

**République Algérienne Démocratique et Populaire**  
**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**  
**Ecole Nationale Polytechnique**



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
Ecole Nationale Polytechnique



**Mercedes-Benz**  
SAPPL MB

**Département de Maitrise des Risques industriels et environnementaux**  
**(MRIE)**

Mémoire de projet de fin d'études pour l'obtention  
du diplôme d'Ingénieur d'Etat en  
**QHSE-GRI**

---

**Contribution de l'Analyse du cycle de vie (ACV) et l'identification des  
défaillances dans le choix d'un système de peinture écologiquement  
responsable et durable.**

**Cas de SAPPL-Mercedes Benz**

---

**Chaima Yousra BENHASSIR**

Sous la direction de :

M A. CHERGUI	Professeur à l'ENP
M M. SENOUCI-BEREKSI	MCB à l'ENP
M H. CHIKH	Doctorant à l'ENP
M A. MEKIRI	Directeur HSE à SAPPL-MB

Présenté et soutenu publiquement le 03/07/2023 devant le jury composé de :

Président de jury :	M. A. BENMOKHTAR	MCA	ENP
Examineurs :	M. A. KERTOUS	MAA	ENP
	M. M. BOUSBAI	MCB	ENP

**ENP 2023**



**République Algérienne Démocratique et Populaire**  
**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**  
**Ecole Nationale Polytechnique**



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
Ecole Nationale Polytechnique



Mercedes-Benz  
SAPPL MB

**Département de Maitrise des Risques industriels et environnementaux**  
**(MRIE)**

Mémoire de projet de fin d'études pour l'obtention  
du diplôme d'Ingénieur d'Etat en  
**QHSE-GRI**

---

**Contribution de l'Analyse du cycle de vie (ACV) et l'identification des  
défaillances dans le choix d'un système de peinture écologiquement  
responsable et durable.**

**Cas de SAPPL-Mercedes Benz**

---

**Chaima Yousra BENHASSIR**

Sous la direction de :

M A. CHERGUI	Professeur à l'ENP
M M. SENOUCI-BEREKSI	MCB à l'ENP
M H. CHIKH	Doctorant à l'ENP
M A. MEKIRI	Directeur HSE à SAPPL-MB

Présenté et soutenu publiquement le 03/07/2023 devant le jury composé de :

Président de jury : M. A. BENMOKHTAR	MCA	ENP
Examineurs : M. A KERTOUS	MAA	ENP
M. M BOUSBAL	MCB	ENP

**ENP 2023**

# Dédicaces

Je dédie ce modeste travail avec un profond amour :

A mes chers parents, qui ont toujours été présents pour  
m'encourager et me donner de la force.

A ma sœur, Mouna, qui a été une source d'inspiration constante dans  
ma vie.

A mes frères, Mohamed et Ismail, mes fidèles alliés, qui m'aident à  
surmonter les défis avec courage.

A mes amies, Rayane, Ines, Ryma, Rania et Imene, qui m'ont soutenue  
dans les moments les plus difficiles.

Avec bonheur, j'exprime ma gratitude envers tous ceux qui ont croisé  
mon chemin, m'apportant inspiration et encouragement.

Ensemble, vous avez été les architectes de mon succès, m'insufflant  
courage, détermination et confiance pour réaliser mes aspirations.

## Remerciements

Je tiens tout d'abord à exprimer mes remerciements et ma gratitude à mes parents respectifs pour leur amour, soutiens et encouragements.

Mes vifs remerciements à mes promoteurs M A. Chergui, M M. SENOUCI-BEREKSI ainsi que M H. CHIKH, pour le temps qu'ils m'ont accordé, les conseils qu'ils m'ont prodigués et pour leur aide précieuse afin de mener à bien ce travail.

Je remercie les membres du jury : M A. BENMOKHTAR, M A. KERTOUS et M M. BOUSBAI de m'avoir fait l'honneur d'examiner mon travail.

Mes remerciements s'adressent également à M A. MEKIRI Chef du département HSE et Mme M. MOUMENI et M N. TIRSATINE ingénieurs à SAPPL-MB pour m'avoir donné l'opportunité d'accéder à la documentation, de m'avoir guidé et orienté durant mon stage d'entreprise et aussi pour leur disponibilité.

Merci à tous les enseignants du département Maitrise des risques industriels pour le savoir qu'ils nous ont transmis au cours de ces dernières années.

Merci à mes amis proches, mes camarades à tous ceux et celles qui, directement ou indirectement ont contribué à faciliter mon travail.

## ملخص

تستخدم الشركة الوطنية لصناعة المركبات من نوع مرسيدس بانز حاليًا عمليتي طلاء لمركباتها ، واحدة تعتمد على عملية جافة والأخرى باستخدام عملية رطبة.

من خلال هذا المشروع ، تم إجراء تحليل لدورة الحياة لتقييم ومقارنة الأثر البيئي للأسلوبين في ظروف التشغيل العادية. الهدف هو تحديد العملية الأكثر مثالية من وجهة نظر بيئية ، وتحديد أي أعطال قد تواجهها. تمت صياغة التوصيات لتحسين الأداء البيئي وضمان التشغيل الأمثل للعملية المختارة.

الكلمات المفتاحية : تأثير بيئي، شاحنات، طلاء، مؤشرات التأثير، عيوب.

---

## Abstract

The SAPPL-Mercedes Benz company currently uses two painting processes for its vehicles, one based on a dry process and the other using a wet process. As part of this project, a life cycle assessment was carried out to evaluate and compare the environmental impact of the two processes under normal operating conditions. The aim is to identify which process is the most optimal from an environmental point of view, determine any dysfunctions it may face, and formulate recommendations to control its environmental impacts and ensure its sustainability. and to formulate recommendations for improving environmental performance and ensuring optimal operation of the chosen process.

Key words: environmental impact, Truck, paint, Impact indicators, failure.

---

## Résumé

L'entreprise SAPPL-Mercedes Benz utilise actuellement deux processus de peinture pour ses véhicules, l'un basé sur un procédé à sec et l'autre utilisant un procédé humide. Dans le cadre de ce travail, une analyse du cycle de vie a été réalisée pour évaluer et comparer l'impact des deux processus sur l'environnement dans des conditions de fonctionnement normales. L'objectif est d'identifier lequel des deux processus est moins nocif du point de vue environnemental, déterminer les éventuels dysfonctionnements auxquels il peut être confronté et formuler des recommandations afin de maîtriser ses impacts environnementaux et assurer sa durabilité.

Mots clés : Impact environnemental, Véhicules, Peinture, Indicateurs d'impact, Dysfonctionnements

# Sommaire

Liste des figures

Liste des tableaux

Liste des acronymes

Introduction générale .....	11
1 Présentation de SAPPL Mercedes Benz .....	14
1.1 Le projet Mercedes- Benz en Algérie.....	14
1.2 Présentation de l'entreprise SAPPL MB .....	14
1.2.1 Vue globale de l'entreprise.....	14
1.2.2 Organigramme.....	15
1.2.3 Localisation et superficie .....	15
1.2.4 Activités et services.....	17
1.2.5 Gamme de produit.....	17
1.3 Processus de fabrication dans l'entreprise SAPPL-MB .....	19
1.3.1 Etapes d'assemblage des camions.....	19
1.3.2 Processus de peinture .....	25
1.3.3 Description du processus de traitement des rejets.....	30
2 Généralités sur les outils d'aide à la décision .....	39
2.1 Importance des études environnementales dans l'étape de conception.....	39
2.2 Définition des outils d'aide à la décision.....	39
2.3 Quelques outils d'aide à la décision .....	39
2.4 Analyse du cycle de vie .....	40
2.4.1 Définition de l'ACV.....	40
2.5 Les phases de l'ACV .....	41
2.5.1 Définition de l'objectif et champs de l'étude .....	42
2.5.2 Analyse de l'inventaire.....	44
2.5.3 Evaluation des impacts du cycle de vie (EICV).....	45
2.5.4 Interprétation des résultats .....	51
2.6 Identification des priorités d'action .....	51
3 Application de l'ACV sur les processus de peinture de l'entreprise SAPPL - Mercedes Benz.....	54
3.1 Méthodologie de travail.....	54
3.2 Application de l'analyse de cycle de vie .....	54
3.2.1 Définition de l'objectif et le champ de l'étude.....	54

3.2.2	Réalisation de l'inventaire.....	56
3.2.3	Evaluation des impacts environnementaux .....	60
3.2.4	Recommandations .....	79
4	Identification des défaillances et recommandations .....	82
4.1	Méthodologie du travail .....	82
4.2	Décomposition des systèmes critiques .....	82
4.2.1	Principe de la méthode SADT .....	82
4.2.2	Application de la décomposition SADT .....	83
4.3	Analyse des modes de défaillance et de leurs effets (AMDE) .....	84
4.3.1	Principe de la méthode .....	84
4.3.2	Application de l'AMDE sur les systèmes critiques .....	85
4.4	Application des arbres de défaillances et arbre des causes et conséquences sur le système d'application de peinture .....	91
4.4.1	Principe de l'analyse par arbre de défaillance .....	91
4.4.2	Les évènements .....	91
4.4.3	Les portes logiques.....	93
4.4.4	Logique booléenne .....	93
4.4.5	Etapas de modélisation.....	93
4.5	Analyse causes-conséquences .....	94
4.5.1	Application des arbres de défaillance sur le système d'application de peinture	95
4.5.2	Application de l'arbre des causes et conséquences sur la phase d'application de peinture.....	98
4.5.3	L'impact des conséquences sur les catégories d'impact .....	102
4.5.4	Recommandations .....	105
4.6	Application de l'arbre des causes et conséquences sur le système du séchage.....	106
4.6.1	Application des arbres de défaillances sur le système du séchage.....	106
4.6.2	Application de l'arbre des causes et conséquences .....	109
4.6.3	L'impact des conséquences sur les catégories d'impact .....	111
4.6.4	Recommandation.....	113
	Conclusion .....	114
	References bibliographiques.....	116
	Annexes.....	118

## Liste des figures

Figure 1-1: Organigramme de SAPPL Mercedes-Benz. ....	15
Figure 1-2: Plan de masse globale de l'entreprise SAPPL-MB.....	16
Figure 1-3: Plan de masse de l'atelier ligne pilote.....	19
Figure 1-4: Logigramme de l'assemblage de camion.....	20
Figure 1-5: Châssis d'un camion de type ACTROS.....	21
Figure 1-6: Logigramme du processus carrossage . ....	23
Figure 1-7: Logigramme du processus de peinture châssis.....	25
Figure 1-8: Logigramme du processus de peinture châssis-cabine.....	27
Figure 1-9: Camion de type ACTROS masqué.....	28
Figure 1-10: Camion ACTROS prêt pour la livraison .....	29
Figure 1-11: Cabine d'application de peinture humide .....	30
Figure 1-12: Fosse relevage/ Fosse tampon. ....	31
Figure 1-13: Traitement chimique des effluents par coagulation et neutralisation.....	32
Figure 1-14: Traitement chimique des effluents par floculation.....	32
Figure 1-15: traitement par décantation. ....	33
Figure 1-16: Déshydratation des boues. ....	34
Figure 1-17: Salles d'Application de peinture du processus sec .....	34
Figure 1-18: système d'application de peinture sec .....	36
Figure 1-19: Entretoises .....	36
Figure 1-20: Filtre en fibre verre .....	37
Figure 2-1: Cycle de vie général .....	41
Figure 2-2: Etapes de l'analyse de cycle de vie .....	41
Figure 2-3: bordures du système .....	43
Figure 2-4: Méthodologies d'évaluation d'impact utilisées dans l'AICV. ....	49
Figure 2-5: catégories <i>midpoint</i> et <i>endpoint</i> .....	50
Figure 2-6: Exemple de différence entre <i>midpoint</i> et <i>endpoint</i> .....	51
Figure 3-1: Bordures du système .....	56
Figure 3-2: les produits résultants de chaque étape du processus .....	60
Figure 3-3: l'impact des deux processus sur les catégories d'impact.....	61
Figure 3-4: Contribution des phases du processus de peinture humide dans l'impact sur l'environnement .....	63
Figure 3-5: impact globale sur les catégories d'impact .....	64
Figure 3-6: Contribution du processus humide sur les respiratoires organiques et inorganiques .....	65
Figure 3-7: impact du processus humide sur le réchauffement climatique.....	68
Figure 3-8: contribution des phases du processus humide dans l'impact sur l'utilisation des énergies non renouvelables .....	69
Figure 3-9:contribution des phases du processus humide dans l'impact sur l'écosystème terrestre.....	70
Figure 3-10: Contribution des phases du processus de peinture sec dans l'impact sur l'environnement .....	71
Figure 3-11: impact total du processus sec sur les catégories d'impact .....	72
Figure 3-12: impact des étapes du processus sec sur les respiratoires organiques et inorganiques .....	73

Figure 3-13: contribution des phases du processus sec sur l'écotoxicité terrestre .....	74
Figure 3-14: impact des phases du processus sec sur le réchauffement climatique.....	75
Figure 3-15: impact des phases du processus sec sur les énergies non renouvelables.....	76
Figure 3-16: Impact global des deux processus de peinture .....	77
Figure 3-17: Comparaison entre l'impact total des deux processus de peinture sec et humide	78
Figure 4-1: La méthode SADT.....	82
Figure 4-2: Bloc de la SADT .....	83
Figure 4-3: Bloc initial du processus de peinture.....	83
Figure 4-4: La première décomposition du processus de peinture.....	84
Figure 4-5: Arbre de défaillances .....	92
Figure 4-6: Arbre des causes et conséquences .....	95
Figure 4-7: Dysfonctionnement du système de traitement d'air.....	96
Figure 4-8 : Dysfonctionnement de l'injecteur d'air .....	96
Figure 4-9: Présence d'une source d'inflammation.....	98
Figure 4-10: Arbre des causes et conséquences de la phase d'application de peinture .....	99
Figure 4-11 : Domaine d'explosibilité de chaque produits utilisé dans la peinture d'un véhicule .....	101
Figure 4-12: Impact des conséquences sur les catégories d'impact .....	102
Figure 4-13: Arbre de panne de la présence de gaz .....	106
Figure 4-14: Arbre de panne relative au dysfonctionnement du détecteur .....	107
Figure 4-15: Arbre de panne relative à la présence inhabituelle de source d'ignition .....	108
Figure 4-16: Arbre de panne du dysfonctionnement du système de traitement d'air.....	109
Figure 4-17: Arbre des causes et conséquences de la phase du séchage.....	110

## Liste des tableaux

Tableau 1-1: Vue globale de l'entreprise SAPPL-Mercedes Benz.....	14
Tableau 1-2:Superficie des différents immeubles de l'entreprise SAPPL-MB .....	16
Tableau 1-3: gamme de production de l'entreprise SAPPL-MB.....	17
Tableau 2-1:Domaine de protection des catégories d'impact .....	46
Tableau 2-2: les principales substances des catégories d'impact .....	47
Tableau 2-3: Substances de référence des Catégories d'impact. ....	48
Tableau 3-1: Composition des produits de la peinture, du diluant et du durcisseur .....	58
Tableau 3-2: Impact sur les différentes catégories d'impact .....	61
Tableau 3-3: Impact des constituants chimiques organiques sur le système respiratoire .....	66
Tableau 3-4: Impact des composants inorganiques sur le système respiratoire.....	67
Tableau 3-5:Effets des matières de combustion sur l'écotoxicité terrestre .....	70
Tableau 3-6:différence de quantité de produits utilisés dans les deux phases de préparation et application de la peinture .....	73
Tableau 3-7:les composants chimiques inorganiques avec impact sur le système respiratoire	74
Tableau 3-8:différence de consommation entre deux phases du processus .....	77
Tableau 4-1: Tableau de l'AMDE sur les deux systèmes de peinture critiques .....	86
Tableau 4-2: Signification des symboles de l'ADD .....	92
Tableau 4-3: Signification des portes logiques .....	93
Tableau 4-4: Codification des événements élémentaires pour le dysfonctionnement du système de traitement d'air.....	96
Tableau 4-5:Codification de l'arbre de défaillance de l'injecteur d'air .....	97
Tableau 4-6:Codification des événements élémentaires de la présence d'une source d'inflammation.....	98
Tableau 4-7: Conditions du fonctionnement idéal de l'injecteur d'air.....	100
Tableau 4-8: Limites inférieures de toxicité.....	100
Tableau 4-9: Limites d'explosibilités de la peinture, diluant et durcisseur .....	101
Tableau 4-10: impact des conséquences sur les catégories d'impact dans la phase d'application de peinture .....	103
Tableau 4-11: Codification des événements élémentaires de la présence de gaz .....	106
Tableau 4-12: Codification des événements élémentaires relatives au dysfonctionnement du détecteur .....	107
Tableau 4-13: Codification des causes .....	108
Tableau 4-14: Codification des événements élémentaires relatifs au dysfonctionnement du système de traitement d'air .....	109
Tableau 4-15: Impact des conséquences sur les catégories d'impact .....	112

## Liste des acronymes

<b>ACV</b>	Analyse du cycle de vie
<b>ADD</b>	Analyse par arbres de défaillance
<b>AFM/AFS</b>	Analyse de flux de matière/ Analyse de flux de substance
<b>AHU</b>	Air handling unit
<b>AMDE</b>	Analyse des modes de défaillances et leurs effets
<b>AR</b>	Analyse des risques
<b>CKD</b>	Completely knocked down
<b>EICV</b>	Evaluation de l'inventaire du cycle de vie
<b>EIE</b>	Etude de l'impact sur l'environnement.
<b>FC</b>	Facteur de caractérisation
<b>MGx</b>	Moyens généraux
<b>RH</b>	Ressources humaines
<b>SADAB</b>	Société Africaine des automobiles Berliet
<b>SADT</b>	Structured Analysis and Design Technique
<b>SAPPL</b>	Société Algérienne de production de poids lourds
<b>SNVI</b>	Société Algérienne des véhicules industriels
<b>SONACOME</b>	Société nationale de la construction mécanique
<b>UF</b>	Unité fonctionnelle
<b>PM</b>	Particulate Matter
<b>COV</b>	Composés organiques volatils
<b>POP</b>	Polluants organiques persistents

# Introduction générale

L'industrie des camions de poids lourds a pris naissance en Algérie en 1957 pendant la période coloniale avec la société africaine des automobiles Berliet (S.A.D.A.B). En 1967, Après l'indépendance, l'Algérie a créé la Société Nationale de Construction Mécanique (SONACOME) dans le but de développer son industrie automobile et réduire sa dépendance vis-à-vis des importations. Puis, des partenariats ont été établis avec des constructeurs étrangers pour créer des usines de montage en Algérie. Parmi les marques étrangères qui ont participé à ces projets figuraient Mercedes-Benz Avec un projet au niveau de trois entreprises à savoir SAFMA, SAFAV et SAPPL-Mercedes Benz. [1 ; 2]

L'industrie automobile est confrontée à de nombreux défis qui affectent sa croissance soutenue. L'augmentation du coût d'énergie utilisée dans les phases de production est souvent identifiée comme l'un des principaux défis. Les réglementations environnementales exercent également une pression sur l'industrie. Au cours des étapes de fabrication automobile, le processus de peinture est celui qui consomme le plus d'énergie. [3]

Le processus peinture au niveau de la SAPPL – MB se fait selon deux (02) méthodes différentes qui sont soit en processus sec, soit en processus humide. Dans le but d'améliorer les effets de l'activité sur l'environnement et minimiser les coûts. L'entreprise s'engage à déterminer le processus de peinture le plus optimal afin de basculer vers un seul processus écologiquement responsable.

A travers ce projet nous allons répondre aux problématiques suivantes :

**« Quel sont les impacts environnementaux des processus de peinture des véhicules sec et humide ? quel est le processus de peinture le plus optimal pour l'environnement dans les conditions de fonctionnement normales ? Quels sont les dysfonctionnements qui peuvent survenir dans ce processus ? et quels sont les moyens de maîtrise de ces dysfonctionnements ? ».**

Afin de répondre à ces problématiques, nous avons suivi une méthodologie qui consiste à partager le travail en quatre chapitres.

Dans le premier chapitre, nous allons présenter l'entreprise SAPPL-MB ainsi que son processus d'assemblage, de carrossage et de peinture.

Le deuxième chapitre est dédié à la description théorique de la démarche de l'analyse du cycle de vie.

Dans le troisième chapitre, nous allons évaluer et comparer l'impact environnemental des deux processus de peinture sec et humide.

Pour évaluer l'impact environnemental, il existe plusieurs outils, les plus courants sont l'analyse du cycle de vie, l'analyse de flux de matière, l'étude d'impact sur l'environnement, le bilan carbone, etc.

Pour notre cas d'étude nous avons utilisé la démarche de l'Analyse du cycle de vie (ACV) constituée de (04) étapes essentielles afin de comparer les impacts environnementaux des deux processus dans leurs différentes phases de cycle de vie.

Après avoir déterminé le processus optimal, nous allons passer au dernier chapitre de ce projet qui va être centré sur l'identification des dysfonctionnements qui peuvent perturber le fonctionnement de ce processus et proposer des mesures préventives.

Pour cette étape, nous allons utiliser les outils cités ci-dessous:

- La décomposition en SADT ;
- L'analyse des modes de défaillance et leurs effets (AMDE) pour l'identification des défaillances de chaque équipement ;
- L'analyse par arbres de défaillances pour schématiser et combiner ces défaillances et dysfonctionnements ;
- L'arbre des causes et conséquences, pour combiner les arbres de défaillances (ADD) avec des conditions d'apparence pour atteindre les conséquences qui ont un impact sur l'environnement.

Nous allons finir ce travail par des recommandations qui permettront une meilleure maîtrise du processus optimal vis-à-vis l'environnement et une conclusion générale.

**CHAPITRE 01 :**  
**Présentation de SAPPL –**  
**MERCEDES BENZ**

# 1 Présentation de SAPPL Mercedes Benz

Dans ce chapitre, nous allons présenter SAPPL - Mercedes-Benz ainsi que le processus de fabrication et de peinture afin de bien définir les systèmes sur lesquels nous allons travailler.

## 1.1 Le projet Mercedes- Benz en Algérie

Le projet MB a été initié par la collaboration entre le groupe AABAR avec le représentant de l'Algérie qui est le Ministère de la Défense Nationale (MDN), le tout accompagné par Daimler comme partenaire technologique. Cette collaboration régie par la règle 49/51% relative à l'investissement étranger et se résume dans les trois (03) entreprises suivantes :

- SAPPL : Société Algérienne de Production du Poids Lourds à Rouïba.
- SAFMA : Société Algérienne de production et de fabrication des moteurs à Constantine.
- SAFAV : Société Algérienne de Fabrication des véhicules à Tiaret.

## 1.2 Présentation de l'entreprise SAPPL MB

L'entreprise SAPPL est une société mixte Algéro-Emirati créée en 2014 dont l'activité principale est la production des poids lourds. [4]

### 1.2.1 Vue globale de l'entreprise

Le tableau 1-1 donne des informations générales sur l'entreprise SAPPL-Mercedes Benz.

Tableau 1-1: Vue globale de l'entreprise SAPPL-Mercedes Benz. [4]

Nom Complet	Société Algérienne de Production des Poids Lourds
Forme juridique	S.P.A
Date de création	2014
Actionnaires	Ministère de la Défense Nationale (51%) Groupe émirati AABAR (49%)
Donneur de licence	Daimler
Groupe	Mercedes-Benz
Client principal	Algerian Motors Services (AMS)
Nombre d'employés	Environs 600
Secteur d'activité	Mécanique

## 1.2.2 Organigramme

La figure 1-1 représente l'organigramme de SAPPL-MB.

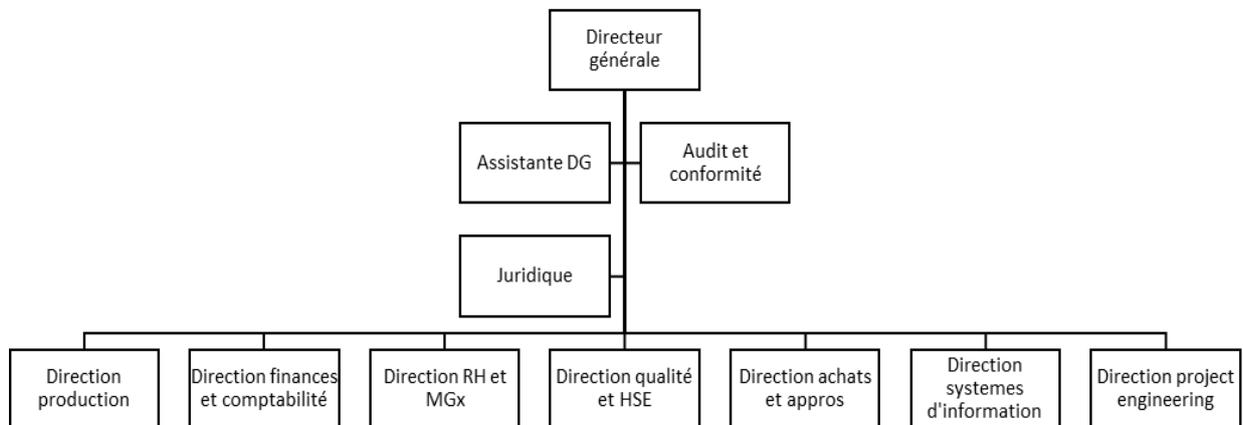


Figure 1-1: Organigramme de SAPPL Mercedes-Benz. [4]

## 1.2.3 Localisation et superficie

SAPPL MB est sise au niveau de la zone industrielle de Rouïba, Wilaya d'Alger. Elle est implantée sur le site de la société SNVI. L'entreprise a loué des locaux et ateliers d'une superficie totale d'environ 150 000 m<sup>2</sup>. [4]

La figure 1-2 représente le plan de masse global de l'entreprise SAPPL-MB.

