris de vitres
140 mbars	Seuils des effets irréversibles (par effets indirects)
200 mbars	Effets létaux par effets directs : potentiellement 1% de létalité par effets directs dans la population (Hémorragie pulmonaire)

Tableau 2.3.5 : Effet de suppression pour les structures [32]

Surpression	Effets
2 à 3 mbars	grand bruit (143 dB), "boum" sonique
50 mbars	destruction de 75% des vitres
140 mbars	Effondrement partiel des murs des maisons
200 mbars	Destruction à 50 % des maisons en briques)

Afin d'éviter l'effet domino sur les autres installations (salle de contrôle) les constructeurs doivent tenir compte du rayon de sécurité calculer par PHAST :

$$R_{min} = 23,23m$$

2.3.5. Traitement des fumées

Pour maîtriser la dispersion des métaux lourds, on va dimensionner un électro filtre qui peut traiter toutes les fumées de la sortie du four.

Dispersion atmosphérique : La dispersion atmosphérique caractérise le devenir dans le temps et dans l'espace d'un ensemble de particules (aérosols, gaz, poussières) rejetées dans l'atmosphère [35].

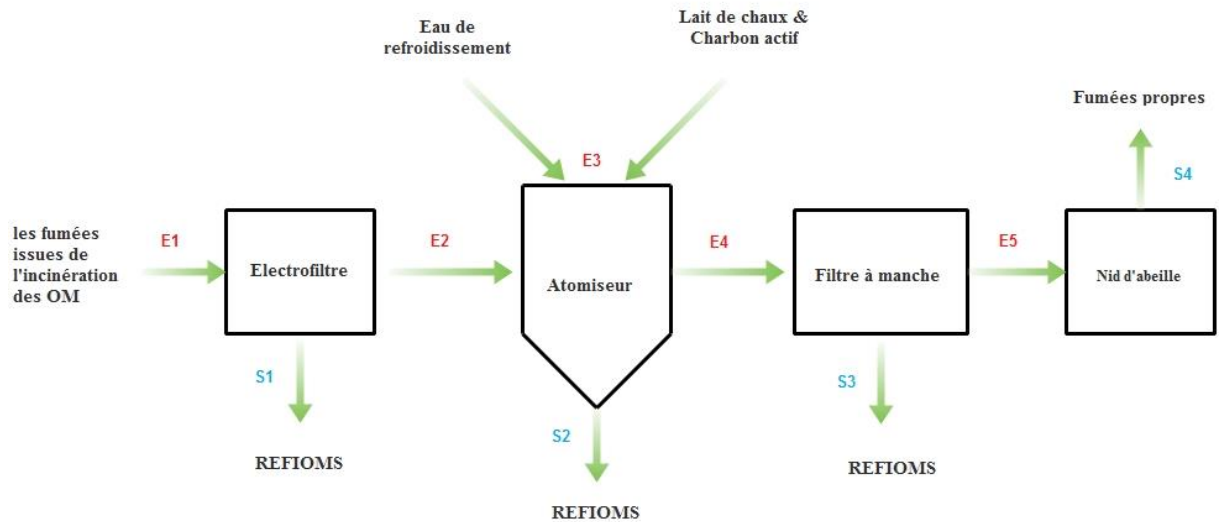


Figure 2.3.9 : Schéma de traitement de fumée

2.3.5.1. Définition Electrofiltre

L'électro filtration est un procédé extrêmement efficace pour la séparation des particules d'un gaz. Les électro filtres sont principalement utilisés dans l'industrie lourde telle que la sidérurgie, les unités d'incinération des déchets, les cimenteries, les unités de production d'énergie. Ils peuvent également être utilisés pour des applications domestiques telles que l'épuration de l'air des locaux (fumées de tabac, ...) ou celle des ambiances de travail (brouillards d'huile, poussières de bois, ...). Leur efficacité est extrêmement élevée, notamment pour les particules microniques et submicroniques où d'autres systèmes sont peu efficaces [36].

2.3.5.2. Principe Electrofiltre

La charge des particules résulte du phénomène « effet couronne » qui apparait lorsque l'on applique une différence de potentiel suffisamment importante entre deux conducteurs aux configurations géométriques appropriées. En deçà d'une valeur critique, l'application du champ électrique induit un courant très faible. La résistivité de l'air est de l'ordre de $10^{14} \Omega.m$. Cependant, à partir d'une valeur critique du champ électrique appelé gradient de dis rupture, le comportement du gaz change et devient relativement conducteur. Sa résistivité est alors de l'ordre de $10^3 \Omega.m$. La tension appliquée à l'électrode émissive, caractérisée par un fil, varie entre 30 et 100 kV tandis que l'électrode réceptrice est reliée à la terre.

Dans la plupart des cas, le champ électrique appliqué est de l'ordre de 4 kV.cm^{-1} , ainsi, nous choisirons cette valeur dans nos calculs. Les électrons libres présents ionisent ainsi les molécules de gaz qui produisent à leur tour des électrons. Sous l'influence du champ électrique, ils se dirigent très rapidement sur les électrodes réceptrices. Au cours de leur déplacement, les ions vont se fixer sur les particules et poussières présentes dans les fumées et les entraînent alors avec eux jusqu'à l'électrode réceptrice où elles vont être collectées.

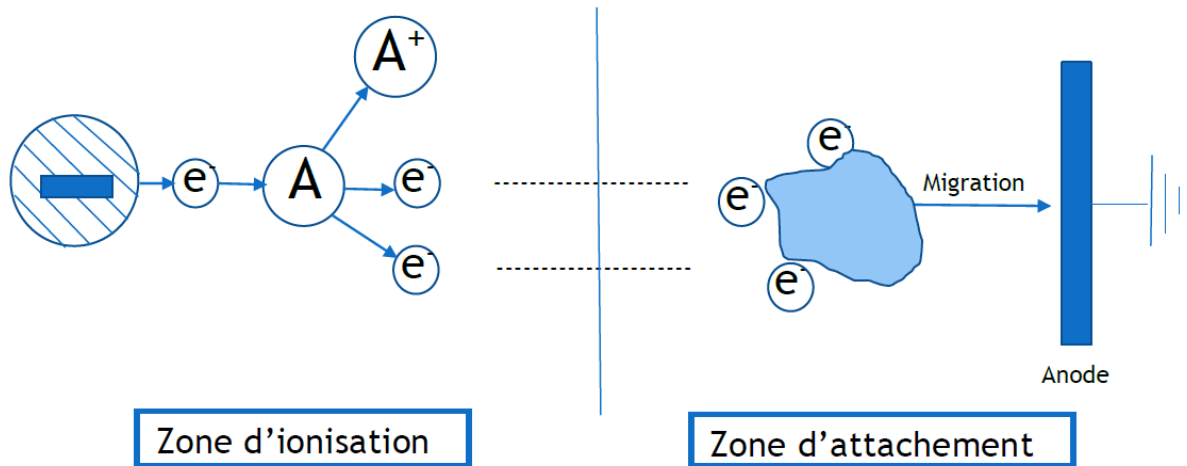


Figure 2.3.10 : Schéma de principe électro filtre [12]

L'électro filtre est composé de plusieurs rues qui correspondent à l'écart entre 2 électrodes réceptrices. On peut aussi distinguer la distance D qui correspond à l'écart entre l'électrode émissive et l'électrode réceptrice. Dans les cas classiques, deux plaques sont distantes de 20 à 50 cm. C'est la distance maximale que parcourront les particules chargées avant de se déposer sur l'électrode réceptrice. On peut schématiser le passage des fumées dans l'électro filtre de la manière suivante :

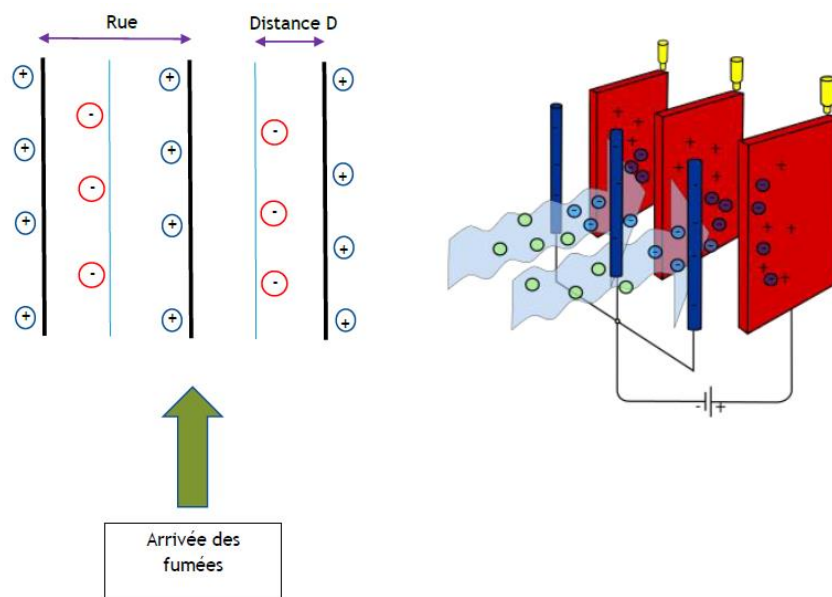


Figure 2.3.11 : Passage des fumées dans l'électro filtre [12]

On distingue donc 3 étapes dans l'élimination des poussières :

- Charge électrique des poussières
- Migration des poussières vers l'électrode réceptrice
- Evacuation des fumées purifiées

Pour une bonne élimination, la succession de ces trois étapes doit être plus rapide que le passage des fumées à travers l'électro filtre. La vitesse de passage des gaz est généralement comprise entre 0,5 et 1,5 m.s-1. Dans le cas de notre étude, nous choisirons de fixer la vitesse des fumées à 1 m.s-1. Pour cela, nous dimensionnerons la tuyère d'arrivée des fumées dans l'électro filtre.

2.3.5.3. Dimensionnement d'un électro filtre

Le dimensionnement est assez complexe et repose sur des lois empiriques. **La loi de Deutsch** permet d'évaluer le rendement selon la vitesse de migration des particules, la surface des contre-électrodes et le débit volumique des fumées selon [36] :

$$\eta = 1 - \exp\left(-\frac{\omega S}{Q}\right) \quad (2.3.2)$$

En choisissant un rendement à atteindre, et connaissant le débit Q, nous pourrions remonter à la surface nécessaire en calculant préalablement la vitesse de migration des particules.

Nous scinderons le dimensionnement en plusieurs étapes :

- Calcul de la surface de passage de la tuyère d'arrivée des fumées
- Calcul de la vitesse de migration des fumées
- Calcul des grandeurs de l'électro filtre (surface, hauteur, longueur et largeur)

2.3.5.3.1. Calcul de la surface de passage S des fumées entrantes

Les bilans matières effectués sur le four ont permis de déterminer le débit de fumées sortant du four. Rappelons les résultats trouvés :

Tableau 2.3.6 : Débits massique des différents courants

Courants	Ordures ménagères	Air	Fumées	Mâchefers
\dot{m} (kg/h)	15000	53855	59888,62	8966,38

Afin de déterminer la surface de passage, le débit de fumées doit être volumique. Ainsi, nous pourrions utiliser la formule :

$$S = \frac{Q}{u} \quad (2.3.3)$$

Pour cela, nous considérerons que les fumées se comportent comme un gaz parfait. Ainsi :

$$Q = \frac{\dot{m} RT}{MP} \quad (2.3.4)$$

Avec :

$R = 8,314 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, constante des gaz parfaits

$T = 493 \text{ K}$, température des fumées

$P = 101\,300 \text{ Pa}$, pression des fumées

M , masse molaire des fumées.

La masse molaire reste la seule inconnue. Nous pouvons la calculer à partir de la composition des fumées en faisant une moyenne pondérée.

Le tableau 2.3.7 regroupe les différents résultats trouvés.

Tableau 2.3.7 : Compositions et masse molaire des fumées avant traitement

Elément	CO2	HCl	NO	SO2	H2O	O2	N2
Composition (%)	0,0945	0,0048	$1,641 \cdot 10^{-4}$	$3,351 \cdot 10^{-4}$	0,0659	0,1132	0,721
Masse molaire (kg/mol)	$44 \cdot 10^{-3}$	$36,5 \cdot 10^{-3}$	$30 \cdot 10^{-3}$	$64 \cdot 10^{-3}$	$18 \cdot 10^{-3}$	$32 \cdot 10^{-3}$	$28 \cdot 10^{-3}$

$$M_{\text{fumées}} = (0,0945 \cdot 44 + 0,0048 \cdot 36,5 + 1,641 \cdot 10^{-4} \cdot 30 + 3,351 \cdot 10^{-4} \cdot 64 + 0,0659 \cdot 18 + 0,1132 \cdot 32 + 0,721 \cdot 28) \cdot 10^{-3}$$

$$M_{\text{fumées}} = 29,4 \cdot 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{mol}^{-1}$$

D'où :

$$Q = \frac{m RT}{MP} = \frac{59888.62 \cdot 8,314 \cdot 493}{29,4 \cdot 10^{-3} \cdot 101\,300}$$

$$Q = 82422,25 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$$

On peut maintenant déterminer la surface de passage connaissant la vitesse :

$$S = \frac{Q}{u} = \frac{82422.25}{3\,600 \cdot 1}$$

$$S = 22,89 \text{ m}^2$$

Diamètre de la tuyère vaut donc :

$$d = \sqrt{\frac{4S}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 22.89}{\pi}}$$

$$d = 5,39 \text{ m}$$

Ainsi, connaissant le débit de fumées, il est possible obtenir la vitesse de fumées désirée en adaptant la tuyère. Dans notre cas, ce sera une tuyère cylindrique de diamètre $d = 4,18 \text{ m}$.

2.3.5.3.2. Calcul de la vitesse de migration des particules ω

Les vitesses des fumées étant assez faibles, nous ferons l'hypothèse d'être en régime de Stokes. En effet, une trop grande vitesse engendrerait des turbulences au sein des fumées, ce qui baisserait les performances de l'électro filtre.

En régime de Stokes, la vitesse de migration s'écrit selon [36] :

$$\omega_0 = \frac{nQ_e E}{3\pi\mu_f d_p} \quad (2.3.5)$$

Avec :

n : Le nombre de charges élémentaires apportées à la particule

Q_e : La charge élémentaire en C

μ_f : La viscosité du gaz en $Pa.s$

d_p : Le diamètre de la particule chargée en m

E : Le champ électrique en $V.m^{-1}$

2.3.5.3.3. Bilan des forces

Il est possible de retrouver cette expression en effectuant un bilan de force sur la particule :

- Force électrique : nQ_eE
- Force de trainée : $Cd \frac{\rho_f}{2} \omega^2 \frac{\pi d_p^2}{4}$

La force de trainée étant opposée à la force électrique.

Le bilan de force se traduit par l'expression :

$$m\vec{a} = \Sigma\vec{F}$$

Soit

$$\left(\frac{\pi d_p^3}{6} \rho_p \right) \frac{d\omega}{dt} = nQ_eE - Cd \frac{\rho_f}{2} \omega^2 \frac{\pi d_p^2}{4} \quad (2.3.6)$$

En se plaçant en régime stationnaire $\frac{d\omega}{dt} = 0$ on obtient l'égalité suivante :

$$nQ_eE = Cd \frac{\rho_f}{2} \omega^2 \frac{\pi d_p^2}{4}$$

En se plaçant en régime de Stokes, $Cd = \frac{24}{Re} = \frac{24*\mu_f}{\rho_f*d_p*\omega}$ d'où :

$$nQ_eE = \frac{24 * \mu_f}{\rho_f * d_p * \omega} * \frac{\rho_f}{2} \omega^2 \frac{\pi d_p^2}{4} = 3\mu_f * \omega * \pi d_p^2$$

$$\omega_0 = \frac{nQ_eE}{3\pi\mu_f d_p}$$

Le nombre de charges acquises par la particule est compliqué et dépend du mécanisme de charge. Pour un diamètre de particule supérieur à $1\mu m$, le mécanisme est la « charge par champ ». Les ions migrent selon des lignes de champ jusqu'à la particule. Dans ce cas on peut déterminer la charge de saturation grâce à la relation de Cochet : [36]

$$q_p^s = nQ_e = \left[(1+k)^2 + \left(\frac{2}{1+k} \right) \left(\frac{\varepsilon_p - 1}{\varepsilon_p + 2} \right) \right] \pi \varepsilon_0 d_p^2 E \quad (2.3.7)$$

Avec :

$$K = \frac{2\lambda}{d_p} \text{ Le nombre de Kundsens}$$

$$\lambda = \frac{\mu_f}{0,499*\rho_f} * \sqrt{\frac{\pi M}{8RT}} \text{ Le parcours libre moyen (en mètre)}$$

Pour l'air :

$$\alpha_1 = 1,246 \quad \alpha_2 = 0,42 \quad \alpha_3 = 0,87$$

$$\mu_f = 3,58 \cdot 10^{-7} * T^{0,69} \text{ Pa.s}$$

$$T = 493 \text{ K}$$

$$\rho_f = 0,61 \text{ kg/m}^3$$

$$\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ C}^2/\text{N/m}^2 \text{ La permittivité du vide}$$

$\varepsilon_p = 2,5$ Constante diélectrique de la matière constituant la particule (pour des poussières industrielles, sa valeur est comprise entre 2 et 3)

$$Q_e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C} \text{ La charge élémentaire}$$

Afin de sur dimensionner notre électro filtre, nous choisirons une valeur de d_p intermédiaire. L'électro filtre étant efficace pour des particules allant de 0,1 à 10 μm , et particulièrement pour des particules allant de 1 à 10 μm nous choisissons :

$$d_p = 3 \mu\text{m}$$

On a donc :

$$K = \frac{2 * \left(\frac{3,58 \cdot 10^{-7} * 493^{0,69}}{0,499 * 0,61} * \sqrt{\frac{\pi * 29,4 \cdot 10^{-3}}{8 * 8,314 * 493}} \right)}{3 * 10^{-6}} = 0,095$$

De plus, la valeur du champ électrique E que nous choisirons est de $400 \text{ kV} \cdot \text{m}^{-1}$. On peut ainsi déterminer le nombre de charges portées par la particule puis la vitesse de migration ω_0 :

$$nQ_e = \left[(1 + 0,095)^2 + \left(\frac{2}{1 + 0,095} \right) \left(\frac{2,5 - 1}{2,5 + 2} \right) \right] \pi 8,85 \cdot 10^{-12} * (3 * 10^{-6})^2 * 400000$$

$$nQ_e = 1,81 \cdot 10^{-16}$$

De plus, dans le cas des particules les plus petites, il faut mettre en place un coefficient de correction qui est le coefficient de Cunningham. Dans ce cas, la vitesse de migration s'écrit :

$$\omega_0 = \frac{nQ_e E C_c}{3\pi\mu_f d_p}$$

La valeur de ce coefficient dépend donc du diamètre des particules et s'écrit :

$$C_c = 1 + [\alpha_1 + \alpha_2 \exp(\frac{-\alpha_3}{K})]$$

$$C_c = 1,12$$

D'où

$$\omega_0 = \frac{1,81 \cdot 10^{-16} * 400000 * 1,12}{3\pi * 3,58 \cdot 10^{-7} * 493^{0,69} * 3 \cdot 10^{-6}} = 0,11 \text{ m/s}$$

2.3.5.3.4. Détermination des grandeurs de l'électro filtre

Un électro filtre est extrêmement efficace et est capable d'éliminer 99 % des poussières présentes dans les fumées. Afin de déterminer la surface grâce à l'expression de Deutsch, nous choisirons donc un rendement de 99 %. Rappelons que d'après le bilan matière effectué sur le four, le débit volumique des fumées est de $22,89 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

$$0,99 = 1 - \exp\left(\frac{-0.011 * s}{22.89}\right) \quad [36]$$

$$S = 958 \text{ m}^2$$

Il est également possible de relier le temps de migration des particules et le temps de passage des fumées. En effet :

Il est également possible de relier le temps de migration des particules et le temps de passage des fumées. En effet :

$$t_{migration} = \frac{D}{\omega}$$

Où D est la distance entre l'électrode émissive et l'électrode réceptrice

$$t_{passage} = \frac{L}{u}$$

Où L est la longueur de l'électro filtre et u la vitesse des fumées et

$$u = \frac{Q}{2DHn_{rues}}$$

($2D$ car dans chaque rue, il y a deux surface réceptrices)

En faisant le rapport des 2, on obtient :

$$\frac{t_{passage}}{t_{migration}} = \frac{2DHLn_{rues}\omega}{QD} = \frac{\omega(2HLn_{rues})}{Q} = \frac{\omega S}{Q} = 4,6$$

Le plus important est de choisir un temps de migration nettement inférieur au temps de passage afin d'être certains que toutes les particules auront le temps d'être éliminées. Un rapport de 4,6 est une sécurité suffisante. En estimant la distance entre le fil et la plaque à 0,1 m, on obtient un temps de migration de :

$$t_{migration} = \frac{D}{\omega} = \frac{0.1}{0.11} = 0,9 \text{ s}$$

On en déduit le temps de passage des fumées dans l'électro filtre :

$$t_{passage} = t_{migration} * \frac{\omega S}{Q} = \frac{0,11 * 958}{22,89} * 0,9 = 4,1 \text{ s}$$

Comme on l'a mentionné plus tôt, la vitesse des gaz est de 1 m/s. On a donc :

$$L = u * t_{passage} = 4,1 \text{ m}$$

La largeur, elle, est directement déterminée à partir du nombre de rues qui composent l'électro filtre. Il est important que la largeur du procédé ne soit pas beaucoup plus grande que le diamètre des canalisations afin d'avoir une bonne répartition des fumées en entrée du filtre. Le diamètre étant de **5.39 m**, nous tacherons de ne pas dépasser **$l = 5\text{m}$** . La largeur est donnée par la relation :

$$l = 2 * D * nrues = 5 \text{ m}$$

Pour **$l = 5\text{m}$** , on a :

$$n_{rues} = \frac{5}{2 * 0,1} = 25 \text{ rues}$$

Enfin, grâce au nombre de rues, il est possible de déterminer la hauteur de l'électro filtre.

$$H = \frac{Q}{2D * u * nrues} = \frac{22,89}{2 * 0,1 * 1 * 25} = 4,57 \text{ m}$$

Pour récapituler, voici un tableau indiquant les principales données de l'électrofiltre qui permettra le dépoussiérage des fumées d'incinération d'ordures ménagères :

Tableau 2.3.8 : Grandeurs caractéristiques de l'électrofiltre

Champs électrique E $KV.m^{-1}$	Nombre de rues N_{rues}	Vitesse de migration ω ($m.s^{-1}$)	Diamètre de la tuyère d'arrivée d_t (m)	Surface active S_A (m^2)	Longueur L (m)	Largeur l (m)	Hauteur H (m)
400	25	0,11	5,39	958	4,1	5	4,57

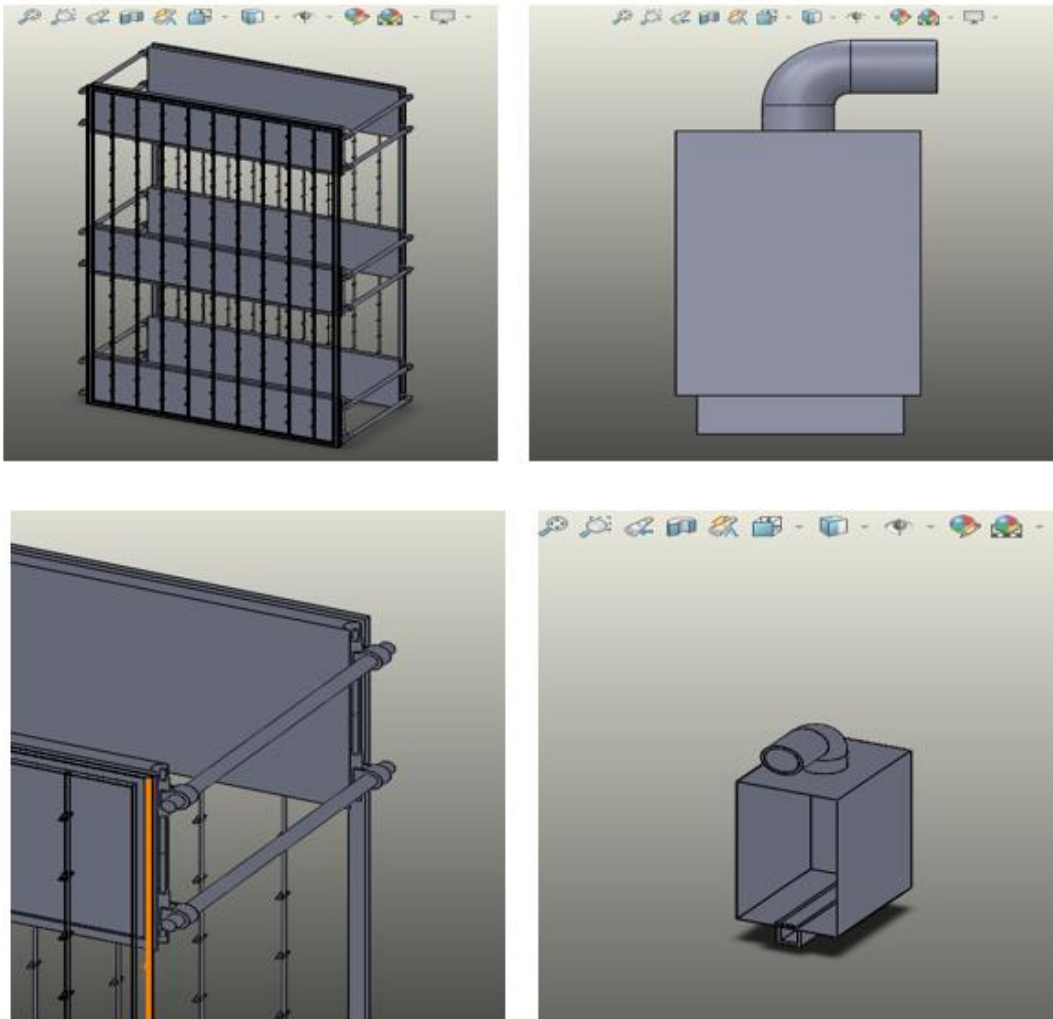


Figure 2.3.12 : Modèle 3D de l'électrofiltre

CONCLUSION GENERALE

Le travail présenté dans ce mémoire avait un double objectif :

Au premier plan, il était question de montrer que la gestion des déchets ménagers n'est pas suffisante en raison de l'absence d'une gestion qui s'appuie sur les méthodes d'élimination. Aussi, la réglementation algérienne n'est pas assez claire à ce sujet car dans le cadre de la protection de l'environnement elle parle d'une collecte et d'un entreposage de déchets et non pas de leur élimination. Donc l'incinération figure parmi les solutions existantes afin de mettre fin au cycle de vie des déchets.