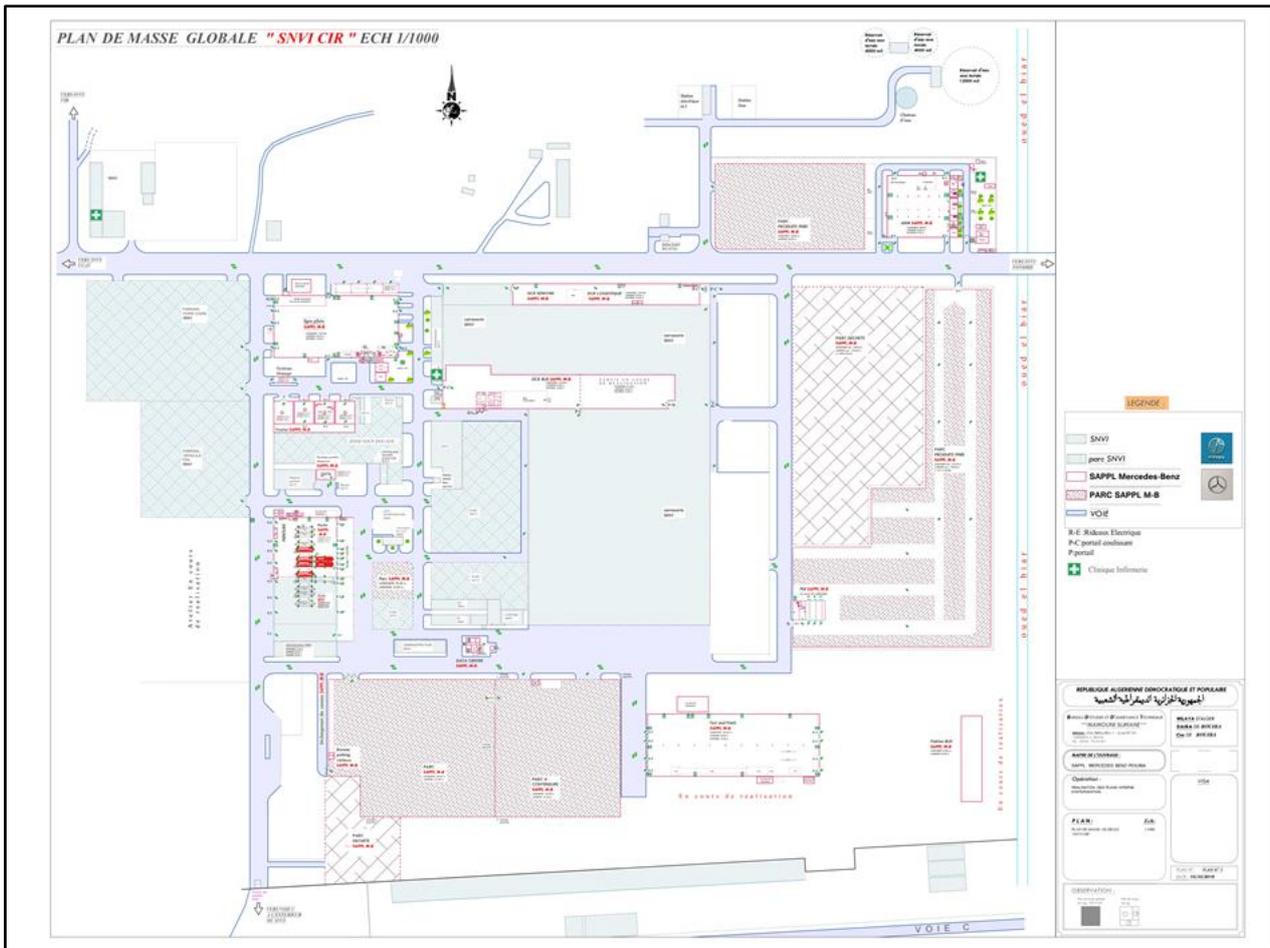


Figure 1-2: Plan de masse globale de l'entreprise SAPPL-MB. [4]

Le tableau 1-2 représente la superficie des différents immeubles de l'entreprise SAPPL-MB.

Tableau 1-2:Superficie des différents immeubles de l'entreprise SAPPL-MB [4]

Utilisation	Surface (m2)
Siège	400m <sup>2</sup>
Atelier ARM (montage camion)	4 500 m <sup>2</sup>
Atelier ligne pilote (montage camion)	7 200 m <sup>2</sup>
Atelier DCR Bus ( carrossage camion)	5 000 m <sup>2</sup>
Atelier Montage Bus	46 000 m <sup>2</sup>
Atelier finition	9 960 m <sup>2</sup>
Atelier DCR <i>Rework</i> (reprise camion, zone logistique)	3 670 m <sup>2</sup>
Atelier de peinture (peinture camion et bus)	3 200 m <sup>2</sup>

Magasin des produits dangereux	200 m <sup>2</sup>
Voutes (magasins logistique)	1 600 m <sup>2</sup>
Zone des déchets	3 500 m <sup>2</sup>
Aire de stockage des produits finis et semi finis (Parking)	37 000 m <sup>2</sup>
Parc de stockage des pièces mécaniques	20 000 m <sup>2</sup>
Station de lavage véhicule	292 m <sup>2</sup>

### 1.2.4 Activités et services

La société SAPPL-MB a pour objet la production de divers modèles de camions et bus de marque Mercedes-Benz. La production est destinée à satisfaire les besoins du marché national dont notamment les institutions militaires, les entreprises publiques ainsi que le secteur privé.

### 1.2.5 Gamme de produit

Le tableau 1-3 représente la gamme de produit de l'entreprise SAPPL-MB.

Tableau 1-3: gamme de production de l'entreprise SAPPL-MB.

Type de produit	Désignation du produit	Photo
CAMION	ACCELO	
	ACTROS	

	<p>AROCS</p>	
	<p>ATEGO</p>	
	<p>UNIMOG</p>	
	<p>ZETROS</p>	
<p>BUS</p>	<p>CONECTO</p>	

### 1.3 Processus de fabrication dans l'entreprise SAPPL-MB

L'entreprise SAPPL – MB suit un processus économique dans la fabrication des véhicules de poids lourds. Ce processus est appelé CKD « *Completely Knocked-Down* » ou le constructeur démonte complètement un véhicule dans le pays d'origine et le remonte dans un autre pays. Cependant, Ce constructeur ne peut pas vendre les unités CKD directement. Par conséquent, une fois que le véhicule atteint son pays de destination en tant qu'unité CKD, il faut procéder à d'autres opérations de fabrication ou d'assemblage. [5]

#### 1.3.1 Etapes d'assemblage des camions

La fabrication s'effectue au niveau de l'atelier d'assemblage « ligne pilote » en passant par 10 stations, l'atelier peinture et d'autres stations supports.

La figure 1-3 représente le plan de masse de l'atelier ligne pilote.

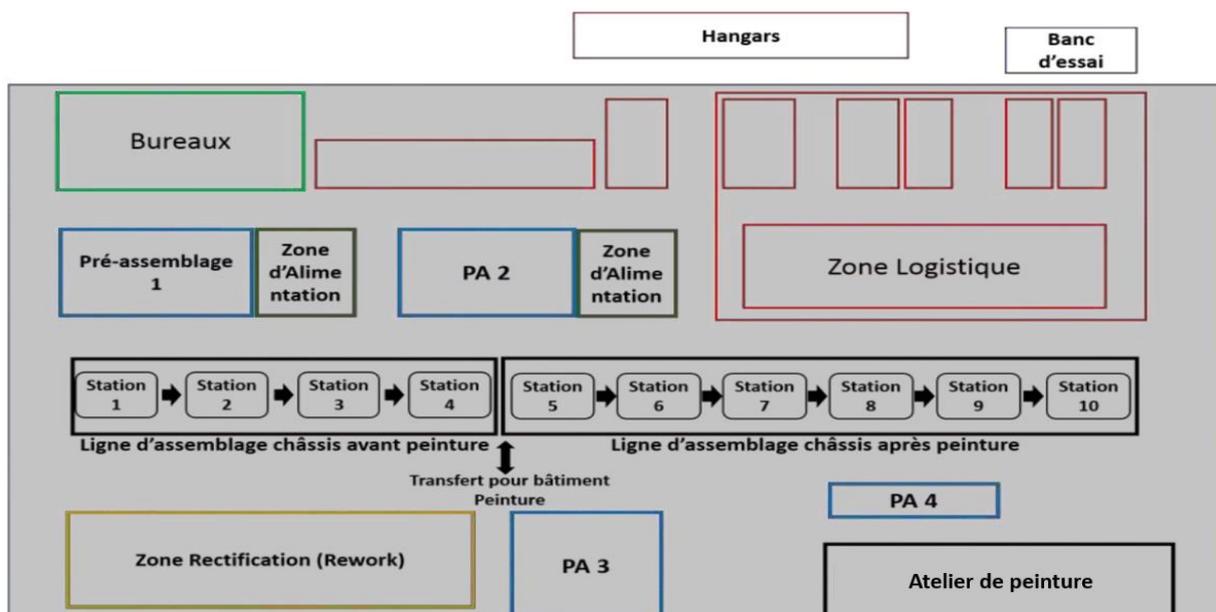


Figure 1-3: Plan de masse de l'atelier ligne pilote. [4]

### 1.3.1.1 Description des étapes d'assemblage d'un camion

Le logigramme représentant les étapes d'assemblage camion est illustré dans la figure 1-4.

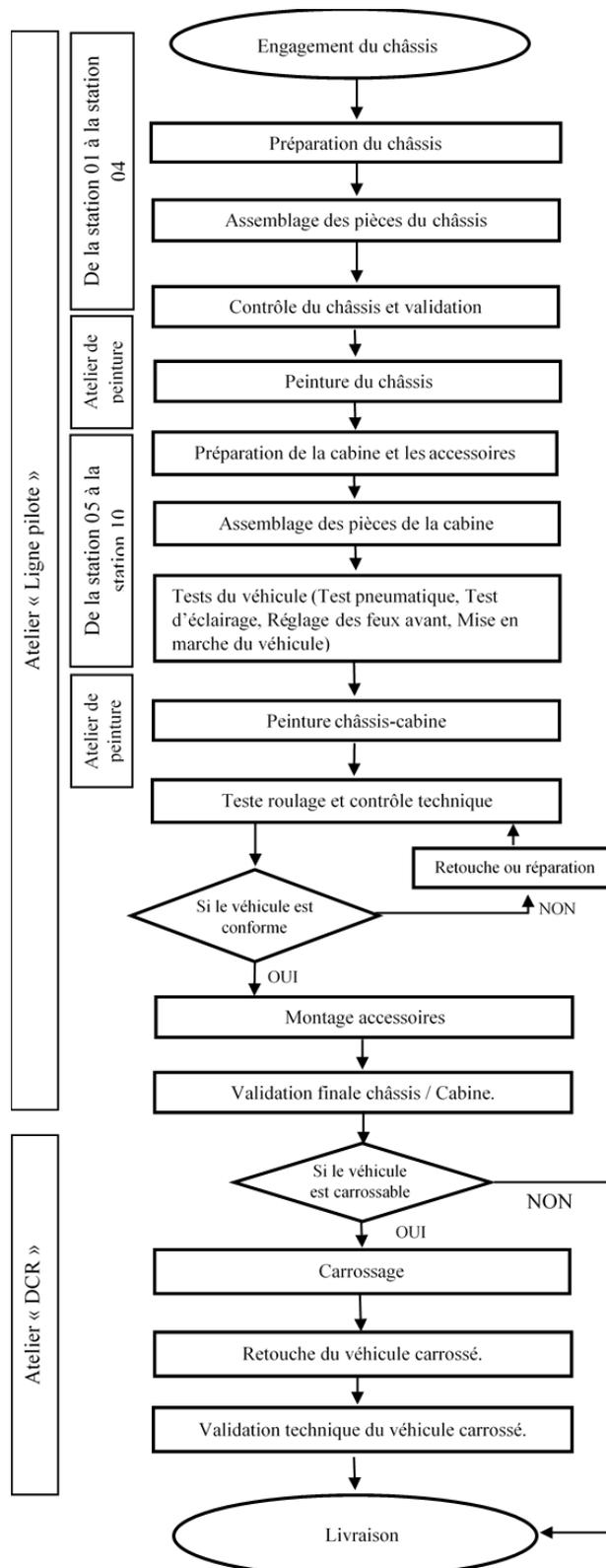


Figure 1-4: Logigramme de l'assemblage de camion. [4]

Les étapes d'assemblage présentées dans le logigramme de la figure 1-4 sont décrit comme suit [4]:

- Engagement des Châssis

Le châssis est acheminé vers l'atelier de production ligne pilote par l'équipe de la Logistique interne. Par la suite, les opérateurs de la station 01 vérifient le numéro de châssis à engager.

- Assemblage des Pièces du châssis : de la Station une (01) à la station quatre (04)

Les pièces d'assemblage sont alimentées dans les stations respectives conformément à la liste d'alimentation de la Logistique interne. Les opérateurs assemblent les pièces requises conformément aux exigences des normes de Daimler.

Le masquage châssis se fait à la station quatre (04) par l'opérateur peinture suivi par un contrôle de qualité du châssis avant d'entamer l'opération de peinture du châssis.

Si le châssis présente des défauts relatifs aux manques de pièces dans les Kits CKD, ces défauts seront repris par la section rectification (*Rework*). Puis, les opérateurs valident le châssis et le transfèrent à l'atelier de peinture.

La figure 1-6 représente un châssis d'un camion sortant de l'atelier de la peinture.



Figure 1-5: Châssis d'un camion de type ACTROS

- Assemblages des Pièces et la cabine : de la station 05 à la station 10

Dès son retour de l'atelier de peinture, Les opérateurs mettent en place le châssis à la station cinq (05), où l'opérateur vérifie le numéro de châssis engagé. Ce dernier se déplace jusqu'à la station 10 avec un convoyeur ou les opérateurs assemblent les pièces requises dans les différentes stations d'assemblage 5 à 10.

A la station 10, le châssis subit tous les essais de mise en marche et réglages nécessaires ainsi que le contrôle de qualité avant qu'il soit transmis une deuxième fois vers l'atelier de peinture. Si des défauts sont relatifs aux manques de pièces CKD sont constatés, le camion sera repris par la section rectification une fois les pièces réclamées sont réceptionnés.

- Test de roulage et contrôle technique

A la fin de l'opération de peinture du châssis-cabine, tous les véhicules seront soumis à un test dynamique de roulage et contrôle technique.

- Rectification pour validation technique

La rectification intervient pour lever les défauts et réserves non corrigés sur la chaîne de production ou pour des travaux de rattrapage des pièces manquantes réclamées. Il existe deux types de rectification : la retouche et la réparation.

- Montage accessoires

Assemblage de pièces requises (Garde boue ; Roue de secours ; les étiquettes et autocollants, etc.) selon le catalogue d'assemblage.

- Validation finale châssis / cabine

Après le montage des accessoires, le service qualité contrôle le véhicule et le *Rework* intervient pour lever tous les défauts signalés sur la liste des défauts. Une fois le véhicule retouché par *rework* et validé par le service qualité, il sera prêt à être carrossé si possible.

### **1.3.1.2 Description des étapes de carrossage**

Les étapes du carrossage se résument dans le logigramme de la figure 1-6.

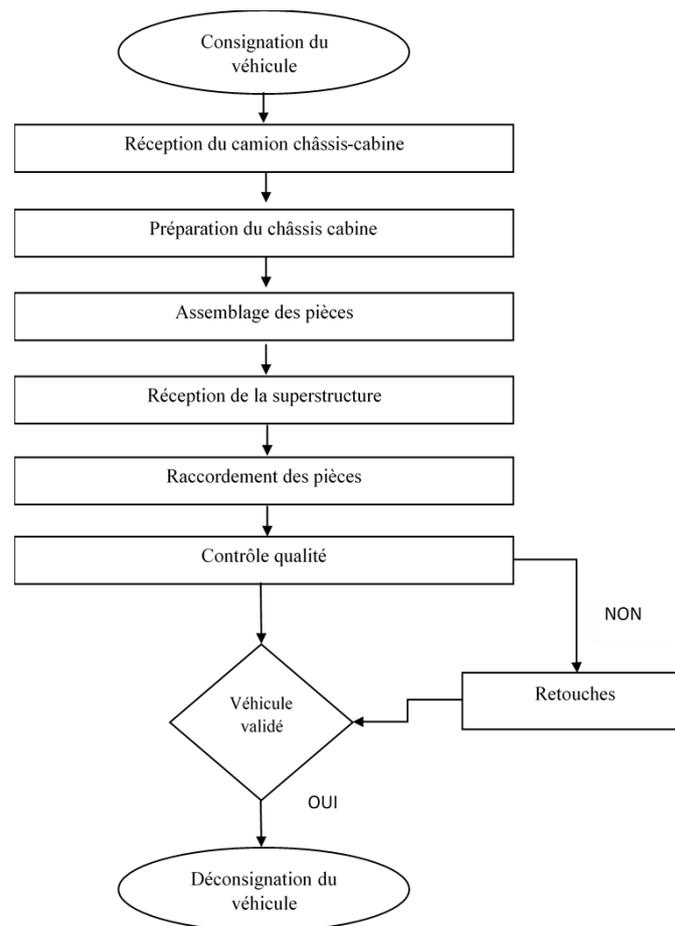


Figure 1-6: Logigramme du processus carrossage . [4]

Le carrossage s'effectue au niveau de l'atelier de production DCR et passe par les étapes suivantes [4]:

- Consignation et contrôle du camion châssis cabine

Un opérateur vérifie le véhicule châssis cabine et il l'envoie pour objet de consignation à l'équipe logistique pour la signature d'un PV de consignation.

- Réception du camion châssis cabine

Le camion est acheminé vers l'atelier de carrossage et il sera à la disposition de l'équipe carrossage. L'opérateur logistique vérifie le numéro du châssis par rapport au PV de consignation.

- Préparation du châssis cabine

Le véhicule fera l'objet de démontage des pièces et la préparation des faisceaux électriques et pneumatiques.

- Assemblage des pièces

L'équipe logistique alimente les stations d'assemblage par les pièces nécessaires au carrossage de la superstructure avec le châssis (soudage de faux châssis).

- Réception de la superstructure

L'opérateur contrôle visuellement le numéro de la superstructure et le compare avec la liste de carrossage.

- Raccordement des pièces de la superstructure avec le châssis cabine

Les opérateurs posent la superstructure sur le châssis en utilisant le pont de la station concernée.

- Contrôle qualité

L'opérateur qualité réalise des tests de fonctionnement de la superstructure selon le formulaire interne de carrossage et à l'issue de cette opération il met à la disposition de l'équipe *rework* une liste de défauts.

- Retouches

Après inspection du véhicule par l'équipe qualité, qui relève les défauts constatés sur le véhicule carrossé. L'équipe Carrossage camions intervient pour la levée des réserves des différents défauts. Après la levée de réserve le véhicule sera validé techniquement par la qualité.

- Déconsignation

Une fois le véhicule est retouché et validé, il sera déconsigné avec le service qualité carrossage et avec le PV de déconsignation.

- Peinture et validation finale du véhicule carrossé

Une fois le véhicule est validé techniquement, Il sera acheminé vers l'atelier peinture pour retouche et validation finale et un PV de validation finale camion carrossé sera conjointement signé par la qualité et la production.

- Mise à disposition du véhicule Validé Final

Une fois le Véhicule est validé par la qualité, il est directement mis à la disposition du département processus Management par la logistique pour inspection avant livraison.

### 1.3.2 Processus de peinture

Le processus de peinture est une étape essentielle dans la fabrication des véhicules. Chaque véhicule doit passer deux fois par l'atelier d'application du revêtement pour peindre le châssis et le châssis-cabine afin d'assurer que toute la surface métallique est couverte.

#### 1.3.2.1 Peinture châssis

La figure 1-7 représente le processus de peinture du châssis.

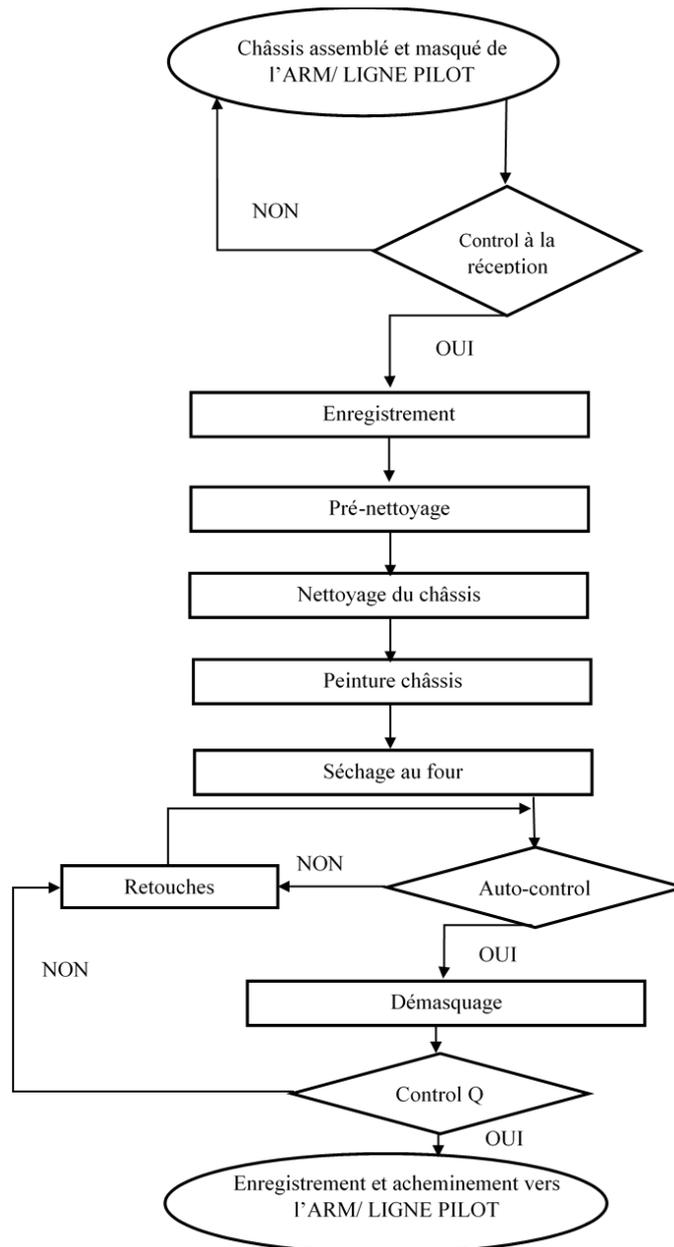


Figure 1-7: Logigramme du processus de peinture châssis. [4]

Le processus de peinture châssis est décrit comme suit [4]:

- Réception du châssis

L'opérateur peinture contrôle visuellement le châssis assemblé et masqué au préalable (station 04).

- Pré-nettoyage

Un pré-nettoyage au chiffon se fait afin d'éviter l'intrusion de poussière dans les parties inaccessibles après masquage. L'opérateur opte pour une vérification finale du masquage.

- Nettoyage du châssis

Nettoyage au chiffon et/ou solvant de nettoyage afin d'éliminer toute traces de mains, poussière et graisse avant de procéder à la peinture.

- Application peinture sur châssis

Avant de procéder à l'application peinture, une préparation de la peinture doit être faite en mélangeant les trois produits (peinture, diluant et durcisseur). Le mélange est transféré vers la cabine d'application de peinture ou la peinture est appliquée par pulvérisation.

- Séchage de la peinture

C'est une opération qui nécessite une maîtrise des équipements, elle consiste à mettre le châssis dans une cabine confinée liée à une chambre de combustion ou le transfert de chaleur se fait par convection.

- Contrôle

Un autocontrôle visuel et d'épaisseur est effectué par la production, afin de vérifier le résultat final du châssis peint, si ce dernier présente des non-conformités il repartira directement pour retouches. Si le résultat est conforme, un enregistrement est effectué.

- Démasquage châssis

Après validation de la qualité, le châssis sera démasqué entièrement puis vérifié (checklist signée).

### **1.3.2.2 Peinture camion châssis-cabine**

Les étapes du processus de peinture du châssis-cabine sont présentées dans l'organigramme de la figure 1-8.

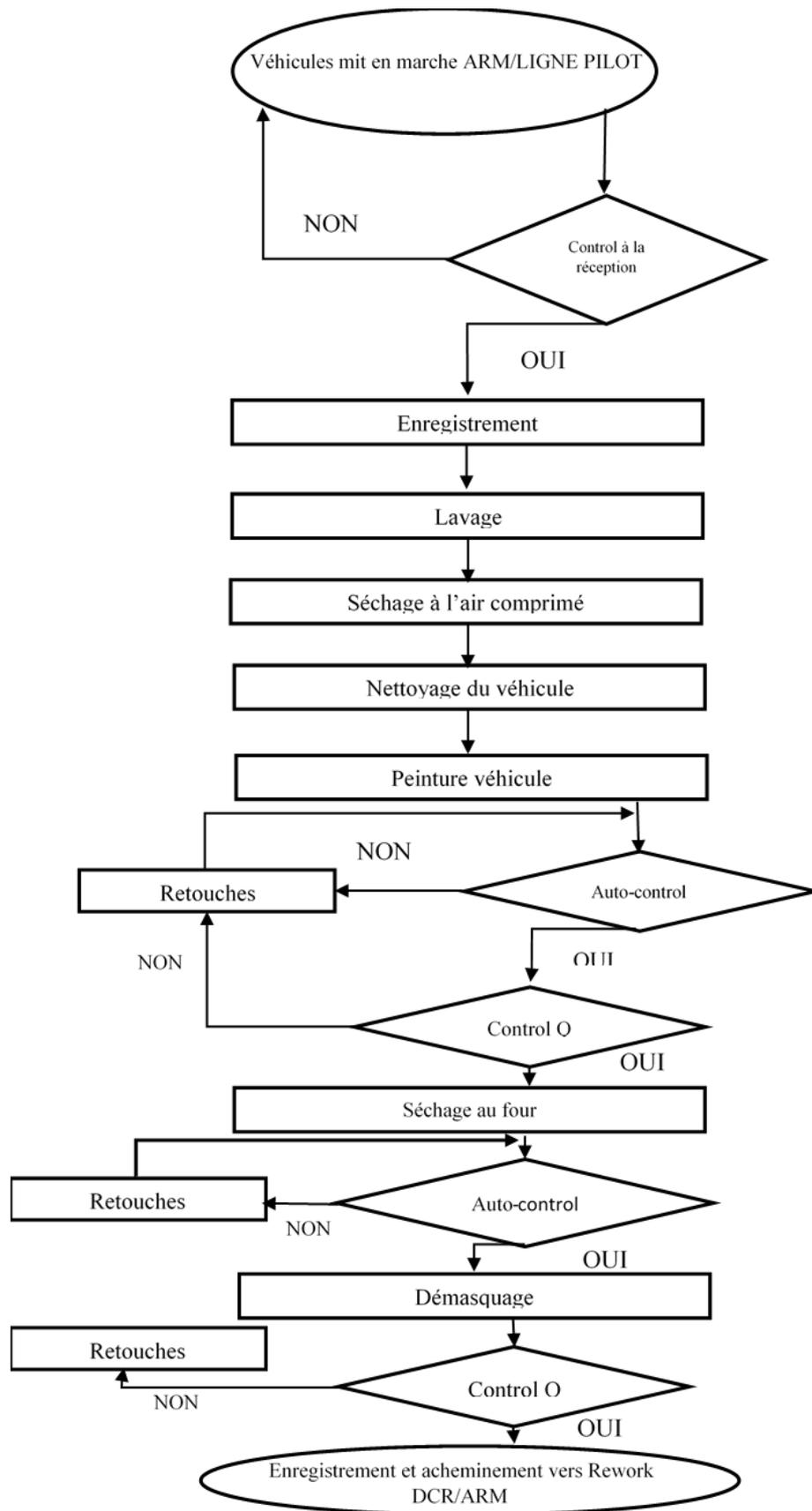


Figure 1-8: Logigramme du processus de peinture châssis-cabine. [4]

Les étapes de peinture châssis cabine sont décrit comme suit [4]:

- Réception du véhicule

L'opérateur contrôle visuellement le véhicule mis en marche prêt pour peinture.