En second plan, nous avons dimensionné la chambre de combustion afin d'estimer son volume actif, en suite, nous avons fait un bilan de flux molaire et sa transformer de LAPLACE pour déterminer l'équation qui sert à calculer le nombre des brûleurs. Des bilans de masse partiel sur les différents composants des déchets (C, H,N,O...) ont été élaborés afin de construire un système d'équation, la résolution de ce système par MATLAB nous a permis d'estimer les fractions massiques des polluants et le débit des fumées.

Nous avons construit notre APR en se basant sur l'accidentologie de la base de données ARIA et on a essayé de maîtriser les accidents les plus critiques :

1. La création d'une fosse de telle sorte que les incendies seront étouffés facilement tout en prenant compte de la fermentation des déchets à l'intérieur de la fosse
2. Utilisé les grandeurs calculées précédemment pour modéliser le phénomène redouté (explosion) par PHAST afin de déterminer le rayon critique à respecter et pour éviter les effets domino sur les autres structures.
3. Dimensionnement et modélisation de l'électrofiltre selon le modèle de **Deutch** par solideWorks 2018 Enfin, afin de maîtriser la dispersion des métaux lourds.

Nous souhaiterons que la prise en considération des différentes solutions étudiées et les recommandations émises dans ce projet soient mises en pratique pour une bonne maîtrise des risques si le projet d'implantation d'une unité d'incinération se réalise.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] H. CHENITI. « Management de l'Environnement et Contrôle des Terrains » - Thèse de Doctorat - Université : Annaba. 2014
- [2] T.BENNAMA. Les bases de traitement des déchets solides. Cours : Département de Génie Chimique, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran - Janvier 2016
- [3] S.HAMZAOUI. Gestion et impact des déchets solides urbains sur l'environnement El taref commune -Mémoire de magister - Université : Annaba. 2011
- [4] M.CHAABANE. « Optimisation de la combustion au sein d'un incinérateur de déchets solides pour réduire les émissions nocives : cas des NOx » - Mémoire de Magister Université : Batna.2013
- [5] B.DJEMACI. La gestion des déchets municipaux en Algérie : Analyse prospective et éléments d'efficacité. –Thèse Doctorat - Université de Rouen 2013
- [6] Manuel de l'enseignement. Les déchets ménagers .SYTCOM d'agglomération parisienne. 2004
- [7] Y. MENARD. Modélisation de l'incinération sur grille d'ordures ménagères et approche thermodynamique du comportement des métaux lourds-Thèse Doctorat- Institut National Polytechnique de Lorraine 2008
- [8] B.DJEMACI & M.AHMED ZAÏD-CHERTOUK. La gestion intégrée des déchets solides en Algérie. Contraintes et limites de sa mise en œuvre - CIRIEC N° 2011/04.
- [9]AGENCE NATIONAL DES DECHETS. Caractérisation des déchets ménagers et assimilés dans les zones nord, semi-aride et aride d'Algérie- 2013
- [10] N.DORBANE. Contraintes de la gestion des déchets dans les villes algériennes : cas de Tizi-Ouzou : Université : Annaba.2015
- [11] J.BERTHOLON. L'incinération de l'ordure ménagère Université de Cergy-Pontoise.2008
- [12] M. Clément BOINEAU. Conception d'une usine d'incinération pour 150 000 habitants.2016
- [13] G.GOSSELIN. L'incinération des ordures ménagères au Québec comme source d'électricité et de vapeur .2016
- [14] L'Institut national de recherche et de sécurité INRS. Conception des usines d'incinération des ordures ménagères .2006
- [15] Agence Nationale d'Intermédiation et de Régulation Foncière. Rubrique Monographie Wilaya : Wilaya de SETIF
- [16] Commission européenne. Incinération des déchets. 2006

- [17] A. BENKENIDA. « Dimensionnement d'une unité d'incinération des déchets ménagers avec récupération d'énergie » Mémoire de ingénieur. Ecole Polytechnique .Alger 1995
- [18] M.Popescu et al. 1998 Analyse et traitement physicochimique des rejets atmosphériques industriels. Emissions, fumées, odeurs et poussières,
- [19] C. LE GUERN, Modélisation des transferts de matière et d'énergie au cours de l'incinération d'ordures ménagers : synthèse bibliographique.2000
- [20] C. COULON, S. LE BOITEUX et P. SEGONDS THERMODYNAMIQUE PHYSIQUE Cours et exercices avec solutions Edition DUNOD
- [21] O.BONNEFOY, complément de cours Combustion-EMSE, pouvoir calorifique, 2015.
- [22] Handbook of Chemistry and Physics - University of Paris VII -National Institute of Standards and Technology .1939
- [23] Y.MORTUREX- technique de l'ingénieur CD-ROM sécurité et gestion des risques. Parution : p 4010.octobre 2002 – dernière Validation mars 2016 –
- [24] Mohamed Habib MAZOUNI « pour un meilleur approche de management des risques » Thèse de Doctorat p50 .2008.
- [25] J.WEISSENBUGER – notion de risque, danger et analyse des causes applique à l'administration de médicament - MCU pharmacologie
- [26] Annexe 8 : Etude complémentaires – pièce : Etude de danger d'une installation de traitement de bois – Commune Saint Benoit. Rapport d'étude N° 3 : technicien consultant. Lyon.
- [27] A.DESROCHE, D.BOUDRIN, M.DADOU – l'analyse préliminaire des risques – Edition : Hermès Lavoisier. 2009
- [28] H.Hadj MABROK – (Researcher) une méthode d'analyse préliminaire des risques. Publié 17/02/2016.
- [29] WE, Vesely,F,F,Goldderg NH.Robers, DF,Haasl,Nweg Fault tree handbook, report 0492.1981
- [30] Fault tree analysis” et sa traduction française NF EW 6b25 (analyse par arbre des pannes)
- [31] OMEGA, maîtrise des risques industriels - INERIS
- [32] INERIS - Les effets d'un phénomène dangereux et leur incidence sur les structures.
- [33] S. Hartig – **livre** : Guide des biogaz, 2016
- [34] D. ETIEMBLE, algèbre de Boole et fonctions booléennes

[35] OMEGA 12, Méthodes pour l'évaluation et la prévention des risques accidentels

[36] B.BENAMAR, Mémoire de Doctorat : La faisabilité de l'électro filtration d'une atmosphère chargée en poussières, novembre 2008.

ANNEXE

ANNEXE 1 :

Accidentologie :

ARIA 39952 (échelle 1-0-0-0) - IC - 13/07/2007 - 19 - BRIVE-LA GAILLARDE

38.21 - Traitement et élimination des déchets non dangereux Un incendie se déclare vers 15h30 dans le bac de rétention d'une cuve de 1 000 l de fioul située à proximité de la trémie à mâchefers d'un incinérateur d'ordures ménagères. L'exploitant arrête l'incinération et alerte les services de secours qui maîtrisent le sinistre vers 15h50, 300 l de fioul ont été brûlés. Ils arrosent la cuve de fioul pendant une heure en raison de la persistance de points chauds à 80 °C. Les chemins des câbles situés au-dessus de la cuve sont endommagés, ce qui provoque l'arrêt des compresseurs et des 3 fours de l'incinérateur. L'exploitant vidange le contenu de la cuve et procède à la réparation des câbles (2 000 euros de travaux). L'incinérateur redémarre vers 21 h sans nécessité de détourner les déchets en attente vers un autre incinérateur. La source d'inflammation provient des mâchefers en fusion qui ont été projetés hors de la trémie lorsqu'elle a débourrée brutalement, alors que l'incinérateur était en fonctionnement et qu'un encombrant métallique avait bloqué la trémie. L'exploitant supprime cette cuve qui servait de tampon pour l'alimentation de la chaudière utilisée pour le chauffage des serres municipales voisines de l'incinérateur.

ARIA 34988 (échelle 1-0-0-0) - IC - 24/10/2007 - 90 – BOUROGNE

38.21 - Traitement et élimination des déchets non dangereux Dans une usine d'incinération d'ordures ménagères, une canalisation en acier simple enveloppe en caniveau joignant la cuve de stockage de fioul domestique à l'ensemble fours/chaudières se perce par une corrosion. La pression de l'ordre de 16 bars provoque un débit de fuite croissant. La fuite est repérée seulement au bout de 7 jours par détection d'une anomalie des courbes de consommation. La fuite est recherchée en vain au niveau du regard situé près de la cuve de stockage. La canalisation située dans un caniveau recouvert d'une couche de remblai et d'un revêtement bitumeux n'est mise à nu qu'au bout de 16 jours. La fuite est alors maîtrisée. Le volume total de fioul répandu dans le sol est estimé à 10 m³. Deux puits de pompage sont mis en place pour récupérer le fioul localisée sur une couche argileuse. Ce pompage doit permettre de confiner la pollution. Une surveillance des eaux souterraines sera mise en place par l'exploitant. Les terres polluées seront excavées.

ARIA 37225 (échelle 0-1-0-0) - IC - 23/04/2008 - 78 - THIVERVAL-GRIGNON

38.21 - Traitement et élimination des déchets non dangereux Vers 1h, un début d'incendie se produit dans un caisson technique de la ligne d'incinération N°1 d'une usine de traitement de déchets non dangereux.

L'alarme du détecteur de fumée se déclenche dans la salle de commande et le personnel de quart intervient avec un extincteur de 50 kg de CO₂. Les 2 intervenants sont incommodés par les fumées. L'incendie endommage les câblages électriques situés à

proximité du caisson, entraînant la perte de l'alimentation électrique (par disjonctage) sur tout le site et avec elle l'arrêt des ventilateurs de tirage des cheminées. Les fours sont arrêtés en urgence. Les secours arrosent le caisson ainsi que la trémie d'alimentation en ordures ménagères. L'accident n'a pas de conséquences significatives sur l'environnement. D'après l'exploitant, l'incendie pourrait avoir pour origine un écoulement de produits combustibles au niveau de la jointure entre la table poussant des déchets et le caisson inférieur d'homogénéité ; la typologie des déchets reçus ce jour-là était différente de l'accoutumée (moins d'ordures ménagères, plus de DIB).

ARIA 34973 (échelle 1-1-0-0) - IC - 31/07/2008 - 13 – ROGNAC

38.22 - Traitement et élimination des déchets dangereux Une violente explosion se produit vers 11h45 à l'intérieur de la chambre de post combustion d'un four d'une usine d'incinération de déchets industriels. L'installation en cause est composée d'un four, d'une chambre de post combustion et d'une chaudière. Ces trois éléments sont en liaison directe. Sous la violence de l'explosion les éléments de sécurité fonctionnent : ouverture des soupapes, déplacement de la face avant du four qui fait ainsi office d'évent. Cependant une trappe située en partie latérale de l'économiseur de la chaudière est arrachée et 3 ouvriers d'une entreprise extérieure sont brûlés dont un gravement. L'accident est dû au décrochage dans la chambre de post combustion d'un gros bloc de poussières porté à haute température. Celui-ci est tombé dans un garde d'eau entraînant son évaporation brutale et une importante montée en pression interne.

ARIA 35439 (échelle 0-0-0-0) - IC - 06/11/2008 - 83 – TOULON

38.21 - Traitement et élimination des déchets non dangereux Un portique de détection de radioactivité se déclenche vers 11 h dans une usine d'incinération d'ordures ménagères lors du passage d'un camion transportant 3 t de cendres provenant d'une usine thermoélectrique fonctionnant au charbon. Le camion livrait les cendres à une société qui produit du béton avec celles-ci. N'ayant pu décharger la totalité du chargement dans le silo de stockage, il est reparti avec 3 t de cendres et est venu dans l'usine d'incinération pour charger à nouveau des cendres. Le contenu du silo du fabricant de béton est contrôlé pour vérifier si celui-ci est contaminé. Cependant, 3 camions ont déjà livré sur des chantiers du béton fabriqué avec la cendre concernée avant l'arrêt de la production. Le dosage est de 80 kg de cendre pour 1 m³ de béton. Les relevés de mesures effectués par les pompiers sur les cendres retombées aux abords du silo ou stockées dans ce dernier présentent un débit de dose homogène de 150 à 200 nano sieverts / h. Les secours recensent les chantiers concernés et contactent la centrale thermique pour faire vérifier le niveau de radioactivité de son stock, sa provenance et éventuellement la traçabilité du véhicule de transport. L'autorité de sûreté nucléaire demande que soit effectués des relevés sur le béton produit et livré et confirme que les valeurs relevées correspondent à la radioactivité naturelle du charbon et prend contact avec la centrale thermoélectrique pour approfondir les investigations. Lors d'une inspection sur le site de l'usine thermoélectrique le 19/12/2008, l'ASN mesure un débit de dose observé qui varie de 70

nano-sieverts/h (bruit de fond de la région méditerranée) à 140 nano-sieverts/h (au contact du silo de stockage).

ARIA 35509 (échelle 0-1-0-0) - IC - 09/12/2008 - 91 - VERT-LE-GRAND

38.21 - Traitement et élimination des déchets non dangereux Une fuite de 3 m³ d'acide chlorhydrique (HCl) à 33 % a lieu vers 9 h sur une cuve de 5 m³ sur rétention dans un centre de traitement et d'élimination de déchets. La cuvette de rétention contient 2 cuves de stockage d'HCl à 33 % et de soude (NAOH) à 33 %. Les secours recensent 50 personnes travaillant dans le bâtiment lors des faits et 6 personnes ayant été en contact avec la fuite ; l'une d'entre elles intoxiquée est transportée à l'hôpital. Les pompiers sous TLD (tenue légère de décontamination) et ARI reconnaissent le local sinistré. L'acide s'est ensuite déversé dans le bassin de rétention où des mesures de pH seront effectuées. Une entreprise de récupération prend en charge les produits répandus. Aucune incidence sur le fonctionnement de l'incinérateur n'est à déplorer mais l'activité du centre de tri est suspendue. Les camions de collecte des ordures ménagères arrivant stationnent en attente.

ARIA 35991 (échelle 0-0-0-0) - IC - 02/03/2009 - 971 - BAIE-MAHAULT

38.22 - Traitement et élimination des déchets dangereux Un feu se déclare vers 2 h sur un stockage de 1 500 m² de déchets d'activités de soins à risques infectieux (DASRI) dans une usine d'incinération. Les pompiers protègent l'incinérateur et éteignent l'incendie. Sur les 500 t de déchets, 250 sont brûlées. Lors de l'incendie, l'incinérateur était à l'arrêt et aucun employé ne se trouvait sur les lieux. Les conditions de stockage (non autorisé) des DASRI sur le site avaient fait l'objet d'un arrêté préfectoral de mise en demeure le 28/12/07. Les services de l'inspection des installations classées proposent un arrêté préfectoral imposant les mesures d'urgence suivantes : la mise en sécurité du site, l'évacuation des déchets refroidis issus de l'incinération des DASRI vers des installations autorisées et la réalisation d'une étude de remise en état du site basée sur un diagnostic des sources de pollution.

ARIA 36177 (échelle 1-0-0-0) - IC - 09/05/2009 - 67 - SCHWEIGHOUSE-SUR-MODER

38.21 - Traitement et élimination des déchets non dangereux Une explosion se produit vers 19h45 dans le four d'un incinérateur d'ordures ménagères suite à une élévation de la température. Les pompiers éteignent l'incendie et la température dans le four passe de 900 à 650 °C ; ils quittent les lieux à 21 h. Un orifice de 0.5 m² est visible dans la paroi du four.

ARIA 36506 (échelle 0-1-0-0) - IC - 08/07/2009 - 22 - PLUZUNET

38.21 - Traitement et élimination des déchets non dangereux Un feu se déclare vers 20 h dans une presse à papier d'une usine d'incinération de déchets non dangereux. Les

secours transportent à l'hôpital 2 ouvriers intoxiqués par les fumées et maîtrisent l'incendie en moins d'1 h.

ARIA 36770 (échelle 0-0-0-0) - IC - 15/07/2009 - 13 - FOS-SUR-MER

38.22 - Traitement et élimination des déchets dangereux Une brusque coupure d'électricité lors d'un orage, provoque l'arrêt le ventilateur de la ligne d'incinération d'une usine de traitement des déchets dangereux. Les sécurités s'enclenchent automatiquement : arrêt de l'injection des déchets dans le four, ouverture du clapet de sécurité de la post combustion et arrêt complet de l'unité. Par contre l'onduleur permettant la commande du variateur du ventilateur de la ligne s'est mis en défaut, rendant le ventilateur hors service et provoquant un important panache de fumées lors de l'ouverture du clapet de sécurité postcombustion.

ARIA 37425 (échelle 1-0-0-0) - IC / ASP - 27/10/2009 - 19 - SAINT-PANTALEON-DE-LARCHE

38.21 - Traitement et élimination des déchets non dangereux Dans une usine d'incinération d'ordures ménagères, une cuve de 38 000 l d'ammoniaque s'effondre vers 15h30 à la suite d'une dépression de 220 mbar. Une soupape montée à l'envers sur ce réservoir en service depuis 1 mois est à l'origine de l'accident. La cuve qui contient encore 12 t d'ammoniaque, reste sous surveillance jusqu'à son remplacement sous 2 mois ; l'ammoniaque est utilisée sur ce site dans le traitement des fumées en vue du respect des normes d'émissions en NOX.

ARIA 37494 (échelle 0-0-0-3) - IC - 15/11/2009 - 66 - CALCE

38.21 - Traitement et élimination des déchets non dangereux Un feu se déclare sur un stock de 200 t de déchets banals provenant de déchetteries (DIB) dans le hall de réception au niveau du quai de déchargement d'ordures ménagères d'un centre d'incinération de déchets non dangereux. Le feu couvant de déchets génère une épaisse fumée qui se disperse mal en l'absence de vent. Un employé aperçoit les flammes vers 10 h lorsqu'il pénètre sur l'aire de stockage de 3 000 m² et alerte les secours. Les 2 fours en fonctionnement sont arrêtés. Les pompiers, équipés d'ARI, protègent les installations, puis ventilent les bâtiments par ouverture des trappes de désenfumage et destruction de syndromes et éteignent l'incendie vers 21h50 avec 3 lances à débit variable. Les eaux d'extinction sont récupérées dans le bassin de rétention du site et traitées par une entreprise extérieure pour un montant estimé à 300 000 euros. Les installations sont peu endommagées, mais l'incinérateur est arrêté 6 jours et les déchets dispatchés vers d'autres centres. Le stockage de déchets banals sur le quai de déchargement est interdit. Selon l'exploitant, le centre a été surchargé par le flux de déchets ce jour-là, obligeant leur stockage. L'inspection avait déjà constaté cette non-conformité liée au démarrage d'une nouvelle activité non déclarée au préalable par l'exploitant, ainsi que de fortes émissions de poussières et l'exploitant avait été mis en demeure le 5 novembre 2009 de mettre en conformité les installations. Les risques liés au stockage de déchets sur le quai n'ont pas

été analysés dans l'étude des dangers. Un arrêté de mesures d'urgence interdit l'activité de stockage de Déchets Commerciaux et Industriels Banals (DICB) sur le quai en absence d'autorisation et conditionne le redémarrage du four aux mesures suivantes :

- Remise du site dans un état de sécurité et vérification de l'intégrité des moyens de secours,
- Evacuation des eaux récupérées dans le bassin de rétention afin de le ramener au niveau permettant une pleine capacité d'utilisation,
- Evacuation de tous les déchets restant sur le quai de déchargement.

ARIA 38180 (échelle 0-0-0-0) - IC - 03/05/2010 - 34 - LUNEL-VIEL

38.21 - Traitement et élimination des déchets non dangereux Le portique de détection radiologique d'un centre de traitement de déchets (UIOM) se déclenche à 15h45 au passage d'un camion. Les premières mesures avec l'appareil présent sur le site indiquent 80 mSv derrière la paroi de la benne. Le véhicule est isolé sur une aire de stationnement et un périmètre de sécurité de 10 m est installé. Une équipe de pompiers spécialisée en radiologie arrive sur les lieux et relève à 17 h une dose de 50µSv sur le côté gauche de la benne à 2 m du sol. Il est décidé de laisser le camion isolé sur le parking jusqu'au lendemain. Celui-ci repassera alors sous le portique de détection. L'inspection des installations classées, les services sanitaires ainsi que les autorités de défense et de protection civiles sont informées.

ARIA 39784 (échelle 1-0-0-1) - IC / TMDROUTE - 28/05/2010 - ALLEMAGNE - HAMBOURG (HAMBURG)

38.22 - Traitement et élimination des déchets dangereux Dans un centre d'incinération de déchets dangereux, une réaction accidentelle se produit vers 11h45 lors de l'aspiration de déchets décapants liquides/boueux dans un camion pompe par un prestataire, provoquant un dégagement de fumée blanche par l'ouverture de la vanne de sécurité du camion, puis l'éclatement de son disque de rupture. Les 2 intervenants évacuent la zone car la fumée se propage et alertent le chef d'équipe du centre qui prévient les services de secours et demande par hautparleur au personnel d'évacuer le site. Les pompiers, arrivés sur place à 12 h, sécurisent la zone, coupent une ligne de tramway passant à proximité et arrosent la cuve du camion, dont la température est montée à 90 °C, pour la refroidir. Le dégagement de fumée s'arrête mais la température de la cuve remonte dès l'arrêt de l'arrosage. L'exploitant décide de remplir un 2ème camion pompe de chaux hydratée et de vidanger le 1er camion dans ce dernier. La réaction cesse et les déchets sont transportés dans l'entrepôt de boue pour y être traités. L'opération de pompage était planifiée et un permis de travail avait été établi avec les intervenants du prestataire. L'aspiration des cuves avait débuté à 9 h et le camion avait été rempli une 1ère fois à 11 h, puis les déchets transférés sans incident. Lors de la 2ème aspiration, 3 conteneurs de déchets ont été pompés dont 1 contenant un produit plastifiant (C24H38O4 ou di-éthylhexil-phthalate). Des résidus de couleur ont ensuite été pompés mais l'aspiration est devenue impossible, les déchets ayant durcis à cause de la présence du produit

plastifiant. Les installations étaient en bon état et les dispositions de fonctionnement étaient respectées. La cause de l'accident réside dans une décomposition rapide des déchets concentrés des 2 premiers conteneurs, probablement déclenchée par un point chaud dans la citerne du camion (mélange stable à température ambiante) et provoquant la montée en pression de la citerne. Les pompiers détectent de faibles concentrations d'hydroxylamine. Les dégâts matériels au niveau du camion sont estimés à 10 000 euros.

ARIA 38364 (échelle 0-0-0-0) - IC - 06/06/2010 - 13 - FOS-SUR-MER

38.21 - Traitement et élimination des déchets non dangereux Un feu embrase vers 13h40 8 t de déchets ménagers dans une fosse de stockage d'un incinérateur d'ordures ménagères (UIOM). Les déchets sont noyés avec les canons à mousse du site appuyés par 3 lances à eau des pompiers. Ils sont ensuite acheminés avec un grappin sur le quai pour parfaire leur extinction. Les pompiers quittent les lieux vers 16h30.

ARIA 38493 (échelle 0-0-0-0) - IC - 22/06/2010 - 54 - LUDRES

38.21- Traitement et élimination des déchets non dangereux Dans un centre de traitement des déchets (UIOM), un portique de radio détection se déclenche au passage d'un camion. Les mesures de radioactivité réalisées par les pompiers sont nulles pour le personnel et le conteneur. Le débit de dose au niveau du colis est de 5mSv/h ; celui-ci est isolé. La préfecture et la sureté nucléaire sont informées.