- Lavage

Le véhicule est lavé avec un équipement d'une haute pression (Karcher).

- Nettoyage du véhicule

Nettoyage au chiffon et/ou solvant de nettoyage afin d'éliminer toute traces de mains, poussières et graisse avant de procéder à la peinture.

- Masquage

Les opérateurs optent pour le masquage en utilisant le papier collant, le papier masquage et le Nylon. Une vérification du masquage finale se fait en utilisant la fiche de contrôle final de masquage.

La figure 1-9 représente un camion de type ACTROS après le masquage.



Figure 1-9: Camion de type ACTROS masqué

- Application peinture sur véhicules

L'application de la peinture se fait par pulvérisation en utilisant des pistolets après avoir préparé le mélange dans la salle de préparation.

- Séchage de la peinture

Le séchage est la dernière étape du processus de peinture où le véhicule est mis dans une salle confinée à 80°C et le transfert de chaleur se fait par convection. Cette opération nécessite environ 30 min.

- Contrôle

Un autocontrôle visuel et d'épaisseur est effectué au niveau de la production, afin de vérifier le résultat final du châssis peint, si ce dernier présente des non conformités il repartira directement pour retouches. Sinon, un contrôle de la qualité s'effectue avec enregistrement de données. Si le résultat est conforme, un enregistrement est effectué.

- Démasquage châssis

Après validation de la qualité, le véhicule sera démasqué entièrement puis vérifié (checklist signée).

- Enregistrement et acheminement vers l'atelier DCR

Le camion est enregistré puis acheminé vers l'atelier de carrossage s'il est carrossable, sinon, vers le parking pour le stockage avant la livraison.

La figure 1-10 présente un camion ACTROS prêt pour la livraison.



Figure 1-10: Camion ACTROS prêt pour la livraison

### 1.3.3 Description du processus de traitement des rejets

Au niveau de l'entreprise SAPPL Mercedes-Benz il existe deux type de système de peinture.

#### 1.3.3.1 Traitement des rejets dans le processus de peinture humide

Le processus de peinture humide implique l'application des différentes étapes de peinture mentionnées précédemment, tout en intégrant un système de traitement des rejets liquides.

Ce système de traitement des rejets liquides commence par la cabine d'application de peinture, où un rideau d'eau est utilisé pour collecter les effluents liquides et les diriger vers la station de traitement.

La figure 1-11 schématise une cabine d'application de peinture utilisée dans le processus humide

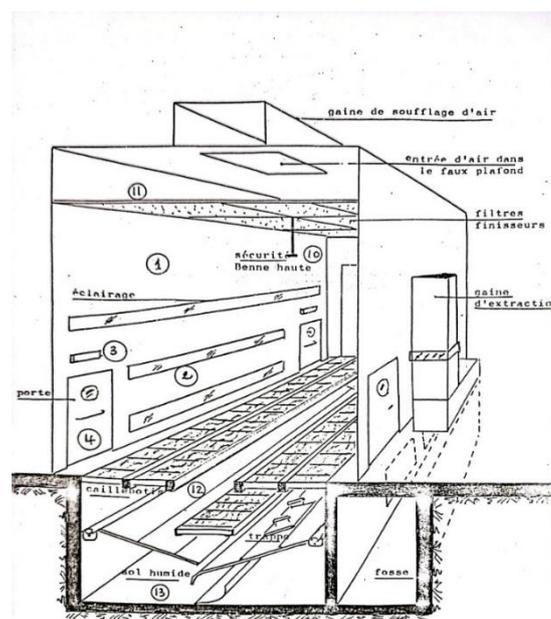


Figure 1-11: Cabine d'application de peinture humide [2]

##### 1.3.3.1.1 Description du système de traitement des rejets liquides

Les effluents qui proviennent de la cabine de peinture sont déplacés vers la fosse relevage avec le rideau d'eau en dessous des véhicules dans la cabine d'application de peinture.

A travers deux (02) pompes auto-amorçantes, les rejets de la fosse relevage arrivent à la fosse tampon de capacité  $70 m^3$  puis à la station de traitement par voie physico-chimique.[2]

La figure 1-12 représente la fosse de relevage et la fosse tampon.

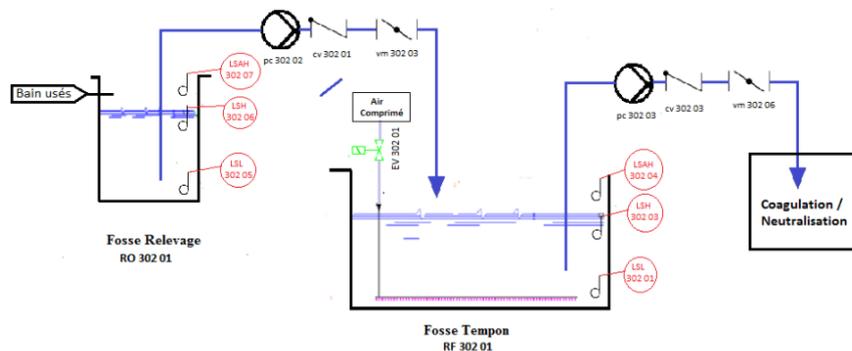


Figure 1-12: Fosse relevage/ Fosse tampon. [2]

### 1.3.3.1.2 Le traitement physico chimique

Pour le traitement physico chimique les effluents passent par quatre étapes essentielles.

#### 1.3.3.1.2.1 Coagulation/ neutralisation

Certaines des suspensions étant de nature colloïdale, une coagulation est effectuée pour les déstabiliser et faciliter la séparation ultérieure des phases boues et eau pure. [2]

Le coagulant est stocké dans un réservoir de  $2\text{ m}^3$  et injecté dans le réacteur au moyen d'une pompe doseuse volumétrique. La neutralisation et la précipitation des hydroxydes métalliques sont assurées par l'injection de lait de chaux ( $600\text{g/l}$ ) stocké dans une cuve de  $3\text{ m}^3$  et d'acide sulfurique stocké dans une cuve de  $2\text{ m}^3$ . [2]

Une pompe centrifuge alimente le circuit de lait de chaux. En ouvrant la vanne papillon, le lait de chaux est injecté dans le réacteur et l'acide sulfurique est injecté dans le réacteur à l'aide d'une pompe doseuse. [2]

La figure 1-13 schématise la première étape du traitement chimique des effluents (coagulation neutralisation).

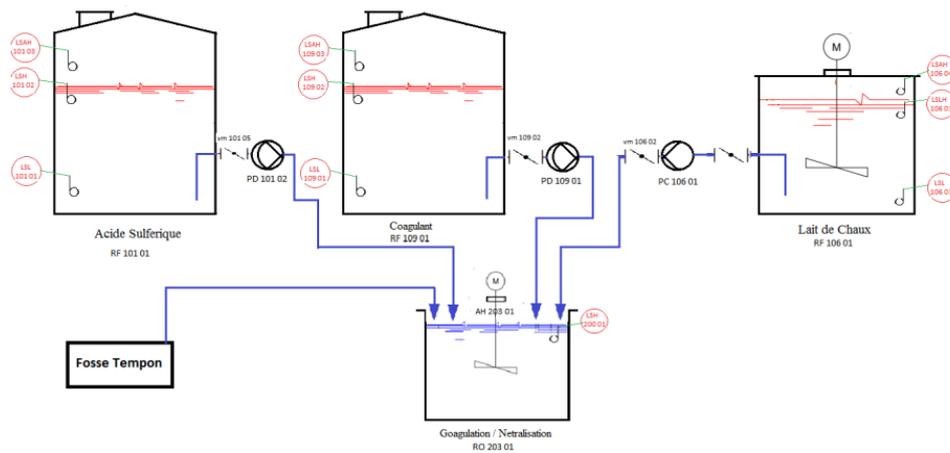


Figure 1-13: Traitement chimique des effluents par coagulation et neutralisation.[2]

### 1.3.3.1.2.2 Flocculation

Le but de ce traitement est de grossir les particules pour faciliter la séparation du solide et du liquide. L'effluent sort du réacteur de coagulation/neutralisation par gravité. La flocculation se fait par injection volumétrique de la solution de flocculation préparée avec une pompe doseuse. Le flocculant est préparé et stocké dans une cuve de  $1m^3$ . [2]

La figure 1-14 illustre la suite du traitement chimique des effluent (La flocculation).

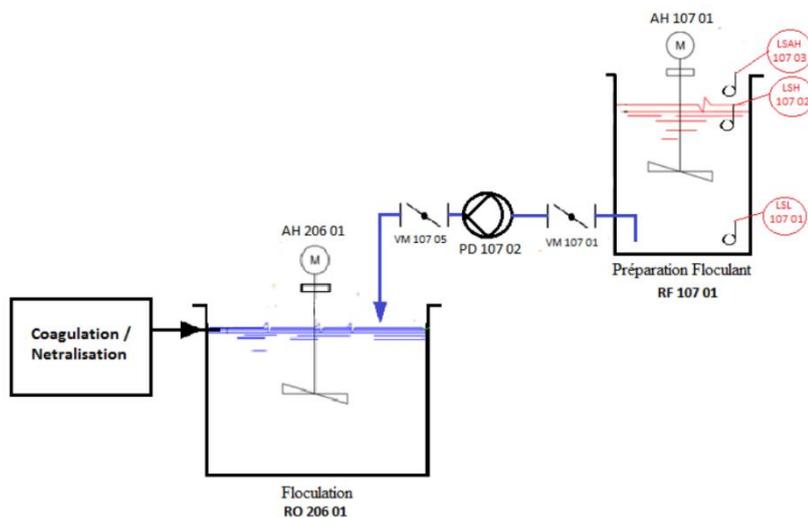


Figure 1-14: Traitement chimique des effluents par flocculation.[2]

### 1.3.3.1.2.3 La décantation

Cette étape consiste à séparer les phases boue et eau propre : les particules lourdes tombent au fond du clarificateur. Elles sont collectées à intervalles réguliers et transportées vers la

station d'épuration au moyen d'une pompe pneumatique d'aspiration des boues et l'eau clarifiée s'écoule dans une fosse par gravité. [2]

La figure 1-15 schématise le traitement mécanique des effluents qui se fait par la décantation.

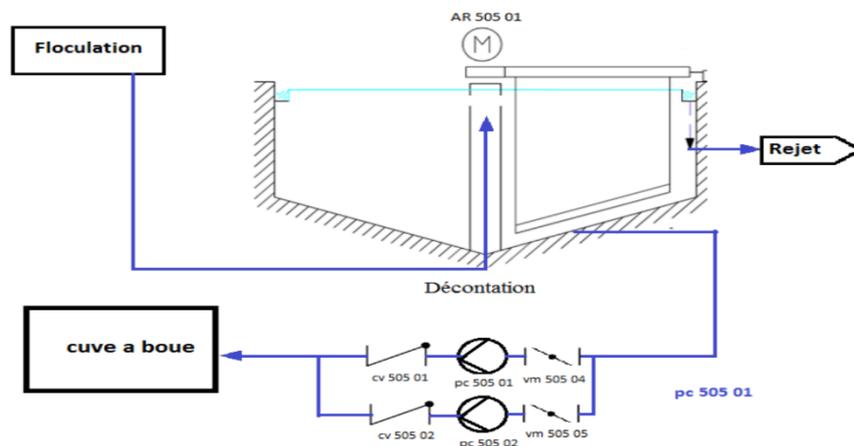


Figure 1-15: Traitement par décantation. [2]

#### 1.3.3.1.2.4 Déshydratation des boues

Les boues déposées sont stockées dans le réservoir de stockage de 5m de long avec un mélange d'air comprimé. elles sont aspirées par une pompe qui alimente le filtre-presse et se trouve en aval des détecteurs de niveau installés dans le bac à boues. Le filtre-presse à une capacité d'environ 200 litres. L'opérateur met en place le filtre-presse et l'abaisse pour faire place à la nouvelle presse. [2]

Les boues déshydratées sont récupérées et stockées dans une cuve. Les filtrats du filtre-presse sont introduits dans le réservoir tampon. Le séparateur d'huile statique permet un épaissement supplémentaire des huiles. Cette concentration est basée sur la différence de densité entre les hydrocarbures et l'eau. [2]

Les hydrocarbures récupérés sont collectés dans une cuve de  $1m^3$  à l'aide d'un écremeur mobile et d'une pompe péristaltique. [2]

La figure 1-16 représente l'étape de déshydratation des boues de peinture.

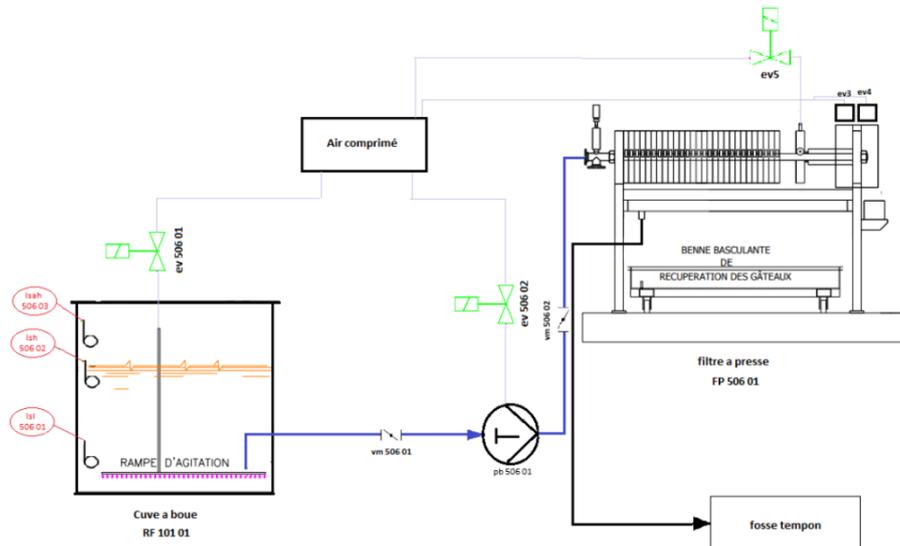


Figure 1-16: Déshydratation des boues. [2]

### 1.3.3.2 Traitement des rejets dans le processus de peinture sec

La figure 1-18 représente les schémas des cabines du processus d'application de peinture sec.

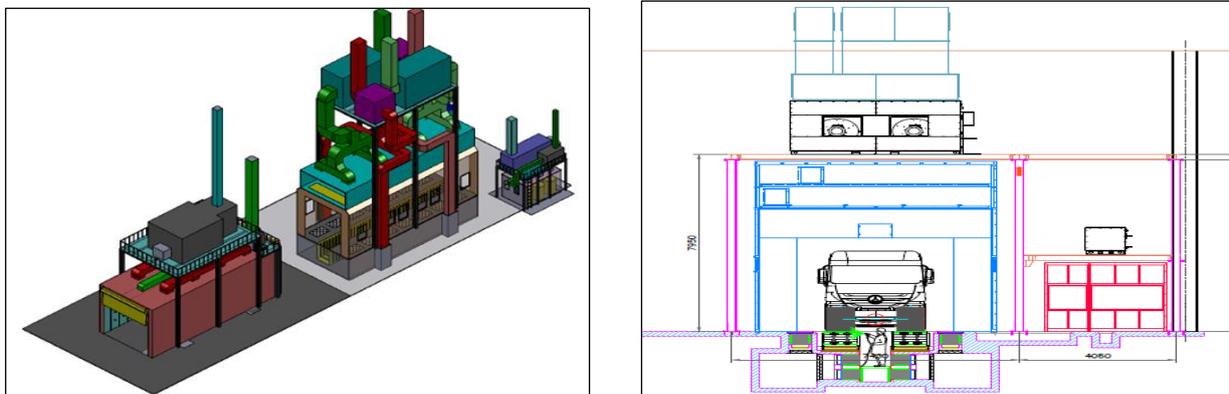


Figure 1-17: Salles d'Application de peinture du processus sec [4]

Le traitement des rejets pour le système sec se fait en utilisant des filtres qui se trouvent en dessous de l'application de peinture

En effet, en dessus de cette cabine se trouve une unité de traitement d'air (AHU), cet équipement est constitué de :

Système de ventilation de l'AHU (*Air Handling Unit*) :

Système équipé de deux types de filtres pour assurer la qualité de l'air à l'intérieur de la chambre.

Le premier filtre, appelé "pré-filtre", est conçu pour bloquer les particules de grande taille telles que la poussière. Son rôle principal est de protéger les composants internes de l'AHU contre les dommages éventuels causés par ces particules.

Le deuxième filtre, connu sous le nom de "filtre à sac", est responsable de l'élimination des particules plus fines et des contaminations présentes dans l'air extérieur. Son objectif est de garantir un air propre et dépourvu de contaminants à l'intérieur de la chambre en filtrant efficacement ces éléments indésirables.

- Serpentin de refroidissement :

Cet équipement utilise de l'eau réfrigérée pour refroidir l'air à l'intérieur de la cabine.

- Serpentin de chauffage :

La chaleur introduite dans la cabine est le produit de la combustion du gaz naturel, ce serpentin est utilisé pour chauffer l'air pendant les conditions hivernales.

- L'humidificateur :

Cet équipement permet de régler l'humidité de l'air à l'intérieur de la cabine et de prévenir des énergies électrostatiques et poussières. Il est relié à un système de traitement de l'eau ou l'eau passe par trois étapes essentielles pour son traitement qui sont : l'Osmose inverse, adsorption sur charbon actif et un système de filtration multimédia.

- Turbines :

Deux types de turbines sont mis en place au début et à la fin de l'unité de traitement d'air (AHU) pour l'extraction de l'air de l'extérieur et l'injection d'air traité dans la cabine.

Les injecteurs d'air poussent les particules de peintures de l'atmosphère de la cabine vers les filtres en dessous de la cabine pour que l'air soit traité avant d'être rejeté vers l'extérieur.

La figure 1-19 présente le système d'application de peinture.

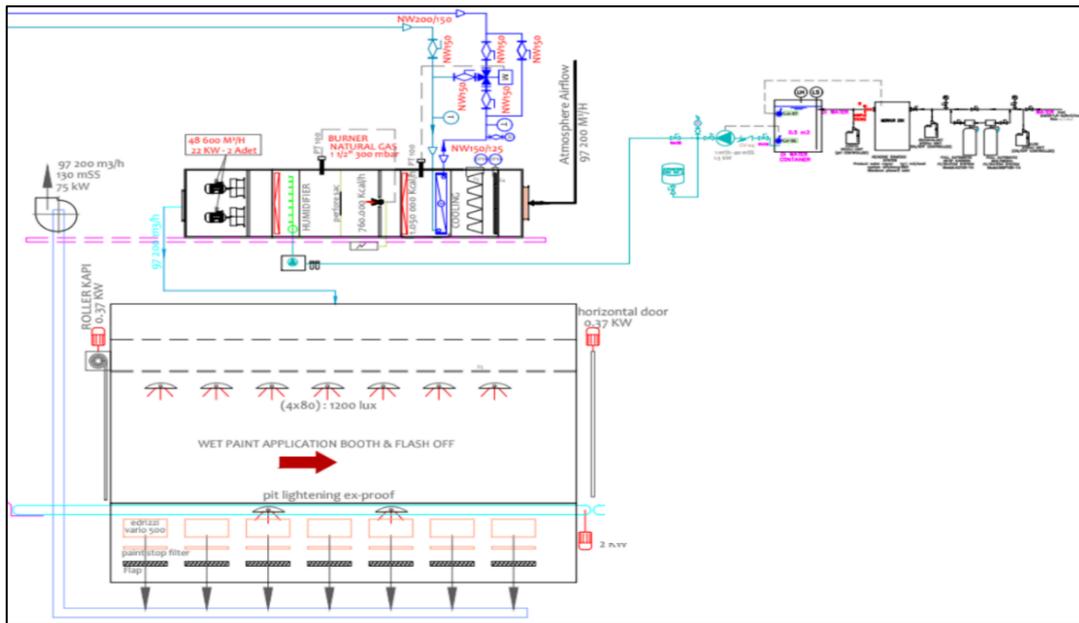


Figure 1-18: Système d'application de peinture sec [4]

### 1.3.3.2.1 Les filtres utilisés pour le traitement des rejets atmosphériques

En dessous de la salle d'application de la peinture nous trouvons les filtres suivants :

- Les entretoises :

Les entretoises forment un système de séparation des brouillards de peinture dans le secteur des revêtements. Le système est basé sur un cube fabriqué à partir du carton ondulé. [6]

Les entretoises utilisées pour le traitement des rejets sont illustrées dans la figure 1-20.



Figure 1-19: Entretoises [6]

- **Le filtre en fibre de verre Paint-stop :**

C'est un média anti-peinture composé de longues fibres de verre spécialement tissées avec des résines synthétiques thermodurcissables sur une structure à densité progressive, plus ouverte du côté de l'entrée d'air (vert). Ce filtre est utilisé pour retenir les fines gouttelettes de peinture, les résidus de peinture séchés, les poussières et autres particules solides générées lors des processus de pulvérisation de peinture. [7]

La figure 1-21 montre le filtre en fibre de verre utilisés après les entretoises pour le traitement d'air



Figure 1-20: Filtre en fibre verre [7]

Le processus de fabrication au niveau de l'entreprise SAPPL Mercedes Benz comprend trois (03) grandes phases qui sont l'assemblage en CKD, la peinture et le carrossage.

Dans notre étude, Nous nous intéressons au processus de peinture qui se fait suivant deux voies différentes, la voie sèche et la voie humide ou la principale différence se trouve dans les systèmes de traitement des rejets.

Afin de bien analyser et comparer ses processus nous avons choisi l'outil Analyse de cycle de vie (ACV) que nous détaillons dans le prochain chapitre.

## **CHAPITRE 02 :**

### **Généralités sur les outils d'aide à la décision**

## 2 Généralités sur les outils d'aide à la décision

Dans ce chapitre, nous allons aborder les différents outils d'aide à la décision dans le domaine environnemental et nous allons nous concentrer sur l'analyse de cycle de vie (ACV) pour l'appliquer sur nos systèmes de peinture afin de résoudre notre problématique.

### 2.1 Importance des études environnementales dans l'étape de conception

Le but de la recherche environnementale est de prédire ou d'identifier les problèmes potentiels (ou réels), les risques, les dangers et les perturbations humaines qui pourraient avoir des effets néfastes sur l'environnement, causant de la pollution ou d'autres dommages à l'environnement. [8]

### 2.2 Définition des outils d'aide à la décision

Les outils d'aide à la décision sont un ensemble de méthodes et modèles qui permettent une analyse et évaluation d'une situation, dans notre cas une situation environnementale, afin d'aider les décideurs à trouver des solutions optimales pour la maîtrise de la situation.

### 2.3 Quelques outils d'aide à la décision

Parmi les outils d'aide à la décision dans le domaine environnemental nous avons :

#### - Bilan carbone

C'est une méthode d'évaluation des émissions à effet de serre liées à une activité industrielle ou tertiaire. Elle s'applique aux produits, services et processus.

Les six gaz à effet de serre pris en compte dans l'outil Bilan Carbone sont : le dioxyde de carbone ( $CO_2$ ), le méthane ( $CH_4$ ), le protoxyde d'azote ( $N_2O$ ), les drofluorocarbures (HFC), les perfluorocarbones (PFC) et l'hexafluorure de soufre ( $SF_6$ ). [9]

#### - Analyse du cycle de vie

C'est une méthode qui assure la compilation et l'évaluation des intrants, des extrants et des impacts environnementaux potentiels d'un produit, service ou processus tout au long de son cycle de vie. [10]

- **Analyse de flux de matière (AFM)**

L'AFM évalue les flux de matière (papier, plastique, verre, béton, etc.) d'un système complexe. Nous pouvons l'appeler « Analyse des flux de substance » (AFS) lorsqu'elle se focalise sur le transfert d'une seule substance polluante ou d'un groupe de substances vers divers milieux. [11]

- **Étude d'impact sur l'environnement (EIE)**

L'EIE est un outil d'étude des impacts d'une installation ou projet généralement nouvellement créé et de vérification de conformité aux prescriptions sur la protection de l'environnement afin d'atténuer ses impacts locaux et être conforme avec la législation. [12]

- **Analyse de risque (AR)**

Les analyses de risques sont des outils qui aident les responsables à mieux comprendre les risques auxquels ils sont confrontés dans leurs installations et à évaluer les options disponibles pour les maîtriser et protéger l'installation, les personnes ainsi que l'environnement. [13]

## **2.4 Analyse du cycle de vie**

Pour notre cas d'étude, nous avons choisi l'analyse de cycle de vie pour les raisons suivantes :

- Elle adopte une perspective globale en prenant en considération toutes les étapes du cycle de vie ;
- Elle prend en considération les impacts indirects ;
- Elle permet les points d'amélioration tout au long du cycle de vie.

### **2.4.1 Définition de l'ACV**

L'ACV est une méthode analytique bien établie pour quantifier les impacts environnementaux appliquée aux produits, services et processus en considérant toutes les étapes de leur cycle de vie. Elle est définie selon la norme ISO 14040 comme : « Compilation et évaluation des intrants, des extrants et des impacts environnementaux potentiels d'un système de produits tout au long de son cycle de vie ». [10]

Cet outil est, avant tout, employé pour comparer les charges environnementales de différents produits, processus ou systèmes entre eux, ainsi que les différentes étapes du cycle de vie d'un même produit. [10]

La figure 2-1 illustre les différentes phases du cycle de vie d'un produit commençant par les ressources jusqu'à la fin de vie.