ARIA 39003 (échelle 0-1-0-0) - IC / TMDROUTE - 22/09/2010

- 39 - LONS-LE-SAUNIER 38.21 - Traitement et élimination des déchets non dangereux Lors d'une livraison de soude caustique utilisée pour produire de l'eau déminéralisée alimentant la chaudière d'un centre d'incinération de déchets ménagers, le flexible d'alimentation branché sur la citerne du camion se détache brusquement et asperge de produit le chauffeur qui contrôle le dépotage. Celui-ci ne porte pas les équipements de protection individuels préconisés par l'exploitant du centre (combinaison, lunette ou écran facial, chaussures de sécurité). De l'autre côté de la cloison séparatrice du poste de dépotage, l'opérateur qui contrôle le tuyau d'alimentation de la cuve réceptrice du centre aperçoit l'accident, quitte son poste et traîne la victime sous la douche de sécurité proche. Les secours sont alertés et le transfert de soude est arrêté. Le chauffeur, gravement brûlé aux yeux et au visage, est évacué par hélicoptère sur un hôpital spécialisé. L'opérateur du centre qui ressent des picotements aux yeux, est lui aussi hospitalisé. Une centaine de litres de soude déversés au sol sur 100 m² sont dilués par les pompiers avec une lance incendie à débit variable, puis récupérés dans un bac de rétention du site. Ces effluents seront utilisés par l'exploitant pour le procédé de déminéralisation de l'eau. A la suite du maire, la police et l'inspection du travail se rendent sur place pour effectuer une enquête.

ARIA 39287 (échelle 0-1-0-0) - IC - 17/11/2010 - 38 - LA TRONCHE

38.22 - Traitement et élimination des déchets dangereux Vers 7h30 du matin, un camion de 15 t décharge une benne de 10 t de feuilles mortes quand il est entraîné par le poids de la benne et se retrouve sur le toit dans la fosse à déchets d'une usine d'incinération. Le conducteur reste coincé 40 min dans sa cabine avant que les pompiers ne le dégagent. Sous le choc et légèrement blessé, il est conduit à l'hôpital par les secours. Le camion est sorti de la fosse dans la journée.

ARIA 39343 (échelle 0-2-0-0) - IC - 23/11/2010 - 13 - ROGNAC

38.22 - Traitement et élimination des déchets dangereux Dans une usine de traitement et d'incinération de déchets industriels spéciaux (traitement physico-chimique et incinération), une réaction incontrôlée lors de la vidange d'une tuyauterie dans une capacité provoque une émission de vapeur qui brûle gravement 2 employés et en blesse légèrement un autre à 15h40. Le dispositif d'évacuation des blessés comprend 3 ambulances et 2 hélicoptères de la sécurité civile.

ARIA 39541 (échelle 0-0-0-0) - IC - 03/01/2011 - 03 - BAYET

38.21 - Traitement et élimination des déchets non dangereux Un feu se déclare vers 21h30 dans un local de maintenance au sous-sol d'une usine d'incinération d'ordures ménagères. Les 3 employés présents évacuent les lieux avant de donner l'alerte à 21h40. Le local contient des cartouches de graisse, 1 bouteille d'oxygène (O₂) et 1 bouteille d'acétylène (C₂H₂). Les flammes se propagent à la façade et à la toiture. Les 20 véhicules et 50 pompiers intervenant, dont certains sont équipés d'ARI, circonscrivent le sinistre à 23h15 avec 5 lances à eau et l'éteignent à 2h05. Le local de maintenance est brûlé sur 50 m². Les premiers éléments de l'enquête menée par la gendarmerie montre que le départ de feu serait accidentel.

ARIA 39725 (échelle 0-0-0-0) - IC - 02/02/2011 - 51 - LA VEUVE

38.21 - Traitement et élimination des déchets non dangereux Lors d'une maintenance sur un silo de 50 t de chaux vive dans une usine d'incinération de déchets ménagers, un employé laisse échapper 4 t de chaux par une vanne à 11h25. Le salarié indemne est néanmoins mis en observation à l'hôpital par précaution. Les secours publics sont alertés en raison de l'absence de tenue TMD sur le site. Un employé parvient cependant à fermer la vanne avant l'arrivée des pompiers et stoppe la fuite. Le produit qui s'est déversé reste confiné à l'intérieur du bâtiment d'exploitation de l'incinérateur. Une société spécialisée prend en charge la chaux écoulée. L'intervention s'achève à 12h45. L'incinérateur est mis à l'arrêt jusqu'au lendemain à 1 h ; il n'y a pas eu de dommage matériel sur ce dernier ni sur les équipements de traitement des effluents.

ARIA 40306 (échelle 1-0-0-0) - IC - 18/05/2011 - 01 - SAINT-VULBAS

38.22 - Traitement et élimination des déchets dangereux A 15h40, un opérateur charge des seaux contenant des batteries au lithium usagées dans le monte-charge d'un

four rotatif d'une usine d'incinération de déchets dangereux quand un des seaux dégage une forte fumée puis s'enflamme. Il saisit un extincteur à poudre pour arroser le seau mais n'arrive pas à l'éteindre. Il alerte sa hiérarchie qui déclenche le POI à 15h50. L'équipe de secours interne intervient à 15h55 et les services de secours, alertés à 16h, arrivent sur site à 16h30 avec 20 pompiers, 2 fourgons grands puissance et 1 cellule mobile d'intervention chimique (CMIC). Le feu est maîtrisé à 16h55. Un stock de poudre d'extinction spécifique pour le lithium, envoyé depuis Lyon, est répandu sur la zone sinistrée à 18 h. Les pompiers quittent les lieux à 19h30 après nettoyage de la zone et levée du POI. L'exploitant informe l'inspection des installations classées et les riverains vers 16h45. Le four n'étant pas endommagé, l'exploitant envisage d'y éliminer le reste du stock des batteries au lithium, à un faible débit et sous protection préventive de poudre. D'après l'inspection des installations classées, une réaction entre les piles au lithium et d'autres déchets serait à l'origine de l'incendie. Le chargement de 1,820 t de batteries usagées est arrivé sur le site le matin à 8h20. L'incinération devait avoir lieu à 8h45 mais, le four étant indisponible, le traitement a été reporté à la prise de poste de l'après-midi.

ARIA 40338 (échelle 0-0-0-0) - IC - 25/05/2011 - 30 - CODOLET

38.22 - Traitement et élimination des déchets dangereux Le dysfonctionnement des détecteurs incendie de l'unité d'incinération d'une usine d'incinération et de fusion de déchets radioactifs est constaté lors d'un essai périodique. Les employés tentent en vain de réinitialiser le système de détection incendie. L'exploitant interdit les travaux par "point chaud" dans l'unité et met en place des rondes de surveillance toutes les heures. Le système est réparé 3 jours après suite au remplacement de l'unité centrale dont la carte présentait 8 voies défectueuses.

ARIA 40605 (échelle 0-0-0-2) - IC - 03/07/2011 - 51 - REIMS

38.21 - Traitement et élimination des déchets non dangereux Un feu se déclare, vers 21 h, au niveau du hall de réception des déchets ménagers de 3 000 m² d'une usine d'incinération d'ordures ménagères. L'incendie qui se développe dans la fosse de déchets de 2 000 m³ provoque l'effondrement partiel de la structure métallique du bâtiment. A proximité se trouvent l'unité de traitement des fumées abritant 3 000 t d'acide chlorhydrique et une cuve de gaz de 13 m³. Protégée par un mur coupe-feu, la zone four avec les 2 chaudières n'est pas atteinte. Les secours, qui interviennent avec 80 hommes, 5 fourgons et 2 échelles, mettent en place un périmètre de sécurité. La densité des fumées nécessite la fermeture de l'autoroute A34. Une cellule mobile d'intervention chimique (CMIC) réalise des mesures de toxicité dans l'air, en périphérie immédiate du site et dans l'axe du vent sur les communes voisines ; aucun risque toxique n'est mis en évidence pour les riverains. Seule une odeur est perceptible. Les eaux d'extinction sont confinées sur le site de l'établissement, ce qui évite une pollution aquatique. Les pompiers maîtrisent l'incendie avec 5 lances alimentées depuis le canal voisin et 2 lances sur le réseau d'eau. En raison des odeurs perceptibles au voisinage, la préfecture diffuse un communiqué de presse et met en place un numéro d'information pour la population. Le communiqué

précise que 6 mois de travaux seront nécessaires pour la remise en état des installations, que les déchets seront pris en charge par un autre site et qu'aucune mesure de chômage technique n'est envisagée. Selon des sources syndicales, le sinistre résulterait d'une accumulation de gaz de fermentation dans un tas d'ordure insuffisamment aéré en raison de son volume exagéré (1000 m³, 18 m de haut). La direction dément cette hypothèse dans la presse locale en évoquant le système de renouvellement d'air existant dans le bâtiment et l'aération naturelle des tas de déchets lors de leur enlèvement.

ARIA 40711 (échelle 0-0-0-0) - IC - 11/08/2011 - 66 - CALCE

38.21 - Traitement et élimination des déchets non dangereux Le portique de détection radioactive d'une usine d'incinération de déchets ménagers et hospitaliers se déclenche (5 micro sieverts), à 11h40, au passage d'une semi-remorque de 20 t. Les services de secours sont alertés et interviennent avec une cellule mobile d'intervention radiologique (CMIR). Un périmètre de sécurité est mis en place autour du camion et d'éventuels points chauds dans la benne sont recherchés. Vu le niveau de rayonnement, le périmètre de sécurité est levé et une entreprise spécialisée dépose la benne le lendemain pour récupérer la source détectée.

ARIA 40923 (échelle 0-0-0-0) - IC - 07/09/2011 - 01 - BELLEGARDE-SUR-VALSERINE

38.21 - Traitement et élimination des déchets non dangereux Un feu se déclare, vers 17h30, dans le broyeur d'une usine d'incinération lors du broyage de 10 m³ de déchets ménagers encombrants provenant d'une déchetterie locale. Les pompiers, alertés à 17h35 par un opérateur, arrivent sur place à 17h55 et maîtrisent rapidement le sinistre au niveau des rotors avec 2 lances mais les flammes dans la trémie restent actives car le foyer est couvant. L'humidité due aux eaux d'extinction met le système broyeur en défaut et l'acquittement de celui-ci n'est pas possible puisque les commandes au sous-sol sont devenues inaccessible en raison des fumées qui l'ont envahi. Faute d'acquittement, le grappin ne peut pas être utilisé pour retirer les déchets présents dans la trémie et atteindre le foyer. Entre 19h30 et 21 h, une pelle mécanique d'une entreprise extérieure permet de les retirer et de les stocker dans une benne. Les pompiers éteignent alors l'incendie avec 2 lances. Les pompes de relevage du site ayant été endommagées au sous-sol, les pompiers procèdent au pompage des 50 m³ d'eau d'extinction utilisés et retenus au sous-sol avec une motopompe mobile. Ces eaux sont ensuite stockées dans le bassin de rétention du site d'une capacité de 480 m³. Elles seront envoyées progressivement les jours suivants à la station d'épuration de la ville. Le fonctionnement du site n'est pas impacté, le broyeur n'est pas endommagé et aucun des 40 employés du site n'est en chômage technique.

ARIA 40936 (échelle 1-2-0-0) - IC - 12/09/2011 - 30 – CODOLET

38.22 - Traitement et élimination des déchets dangereux Une explosion suivie d'un feu se produit vers 12 h dans un four à induction d'un centre de traitement de déchets

faiblement ou très faiblement radioactifs. Un salarié est tué et 4 autres sont blessés dont un gravement brûlé ; aucun d'eux n'est contaminé. L'installation, classée INB et autorisée par décret en 1996, a été mise en service en 1999 et comporte 2 unités indépendantes, l'une de fusion pour les déchets métalliques (vannes, pompes, tuyaux, outils...), l'autre d'incinération pour les déchets combustibles. Le plan d'urgence interne de l'établissement est déclenché. L'autorité de sûreté nucléaire (ASN) active son centre d'urgence à Paris. Les pompiers éteignent l'incendie à 12h55. La sirène d'alerte du site ayant été entendue par la population, les services préfectoraux sont fortement sollicités ; le maire d'une commune voisine confinerait des élèves durant une quinzaine de minutes. Les mesures de la radioactivité dans l'environnement effectuées par l'exploitant, les personnels spécialisés des pompiers et l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (l'IRSN, appui technique de l'ASN) confirment l'absence de conséquences radiologiques pour la population et l'environnement ; aucune action de protection n'est nécessaire. La Criirad (commission de recherche et d'information indépendantes sur la radioactivité) indique sur son site internet qu'aucune contamination n'a été détectée par leurs 6 balises dans la vallée du Rhône. La préfecture et l'ASN diffusent plusieurs communiqués de presse pour cet événement fortement médiatisé. La mission des secours publics s'achève en début de soirée. Le local abritant le four est endommagé mais le bâtiment de l'unité de fusion à l'intérieur duquel se trouve ce local n'est pas affecté. L'ASN classe l'accident au niveau 1 de l'échelle INES (échelle internationale des événements graduée de 0 à 7 par ordre croissant de gravité). L'ASN soumet également à autorisation préalable le redémarrage des fours de fusion et d'incinération, qui avaient été arrêtés après l'accident. Le four de fusion contenait au moment de l'accident une charge de 4 t de métal pour une activité de l'ordre de 30 MBq et non de 63 kBq comme indiqué initialement par l'exploitant à la suite, selon ce dernier, d'un calcul erroné fait dans l'urgence au moment de l'accident et non-vérifié avant sa diffusion. Une enquête judiciaire ainsi que des enquêtes de l'ASN et de l'inspection du travail sont effectuées pour déterminer les causes et circonstances de l'accident. Selon certains journaux, le four de fusion avait connu des pannes diverses la semaine précédant l'accident et avait été remis en marche le matin même avec ses 4 t de métal partiellement fondues ; l'explosion serait survenue alors qu'un fondeur qui avait fait "une entrée casemate" brisait la croûte en surface du bain en fusion. Un hebdomadaire évoque également un rallumage du four dans des conditions inhabituelles et l'absence de personnel d'encadrement lors de l'intervention du salarié.

ARIA 40994 (échelle 0-0-0-2) - IC - 26/09/2011 - 69 - VILLEFRANCHE-SUR-SAONE

38.21 - Traitement et élimination des déchets non dangereux Un feu se déclare à 19h30 dans le local du transformateur électrique (TGBT) d'une usine d'incinération de déchets ménagers. Les employés éteignent les flammes pendant que les services de secours et de l'électricité sont alertés, les fours d'incinération sont mis à l'arrêt. Le site est privé d'électricité et sera à l'arrêt pour 1 mois du fait des dommages matériels (500 kEuros, y compris perte de production). L'exploitant publie un communiqué de presse et informe l'inspection des installations classées le lendemain matin. Les déchets ménagers

habituellement traités sur place (200 t/jour) et ceux en cours de traitement présents dans la fosse (400 t) sont envoyés dans d'autres usines d'incinération de la région. L'exploitant met un place un groupe électrogène pour alimenter le grappin de la fosse de réception et le système hydraulique du poussoir des fours. Il évacue tous les bacs de déchets contenant des déchets dangereux.

ARIA 41038 (échelle 1-0-0-0) - IC - 02/10/2011 - 94 - IVRY-SUR-SEINE

38.21 - Traitement et élimination des déchets non dangereux Le circuit électrique alimentant le système informatique de contrôle et de commande (SNCC) d'un four d'incinération tombe en panne dans un centre d'incinération d'ordures ménagères à 11h30. Une détonation se produit et les soupapes de sécurité s'ouvrent, relâchant un important panache de vapeur d'eau et de fumées noires au-dessus du site en milieu fortement urbanisé. Le sifflement strident de la vapeur relâchée est entendu par de nombreux riverains. Plus de 20 pompiers et 8 engins arrivent sur le site mais n'ont pas à intervenir, le personnel de permanence ayant maîtrisé l'incident. Il n'y a pas de blessés. Le maire et les services du gaz et de l'électricité se sont rendus sur place.

ARIA 41131 (échelle 0-1-0-0) - IC - 19/10/2011 - 59 - DOUCHY-LES-MINES

38.21 - Traitement et élimination des déchets non dangereux Un sous-traitant participant à la réfection annuelle des parois des 2 fours d'un incinérateur d'ordures ménagères (UIOM) reçoit sur le corps un bloc de béton de 70 kg provenant de la paroi de la cheminée. Conscient, il se retrouve coincé entre les parois du four et l'échafaudage, à 6 m du sol et 15 m du sommet. L'exploitant arrête l'unité. Une équipe de pompiers spécialisés dans les interventions en milieu périlleux (GRIMP) lui administre une perfusion puis l'évacue par le haut à 17h15. La victime souffre d'un traumatisme crânien et de lésions aux vertèbres cervicales, ses jours ne sont pas en danger. L'inspection du travail et la police effectuent une enquête.

ARIA 41157 (échelle 0-1-0-0) - IC - 25/10/2011 - 13 - FOS-SUR-MER

38.21 - Traitement et élimination des déchets non dangereux Un feu se déclare vers 8h40 dans un trommel (cylindre de 20 m de long permettant le tri des déchets selon leur taille) dans un centre d'incinération de déchets ménagers (UIOM). Les alarmes se déclenchent et les employés actionnent l'arrêt d'urgence de la ligne de tri primaire. Ils interviennent avec des extincteurs ainsi que des lances RIA et actionnent un rideau d'eau en début du trommel pour contenir les flammes. Les pompiers, sur place 20 min plus tard, transportent à l'hôpital un employé intoxiqué par les fumées et protègent les autres bâtiments à l'aide de lances sur échelle. Le sinistre est maîtrisé en fin de matinée. Le trommel contenait 40 m³ d'ordures ménagères ; l'incendie pourrait être dû à la présence d'un déchet non conforme comme une fusée de détresse ou un déchet pyrotechnique. L'exploitant signale qu'il ne peut contrôler le contenu de toutes les bennes apportées sur le site. Un incendie de déchets ménagers en fosse de stockage s'était déjà produit l'année précédente (ARIA 38364).

ARIA 41585 (échelle 0-0-0-0) - IC - 06/01/2012 - 87 – LIMOGES

38.21 - Traitement et élimination des déchets non dangereux Un fort dégagement de fumée se produit au-dessus de la cheminée d'un four d'une usine d'incinération d'ordures ménagères. Les services de secours interviennent avec une douzaine d'hommes et un véhicule d'intervention risques technologiques (VIRT). Après reconnaissance, ils constatent qu'une canalisation d'eau de refroidissement s'est rompue à proximité d'un des 3 fours du site et provoque l'écoulement d'eau à l'intérieur du four. Cet écoulement entraîne un important dégagement de vapeur d'eau (25 m au-dessus de la cheminée) et des risques d'explosion du four. La chaîne d'incinération est arrêtée mais les 2 autres sont laissées en exploitation. Une recherche par caméra thermique en partie haute du four confirme l'absence de foyer d'incendie, l'exploitant coupe alors la conduite d'eau. L'intervention s'achève à 13h40. La police et le service du gaz se sont rendus sur les lieux.

ARIA 42005 (échelle 0-0-0-0) - IC - 06/03/2012 - 27 - GUICHAINVILLE

38.21 - Traitement et élimination des déchets non dangereux Des balles de coton à éliminer après un incendie dans une entreprise (ARIA 41881) arrivent à 15 h dans un centre d'incinération et sont placées dans la fosse accueillant le refus de crible du broyage de déchets verts. A 16h30, les employés remarquent une fumée, arrêtent l'apport de déchets verts dans la fosse et l'arrosent avec des lance-canon et des RIA. Le lendemain, 4 nouvelles bennes de coton provenant du même établissement incendié arrivent sur site et sont mélangées aux ordures ménagères dans la fosse de l'incinérateur. Utilisant les moyens d'extinction fixes du centre, les employés maîtrisent plusieurs départs de feu à 12h20, 13h40, 20h30, 21 h et le surlendemain à 3h30. Un départ de feu plus important à 5 h le surlendemain entraîne l'intervention des pompiers publics de 5h40 à 15h40 avec 3 lances à eau alimentées par la réserve et le bassin incendie du site ; 32,5 t de coton et 600 t de déchets ménagers impliqués dans l'incendie sont placés dans la trémie et incinérés au fur et à mesure de l'extinction. Durant toute l'intervention, l'exploitant réoriente le stockage des ordures ménagères vers l'unité de mise en balle, tout en refusant les Déchets Industriels Banals (DIB). Les eaux d'extinction sont recueillies dans des bassins, aucun dépassement significatif des limites d'émissions de polluants atmosphériques en sortie des 2 lignes d'incinération ne sera relevé. Il semblerait que les bordereaux remis au transporteur des balles et indiquant "coton brûlé" n'aient pas été remis à l'exploitant de l'incinérateur. De plus, celui-ci indique que les balles de coton avaient bien été ouvertes mais ne présentaient pas de trace d'arrosage. L'expéditeur affirme que celles-ci ont bien été arrosées avant expédition. Un incident similaire se produira dans un site de traitement de déchets à Mercey (27) également destinataire de balles de coton incendiées provenant du même expéditeur.

ARIA 43406 (échelle 1-1-0-0) - IC / TMDROUTE - 19/11/2012 - 77 - VAUX-LE-PENIL

38.21 - Traitement et élimination des déchets non dangereux Un chauffeur livre de l'acide chlorhydrique à 25 % (HCl) dans une usine d'incinération de déchets ménagers vers 8 h. Le camion transporte 3 GRV de 1 000 l d'acide et 1 GRV d'hypochlorite de sodium à 10 % (NaClO) dans un même compartiment. Après avoir connecté le flexible de dépotage à la cuve d'acide de l'usine, il branche par erreur l'autre extrémité au GRV d'hypochlorite de sodium destiné à un autre client et lance le transfert. Alors que 200 l ont été transférés, l'agent du site chargé de la réception remarque vers 8h15 un dégagement de chlore (Cl₂) depuis la cuve alors qu'il contrôle son niveau de remplissage. Il interrompt l'opération et donne l'alerte. Malgré ses EPI (masque à cartouche), le chauffeur est incommodé mais réussit à s'éloigner à pied de la zone de dépotage. Alertés par le responsable d'exploitation, les pompiers et la police municipale se rendent sur place. Un périmètre de sécurité est établi dans la zone de dépotage. Il est décidé de laisser la réaction se terminer d'elle-même car il n'y a pas de mécanisme d'agitation en service susceptible de l'aggraver. Le chauffeur reste en observation à l'hôpital et reçoit un arrêt de travail d'une semaine. Les 1 500 l de HCl du site sont souillés et sont évacués pour destruction, la cuve est rincée. Les résines échangeuses d'ions utilisées pour préparer l'eau déminéralisée du site sont inutilisables. L'exploitant utilise une unité mobile de déminéralisation (camion) le temps de remplacer les résines. Il s'avère que les GRV de HCl et de NaClO sont identiques et qu'ils disposent des mêmes raccords de dépotage. De plus, le masque du chauffeur était inefficace, la cartouche étant utilisée depuis plusieurs jours. Le fournisseur met en place une procédure de check-list avant tout dépotage chez un client et communique en interne sur cet accident.

ARIA 43546 (échelle 0-0-0-0) - IC - 12/03/2013 - 67 – STRASBOURG

38.21 - Traitement et élimination des déchets non dangereux Les opérateurs en salle de contrôle d'une usine d'incinération (UIOM) observent un dégagement de fumées vers 7h30 au niveau de la fosse à déchets suite au déclenchement du dispositif d'évacuation du personnel. La situation revient à la normale sans intervention et les agents reprennent leur poste jusqu'au déclenchement d'une nouvelle alarme 1 h plus tard. Un feu couvant est détecté dans la fosse contenant 3 000 t de déchets ménagers et les moyens internes sont actionnés (canon et lance incendie). L'incendie émet une importante fumée et les pompiers sont appelés en renfort à 8h35. Une soixantaine de pompiers intervient et éteint l'incendie avec 2 lances à eau supplémentaires alimentées par 2 fourgons. Le four d'incinération n'est pas arrêté ; les eaux incendie sont récupérées dans la fosse à déchets de grande profondeur, ce qui augmentera la durée d'incinération des déchets. L'intervention s'achève à 17h15, les employés poursuivant seuls le déblaiement de la fosse. La commune, propriétaire de l'usine, envoie un communiqué de presse le soir même.

ARIA 44245 (échelle 1-0-1-0) - IC - 11/05/2013 - 64 – LESCAR

38.21 - Traitement et élimination des déchets non dangereux Dans une usine d'incinération de déchets, un big-bag contenant des REFIOM (Résidus d'Epuraton des

Fumées d'Incinération des Ordures Ménagères) se perce vers 16 h lors de son déplacement et se déverse au sol. L'opérateur ramasse le produit avec une pelle et un balai, conformément aux instructions, et le place dans le godet d'un chariot télescopique. Sous stress, l'opérateur oublie la procédure et va déverser les REFIOM sur un stock de mâchefers. Puis, alors qu'il recule, la roue arrière droite du chariot glisse dans le fossé, provoquant le retournement de l'engin. L'opérateur, indemne, alerte sa hiérarchie. Le 14/05, 2 grues relèvent le chariot télescopique. Le tas de mâchefer en contact avec les REFIOM est récupéré et stocké dans une benne étanche avant évacuation vers une installation autorisée (ISDD). Une société spécialisée pompe les eaux du fossé polluées par le déversement d'hydrocarbures du réservoir du chariot. Les terres souillées par ces mêmes hydrocarbures sont récupérées et stockées avant évacuation vers une installation autorisée.