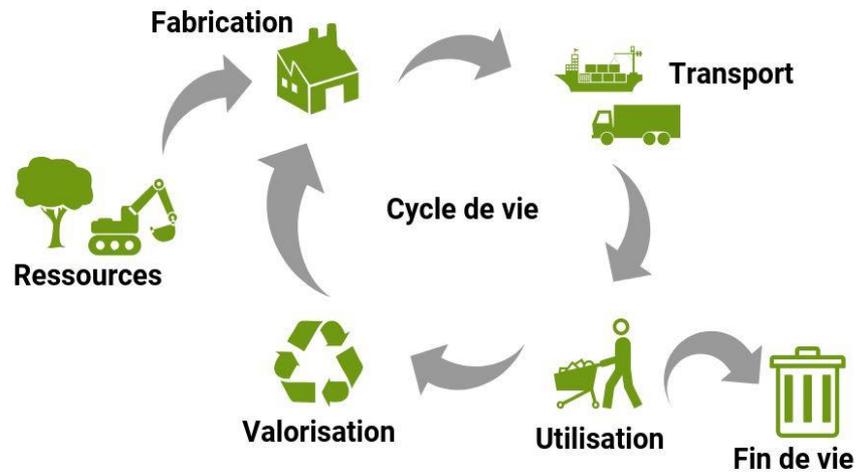


Figure 2-1: Cycle de vie général [14]

## 2.5 Les phases de l'ACV

L'ACV est un outil constitué de quatre étapes qui sont les suivantes:

- Définition des objectifs et champ de l'étude ;
- Analyse de l'inventaire ;
- Evaluation de l'impact ;
- Interprétation.

La figure 2-2 illustre les différentes étapes de l'ACV

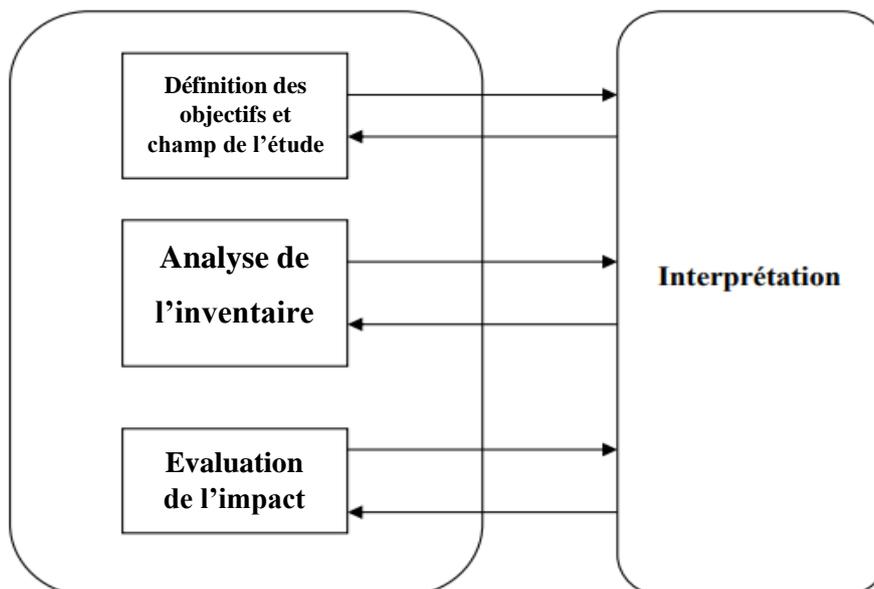


Figure 2-2: Etapes de l'analyse de cycle de vie [10]

## **2.5.1 Définition de l'objectif et champs de l'étude**

### **2.5.1.1 La définition des objectifs**

La première étape dans l'ACV est la définition de son objectif.

Les objectifs de l'étude doivent être cernés en terme :

- D'application envisagée.
- De justification de l'étude.
- Du destinataire de l'étude (à qui va –t-on communiquer les résultats). [15]

### **2.5.1.2 La définition du champ d'une ACV**

La définition de l'objectif est une étape succincte mais fondamentale, elle conditionne la définition du champ de l'étude.

Cette étape doit tenir compte des éléments suivants et les décrire clairement : les fonctions du système de produits ou des systèmes en cas de comparaison, l'unité fonctionnelle, les bordures (limites) du système et les flux de référence. [15]

- Fonctions de l'ACV

Une fois l'objectif de l'étude comparative défini, il faut comparer différents systèmes ou produits sur la base d'une fonction commune.

Les scénarios, qui représentent les différentes alternatives, sont choisis pour satisfaire la même fonction. Cette fonction du système doit être clairement définie, car elle est à la base de la détermination de deux éléments essentiels de l'ACV tel que l'unité fonctionnelle et les limites du système. [16]

- Unité fonctionnelle

Selon la norme ISO 14044 (2006), l'unité fonctionnelle (UF) est la "performance quantifiée d'un système de produits destiné à être utilisé comme unité de référence".

En effet, l'ACV est une approche relative, qui s'articule autour d'une UF ; Cette dernière définit ce qui est étudié. Toutes les entrées et sorties (les flux d'inventaires et impacts) dans l'ICV sont relatives à une seule UF pour tous les scénarios. [16]

Nous pouvons prendre comme exemple l'application de l'analyse de cycle de vie sur la production d'une chaise de bureau que nous considérons comme Unité fonctionnelle. Les éléments entrants dans la production des chaises sont pris en fonction d'une seule chaise comme : la quantité de plastique nécessaire pour construire une chaise. De même, les sortants sont les impacts engendrés dans la production d'une seule chaise tels que les déchets solides.

- Bordures du système

Les limites du système déterminent quels modules spécifiques sont inclus et exclus lors de la modélisation du système. Elles sont définies de manière à inclure idéalement tous les processus nécessaires pour remplir la fonction ainsi que les entrées et sorties à sa frontière qui doivent être des flux élémentaires, d'autres termes, toute entrée et sortie qui ne modifie pas les conclusions doit être éliminée. [17]

La figure 2-3 donne un exemple des bordures d'un système.

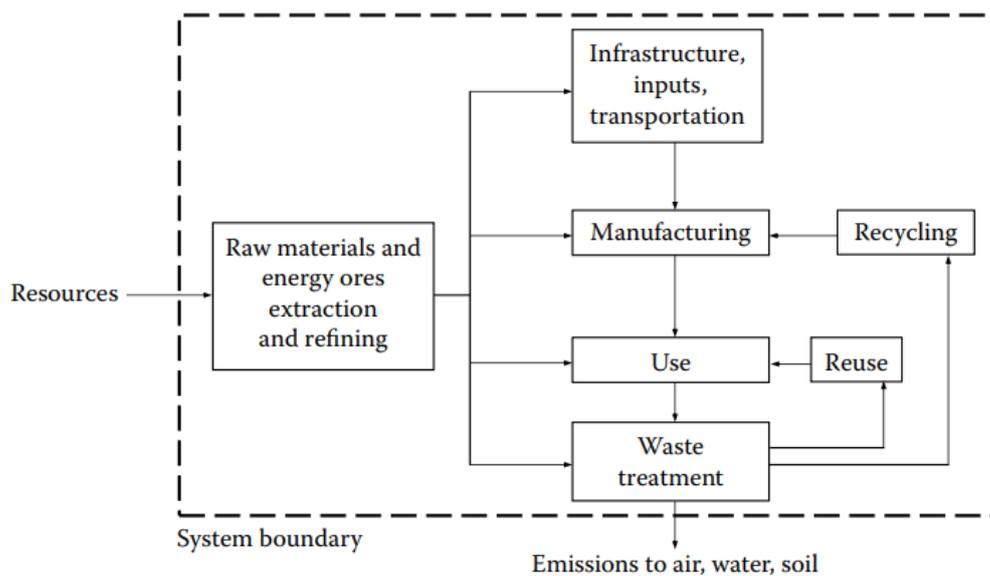


Figure 2-3: Bordures du système [17]

- Le flux de référence

Ce sont les quantités de produits nécessaires pour remplir la fonction du produit, c'est-à-dire, les quantités de matières et d'énergie consommées pour le produit ainsi que les flux intermédiaires et de déchets à traiter. [17]

- Définition du système d'étude

Les flux de référence et les effets subséquents pour chaque UF sont calculés à partir d'un système bien défini. Les approches de modélisation des systèmes se concentrent sur les relations entre les éléments qui composent le système, plutôt que sur les éléments eux-mêmes.

Un système d'étude doit être décrit en fonction de ces relations et de leur importance pour le fonctionnement. [17]

## **2.5.2 Analyse de l'inventaire**

Cette phase consiste à quantifier les émissions polluantes dans l'air, l'eau, et le sol, ainsi que les extractions de matières premières renouvelables et non renouvelables. L'utilisation des ressources nécessaires au fonctionnement du système est également déterminée ici.

L'inventaire des flux élémentaires ou émissions et extractions est, par définition, la description quantitative des flux de matière, d'énergie et de polluants qui traversent les frontières du système. Cela comprend les émissions de substances polluantes dans l'environnement ainsi que les quantités de ressources extraites de l'environnement tout au long du cycle de vie du produit ou du service analysé. [10]

### **2.5.2.1 Etapes clés d'un inventaire du cycle de vie**

Afin de bien organiser cette étape, il est nécessaire de suivre quatre étapes qui fournissent un cadre pour la réalisation d'une analyse d'inventaire et l'évaluation de la qualité des données utilisées et des résultats. [18]

Les quatre étapes d'un inventaire du cycle de vie sont les suivantes :

Etape 01 : Élaborer un organigramme des processus à évaluer :

Cette étape consiste à modéliser le processus à évaluer en détaillant tous les entrants et sortants nécessaires. [18]

Etape 02 : Élaborer un plan de collecte des données.

Après avoir détaillé le fonctionnement du processus une planification pour la collecte de données s'impose afin de garantir la qualité et la précision de ces dernières. [18]

Etape 03 : Collecter les données.

Cette étape consiste à suivre le plan déjà réalisé et collecter le maximum de données à partir de la documentation de l'entreprise comme les fiches techniques des équipements. Certaines données nécessitent des visites sur site pour la détermination réelle et précise des quantités de flux. [18]

Etape 04 : Évaluer et comparer les résultats.

La dernière étape consiste à faire une évaluation globale des données requises et peut être faite en utilisant des logiciels comme : OpenLCA et SIMAPRO. [18]

### **2.5.3 Evaluation des impacts du cycle de vie (EICV)**

L'EICV est défini comme la phase de l'analyse du cycle de vie visant à comprendre et à évaluer l'ampleur et la portée des impacts environnementaux potentiels d'un système de produits. Dans cette phase, les données recueillies dans la phase précédente sont traduites en impacts l'environnement. [10]

Les méthodes de caractérisation EICV « *endpoint* » et « *midpoint* » modélisent essentiellement les mécanismes environnementaux qui considère chaque catégorie d'impact comme une chaîne de cause à effet allant d'une intervention environnementale (émission ou interaction) à son impact. Le résultat de cette phase de l'ACV présente l'impact potentiel. [19]

L'évaluation des impacts comporte plusieurs étapes qui sont :

#### **2.5.3.1 Sélection des catégories d'impact**

L'objectif de cette étape est de trouver les catégories d'impact les plus utiles et les plus nécessaires pour un objectif donné. Afin d'orienter la collecte d'informations sur les flux élémentaires pertinents dans l'analyse de l'inventaire. [19]

Ces catégories d'impact doivent couvrir autant que possible tous les problèmes environnementaux liés aux produits étudiés.

Les catégories d'impact couramment utilisées sont présentées dans le tableau 2-2.

Tableau 2-1:Domaine de protection des catégories d'impact [20]

Catégories	Sous-catégories possibles	domaines de protection			
		Ressources naturelles	santé humaine	environnement naturel	environnement artificiel
Epuisement des ressources abiotiques	Consommation des dépôts	x			
	Consommation des fonds				
	Consommation des écoulements				
Epuisement des ressources biotiques		x		x	
Utilisation des sols	Compétition des sols	x			x
	Perte de biodiversité			x	
	Dégradation des fonctions de subsistance du vivant		x	x	x
Changement climatiques			x	x	x
Diminution d'ozone stratosphérique		x	x	x	x
Toxicité humaine			x		
Ecotoxicité	Aquatique d'eau douce	x			
	Aquatique marine				
	Terrestre			x	
	Sédimentaire d'eau douce				
	Sédimentaire marine				
Formation de photo-oxydants		x	x	x	x
Acidification		x	x	x	x
Eutrophisation	Aquatique	x		x	x
	Terrestre				
Nuisance	Odeurs		x		
	Bruit			x	
	Impact visuel				x
Impact des radiations ionisations		x	x	x	

### 2.5.3.2 Classification

Au cours de cette étape, les flux élémentaires de l'inventaire sont affectés aux catégories d'impact auxquelles ils contribuent. Afin de mener à bien la classification, une connaissance des conséquences relatives aux émissions de polluants et à la consommation des ressources est nécessaire. [19]

Tableau 2-2: les principales substances des catégories d'impact [20]

Catégorie d'impact	Principales substances recensées
Epuisement des ressources abiotiques	Ressources minérales et fossiles
Changement climatique	CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , N <sub>2</sub> O, CFC, HCFC
Diminution d'ozone stratosphérique	CFC, HCC, Halon
Toxicité humaine	Nombreux composés chimiques (NO <sub>x</sub> , SO <sub>x</sub> , NH <sub>3</sub> , CO, métaux lourds, etc.), pesticides, particules
Ecotoxicité	
Formation de photo-oxydants	CO <sub>y</sub> , NO <sub>x</sub>
Acidification	SO <sub>x</sub> , NO <sub>x</sub> , NH <sub>3</sub> , HCl, HF
Eutrophisation	Composés azotés et phosphores
Impact des radiations ionisantes	Ensemble des isotopes radioactifs

### 2.5.3.3 Caractérisation

Lors de la caractérisation de catégorie d'impact, les émissions et les extractions sont pondérées pour représenter leur contribution à chaque catégorie du *midpoint*. Ces facteurs de pondération sont appelés facteurs de caractérisation et ils expriment l'importance relative des émissions (ou des extractions) d'une substance dans le contexte d'une catégorie d'impact environnemental spécifique du *midpoint*. [19]

Ces facteurs doivent être modélisés et quantifiés d'une manière scientifiquement valable et cohérente.

L'équation 2-1 démontre comment les scores d'impact sont calculés. [19]

$$IS_c = \sum_i (CF_i \cdot E_i)$$

Avec :

$IS_c$  : le score d'impact ;

c : une catégorie d'impact ;

$CF_i$  : le facteur de caractérisation ;

$E_i$  : un flux élémentaire ;

i : indicateur d'impact ou catégorie.

### 2.5.3.4 Facteurs de caractérisation (FC)

Les FC permettent de convertir les résultats de l'inventaire du cycle de vie en unité commune d'indicateur de catégorie.

Un FC représente la contribution quantitative d'un flux de base à un impact environnemental spécifique. Ils sont généralement désignés par une molécule de référence. [19]

Tableau 2-3: Substances de référence des Catégories d'impact. [20]

Catégorie d'impact	Substance de référence
Toxicité Humaine (substances cancérigènes et non cancérigènes)	Kg chlorure de vinyle équivalent dans l'air
Effets respiratoires	Kg PM2.5 équivalents dans l'air
Destruction de la couche d'ozone	Kg CFC-11 équivalent dans l'air
Radiations ionisantes	Bq carbone-14 équivalent dans l'air
Formation de photo-oxydants	Kg éthylène équivalent dans l'air
Écotoxicité terrestre	Kg triéthylène glycol équivalent dans l'eau
Acidification	Kg de $SO_2$ équivalent dans l'air
Eutrophisation	Kg de $PO_4^{-3}$ équivalent dans l'eau
Occupation des sols	M2 de terre équivalent
Changement climatique	Kg de $CO_2$ équivalent dans l'air
Énergie non renouvelable	MJ totaux d'énergie non renouvelable

### 2.5.3.5 Indicateurs de catégorie

Après avoir défini les mécanismes environnementaux, la chaîne des événements de cause à effet, il est nécessaire de sélectionner des indicateurs de catégorie à n'importe quel niveau de la chaîne. Ce choix doit être guidé par la pertinence environnementale des indicateurs. Lorsque l'indicateur est défini au début du mécanisme contextuel, il donne des résultats plus mesurables. Cependant, il reste moins pertinent contextuellement et plus éloigné de l'objet de l'observation directe dans le contexte, ce que nous appelons l'impact axé sur le problème. Il est également possible de définir des indicateurs en aval des mécanismes environnementaux, apportant des informations plus pertinentes mais difficilement vérifiables, dans ce cas on parle d'impact dommage direct. [19]

### 2.5.3.6 Méthodes de caractérisation

Un certain nombre de méthodes d'évaluation d'impact peuvent être utilisées lors du calcul des résultats d'une ACV.

La figure 2-4 montre la chronologie des méthodologies les plus courantes.

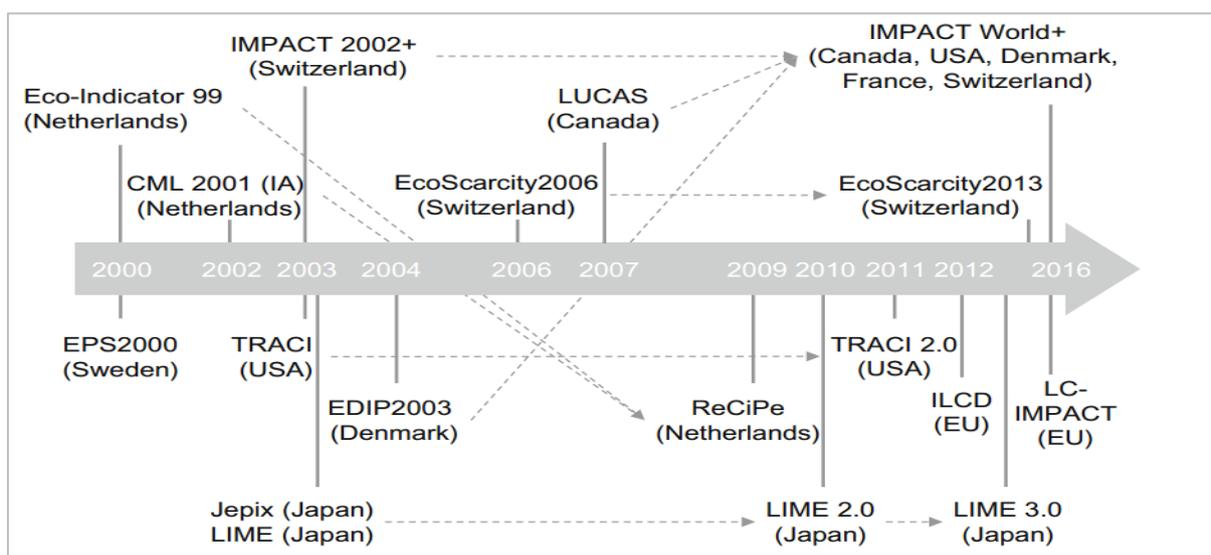


Figure 2-4: Méthodologies d'évaluation d'impact utilisées dans l'AICV. [19]

Bien que les méthodes d'Analyse de l'inventaire du cycle de vie (AICV) soient différentes à plusieurs égards, l'une des principales différences se situe entre les méthodes du « *midpoint* » et du « *endpoint* ». Ces méthodes utilisent différentes étapes de la chaîne de cause pour calculer l'impact.

La méthode « *Endpoint* » examine l'influence de l'environnement à la fin de cette chaîne cause à effet. Tandis que La méthode « *midpoint* » examine l'impact plus tôt dans la chaîne des causes et des effets, avant que le point final ne soit atteint. [19]

La figure 2-5 montre toutes les catégories « *endpoint* » et « *midpoint* » existantes.

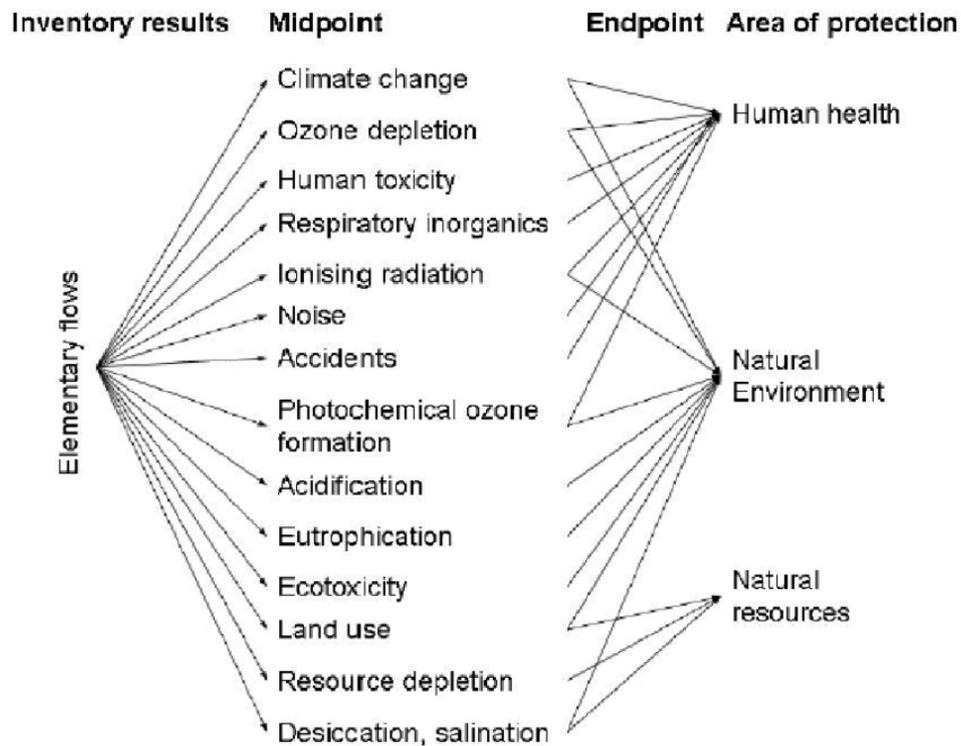


Figure 2-5: Catégories *midpoint* et *endpoint* [19]

Prenons à titre d'exemple une chaîne de cause à effet d'un produit chimique toxique. L'émission du produit chimique dans les eaux souterraines peut permettre à celles-ci de s'écouler dans un lac, où la concentration du produit chimique peut augmenter jusqu'à un niveau dangereux. Les poissons pourraient mourir, ce qui réduirait la population globale de poissons. En fin de compte, l'espèce de poisson pourrait disparaître, ce qui pourrait même avoir un effet négatif sur d'autres espèces qui dépendent d'elle pour se nourrir. [21]

La méthode « *endpoint* » dans cet exemple, détermine l'effet sur l'extinction des espèces. Les résultats sont généralement présentés sous la forme d'un impact sur la santé humaine, la qualité de l'écosystème et l'épuisement des ressources. Ces trois « *endpoint* » reflètent l'effet de nombreux « *midpoint* » différents, étant donné que de nombreuses voies d'impact

environnemental différentes aboutissent finalement à des dommages pour la santé humaine, des dommages pour les écosystèmes ou à l'épuisement des ressources. [21]

Hors que, La méthodes *midpoint* examine les augmentations des concentrations de produits chimiques dans l'eau du lac. C'est à cette étape qu'il détermine l'impact potentiel sur l'environnement. [20]

La figure 2-6 illustre la différence entre les méthodes *endpoint* et *midpoint* de l'exemple.

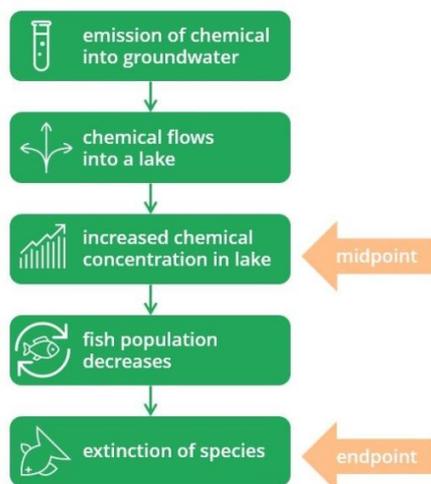


Figure 2-6: Exemple de différence entre *midpoint* et *endpoint* [22]

### 2.5.4 Interprétation des résultats

La dernière étape de l'ACV consiste à donner les lignes directrices pour interpréter les résultats trouvés dans l'étape d'évaluation des impacts.

La finalité de l'interprétation est d'identifier les stades de cycle de vie dans lesquels une intervention s'impose afin de réduire les impacts environnementaux du système ou produit, ainsi que les incertitudes liées aux méthodes utilisées. Cette phase doit démontrer des informations claires et utilisables pour la prise de décision.

La phase d'interprétation du cycle de vie d'une étude ACV, consiste dans un premier lieu à identifier les problèmes significatifs du cycle de vie, à évaluer et vérifier par des contrôles de complétude, la sensibilité et la cohérence, la qualité et la robustesse des résultats obtenus, pour enfin tirer des conclusions et proposer des recommandations. [22]

## 2.6 Identification des priorités d'action

Les résultats de l'inventaire et de l'analyse d'impact sont utilisés pour identifier les points clés de l'impact sur l'environnement.

Une première étape consiste à se concentrer sur les étapes du cycle de vie et les groupes de processus qui génèrent l'impact le plus important.

Dans le processus d'interprétation, nous pouvons également nous concentrer sur les étapes du cycle de vie qui ont le plus grand potentiel de réduction des impacts avec des moyens limités. Dans certains cas où tout le monde est gagnant, il est possible de réduire à la fois les impacts et les coûts. Dans d'autres cas, même une intervention limitée et peu coûteuse peut s'avérer extrêmement efficace pour réduire les impacts. [20]

L'ACV est un outil d'aide à la décision qui donne des lignes directrices générale pour la protection de l'environnement. Toute entreprise peut appliquer les étapes de la méthode selon la spécificité de son activité, ses produits et ses processus.

Dans ce chapitre nous avons décrit les étapes de l'ACV ainsi que ses avantages et limites. Afin de l'appliquer dans le prochain chapitre sur les processus de peinture des véhicules sec et humide.