ARIA 43897 (échelle 1-0-0-0) - IC / ASP - 12/06/2013 - 30 - NIMES

38.21 - Traitement et élimination des déchets non dangereux Deux bouteilles de propane de 35 kg (cylindres) mêlées aux déchets encombrants explosent à 11h53 dans le broyeur d'un centre d'incinération de déchets, soufflant une partie du bardage du bâtiment et provoquant un départ de feu dans la fosse contenant 2 200 t de déchets. Le broyeur est mis à l'arrêt et les ponts roulants de la fosse se mettent en position de repli. Les moyens fixes d'extinction sont mis en œuvre (sprinkler du broyeur, canon de fosse et RIA à eau additive). Les pompiers arrivent 20 minutes plus tard et déploient d'importants moyens en renfort sur l'incendie en partie circonscrit. L'incendie, qui génère une fumée noire visible de l'extérieur par le bardage éventré, est éteint vers 13 h. L'inspection des installations classées est informée ; l'incinérateur n'est ni arrêté ni endommagé et l'exploitation reprendra normalement. Les eaux d'extinction ont été absorbées par les déchets dans la fosse. L'exploitant sécurise les éléments de façade et de toiture en équilibre ou pouvant tomber, effectue une expertise du broyeur avant sa remise en exploitation, remplace les 2 portails métalliques de la presse déformés par le souffle de l'explosion, reconfigure les détecteurs de fumée endommagés au niveau de la fosse, et répare le bardage abritant les installations. Le lot d'encombrants récoltés à l'origine du sinistre provenait d'une collecte directement auprès de particuliers. L'exploitant rappelle à l'ensemble des collectivités adhérentes au syndicat la typologie de déchets non acceptés sur le site. Il met en place une consigne pour contrôler visuellement les déchets vidés en fosse, ainsi que les encombrants envoyés au broyage. Par ailleurs, pour limiter le risque de conséquences humaines, l'exploitant interdit la présence d'opérateurs dans une zone balisée autour du broyeur lorsque celui-ci est en fonctionnement (signalé par un feu à éclat) ; il déporte les commandes locales du broyeur en salle de quart pour permettre un débouillage mécanique à distance. Enfin, il modifie le broyeur pour limiter les phénomènes de « bourrage » nécessitant une intervention manuelle. Le canon de fosse a prouvé son efficacité en permettant une attaque rapide du feu ; l'exploitant renforce sa défense incendie avec un 2ème canon (angle d'attaque supplémentaire) asservi au « scanner de fosse » (détection d'élévation de température).

ARIA 44192 (échelle 0-0-0-0) - IC - 11/08/2013 - 13 - FOS-SUR-MER

38.21 - Traitement et élimination des déchets non dangereux Dans un centre d'incinération de déchets ménagers, un départ de feu se produit à 2 h : au moment où le grappin saisit des déchets pour alimenter le four, le contenu s'enflamme. L'opérateur décharge rapidement les déchets enflammés dans le four, mais quelques déchets incandescents retombent dans la fosse, générant plusieurs départs de feu en surface de cette dernière. Le système de déluge du site et 2 canons à eau fixes sont activés, les pompiers arrivés à 2h20 ajoutent 2 lances. Les 2 lignes de l'unité de valorisation énergétique sont suspendues. Les différents foyers sont éteints vers 8 h et l'intervention s'achève à 12h30. Compte-tenu de l'inflammation spontanée des déchets lors de leur saisie, l'exploitant suppose la présence d'un déchet pyrotechnique ou d'aérosol inflammable parmi les déchets ménagers. Il adresse un courrier à la communauté de communes pour rappeler l'interdiction d'envoyer de tels déchets.

ARIA 44457 (échelle 0-0-0-0) - IC - 03/10/2013 - 45 - GIEN

38.21 - Traitement et élimination des déchets non dangereux Un feu se déclare vers 16h15 sur le moteur de réarmement d'un disjoncteur dans le local TGBT de la ligne n°2 d'une usine d'incinération. Une alarme se déclenche et les 2 lignes sont arrêtées. Des employés éteignent l'incendie avec 1 extincteur à CO2. Les pompiers ventilent les locaux et examinent les employés intervenus. Le disjoncteur est débouché et déconnecté du jeu de barres après contrôle visuel des armoires adjacentes. Les jeux de barres sont remis en tension et la ligne n°1 est remise en service à 19h 30.

ANNEXE 2 : Plan de maintenance préventive

Plan de maintenance préventive		Machine : Compresseur d'air						
Opération exécutable en fonctionnement	Exécutant	fréquence					N° gamme ou instruction	Observation
Opérations		J	M	T	S	A		
Vérifier le niveau d'huile du compresseur	Mécanicien	X						Contrôle
Contrôler la cartouche de filtre d'air	Mécanicien		X					A l'arrêt
Nettoyer la cartouche de filtre d'air	Mécanicien				X			A l'arrêt
Remplacer la cartouche de filtre d'air	Mécanicien					X		A l'arrêt
Changer la cartouche de filtre d'huile	Mécanicien			X				A l'arrêt
Vérifier le clapet de retour d'huile	Mécanicien					X		A l'arrêt
Contrôler l'étanchéité des raccords	Mécanicien				X			A l'arrêt
Vérifier l'état des canalisations	Mécanicien					X		A l'arrêt
Contrôler le système de refroidissement	Mécanicien		X					A l'arrêt
Contrôler la soupape de sécurité	Mécanicien				X			A l'arrêt
Graisser le palier du moteur	Mécanicien				X			A l'arrêt
Vérifier le clapet d'aspiration	Mécanicien					X		A l'arrêt
Vérifier l'état de l'accouplement	Mécanicien					X		A l'arrêt
Nettoyer le dispositif de commande	Mécanicien			X				A l'arrêt
Surveiller le bruit compresseur	Mécanicien							A l'arrêt
Vérifier le robinet de vidange	Mécanicien	X						En marche
Date :		J= jour, M mensuel, T = trimestrielle, S = semestrielle- A = annuelle						

Gamme de maintenance

Gamme de maintenance préventive (N°1)			Machine : compresseur d'air		
Opération réalisée à l'arrêt			Intervenant : technicien		Equipe : maintenance
Consigne de sécurité : machine consignée électriquement					
Ordre	Opération	Temps alloué	Matériel à employer	Fournitures pièces de rechange	Observations
01	* contrôler le cartouche de filtre d'air	10 mn	Thermomètre		Visuel Faire le soufflage des éléments de refroidissement et nettoyage en cas de mal fonctionnement
02	* contrôler le système de refroidissement	15 mn			
Date :		Document source : plan de maintenance préventive			

Gamme de maintenance préventive (N°2)			Machine : compresseur d'air		
Opération réalisée à l'arrêt			Intervenant : technicien		Equipe : maintenance
Consigne de sécurité : machine consignée électriquement					
Ordre	Opération	Temps alloué	Matériel à employer	Fournitures pièces de rechange	Observations
01	* changer la cartouche de filtre d'huile	30 mn	Chiffon		Visuel Air comprimé
02	* nettoyer le dispositif de commande de Surveillance	15 mn			
Date :		Document source : plan de maintenance préventive			

Gamme de maintenance

Gamme de maintenance préventive (N°3)			Machine : compresseur d'air		
Opération réalisée à l'arrêt			Intervenant : technicien		Equipe : maintenance
Consigne de sécurité : machine consignée électriquement					
Ordre	Opération	Temps alloué	Matériel à employer	Fournitures pièces de rechange	Observations
01	* nettoyer le cartouche de filtre d'air	15mn	Visuel	Joints	L'air comprimé Changer en cas d'usure Régler en cas d'usure Faire l'appoint si nécessaire huile
02	* contrôler l'étanchéité des raccords	15mn	Visuel		
03	* contrôler la soupape de sécurité	10 mn	Pompe à graisse		
04	* graisser les paliers du moteur	30 mn			
Date :		Document source : plan de maintenance préventive			

Gamme de maintenance préventive (N°4)			Machine : compresseur d'air		
Opération réalisée à l'arrêt			Intervenant : technicien		Equipe : maintenance
Consigne de sécurité : machine consignée électriquement					
Ordre	Opération	Temps alloué	Matériel à employer	Fournitures pièces de rechange	Observations
01	* remplacer la cartouche de filtre d'air	15mn	Clé spéciale pour filtre	Cartouche de filtre d'air	Remplacement Vérifier l'alignement Compresseur en marche à vide et en marche
02	* vérifier le clapet de retour d'huile	1 h			
03	* vérifier l'état des canalisations	30mn	Visuel		
04	* vérifier le clapet d'aspiration	1 h	Visuel		
05	* vérifier l'état de l'accouplement	15 mn	Visuel		
06	* surveiller le bruit compresseur	10 mn	Visuel		
Date :		Document source : plan de maintenance préventive			

Analyse des modes de défaillance

Dénomination	Défaillance	Cause de la défaillance	Intervention	Mesure préventive
Compresseur	Compresseur ne démarre pas	<ul style="list-style-type: none"> * Pas de courant * Circuit de commande défectueux * Fusible détérioré 	<ul style="list-style-type: none"> *Mettre le courant *Changer le circuit de commande * Changer le fusible 	<ul style="list-style-type: none"> *Prévoir un circuit de commande en stock. *Prévoir des fusibles en stock
Défaut thermique moteur	Déclenchement de la protection thermique du moteur électrique	<ul style="list-style-type: none"> * Tension d'alimentation insuffisante * Surcharge du moteur *réglage de la protection thermique * Roulement moteur * Défaut d'isolement 	<ul style="list-style-type: none"> * Vérifier la tension * Vérifier son branchement et la pression d'air * Vérifier la plage de réglage * vérifier les roulements ou le graissage * Vérifier l'isolement 	<ul style="list-style-type: none"> *Prévoir le graissage en stock
Débit d'air insuffisant	Débit d'air comprimé trop faible ou nul	<ul style="list-style-type: none"> * Filtre à air obstrué * Le débit demandé est supérieur à celui de compresseur * L'électrovanne de régulation ne fonctionne pas * manostat mal régler 	<ul style="list-style-type: none"> *Nettoyer le filtre * Vérifier la consommation et fuites éventuelles * Vérifier la plage de réglage * Régler le manostat 	
Pression de refoulement faible	Pression de refoulement trop faible	<ul style="list-style-type: none"> * Manostat mal régler * Le débit demandé est supérieur à celui de compresseur * Clapet d'aspiration fermé * Déverseur mal régler 	<ul style="list-style-type: none"> *Vérifier la consommation et fuites éventuelles * Vérifier l'électrovanne, manostat, clapet * Vérifier la plage de réglage 	

ANNEXE 3

Capacités calorifiques

Capacités thermiques (corps à l'état gazeux) en $J. mol^{-1}. K$ (à pression constante) :

Méthane :	$23.65 + 47.88 * 10^{-3} * T - 1.92 * 10^5 * T^2$
Dioxygène :	$29.97 + 4.18 * 10^{-3} * T - 1.67 * 10^5 * T^2$
Diazote :	$27.88 + 4.27 * 10^{-3} * T$
Dioxyde de carbone :	$44.16 + 9.04 * 10^{-3} * T - 8.54 * 10^5 * T^2$
Vapeur d'eau :	$30.01 + 10.71 * 10^{-3} * T - 0.33 * 10^5 * T^2$
Oxyde d'azote :	$29.42 + 3.85 * 10^{-3} * T - 0.59 * 10^5 * T^2$
Dioxyde de soufre :	$43.45 + 10.63 * 10^{-3} * T - 5.94 * 10^5 * T^2$
Acide chlorhydrique :	$26.54 + 4.6 * 10^{-3} * T - 1.09 * 10^5 * T^2$

ANNEXE 4

Détermination de la température de sortie des fumées :

Bilan énergie sur le four de combustion :

Soit l'équation suivante :

$$\begin{aligned} \dot{m}_{OM} * C_p^{OM} * (T_e - T_{ref}) + \dot{m}_{air} * C_p^{air} * (T_e - T_{ref}) + \dot{m}_{OM} * PCI_{waste} + \dot{m}_{OM} \\ * [\%_{gaz} * (x_{fumees}^{CH4} * PCI_{CH4} + x_{fumees}^{CO} * PCI_{CO} + x_{fumees}^{H2} * PCI_{H2})] \\ + \dot{m}_{OM} * \%_{car.fixe} * PCI_{c.fixe} \\ = \\ \dot{m}_{fumees} * C_p^{fumees} * (T_s - T_{ref}) + \dot{m}_{machefers} * C_p^{mach} * (T_s - T_{ref}) \\ + \dot{m}_{OM} * h * L_{vap(P,T)} + \dot{m}_{OM} * \%_{gaz} * \Delta_r H_{pyrolyse}(T_s) \end{aligned}$$

Soit avec $T_{ref} = 298 K$

$$:66.37 * 10^6 = 69818.97 * (T_s - 298) + 4.74 * 10^6 + 7350 * \Delta_r H_{pyrolyse}(T_s)$$