## **CHAPITRE 03 :**

### **Application de l'Analyse de cycle de vie**

### **3 Application de l'ACV sur les processus de peinture de l'entreprise SAPPL - Mercedes Benz**

Dans ce chapitre, nous allons quantifier et étudier les impacts environnementaux des deux processus de peinture sec et humide en utilisant l'analyse du cycle de vie, en nous basant sur les résultats du logiciel SIMAPRO. L'objectif est de les comparer et de déterminer quel processus est plus optimal pour l'environnement, afin de formuler des recommandations pour l'amélioration du processus de SAPPL.

#### **3.1 Méthodologie de travail**

Le travail dans ce chapitre suit la démarche suivante :

1. Analyse de l'impact du système de peinture humide ;
2. Analyse de l'impact du système de peinture sec ;
3. Comparaison entre l'impact des deux processus.

#### **3.2 Application de l'analyse de cycle de vie**

Nous avons suivi la démarche de l'analyse de cycle de vie sur les deux processus de peinture sec et humide.

##### **3.2.1 Définition de l'objectif et le champ de l'étude**

La première étape de l'ACV consiste à définir l'objectif de l'étude ainsi que le champ de l'étude.

###### **3.2.1.1 Définition de l'objectif**

L'ACV s'applique aux produits depuis la matière première qui les constitue jusqu'à la fin de vie de ces produits. Dans notre cas, nous nous intéressons uniquement au processus de peinture qui représente la phase d'utilisation dans le cycle de vie du diluant, durcisseur et de peinture.

Ce choix a été fait dans le but de comparer l'impact environnemental de deux (02) processus de peinture afin de déterminer lequel des processus est le plus optimal pour l'environnement.

La finalité de cette étude c'est d'accompagner les responsables dans la prise de décision relative au choix du processus de peinture qui répond aux exigences environnementales.

### **3.2.1.2 L'unité fonctionnelle**

Avant de commencer l'évaluation de l'impact, et afin de bien comparer les deux processus, nous avons choisi comme unité fonctionnelle « **la peinture d'un camion châssis-cabine de type ACTROS** ».

Nous avons choisi cette unité fonctionnelle car durant notre séjour, l'entreprise a effectué le plus d'opération de peinture sur le camion de type ACTROS.

### **3.2.1.3 Définition du système**

Durant notre étude nous avons pris en considération toutes les étapes du processus de peinture qui sont :

1. Préparation du véhicule
2. Préparation de la peinture
3. Application de la peinture
4. Séchage de la peinture

### **3.2.1.4 Les frontières du système**

Dans le cadre d'une analyse comparative entre les deux (02) systèmes de peinture sec et humide, nous avons éliminé les phases de fabrication de la peinture, son transport, son stockage et la phase de fin de vie car ces dernières sont similaires dans les deux processus.

Le schéma 3-1 illustre la partie du cycle de vie choisie pour la comparaison.

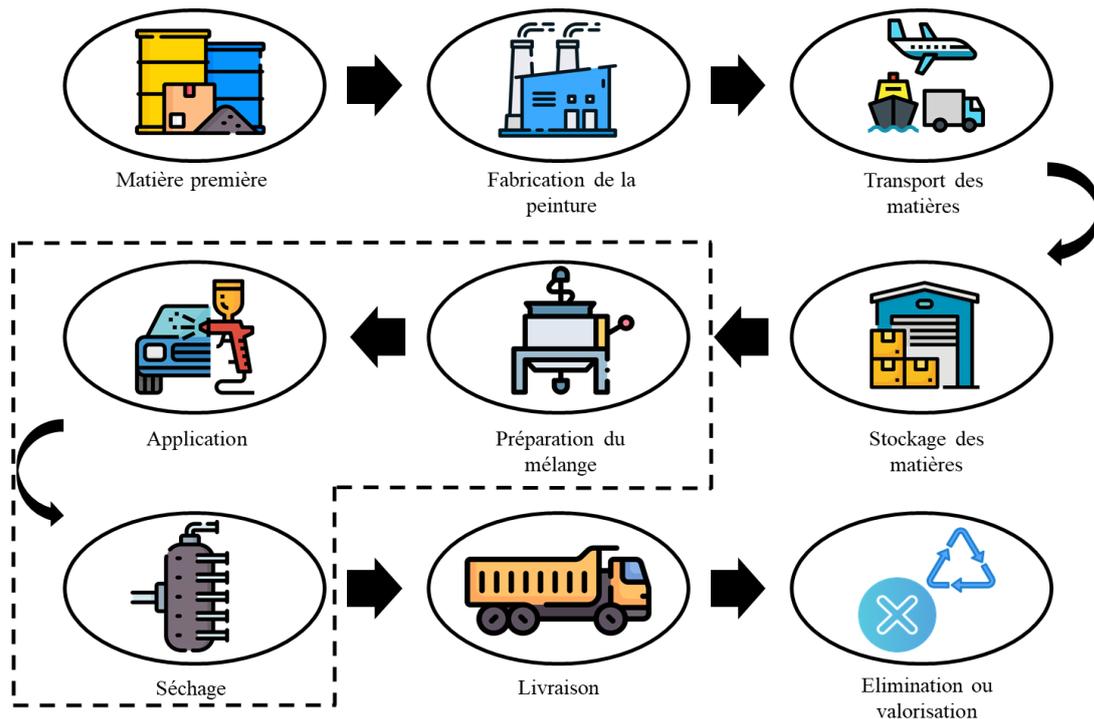


Figure 3-1: Bordures du système

### 3.2.2 Réalisation de l'inventaire

La phase d'analyse de l'inventaire se résume dans la collecte des données nécessaires pour réaliser l'analyse du cycle de vie (ACV). Les entrants et sortants de notre processus sont en général :

- Utilisation des ressources ;
- Consommation d'énergie (gaz et électricité) ;
- Consommation d'eau ;
- Les rejets vers le sol, l'air et l'eau ;
- Les produits résultants de chaque phase de cycle de vie.

Après avoir sélectionné les données, nous sommes passés à l'étape de la collecte. Afin de faire cela nous avons :

- Fait plusieurs visites sur site ;
- Calculer les consommations ;

- Utiliser la documentation de l'entreprise.

Pour un travail mieux organisé, la norme ISO 14044 propose un modèle de constitution des inventaires que nous avons adopté lors de notre étude.

### **3.2.2.1 Données de l'inventaire**

Dans notre cas d'étude, Les données nécessaires sont les suivantes :

#### **3.2.2.1.1 Utilisation des ressources**

La matière première de notre processus se compose de la peinture, le durcisseur et le diluant. Ces trois (03) matières sont stockées puis mélangées avant d'être appliquées sur le véhicule.

La composition chimique de chaque produit utilisé dans le mélange de peinture est montrée dans le tableau 3.1 et ont comme source les fiches de données de sécurité (FDS).

Tableau 3-1: Composition des produits de la peinture, du diluant et du durcisseur

Peinture	Pourcentage	Durcisseur	Pourcentage	Diluant	Pourcentage
Acétate de n-butyle	>10% <15%	Hexaméthylène diisocyanate, oligomères $C_8H_{12}N_2O_2$	>50% <75%	Acétate de 2-méthoxy-1-méthyléthyle	>25% <50%
Acétate de 2-butoxyéthyle	>3% <5%	Acétate de n-butyle	>20% <25%	Acétate d'éthyle	>25% <50%
Solvant naphtharomatique léger (pétrole) Nota(s)P	> 3% <4%	Diisocyanate d'hexaméthylène	>0.5% <0.9%	Acétate de 2-butoxyéthyle	>10% <25%
1,2,4-Triméthylbenzène	>1% <3%	/	/	Acétate de 2-méthoxypropyle	>0.1% <0.3%
Xylène	>1% <3%	/	/	/	/
Acétate de 2-méthoxy-1-méthyléthyle	>3% <5%	/	/	/	/
2,4-pentanedione	>1% <3%	/	/	/	/
Acide hexanoïque, éthyl-2, sel de zinc, basique	>0.1% <0.3%	/	/	/	/

Nous rajoutons à ces produits les produits chimiques utilisés dans la station de traitement des effluents dans le cas du processus humide. Ces produits sont : le lait de chaux, l'acide sulfurique, le coagulant et le flocculant.

### **3.2.2.1.2 Consommation d'énergie**

Afin de bien calculer la consommation d'énergie (gaz ou électricité), nous avons identifié tous les équipements consommateurs d'énergie utilisés dans chaque étape du processus tel que les turbines d'extraction d'air ou celles utilisées dans la station de traitement des eaux polluées STEP, les bruleurs, Karcher, l'éclairage et le système de traitement d'air (AHU).

### **3.2.2.1.3 Consommation en eau**

L'utilisation d'eau au niveau du processus de peinture se résume dans les quatre (04) points suivants :

- Le lavage des véhicules ;
- Système de refroidissement des cabines du processus sec;
- Système d'humidification des cabines du processus sec ;
- Station de traitement des eaux polluées de la cabine humide.

### **3.2.2.1.4 Les rejets vers le sol, l'air et l'eau**

Dans notre cas d'étude nous avons 3 types de rejets qui sont :

#### **Les rejets atmosphériques**

L'émission des rejets atmosphériques est considérée comme un effet inévitable dans toutes les étapes du processus de peinture. La phase la plus critique dans les rejets atmosphériques est la phase de l'application de la peinture pour les deux processus.

#### **Les rejets liquides**

La principale source des rejets liquides c'est le processus de peinture humide qui émet des effluents liquides contenant le diluant, le durcisseur et la peinture lors de la phase d'application de peinture.

#### **Les déchets solides**

Les déchets solides que nous avons pu identifier sont

- Les bidons de matière premières ;
- Récipients ;
- Les boues ;
- Les filtres, papiers de masquage, papier collant et Nylon.

### 3.2.2.1.5 Produits résultants de chaque étape du processus

Les produits résultants de chaque étape du processus sont :

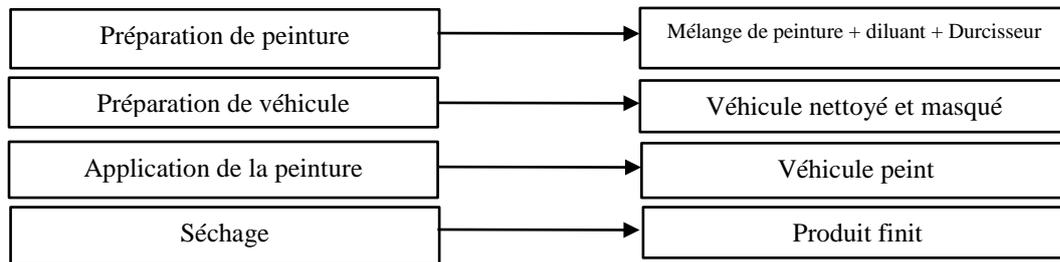


Figure 3-2: les produits résultants de chaque étape du processus

### 3.2.3 Evaluation des impacts environnementaux

Afin d'évaluer et quantifier les impacts environnementaux de notre système, nous avons opté à l'utilisation du logiciel SIMAPRO pour comparer les systèmes de peinture sec et humide.

SIMAPRO est un logiciel spécialisé dans l'ACV qui fonctionne conformément aux normes ISO 14040/14044 et offre des fonctionnalités complètes pour la modélisation et l'évaluation des cycles de vie et le calcul des impacts environnementaux.

Le logiciel SIMAPRO présente les résultats de l'évaluation du cycle de vie sous forme de :

- Tableau : qui indique la contribution de l'impact sur chaque catégorie d'impact par l'unité adimensionnelle « point »
- Graphe : qui illustre l'impact de chaque étape de cycle de vie sur les catégories d'impact soit par pourcentage ou par point
- Arborescence : c'est un schéma qui illustre une idée générale sur la contribution des étapes de cycle de vie et les matières utilisées.

Le schéma 3-3 et le tableau 3.2 montrent la différence d'impact entre les deux processus de peinture sur toutes les catégories d'impact.

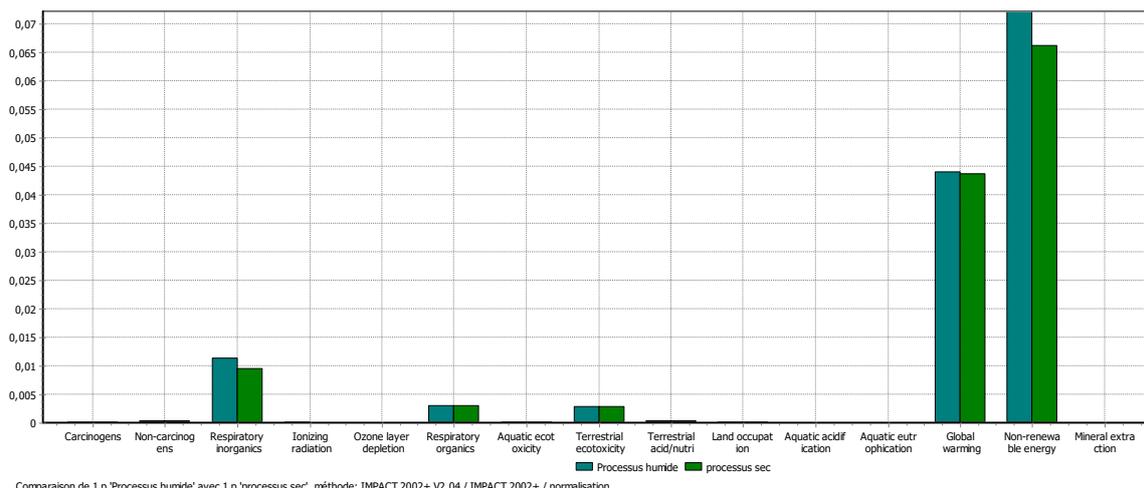


Figure 3-3: l'impact des deux processus sur les catégories d'impact

Tableau 3-2: Impact sur les différentes catégories d'impact

Catégorie d'impact	Unité	Processus humide	processus sec
Total	Pt	0,13440763	0,12607709
Carcinogens	Pt	0,000179696	0,000144053
Non-carcinogens	Pt	0,000353175	0,000320266
Respiratory inorganics	Pt	0,011257131	0,00951002
Ionizing radiation	Pt	8,48E-05	7,52E-05
Ozone layer depletion	Pt	4,75E-06	3,96E-06
Respiratory organics	Pt	0,002954279	0,002951969
Aquatic ecotoxicity	Pt	0,000227756	0,000202597
Terrestrial ecotoxicity	Pt	0,002848196	0,00280247
Terrestrial acid/nutri	Pt	0,000279681	0,000256649
Land occupation	Pt	0,000137533	0,000120092
Aquatic acidification	Pt	-	-
Aquatic eutrophication	Pt	-	-
Global warming	Pt	0,043964544	0,043602769
Non-renewable energy	Pt	0,072109797	0,066081009
Mineral extraction	Pt	6,26E-06	6,01E-06

Nous remarquons que nous avons (05) Cinq catégories d'impact avec un impact significatif. Les autres catégories d'impact sont négligeables par rapport aux catégories d'impacts suivantes :

- Les énergies non renouvelables ;
- Le réchauffement climatique ;
- Effets respiratoires inorganiques ;
- Effets respiratoires organiques ;
- Ecotoxicité terrestre.

Le choix de ces catégories d'impact revient à la différence de l'impact sur ces catégories en comparant avec les autres catégories d'impact que nous considérons comme négligeables.

### **3.2.3.1 Evaluation des deux processus**

Nous allons commencer par évaluer le processus humide ensuite nous passerons au processus sec.

#### **3.2.3.1.1 Cas du processus humide**

L'évaluation des impacts du processus humide nous a permis de visualiser un réseau appelé aussi une arborescence qui donne une idée générale sur la contribution de chaque phase du processus de peinture humide ou sec à l'impact global.

La figure 3-4 donne une représentation graphique des différents procédés pour le cas du processus humide.

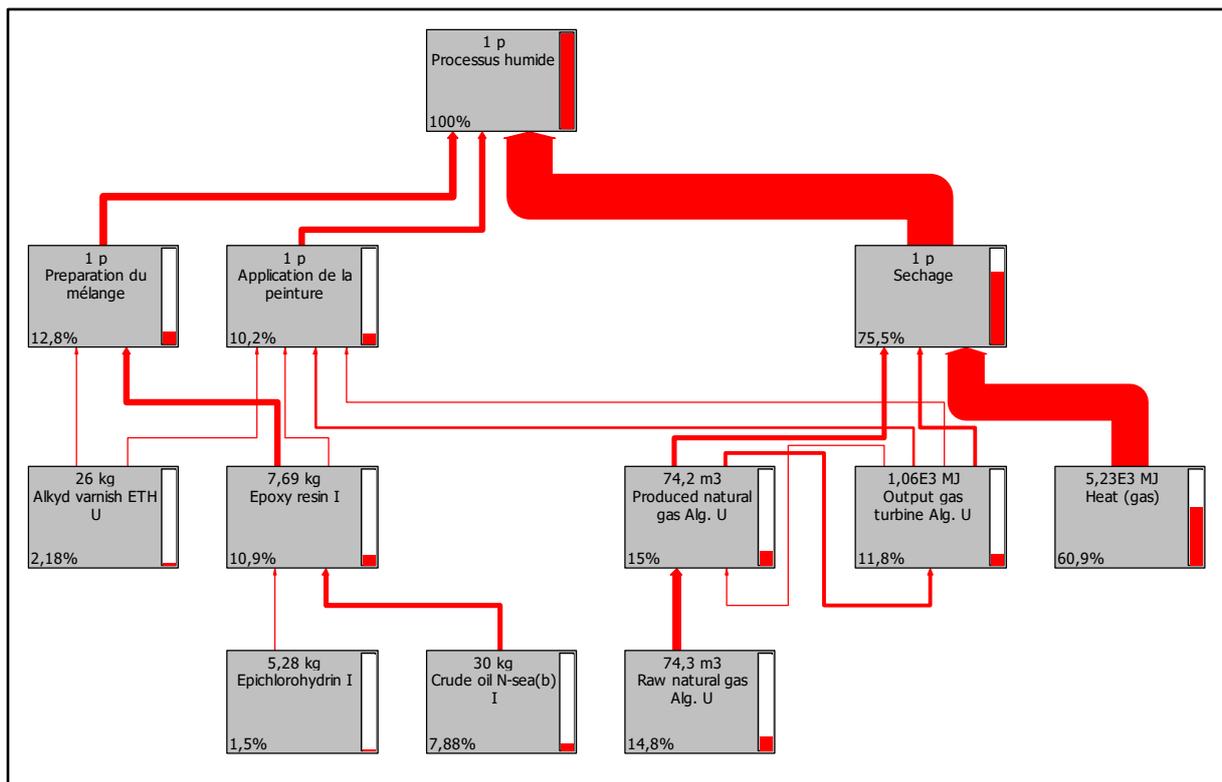


Figure 3-4: Contribution des phases du processus de peinture humide dans l'impact sur l'environnement

L'arborescence indique que la phase du séchage a un taux de contribution dans l'impact le plus important avec un pourcentage de **75,5%** suivi de la préparation du mélange de la peinture à **12,8%** et l'application de la peinture à **10,2%**. Cela, nous permet de conclure que la phase de séchage est la plus critique dans l'ensemble du processus.

Le taux élevé de la contribution du séchage peut être dû à l'opération de la combustion qui consomme des énergies non renouvelables et dégage des gaz à effets de serre.

L'impact du processus humide sur les catégories d'impact est présenté dans le graphe de la Figure 3-5.

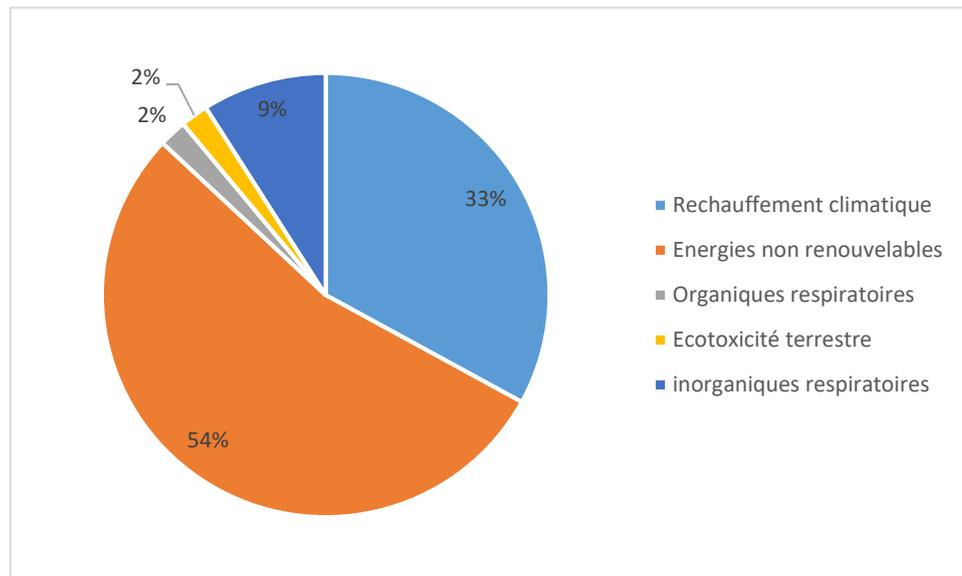


Figure 3-5: impact globale sur les catégories d'impact

Ce graphe illustre les impacts totaux sur les Cinq catégories d'impact du processus de peinture humide. Nous remarquons que :

L'impact le plus élevé est celui sur l'énergie non renouvelable avec un pourcentage de **54%**. Cette catégorie d'impact fait partie de la catégorie de dommage « utilisation des ressources » et elle est caractérisée par MJ. Son pourcentage de contribution dans l'impact global indique une utilisation intensive des combustibles fossiles qui ont une vitesse de régénération très lente.

Le processus de peinture humide a une contribution de **33%** sur la catégorie d'impact réchauffement climatique. Cette catégorie est caractérisée par « kg de  $CO_2$  dans l'air ».

L'impact sur le système respiratoire par les substances inorganiques est caractérisé par « Kg  $PM_{2.5}$  dans l'air ». C'est-à-dire, les particules de diamètre inférieur ou égal à 2,5 micromètre qui peuvent pénétrer profondément dans les voies respiratoires et atteindre les poumons. Les sources de cette catégorie comprennent les métaux lourds tels que le plomb (Pb), le mercure (Hg) et le cadmium (Cd) et les particules inorganiques issues de la combustion telle que les  $NO_x$  et les  $SO_2$ .

L'impact sur le système respiratoire par les substances organiques est de **9%**. La catégorie d'impact « organiques respiratoires » est caractérisée par « kg d'éthylène dans l'air » et elle est engendré par les composés organiques volatils (VOC) tel que le xylène, les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) et les composés organiques persistants (COP).

L'impact sur la qualité de l'écosystème est l'impact le moins significatif et il se manifeste comme écotoxicité terrestre. Cet impact est caractérisé par « kg triéthylène glycol dans le sol » et a comme source les composés organiques persistants tels que les hydrocarbures aromatiques polycycliques, les métaux lourds (le cadmium (Cd), le plomb (Pb), le mercure (Hg)) et les pesticides.

### 3.2.3.1.1.1 Impact du processus humide sur la toxicité humaine

La figure 3-6 donne une illustration graphique de la contribution du processus humide sur les respiratoires organiques et inorganiques.

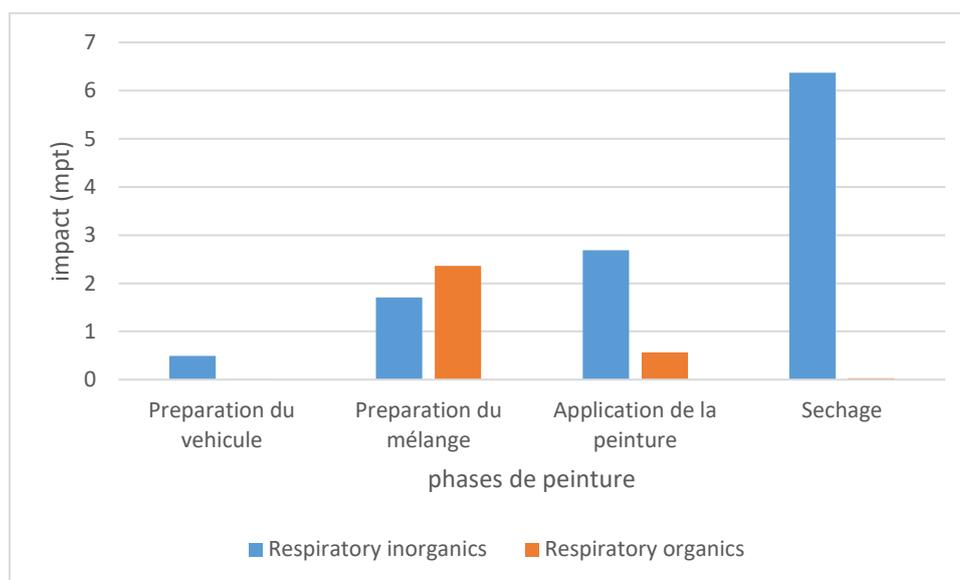


Figure 3-6: Contribution du processus humide sur les respiratoires organiques et inorganiques

D'après le graphe présenté dans la **figure 3-6** l'impact de la matière organique sur le système respiratoire est significatif dans les phases de préparation et d'application de la peinture. Cependant, nous pouvons voir l'effet de la matière inorganique dans les quatre (04) phases. L'impact de la phase du séchage est plus important sur la santé humaine.

Les substances organiques qui ont un impact sur le système respiratoire proviennent du mélange de peinture, durcisseur et peinture. L'impact de ces substances organiques est plus

élevé car la quantité du mélange utilisée lors de la phase préparation du mélange est plus important.

Le tableau 3-3 donne les substances organiques qui provoquent des effets nocifs sur le système respiratoire selon les fiches de données de sécurité (FDS) de chaque produit.

Tableau 3-3: Impact des constituants chimiques organiques sur le système respiratoire

Produits	Constituants chimiques	Impact par inhalation
Diluant	Acetate d'ethyle	Dépression du système nerveux central ; Somnolence ; Vertiges ; Nausées ; Vomissement ; Migraine ; Evanouissement.
	Acetate de 2 methoxypropyl	
Durcisseur	Hexamethylene dissocyanate	Despression du système nerveux central (SNC) ; Somnolence ; Vertiges ; Irritation des voies respiratoires ; Allergies ; Asthme ( ou difficulté respiratoires).
Peinture	Acétate de n-butyl	Irritation des voies respiratoires ; Effets narcotiques.
	1 2 3 trimethylbenzene	

Les constituants chimiques presents dans le tableau 3-3 sont ultra fines et peuvent être inhalée directement dans les poumons causant ainsi les impacts mentionnés.

La présence des impacts sur le système respiratoire causés par les substances inorganiques dans toutes les phases revient à l'utilisation des produits suivants illustrés dans le tableau 3.4.

Tableau 3-4: Impact des composants inorganiques sur le système respiratoire

produits	Constituants chimiques	Impact par inhalation
Peinture	Solvant naphtha aromatique léger	Irritation des voies respiratoires
Floculant	Lait de chaux hydroxyde de calcium	Irritation des voies respiratoires
Neutralisant	Acide sulfurique	Irritations graves du nez et la gorge
Coagulant	Sulfure d'aluminium	Maux de gorge Toux
Gaz naturel	Dioxyde de carbone	Asphyxie
Produits de combustion du gaz	Monoxyde de carbone (CO)	Intoxication aiguë Des maux de tête, Des vertiges, Des nausées.
	Oxydes d'azote (NOx)	Irritation des voies respiratoires La toux, Respiration sifflante ; L'essoufflement ; L'asthme. la BPCO.
	Dioxyde de soufre (SO2)	Irritation respiratoire.

Le tableau 3.4 explique la contribution élevée des substances inorganiques de la phase du séchage de la peinture sur le système respiratoire.

La phase d'application de peinture a le deuxième plus grand taux d'impact sur le système respiratoire car elle est liée à la station d'épuration où le traitement chimique se fait avec des produits inorganiques en plus des produits utilisés dans la phase de préparation de peinture.

### 3.2.3.1.1.2 Impact du processus humide sur le réchauffement climatique

La figure 3-7 est une illustration graphique de l'impact du processus humide sur le réchauffement climatique.

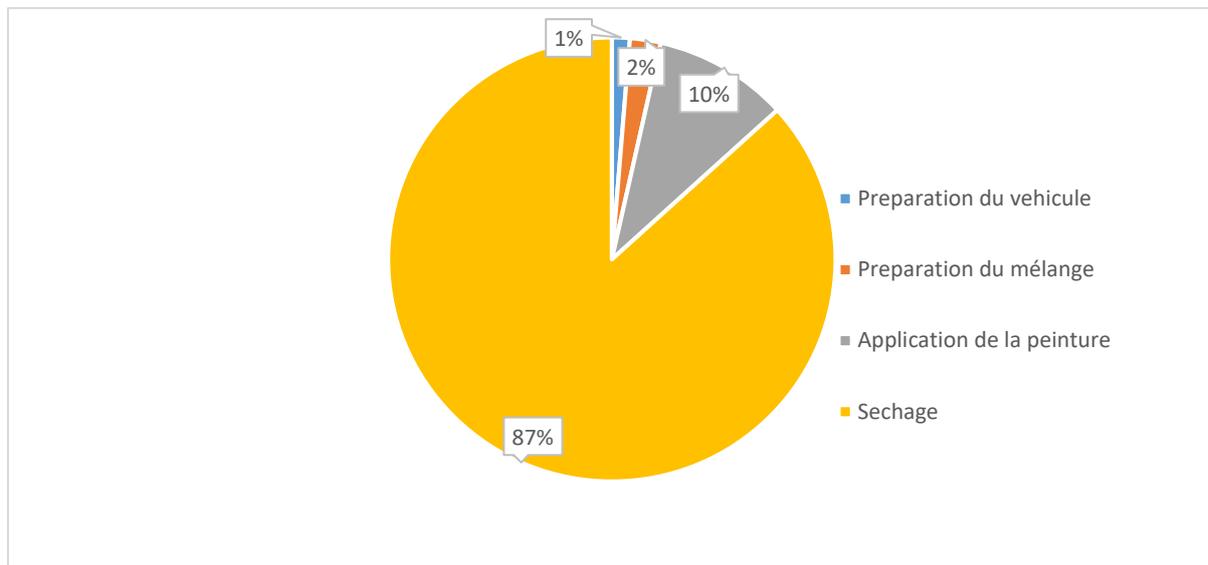


Figure 3-7: impact du processus humide sur le réchauffement climatique

Les substances émises lors de la phase du séchage font que cette phase ait plus d'impact sur le réchauffement climatique (**35 millipoint**). Tandis que Les autres phases affectent le réchauffement climatique mais d'une façon moins significative (**5 millipoint**).

Lors de la phase du séchage une grande quantité de  $CO_2$  et d'autres gaz à effet de serre est émise par la combustion du gaz. Ces gaz retiennent la chaleur du soleil entraînant une augmentation des températures mondiales. C'est ce qui justifie son taux de contribution élevé.

L'application de peinture génère également un impact sur le réchauffement climatique car le système de soufflage, le système d'extraction d'air (les turbines), le système d'éclairage (les ampoules) ainsi que le système de traitement des rejets de peinture (STEP) reliés à la salle de l'application de peinture nécessitent une énergie électrique qui a comme source la combustion du gaz naturel.

### 3.2.3.1.1.3 Impact du processus humide sur l'utilisation des ressources

La figure 3-8 illustre graphiquement la contribution des phases du processus humide dans l'impact sur l'utilisation des énergies non renouvelables.

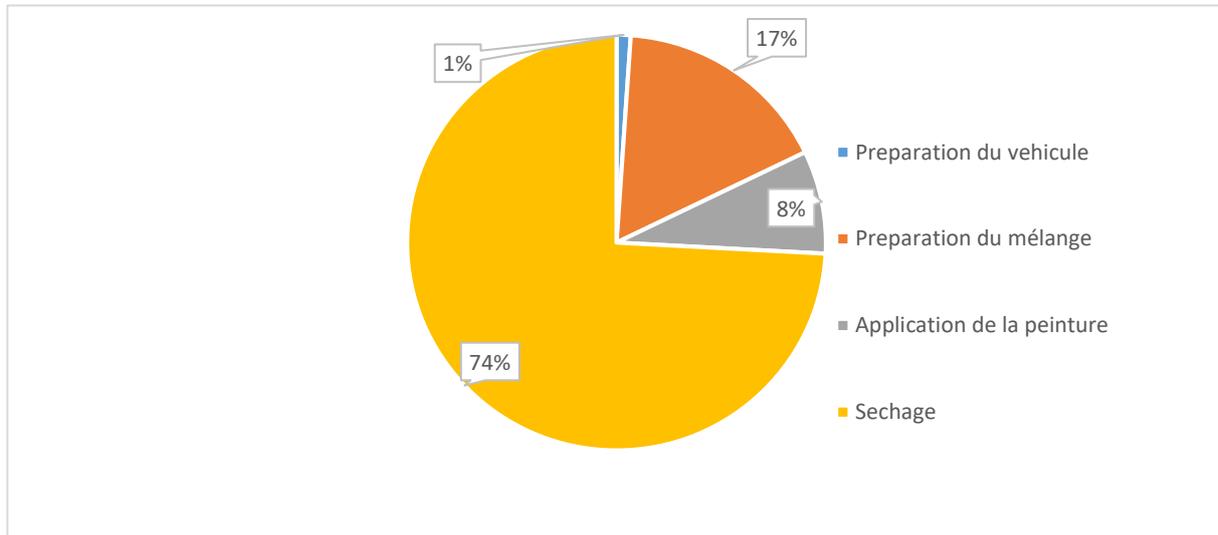


Figure 3-8: contribution des phases du processus humide dans l'impact sur l'utilisation des énergies non renouvelables

Le pourcentage de l'utilisation des énergies non renouvelables est plus élevé lors de la dernière phase du processus de peinture humide (**74%**) suivie par la phase de préparation du mélange qui a un impact significatif moins important que celui du séchage sur les énergies non renouvelables (**17%**). Tandis que la préparation du mélange à un pourcentage de contribution de **8%** et en dernier la préparation du véhicule avec un impact inférieur à **0,01 pt.**

Le gaz naturel est l'énergie non renouvelable utilisée lors de la phase du séchage. Cette énergie est consommée directement (gaz naturel) ou comme énergie électrique. Cette consommation diminue dans la phase de la préparation du mélange et application de la peinture car le travail est principalement manuel et ne nécessite pas l'usage d'équipement consommateur d'énergie.

La phase d'application de peinture nécessite moins de peinture, diluant et durcisseur ce qui justifie la diminution de l'impact sur les énergies non renouvelables. En effet, ces produits ne sont pas des énergies non renouvelables mais là, le logiciel nous a permis d'estimer la quantité des produits fossiles consommé pour la production et la fabrication de la peinture, du diluant et du durcisseur.

### 3.2.3.1.1.4 Impact du processus humide sur l'écotoxicité terrestre

La figure 3-9 illustre la contribution des phases du processus humide dans l'écotoxicité terrestre.

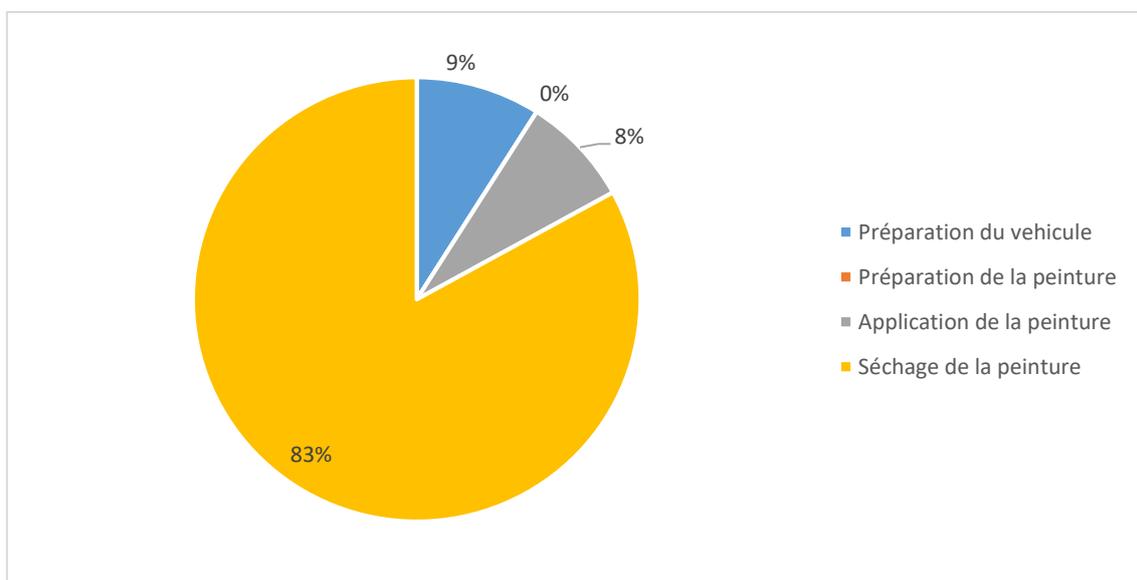


Figure 3-9: Contribution des phases du processus humide dans l'impact sur l'écosystème terrestre

Le séchage représente l'impact le plus élevé sur l'écotoxicité terrestre. Suivi des deux (02) phases, application de la peinture et préparation du véhicule, qui ont approximativement le même taux d'impact sur l'écotoxicité terrestre (9% et 8% respectivement).

Le séchage a l'impact le plus important et cela revient aux produits de la combustion du gaz comme il est illustré dans le tableau 3-5.

Tableau 3-5: Effets des matières de combustion sur l'écotoxicité terrestre

Matières	Effets
oxydes d'azote (NO <sub>x</sub> ) dioxyde de soufre (SO <sub>2</sub> )	Déposent à la surface du sol par voie sèche ou humide et perturbent la qualité des sols (abaisser le pH du sol), la santé des plantes et le fonctionnement général des écosystèmes.
Polluants organiques persistants	Parcourt de longues distances dans l'atmosphère et fini par se déposer sur les écosystèmes terrestres. Les POP peuvent avoir des effets toxiques sur les organismes du sol, la faune et la flore, entraînant une réduction de la biodiversité et des déséquilibres écologiques.

La préparation du véhicule nécessite l'utilisation des éléments solides pour le masquage, qui sont le nylon le papier masquage et le papier collant. Ces derniers vont être jeté à la fin ce qui va avoir un impact sur l'écosystème terrestre.

L'impact de la phase d'application de la peinture revient seulement à l'utilisation des produits chimiques qui entraînent l'émission des métaux lourds. C'est pour cela que l'impact a diminué considérablement.

### 3.2.3.1.2 Cas du processus sec

L'impact du processus sec est illustré sur l'arborescence de la figure 3-10 à travers laquelle nous remarquons des pourcentages indiquant la contribution de chaque phase du processus dans l'impact sur l'environnement.

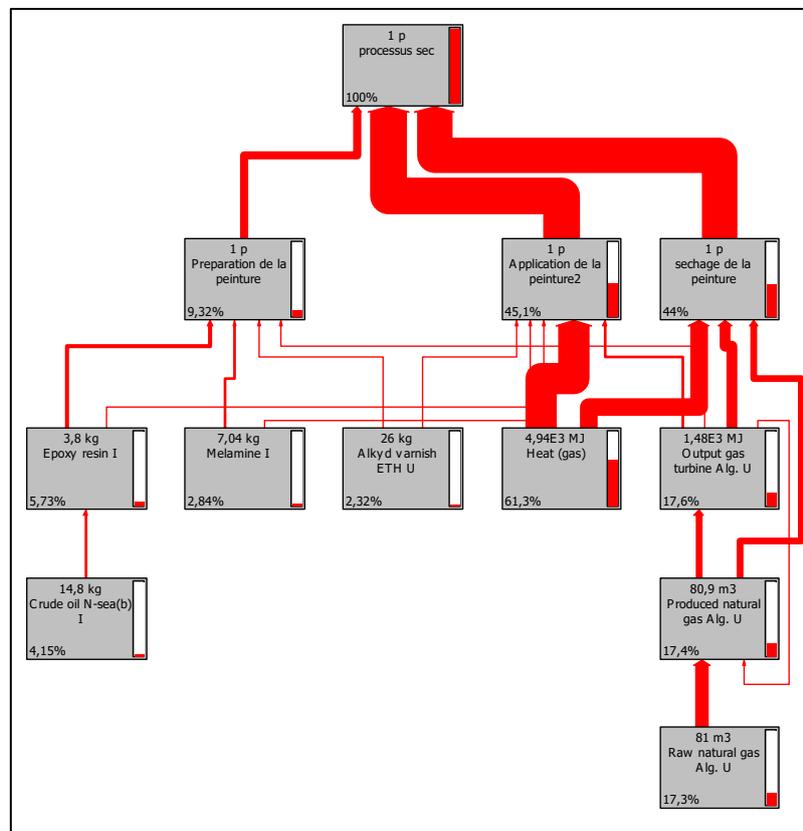


Figure 3-10: Contribution des phases du processus de peinture sec dans l'impact sur l'environnement

Cette arborescence indique que la phase de l'application de la peinture ainsi que l'étape du séchage de la peinture ont approximativement le même taux de contribution. Comme ce taux est élevé pour les deux phases, Nous les classons comme critiques.

Le graphe 3-11 représente l'impact total du processus de peinture sec sur les catégories d'impact choisies.

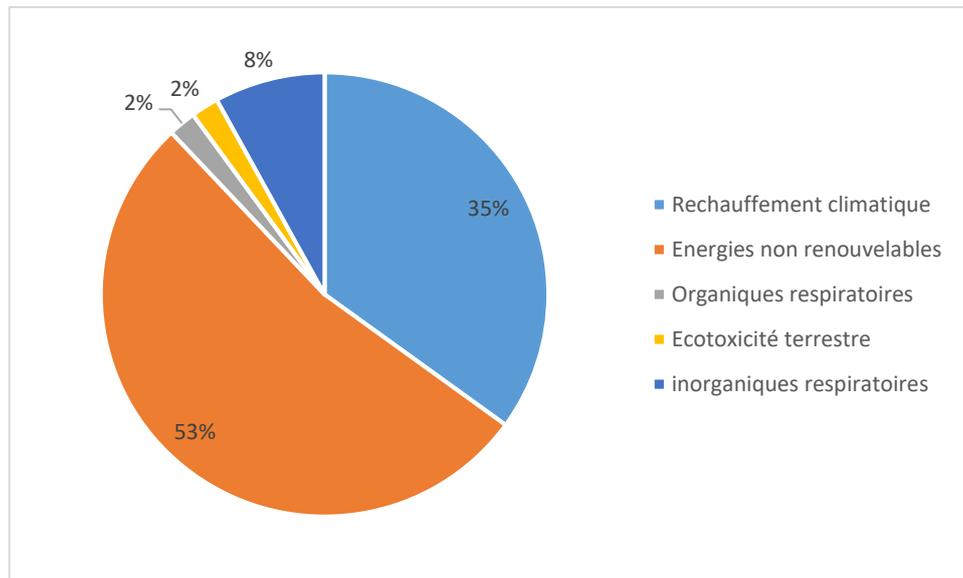


Figure 3-11: Impact total du processus sec sur les catégories d'impact

Nous remarquons que l'utilisation des ressources est la catégorie de dommage la plus impactée. Suivi du changement climatique. Ces deux catégories sont les plus impactées par le processus avec plus de **0,04 pt (35%)**. Tandis que, l'impact sur le système respiratoire que soit par les substance organiques, inorganique ou la toxicité terrestre est en dessous de **0.01 pt**.

Dans le système de peinture sec, l'utilisation des énergies non renouvelables a le taux le plus élevé à cause de la consommation du gaz. Cette utilisation est d'une part directe et d'une autre part indirecte.

La consommation directe a lieu dans la chambre de combustion du sècheur ainsi que dans les systèmes AHU qui se trouvent au niveau de la salle de préparation du mélange de peinture et la salle d'application de la peinture ou le gaz est brûlé pour la création de la chaleur.

La consommation indirecte englobe l'utilisation des combustibles fossiles nécessaires estimés par le logiciel SIMAPRO pour la production de l'énergie électrique utilisée dans l'installation ainsi que pour la fabrication des matières premières qui sont le diluant, la peinture et le durcisseur.

L'émission intensive du  $CO_2$  a fait que l'impact sur le réchauffement climatique est moins conséquent que la consommation des énergies non renouvelables.

L'écotoxicité terrestre est la catégorie d'impact la moins impactée et a comme source les POP et les métaux lourds.

### 3.2.3.1.2.1 Impact du processus sec sur toxicité humaine :

La figure 3-12 représente l'impact des étapes du processus sec sur les respiratoires organiques et inorganiques

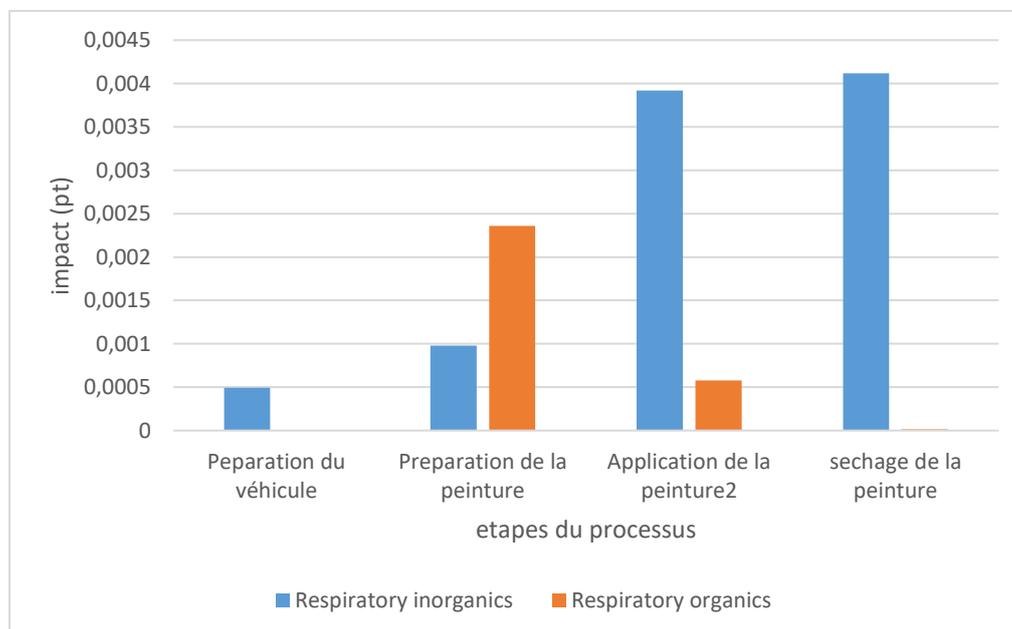


Figure 3-12: Impact des étapes du processus sec sur les respiratoires organiques et inorganiques

D'après le graphe de la Figure 3-12, qui représente l'impact des phases du processus sec sur le système respiratoire, nous avons :

Un impact très important des matières inorganiques sur le système respiratoire dans la phase du séchage et l'application de la peinture. Cet impact diminue considérablement dans les deux premières phases. Les substances organiques, quant à elles, ont un impact significatif uniquement dans deux phases qui sont la préparation de la peinture et l'application de cette dernière avec une différence importante.

La diminution de l'impact des substances organiques revient à la diminution de la quantité de substances mélangées et appliquées comme indiqué dans le tableau 3.6

Tableau 3-6: Différence de quantité de produits utilisés dans les deux phases de préparation et application de la peinture

Phase \ Produit	Préparation du mélange (g)	Application de peinture (g)
Diluant	<b>7000</b>	<b>800</b>
Peinture	<b>21000</b>	<b>5000</b>
Durcisseur	<b>3000</b>	<b>30</b>

Les composés chimiques qui contribuent dans cet impact sont les mêmes pour les deux processus parce que nous utilisons les mêmes produits (Diluant, Peinture et Durcisseur) dans les deux processus.

L'impact des substances inorganiques sur le système respiratoire dans chaque phase est provoqué par les substances illustrées dans le tableau 3.7.

Tableau 3-7: Les composants chimiques inorganiques avec un impact sur le système respiratoire

Phases	Système provoquant les composés inorganiques	Les composés chimiques inorganiques
Préparation du véhicule	Solvants de nettoyage	
Préparation de peinture	Peinture	Solvant naphta aromatique léger
Application de peinture	Peinture Unité de traitement d'air	Solvant naphta aromatique léger, $SO_2$ , CO, $NO_x$
Séchage	Combustion du gaz naturel	$SO_2$ , CO, $NO_x$

### 3.2.3.1.2.2 Impact du processus sec sur l'écotoxicité terrestre

La figure 3-13 illustre la contribution des phases du processus sec sur l'écotoxicité terrestre

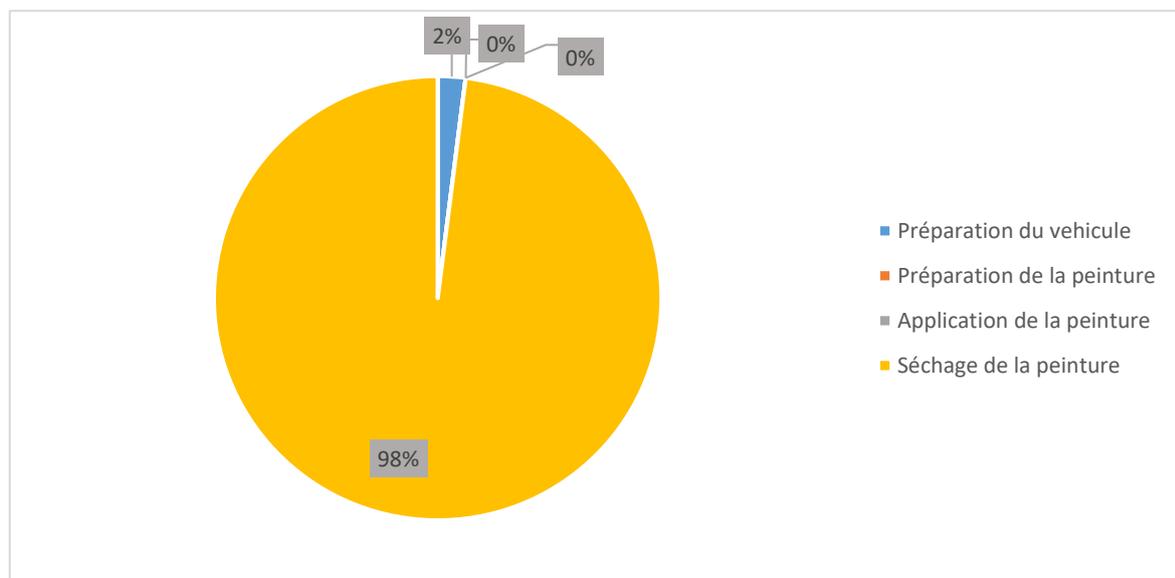


Figure 3-13: Contribution des phases du processus sec sur l'écotoxicité terrestre

L'application de la peinture est la seule phase avec un impact important sur l'écotoxicité terrestre suivie par la préparation du véhicule avec un pourcentage de 2%.

Contrairement au processus humide, dans le processus sec l'impact de la phase d'application de la peinture est le plus élevé en comparant avec les autres phases cela revient à l'existence du système AHU qui rend la combustion de la phase du séchage approximativement égale à celle de l'application de la peinture. Donc, la différence d'impact entre les deux phases réside dans :

L'énergie électrique de source fossile utilisée dans la phase l'application de peinture est supérieure à celle utilisée dans la phase du séchage.

L'utilisation de la peinture des véhicules émet principalement les composés organiques volatils (COV) qui contribuent à la pollution de l'air lorsqu'ils sont libérés dans l'atmosphère. Toutefois, en ce qui concerne les écosystèmes terrestres, l'impact des COV est principalement dû à leur capacité à contribuer à la formation d'ozone troposphérique (smog). L'ozone peut endommager les tissus végétaux et réduire l'activité photosynthétique, affectant ainsi la santé des plantes et la productivité des écosystèmes.

### 3.2.3.1.2.3 Impact du processus sec sur le réchauffement climatique

La figure 3-14 représente graphiquement l'impact des phases du processus sec sur le réchauffement climatique.