Avec :

$$\text{Loi de Kirchhoff : } \Delta_r H_{pyrolyse}(T_s) = -65.72 - \sum_i \int_{T^0}^{T_s} h_i dT + \sum_j \int_{T^0}^{T_s} h_j dT$$

$$\begin{aligned} \sum_i \int_{T^0}^{T_s} h_i dT = (T_s - 298) * C_p^c + [(T_s - 298) * (4 * a_{O2} + a_{CH4} + a_{H2} + a_{CO})] \\ + \left[\frac{10^{-3}}{2} (T_s^2 - 298^2) * (4 * b_{O2} + b_{CH4} + b_{H2} + b_{CO}) \right] \\ - \left[10^6 \left(\frac{1}{T_s} - \frac{1}{298} \right) * (4 * c_{O2} + c_{CH4} + c_{H2} + c_{CO}) \right] \\ + \left[\frac{10^{-6}}{3} (T_s^3 - 298^3) * (4 * d_{O2} + d_{CH4} + d_{H2} + d_{CO}) \right] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sum_i \int_{T^0}^{T_s} h_i dT = -4.0885 * 10^{-7} * T_s^3 + 3.77 * 10^{-3} * T_s^2 + 19.614 * T_s \\ - 28375 * \frac{1}{T_s} - 9521.3 \end{aligned}$$

$$\sum_j \int_{T^o}^{T_s} h_j dT = 3 * Lv(T^o, P) + [(T_s - 298) * (3 * a_{CO2} + 3 * a_{H2o})] \\ + \left[\frac{10^{-3}}{2} (T_s^2 - 298^2) * (3 * b_{CO2} + 3 * b_{H2o}) \right] \\ - \left[10^6 \left(\frac{1}{T_s} - \frac{1}{298} \right) * (3 * c_{CO2} + 3 * c_{H2o}) \right] \\ \left[\frac{10^{-6}}{3} (T_s^3 - 298^3) * (3 * d_{CO2} + 3 * d_{H2o}) \right]$$

$$\sum_j \int_{T^o}^{T_s} h_j dT = 8.023 * 10^{-4} * T_s^2 + 9.2153 * T_s + 170658 * \frac{1}{T_s} + 6168.22$$

D'où :

$$\sum_i \int_{T^o}^{T_s} h_i dT + \sum_j \int_{T^o}^{T_s} h_j dT = \\ - \left(-4.0885 * 10^{-7} * T_s^3 + 3.77 * 10^{-3} * T_s^2 + 19.614 * T_s - 28375 * \frac{1}{T_s} - 9521.3 \right) \\ + \left(8.023 * 10^{-4} * T_s^2 + 9.2153 * T_s + 170658 * \frac{1}{T_s} + 6168.22 \right)$$

$$\sum_i \int_{T^o}^{T_s} h_i dT + \sum_j \int_{T^o}^{T_s} h_j dT = \\ 4.0885 * 10^{-7} * T_s^3 - 2.968 * 10^{-3} * T_s^2 - 10.399 * T_s + 199033 * \frac{1}{T_s} + 15689.5$$

Alors

$$\Delta_r H_{pyrolyse}(T_s) = \\ 4.0885 * 10^{-7} * T_s^3 - 2.968 * 10^{-3} * T_s^2 - 10.399 * T_s + 199033 * \frac{1}{T_s} + 15623.8$$

Et donc devient :

$$66.37 * 10^6 = 69818.97 * (T_s - 298) + 4.74 * 10^6 + 7350 \\ * \left(4.0885 * 10^{-7} * T_s^3 - 2.968 * 10^{-3} * T_s^2 - 10.399 * T_s + 199033 * \frac{1}{T_s} + 15623.8 \right) \\ * 10^{-3}$$

$$T_s = 1180.72 \text{ K Soit } 907.57 \text{ } ^\circ\text{C}$$

ANNEXE 5

Caractéristiques des autres équipements

1- Pompe :

Tableau : Courants traversant la pompe

Grandeur	Aspiration	Refoulement
Débit massique (kg/h)	17620.42	17620.42
Pression (bars)	5	45
Température (°C)	114	115
Entropie (KJ/Kg/K)	1.4733	1.4733
Hauteur (m)	B _{allon}	H _{ballon}

Calcul de la HMT

Si on considère les dernières données exposées, nous pouvons calculer la HMT de notre pompe. La formule à utiliser est :

$$HMT = \frac{P_{ref} - P_{asp}}{\rho * g} + (h_{ref} - h_{asp}) + \frac{1}{2 * g} * (V_{ref}^2 - V_{asp}^2)$$

$$HMT = \frac{4500000 - 500000}{974.74 * 9.81} + \frac{1}{2 * 9.81} * (1.55^2 - 0.92^2)$$

$$HMT = 420 \text{ m}$$

Calcul de débit volumique :

On a $\rho_{eau}(114 \text{ °C}, 5 \text{ bar}) = 974.74 \text{ kg/m}^3$

$$Qv = \frac{Q_m}{\rho} = \frac{17620.42}{974.74} = 18.07 \text{ m}^3/\text{h}$$

Nous pouvons donc rechercher la pompe adéquate avec les deux données ci-dessous :

$$HMT = 420 \text{ m et } Qv = 18.07 \text{ m}^3/\text{h}.$$

Après consultation des catalogues de différents fournisseurs de pompes dans le milieu industriel (Grundfos, Samson, Horus, Europumps, Pompes AB,...), nous avons trouvé un modèle qui correspond parfaitement aux conditions de fonctionnement exigées par notre circuit d'eau secondaire.

Nous choisissons la pompe **Sunflo P-2 000 de chez Ax-Flow**.

La plage de débit et la valeur de la HMT correspondent. Nous vérifions cela grâce à la courbe caractéristique de la pompe fournie par le fabricant (données constructeur).

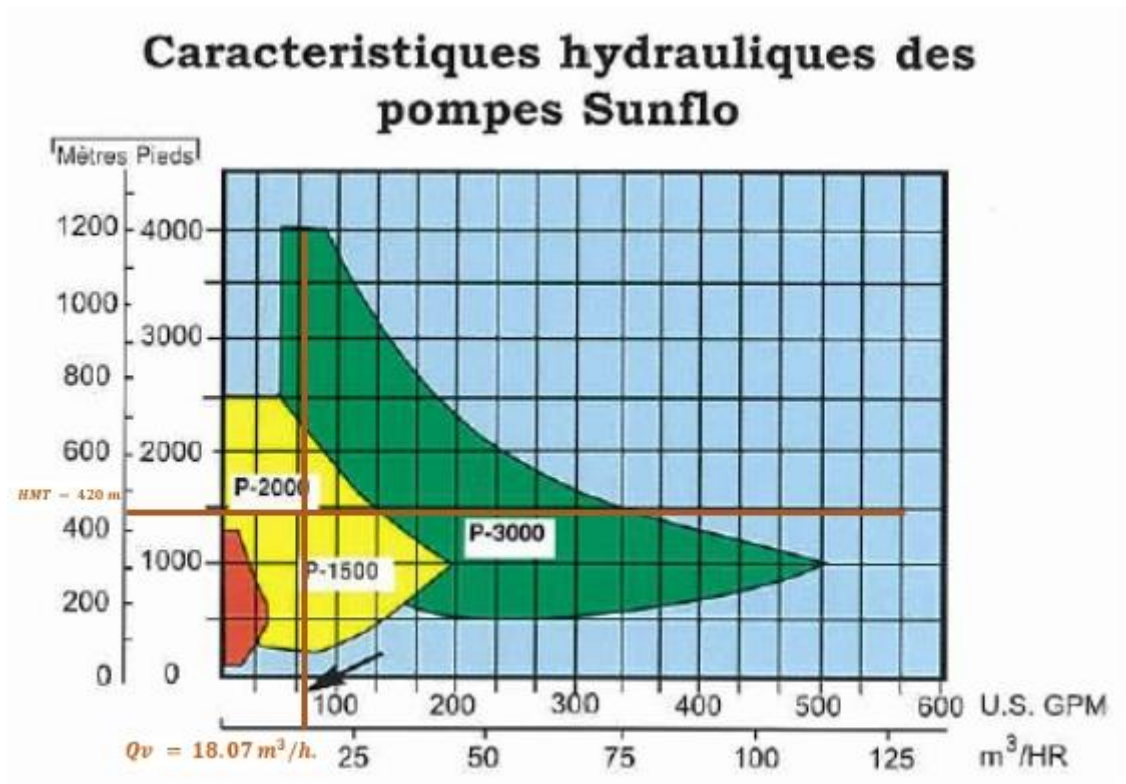


Figure : Courbe caractéristique de la pompe

2- Chaudière :

Caractéristiques courants chaudière :

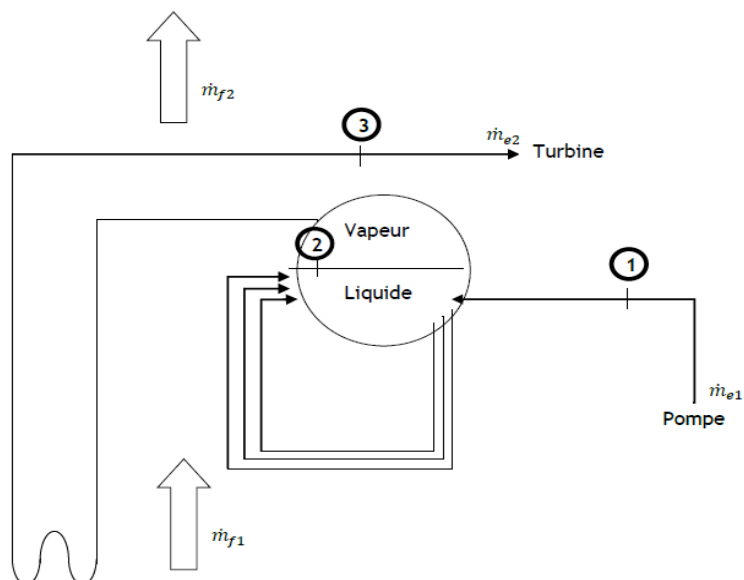


Figure : Schéma simplifié de la chaudière

Tableau : Caractéristiques courants chaudière

	Repère 1	Repère 2	Repère 3
Etat	Liquide sous-refroidi	Equilibre liq-vap	Vapeur surchauffée
Température (°C)	115	257.2	360
Pression (En bar)	45	45	40
Enthalpie (KJ/Kg)	459.02	$h_v=1120.77$ $h_l=2797.85$	3116.72

Températures des fumées aux différentes étapes de la chaudière :

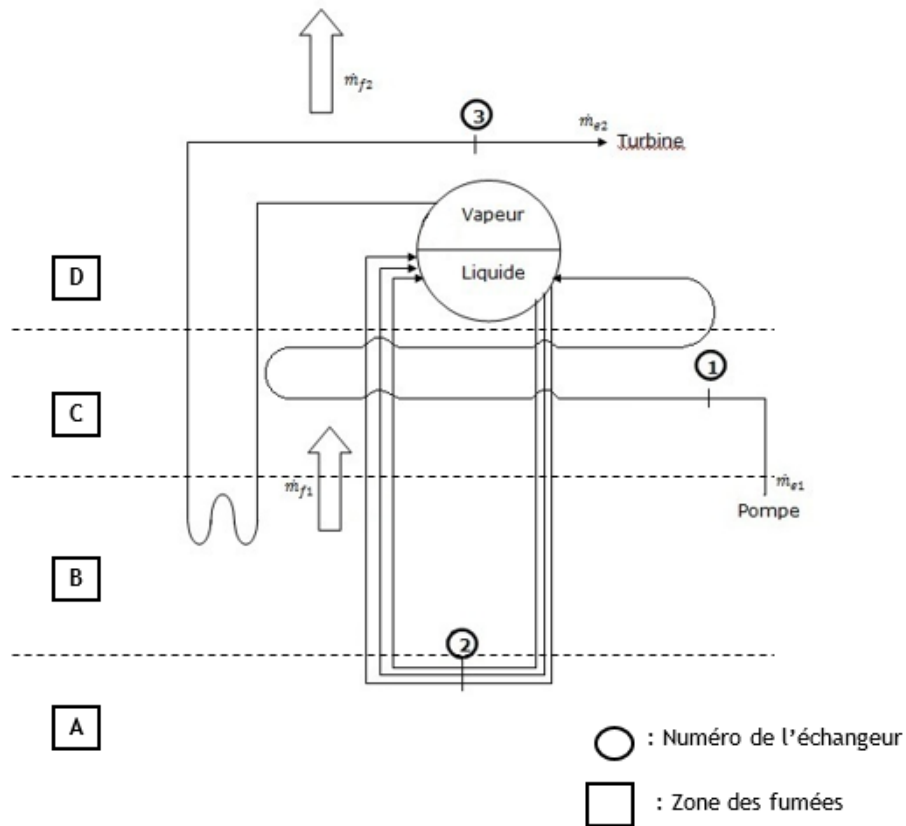


Figure : Schéma de la chaudière et des échangeurs

Tableau : Récapitulatif des températures et Cp des fumées en différents points

Point	Température (°C)	Enthalpie (KJ/Kg)
A	907.57	1085.27
B	505.50	1002.2
C	403.79	981.2
D	220	943.2