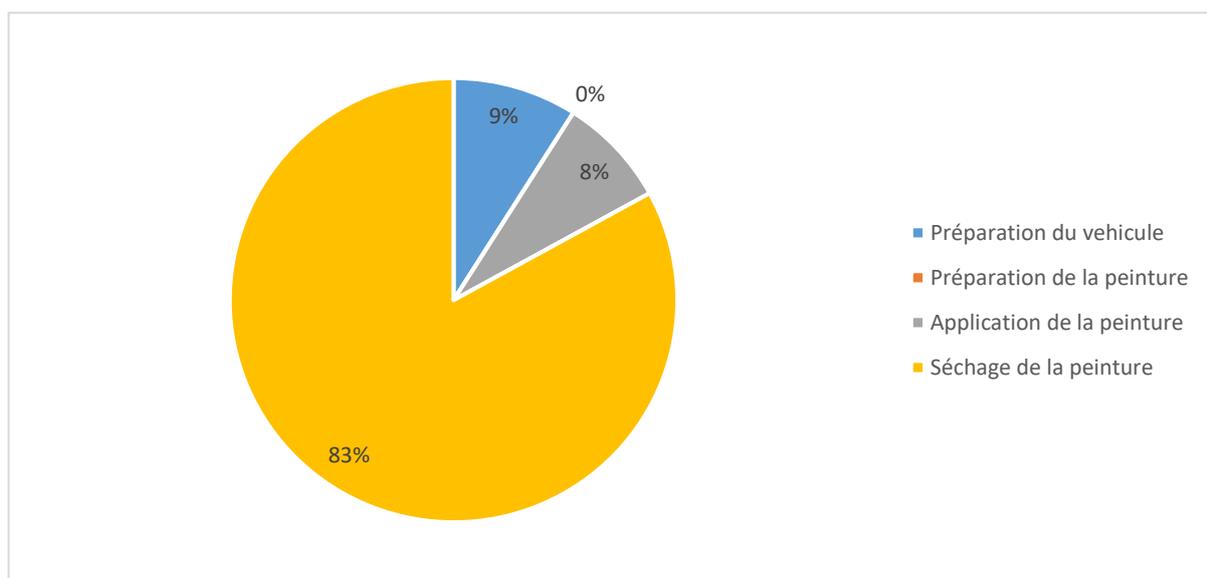


Figure 3-14: Impact des phases du processus sec sur le réchauffement climatique

L'application de peinture est la phase avec le taux d'impact le plus élevé sur le réchauffement climatique suivi du séchage avec un impact significatif mais moins important

que celui de la phase d'application. Tandis que, la préparation de la peinture et du véhicule n'ont pas un impact considérable comparé aux d'autres phases du processus.

La combustion du gaz dans la salle de d'application de peinture et le séchage est accompagnée par l'émission intensive du  $CO_2$ ,  $NO_x$  et autres gaz à effet de serre dans l'atmosphère ce qui a un impact direct sur le réchauffement climatique.

L'application de peinture nécessite une énergie électrique (générée à partir des sources fossiles) supérieure à celle du séchage ce qui justifie la différence d'impact.

La préparation de la peinture et le véhicule ont le moins d'impact sur le réchauffement climatique car ils nécessitent moins d'énergie. En effet, la préparation du véhicule nécessite uniquement l'utilisation du karcher qui ne consomme pas autant d'énergie

#### 3.2.3.1.2.4 Impact du processus sec sur les énergies non renouvelables

Le schéma de la Figure 3-15 résume la contribution de chaque phase du processus sec sur les énergies non renouvelables.

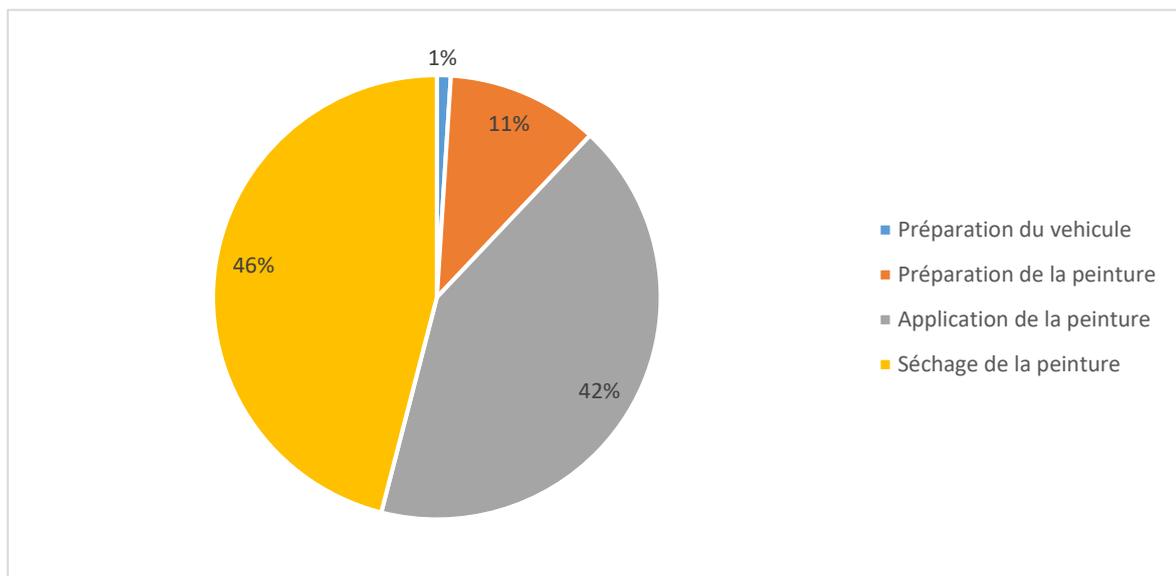


Figure 3-15: Impact des phases du processus sec sur les énergies non renouvelables

La phase du séchage et d'application de la peinture ont les taux de contribution les plus élevés (**46%** et **42%** respectivement) Suivi de la phase de préparation de peinture avec un pourcentage de **11%**.

La cabine d'application de peinture est alimentée avec un système de traitement d'air AHU qui consomme de l'énergie électrique et le gaz pour contrôler la température, l'humidité et l'aération de la cabine.

Le sécheur consomme des combustibles fossiles pour créer la chaleur qui sert à assécher la peinture sur les véhicules.

La salle de préparation du mélange de peinture est alimentée également avec le système AHU mais ce dernier consomme moins d'électricité.

La différence de consommation électrique est illustrée dans le tableau 3-8.

Tableau 3-8:différence de consommation entre deux phases du processus

Phases du processus	Préparation du mélange	Application du mélange
Energies		
Energie électrique	<b>2,2 Kw</b>	<b>22 kw</b>
Capacité de refroidissement	<b>40000 Kcal/h</b>	<b>1050000 kcal/h</b>
Capacité de chauffage	<b>30000 Kcal/h</b>	<b>760000 kcal/h</b>

### 3.2.3.2 Comparaison entre les deux processus sec et humide

La figure 3-16 illustre graphiquement l'impact des deux processus sec et humide sur l'environnement.

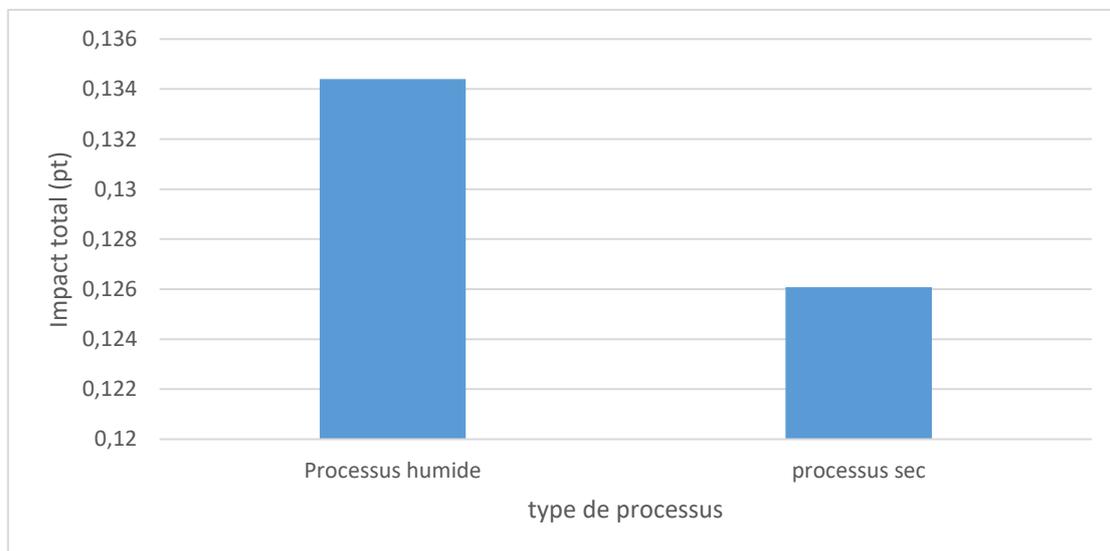


Figure 3-16: Impact global des deux processus de peinture

Nous remarquons une différence d'environ **8 mpt** et le processus humide à plus d'impact sur l'environnement donc nous pouvons le prendre comme référence pour mieux comparer.

La figure 3-17 illustre la différence entre les deux processus de peinture en prenant comme référence le processus avec plus d'impact.

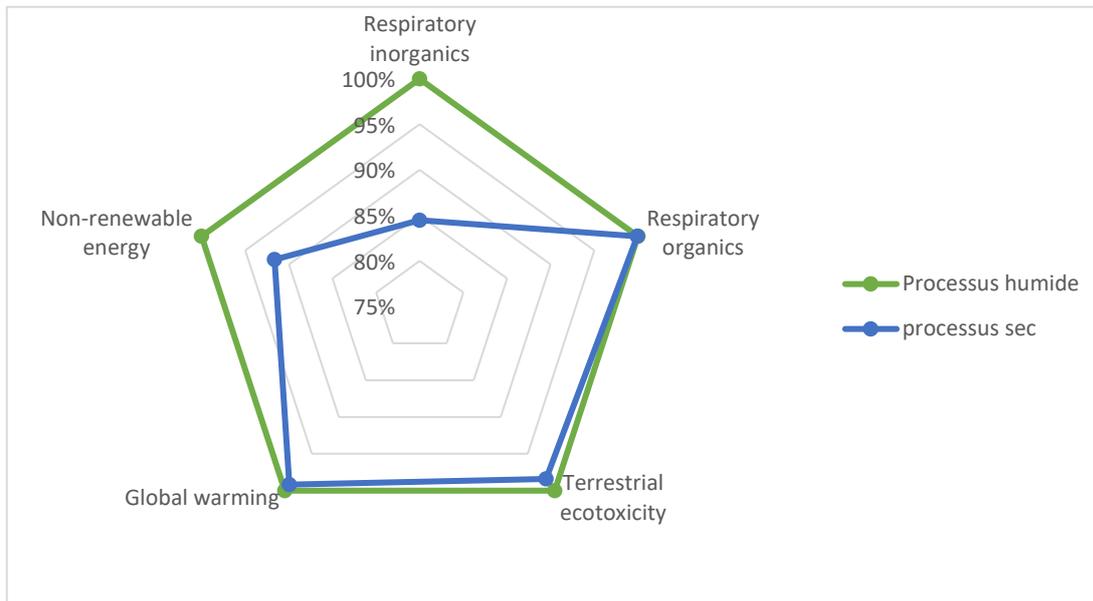


Figure 3-17: Comparaison entre l'impact total des deux processus de peinture sec et humide

Le graphe de la Figure 3-16 illustre la différence d'impact entre les deux processus de peinture. Nous remarquons que le processus humide a plus d'impact que le processus sec ce qui nous a permis de le prendre comme référence dans le graphe de la figure 3-17 afin de bien visualiser la différence des impacts environnementaux des deux processus de peinture sur chaque catégorie d'impact étudiée.

La différence d'impact des deux processus sur les catégories d'impact revient à :

Pour les énergies non renouvelables, elle est plus élevée dans le système humide car il nécessite une autre installation pour traiter les rejets liquides engendrés lors de la phase d'application de peinture. Ce qui indique une consommation supérieure de l'énergie électrique. Par conséquent, plus d'énergie fossile est consommée. De plus, Le sécheur consomme plus de gaz pour arriver à la température idéale qui est entre 75°C et 85°C. Enfin, La différence de la quantité consommée du durcisseur et diluant a aussi un effet sur cette différence.

La différence de la quantité consommée d'énergie entre les deux processus engendre une différence d'émission des gaz à effet de serre comme le  $CO_2$ .

L'impact sur le système respiratoire par les substances organiques est approximativement égal dans les deux processus car les quantités de diluant durcisseur et peinture sont très proches.

Cependant, l'impact des substances inorganiques utilisées dans le processus humide est plus élevé à cause des quantités du floculant, coagulant et neutralisant utilisés dans le traitement des rejets.

Enfin, nous avons l'écotoxicité terrestre, nous remarquons une très petite différence d'impact entre les deux processus mais l'évaluation des impacts a permis de déduire que dans le processus humide la contribution d'impact la plus élevée est celle de la phase du séchage à cause des substances émises lors de la combustion contrairement au système sec ou nous avons constaté que l'application de la peinture a le plus d'impact à cause de la libération des composés organiques volatils.

### **3.2.4 Recommandations**

Après avoir déterminé lequel des deux processus est plus optimale vis-à-vis l'environnement, nous avons proposé les recommandations suivantes afin d'améliorer ce processus :

- Remplacer la peinture à base de solvant par les peintures à base d'eau et de poudre cela va permettre de réduire l'émission des composés organiques volatils (COV)
- Favoriser le recyclage du plastique utilisé pour le masquage.
- Mettre en place des microturbines dans les cheminées de la salle d'application de peinture et le séchage. Cet outil va permettre de transformer l'énergie cinétique en une énergie mécanique puis à l'aide d'un générateur d'électricité cette dernière se transforme en une énergie électrique. Qui va nous permettre d'alimenter le reste de l'atelier.

Notre étude, qui est une analyse du cycle de vie, nous a permis d'identifier et d'inclure toutes les substances impliquées à chaque étape du processus de peinture sec et humide, afin de déterminer leur impact global.

Selon les résultats obtenus à partir du logiciel SIMAPRO, l'utilisation d'énergies non renouvelables a le plus grand impact sur l'environnement. Le processus humide se révèle être le processus le plus critique, ayant l'impact le plus important sur l'environnement, et l'étape de séchage est particulièrement critique dans ce processus.

En revanche, le processus sec présente l'option la plus favorable pour l'environnement, car il génère considérablement moins d'impact que le processus humide. L'étape du séchage et l'application de la peinture contribuent presque de manière équivalente à l'impact global, ce qui les rend toutes deux critiques.

Ainsi, en répondant à la première partie de la problématique, dans des conditions normales et en ne négligeant aucune substance, énergie ou autre donnée relative aux processus, nous pouvons déduire que l'entreprise SAPPL-Mercedes Benz devrait adopter le processus sec et abandonner l'utilisation du processus humide pour obtenir de meilleurs résultats sur le plan environnemental.

Cette partie de notre étude nous a permis de déterminer quel système utiliser pour protéger l'environnement. Cependant, ces conclusions ont été établies dans des conditions de fonctionnement normales. Par conséquent, une deuxième partie de l'étude est nécessaire pour identifier les dysfonctionnements éventuels qui pourraient se produire dans notre système optimal, afin de formuler des recommandations pour une meilleure maîtrise du système.

## CHAPITRE 04 :

# Identification des défaillances et recommandations

## 4 Identification des défaillances et recommandations

Dans ce chapitre nous allons réaliser une analyse des risques où nous allons identifier les dysfonctionnements qui peuvent survenir et avoir un impact sur l'environnement et plus précisément sur les catégories d'impact, que nous avons déjà choisi dans l'analyse de cycle de vie (ACV). Cela, a pour but de proposer des recommandations pour une meilleure maîtrise du système.

### 4.1 Méthodologie du travail :

Le système de peinture optimale choisi à travers l'ACV peut être confronté, pendant son fonctionnement, à des dysfonctionnements qui peuvent générer un impact environnemental négatif. Afin d'avoir une meilleure maîtrise des risques nous allons suivre les étapes suivantes :

- Décortiquer le système en sous-systèmes en utilisant la décomposition SADT ;
- Identifier les équipements à analyser ;
- Identifier les modes de défaillances, leurs causes et leurs effets en utilisant l'AMDE ;
- Schématiser les défaillances des systèmes sous formes d'arbres de défaillances ;
- Combiner ses arbres de défaillances avec des conditions et construire l'arbre des causes et conséquences ;
- Déterminer l'impact sur les catégories d'impact ;
- Proposer des mesures de prévention.

### 4.2 Décomposition des systèmes critiques :

Afin de mieux comprendre notre système nous avons opté pour la décomposition SADT.

#### 4.2.1 Principe de la méthode SADT

La méthode *Structured Analysis and Design Technique* (SADT), également connue sous le nom de méthode d'analyse fonctionnelle descendante, est un outil graphique utilisé pour décomposer des systèmes complexes en partant des aspects généraux pour aller vers les détails spécifiques. Elle offre une approche permettant de décrire des systèmes variés, où différents flux de matière d'œuvre coexistent. [23]

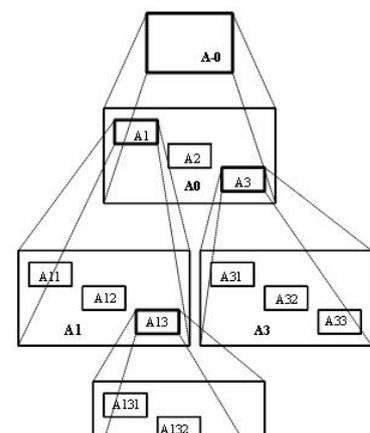


Figure 4-1: La méthode SADT

Les figures 4-1 et 4-2 illustrent comment se fait la décomposition ainsi que les entrants et sortants nécessaires.

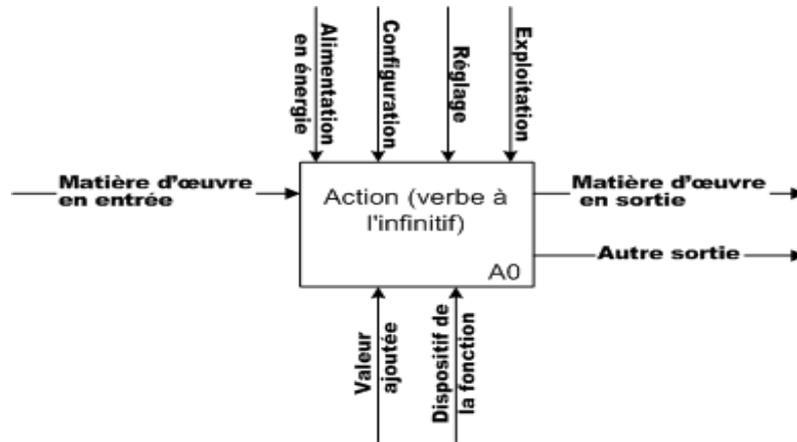


Figure 4-2: Bloc de la SADT [23]

### 4.2.2 Application de la décomposition SADT

Les schémas Figure 4-3 et Figure 4-4 montrent le bloc initial de la décomposition SADT ainsi que la première étape de la décomposition avec tous les entrants et sortants du processus.

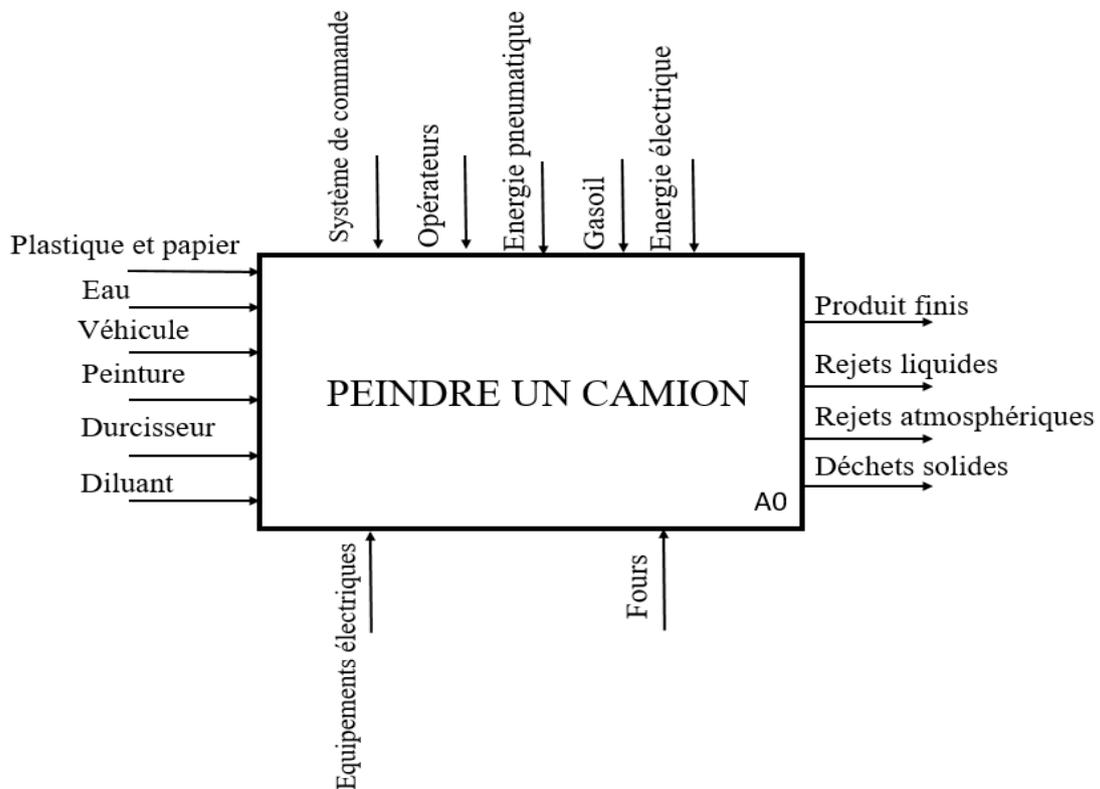


Figure 4-3: Bloc initial du processus de peinture

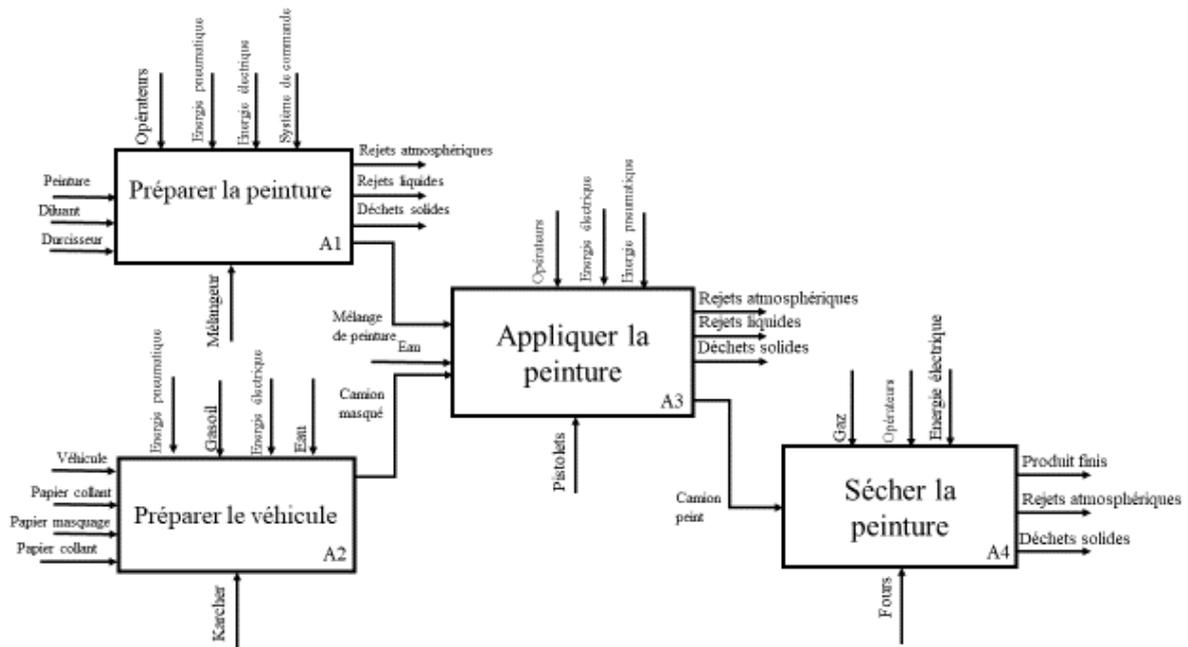


Figure 4-4: La première décomposition du processus de peinture

Nous avons décomposé le système en 4 sous niveaux. Cela nous a permis de simplifier et comprendre les interactions entre les différentes étapes du processus et visualiser les entrants et sortants de chaque étape afin de déterminer les dysfonctionnements des équipements utilisés.

### 4.3 Analyse des modes de défaillance et de leurs effets (AMDE)

Nous avons appliqué la méthode AMDE sur les équipements utilisés dans les deux phases critiques.

#### 4.3.1 Principe de la méthode

L'analyse des modes de défaillance et de leurs effets (AMDE) est un outil qui permet d'identifier dans quelles mesures les composants, les systèmes ou les processus peuvent tomber en panne pour exécuter la conception prévue. Cette méthode permet d'identifier d'une façon qualitative :

- Les modes de défaillances potentiels des différentes parties d'un système ;
- Les causes des défaillances ;
- Les effets de ces défaillances sur le système. [24]

### **4.3.2 Application de l'AMDE sur les systèmes critiques**

Nous avons appliqué la méthode de l'analyse des modes de défaillance et de leurs effets sur les deux systèmes critiques du processus optimal pour l'environnement déduit à partir de l'ACV

#### **Phase d'application de peinture :**

Cette étape de cycle de vie de la peinture se fait dans une cabine Figure 1-20 équipée de

- Système de traitement d'air Air handling unit ;
- Système de filtration d'air ;
- Système de peinture ;
- Systèmes de détection de fumée et flamme.

#### **Phase du séchage :**

La dernière étape du cycle de vie se fait dans un sécheur équipé de :

- Bruleur ;
- Système de traitement d'air ;
- Turbine d'extraction.

Le Tableau 4-1 détaille les dysfonctionnements possibles de ces équipements ainsi que l'effet et la cause de ces derniers.

Tableau 4-1: Tableau de l'AMDE sur les deux systèmes de peinture critiques

Etape de cycle de vie	Equipements	Composants	Mode de défaillance	Effets potentiels	Causes possibles
Application de peinture	<i>Air handling unit</i>	Humidificateur	Absence d'humidification	Environnement désagréable pour les opérateurs ; Pas de contrôle sur l'énergie électrostatique ; Altération de la qualité de la peinture.	Dysfonctionnement du système de traitement d'eau ; Erreur de commande ; Problème électrique ; Dysfonctionnement de la pompe.
			Alimentation en eau contaminée	Introduction des contaminants dans la chambre d'application de peinture.	Traitement insuffisant ; Epuisement des matériaux (charbon actif) .
			Obstruction du système d'alimentation en eau	Réduction du débit d'eau ; Diminution de l'efficacité de l'humidification.	Accumulation des minéraux, tartres et calcaire.
			Défaillance du capteur de mesure de l'humidité	Sur humidification ou sous-humidification ; Incohérence dans le contrôle de l'humidité ;	Problème électrique ; Usure et vieillissement ; Mauvais calibrage ; Endommagement physique.

		Bruleur	Défaillance de l'allumage (pas de combustion)	Pas de chaleur introduite dans la cabine; Emission du gaz naturel.	Ratio Air-combustible insuffisant pour la combustion ; Problème d'allumage (absence d'étincelle).
			Surchauffe	Dommmages matériel.	Erreur de commande ; Flux d'air inadéquat.
			Instabilité de la flamme	Distribution inhomogène de chaleur ; Combustion incomplète ; Libération de gaz toxiques.	Ratio air-combustible insuffisant ; Perturbation de débit (air-gaz).
		Refroidisseur	Inefficacité de refroidissement	Pas d'air frais introduit dans la cabine ; Surchauffe de la cabine d'application de peinture .	Panne électrique ; Panne mécanique ; Défaillance du système de contrôle.
			Défauts de conduites d'eau	Diminution de la capacité de refroidissement. Dommmages d'équipements.	Colmatage des conduites ; Présence des impuretés dans l'eau.
			Fuite d'eau	Perte d'eau, Diminution de l'efficacité de refroidissement	Défaillance du système d'alimentation .

	Filtres d'air	Obstruction du filtres	Réduction de l'efficacité des filtres.	Manque d'entretien ; Accumulation de poussière à la surface du filtre.	
		Contournement du filtre	Réduction de l'efficacité du traitement d'air ; Entrée d'air contaminé.	Manque d'entretien ; Défaillance d'étanchéité ; Installation incorrecte.	
		Dégradation de l'efficacité du filtre	Diminution de l'efficacité de filtration ; Libération des contaminants.	Détérioration du média du filtre, Utilisation excessive Absence de maintenance	
	Turbine	Défaillance du moteur	Diminution de la capacité d'injection d'air ; Les particules restent à l'intérieur de la cabine.	Problème d'entretien ; Court-circuit ; Défaillances du circuit de commande.	
		Dommages aux pales du ventilateur	Flux d'air déséquilibré ; Augmentation du bruit.	Problème d'entretien ; Ingestion de débris .	
	Système de traitement des rejets atmosphériques	Filtres de rejets de peinture	Obstruction des filtres	Diminution de l'efficacité de filtration ; Stagnation des particules dans la cabine.	Manque d'entretien Accumulation de dépôts de peinture

			Dégradation de l'efficacité	Un traitement d'air moins efficace.	Manque d'entretien ; Installation incorrecte ; Mauvaise qualité des filtres.
	Système D'application de peinture	Pistolets	Obstruction des conduites	Arrêt du processus de peinture	Changement de peinture ; Mauvaise qualité de peinture .
			Mauvaise alimentation en peinture	Mauvaise application de la peinture (couverture inhomogène)	Présence de boules d'air dans les conduites de peinture à cause d'une erreur du mélange des peintures.
	Systèmes de détection	Système de détection de (flamme/fumée)	Non détection	Constatation tardive des incendies et explosions.	Problèmes électrique Dysfonctionnement du capteur Défauts du système de notification
			Activation de fausses alarme	Perturbation du processus de peinture Arrêts inutiles	Mauvais calibrage des capteurs
			Activation tardive d'alarme	Constatation retardée des incendies et explosions.	Mauvais calibrage Mauvais positionnement du détecteur Détecteur inadapté
Séchage de la peinture	Sécheur	Bruleur	Défaillance d'allumage (pas de combustion)	Pas de chaleur introduite dans la cabine; Emission du gaz naturel.	Ratio Air-combustible insuffisant pour la combustion ; Problème d'allumage (absence d'étincelle).

			Surchauffe	Dommmages matériels.	Erreur de commande ; Flux d'air inadéquat.
			Instabilité de la flamme	Distribution inhomogène de chaleur ; Combustion incomplète ; Libération de gaz toxiques.	Ratio air-combustible insuffisant ; Perturbation de débit (air-gaz).
Système de traitement d'air	Filtres de rejets	Obstruction des filtres	Un traitement moins efficace	Manque d'entretien ; Accumulation de dépôts.	
		Dégradation de l'efficacité	Un traitement moins efficace	Manque d'entretien Mauvaise qualité des filtres	
		Fuite du filtre	Contamination de l'environnement	Installation incorrecte ; Dommages au média filtrant ; Détérioration au fil du temps	
Système d'extraction	Turbine d'extraction	Défaillance du moteur	Mauvaise extraction d'air	Défaillance électrique Défaillance mécanique	
		Défaillance du système de contrôle (commutateur)	Mauvais contrôle de l'extracteur d'air ; Arrêts inopinés de l'extracteur.	Usure mécanique Panne électrique	

A travers le tableau de l'analyse de modes de défaillance et leurs effets nous avons pu identifier 24 modes de défaillance probables dans la phase d'application de peinture et 08 dans la phase du séchage. Certains dysfonctionnements doivent être combiné pour former un autre dysfonctionnement.

#### **4.4 Application des arbres de défaillances et arbre des causes et conséquences sur le système d'application de peinture**

Nous avons utilisé l'analyse par arbre de défaillance et arbre des causes et conséquences pour mieux visualiser les conséquences des dysfonctionnements des deux phases de peinture. Nous avons choisi uniquement les conséquences ayant un impact sur l'environnement.

##### **4.4.1 Principe de l'analyse par arbre de défaillance :**

Aussi appelée « arbre de pannes ». C'est une technique d'analyse déductive qui permet d'identifier les facteurs et les causes qui contribues à un évènement indésirable. [24]

Cette analyse est modélisée par un arbre contenant :

##### **4.4.2 Les évènements**

###### **1) L'évènement redouté**

C'est l'évènement qui se trouve au sommet de l'arbre. Il est unique et représente l'évènement indésirable pour lequel nous faisons l'étude.

###### **2) Les causes**

Les causes qui mènent à l'évènement redoutées peuvent être considérées comme :

###### **Evènements intermédiaires**

Ce sont des évènements redoutés secondaires et des combinaisons de causes pour d'autres évènements jusqu'à l'évènement redouté principal. [25]

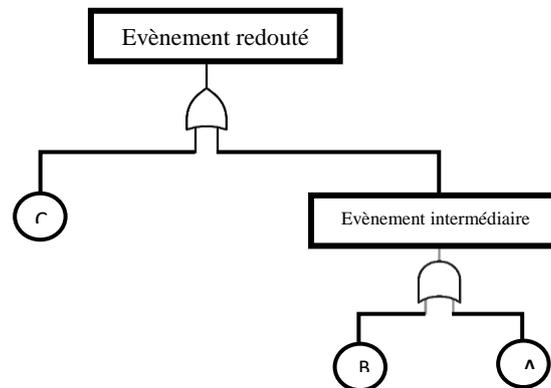
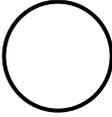
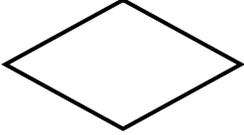
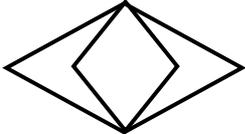


Figure 4-5: Arbre de défaillances

**Evènements élémentaires :**

Les évènements élémentaires sont des évènements qui représentent un niveau plus détaillé de l'analyse du système. Dans un arbre de défaillances, ils représentent les défaillances des composants qui constituent le système étudié.

Tableau 4-2: Signification des symboles de l'ADD [26]

Symbole	Nom	Signification
	Rectangle	-Évènement redouté -Evènement intermédiaire
	Cercle	-Évènement élémentaire
	Losange	-Évènement élémentaire dont les causes ne seront pas développées
	Double losange	-Évènement élémentaire dont les causes seront développées ultérieurement

	<p>Maison</p>	<p>-Evénement de base se produisant normalement pendant le fonctionnement du système</p>
---	---------------	--

### 4.4.3 Les portes logiques

Les portes logiques sont des signes qui font la liaison entre les différents évènements. Il existe deux (02) types de portes logiques « et » et « ou ». La porte « et » indique que les évènements élémentaires doivent se réaliser simultanément pour que l'évènement indésirable suivant se réalise. Tandis que, La porte « ou » indique qu'un seul évènement élémentaire doit se réaliser pour que l'évènement redouté se réalise. [26]

### 4.4.4 Logique booléenne

Un arbre de défaillance peut être traduit en un ensemble équivalent d'équation booléennes ces équations permettent l'évaluation quantitative et qualitative de l'arbre dessiné. [26]

Tableau 4-3: Signification des portes logiques [26]

Symbole	En terme de probabilité	Signification
	$P(FE) = P(A) + P(B) - P(A \cap B)$	<p>La porte OU représente l'"union" logique des évènements d'entrée. Elle est équivalente au symbole booléen " + ".</p>
	$P(FE) = P(A)P(B A) = P(B)P(A B)$	<p>La porte ET représente l'"intersection" logique des évènements d'entrée. Elle est équivalente au symbole booléen " · ".</p>

### 4.4.5 Etapes de modélisation

Les étapes de modélisation d'un arbre de défaillances sont comme suit [27] :

- 1) Définir le champ d'application de l'analyse :

Cela englobe la définition des limites du système, l'objectif et l'étendue de l'analyse et les hypothèses de base formulées.

### 2) Familiarisation avec le système

Afin que l'analyse de l'arbre des défaillances soit menée à bien, il est nécessaire d'avoir une connaissance détaillée du système et de son fonctionnement. Une analyse fonctionnelle peut être efficace pour faciliter la maîtrise du système.

### 3) Identification de l'événement majeur et les événements élémentaires et intermédiaires :

L'événement redouté majeur est au centre de toute l'analyse. Il peut être illustré par l'apparition ou l'existence d'une condition dangereuse, ou l'incapacité du système à fournir la performance souhaitée.

Dans un processus d'évaluation globale de la sécurité, l'événement le plus important est généralement issu d'une analyse précédente par exemple une analyse préliminaire des risques ou une AMDEC.

## 4.5 Analyse causes-conséquences

C'est une analyse qui combine les arbres de pannes et d'événements. Elle part d'un événement critique et analyse les conséquences en combinant des portes logiques OUI/NON qui représentent des conditions susceptibles de se produire ou des défaillances de systèmes conçus pour limiter les conséquences de l'événement initiateur. Les causes des conditions ou des défaillances sont analysées par des arbres de panne. [24]

La méthode permet d'analyser les différents chemins dont dispose un système à la suite d'un événement critique en fonction du comportement de sous-systèmes particuliers. S'ils sont quantifiés, ils donnent une estimation de la probabilité des différentes conséquences possibles à la suite d'un événement critique. [24]

La Figure 4-6 montre un schéma général d'un arbre des causes et conséquences

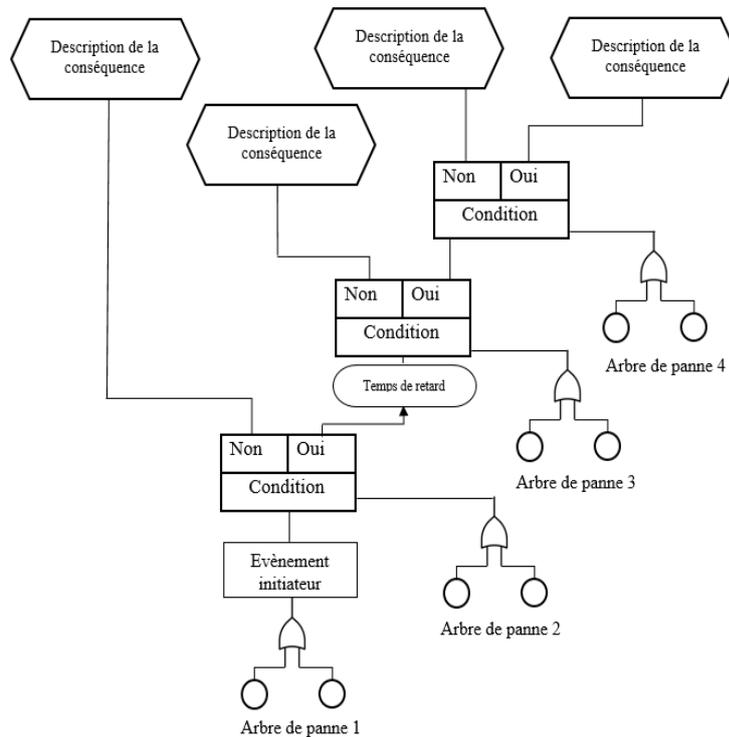


Figure 4-6: Arbre des causes et conséquences [17]

### 4.5.1 Application des arbres de défaillance sur le système d'application de peinture

Nous avons schématisé les dysfonctionnements mentionnés dans le tableau 4.1 dans les arbres de défaillances qualitatives suivantes :

#### 4.5.1.1 Dysfonctionnement du système de traitement d'air

Le dysfonctionnement du système de traitement d'air peut être provoqué par :

L'obstruction des filtres ou un défaut structurel du filtre ce qui engendre une efficacité de traitement réduite.

Le schéma (Figure 4-7) représente l'arbre des pannes qui conduisent au dysfonctionnement du système de traitement d'air. Tel que :

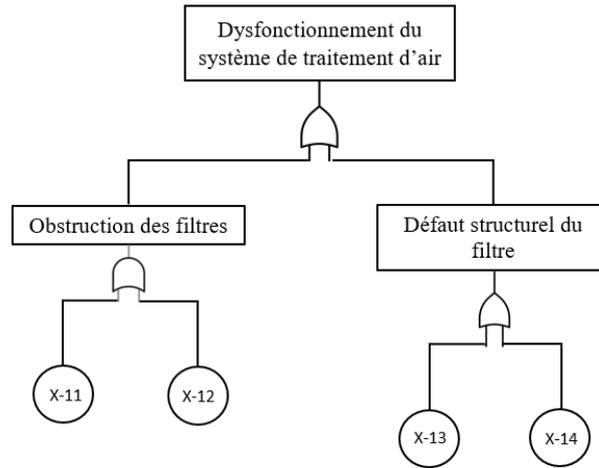


Figure 4-7: Dysfonctionnement du système de traitement d'air

Tableau 4-4: Codification des évènements élémentaires pour le dysfonctionnement du système de traitement d'air

X-11	Accumulation de dépôt de peinture
X-12	Absence d'entretien
X-13	Rupture du filtre
X-14	Usure du filtre

#### 4.5.1.2 Dysfonctionnement de l'injecteur d'air

Le rôle de l'injecteur d'air est de donner une vitesse pour les particules de la peinture présentes dans la cabine d'application de la peinture pour qu'elles puissent traverser les filtres.

Le schéma Figure 4-8 représente l'arbre de défaillance de ce système et le tableau 4-5 donne la signification de chaque code.

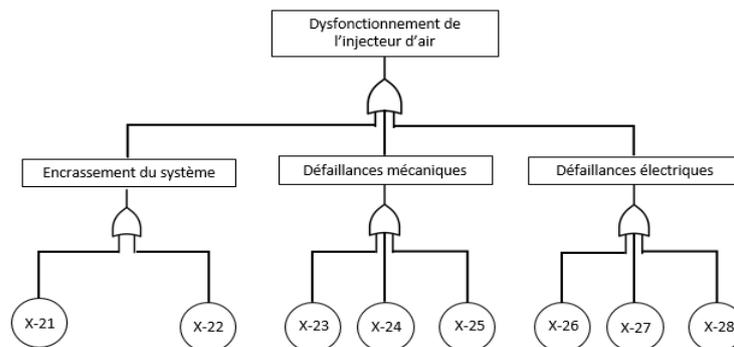


Figure 4-8 : Dysfonctionnement de l'injecteur d'air

Tableau 4-5: Codification de l'arbre de défaillance de l'injecteur d'air

X-21	l'accumulation de dépôts.
X-22	Défaillance du filtre d'air
X-23	Ailettes endommagés
X-24	Usure des soupapes
X-25	Perte de tension des ressorts
X-26	court-circuit.
X-27	Des défauts de capteurs électroniques
X-28	Défaillances du circuit de commande

#### 4.5.1.3 Présence d'une source d'ignition

Lors du fonctionnement normal de l'opération d'application de peinture les opérateurs sont tenus à respecter les règles suivantes :

- Vider leurs énergies statiques ;
- Porter les EPI (soulé de sécurité surtout) ;
- Ne pas utiliser le téléphone .

Ceci étant nécessaire pour éviter toute source d'étincelle dans la cabine.

De plus, les surfaces chaudes peuvent représenter aussi une source d'inflammation (ignition) dont la source de chaleur est le dysfonctionnement du système de traitement d'air et le dysfonctionnement de capteurs de températures simultanément.

L'arbre de la figure 4-10 schématise les dysfonctionnements qui peuvent conduire à la présence inhabituelle de source d'ignition.

Le Tableau 4-6 donne la signification de chaque code.

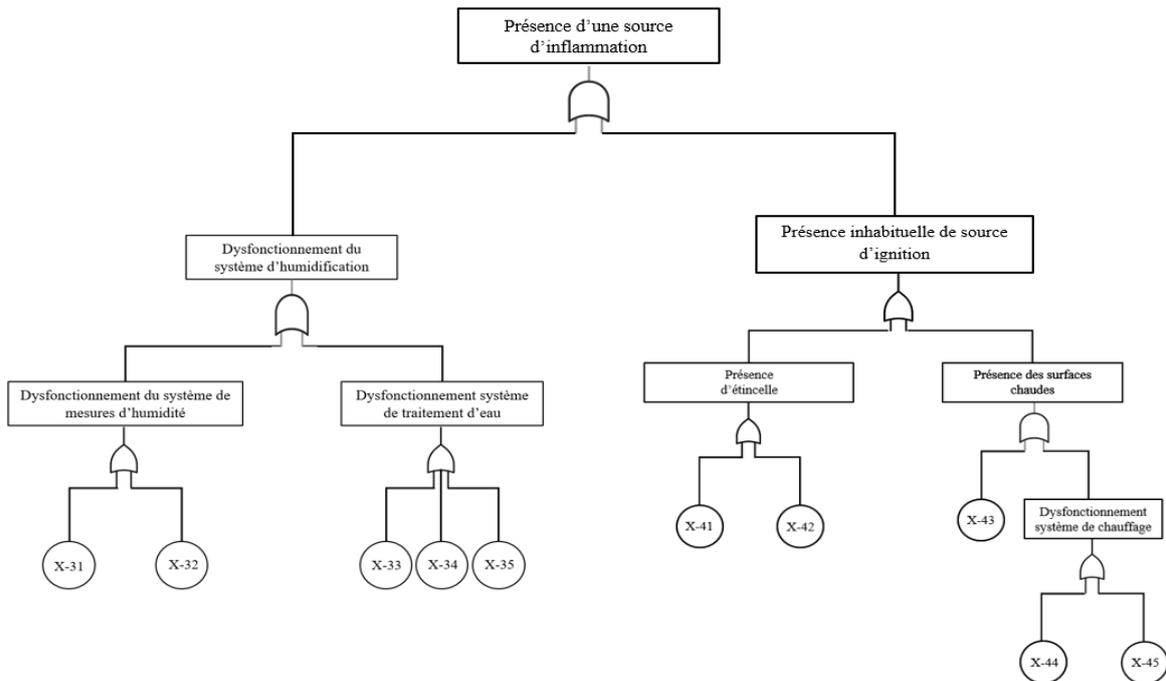


Figure 4-9: Présence d'une source d'inflammation

Tableau 4-6: Codification des événements élémentaires de la présence d'une source d'inflammation

X-31	Défaillance du capteur
X-32	Problème électrique
X-33	Dysfonctionnement de la pompe
X-34	Problème électrique
X-35	Obstruction des conduites
X-41	Erreur humaine (non-respect des règles de prévention)
X-42	Véhicule allumé
X-43	Dysfonctionnement du détecteur
X-44	Erreur de commande
X-45	Perte de contrôle sur le bruleur

### 4.5.2 Application de l'arbre des causes et conséquences sur la phase d'application de peinture

La combinaison des arbres de défaillances avec des conditions nous a permis de construire un arbre des causes et conséquences constitué de :

- 03 arbres de défaillances ;
- 03 conditions ;
- 3 conséquences ayant un impact sur l'environnement.

La figure 4-10 illustre l'arbre des causes et conséquences du système d'application de la peinture.

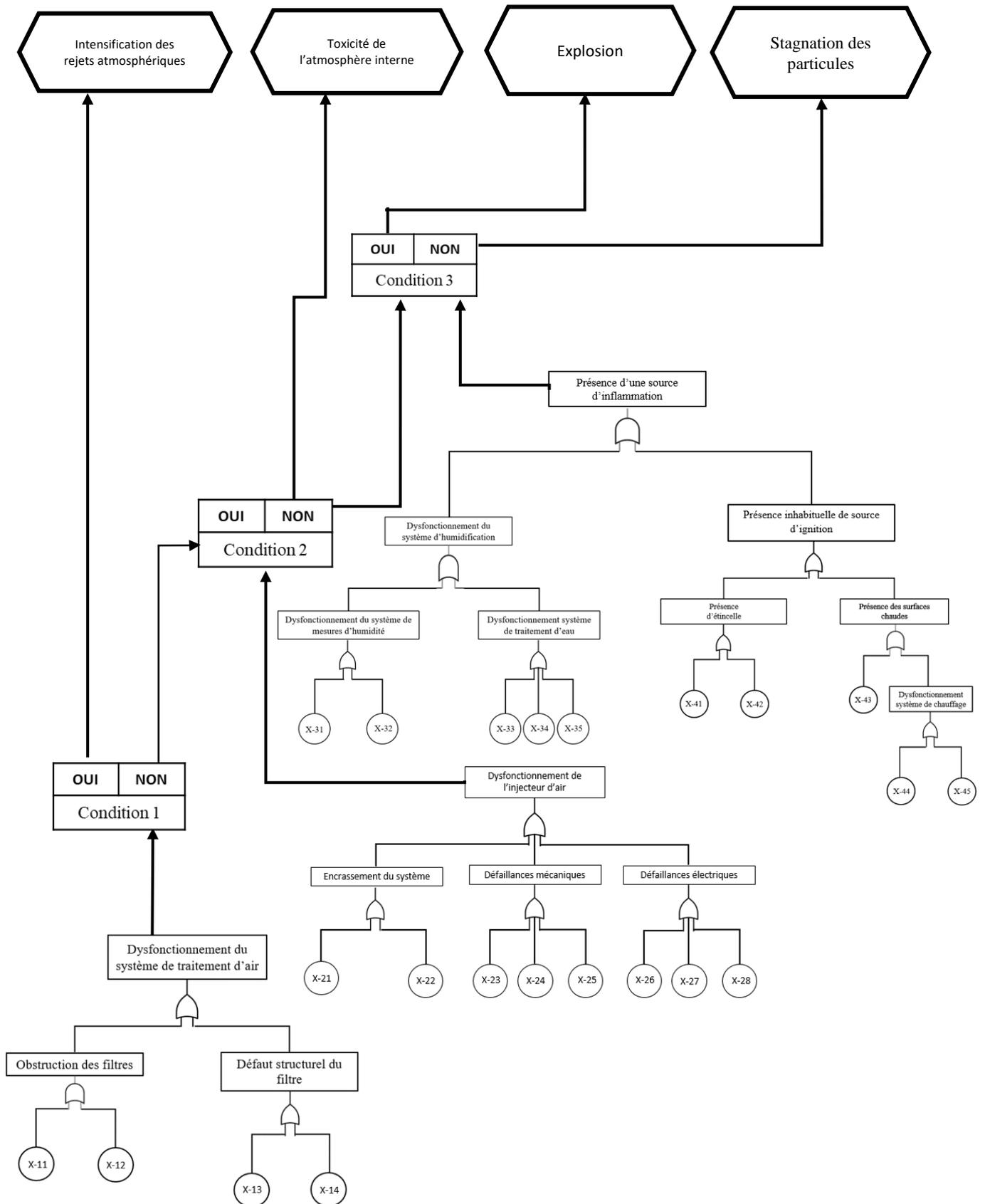


Figure 4-10: Arbre des causes et conséquences de la phase d'application de peinture

**Les conditions d'occurrences des conséquences :**

Les conditions mentionnées dans la Figure 4-11 sont comme suit :

Condition 01 :

La première condition consiste à « assurer que le débit d'air du l'AHU soit dans ses limites idéales ». Le tableau 4.7 donne les valeurs idéales du débit d'air pour un meilleur rendement des filtres

Tableau 4-7: Conditions du fonctionnement idéal de l'injecteur d'air

Débit	Débit minimal ( $m^3/h$ )	Débit maximal ( $m^3/h$ )
Filtres		
Entretoises	2000	3000
Le filtre en fibre de verre Paint-stop	2500	6300

Condition 02 :

La deuxième condition concerne « les seuils minimaux pour que l'atmosphère de la chambre devient toxique pour les opérateurs non porteurs des EPI ou qui ont des EPI défailants ».

Le tableau 4.8 donne les quantités seuils de toxicité des substances présentes dans chaque produit.

Tableau 4-8: Limites inférieures de toxicité

Produits	Nom du composé chimique	Type effet	Concentration	Quantité minimale
Peinture	Acétate de n-butyle	Systémique/ locale	960mg/m <sup>3</sup>	475,2 g
	Xylène	Systémique / locale	289mg/m <sup>3</sup>	143,055 g
Diluant	Acétate d'éthyle	Systémique/ local	1468mg/m <sup>3</sup>	726,66 g
Durcisseur	Hexaméthylène diisocyanate, oligomers	Systémique / locale	1mg/m <sup>3</sup>	495 mg
	Acetate de n-butyle	Systémique / locale	960mg/m <sup>3</sup>	475,2 g
	Diisocyanate d'hexaméthylène	Systémique / locale	0.15 mg/m <sup>3</sup>	74,25 mg

$$V = 5,5 * 6 * 15 = 495 m^3$$

$$Quantité_{min} = C \times V$$

Condition 03 :

La dernière condition rassemble « les limites d’explosibilité de chaque constituant du mélange de peinture présent dans l’atmosphère confiné » comme le montre la figure 4-12 représente les limites d’explosibilité de chaque produit et dans le tableau 4-9 nous avons calculé les quantités minimales et maximales pour l’explosion

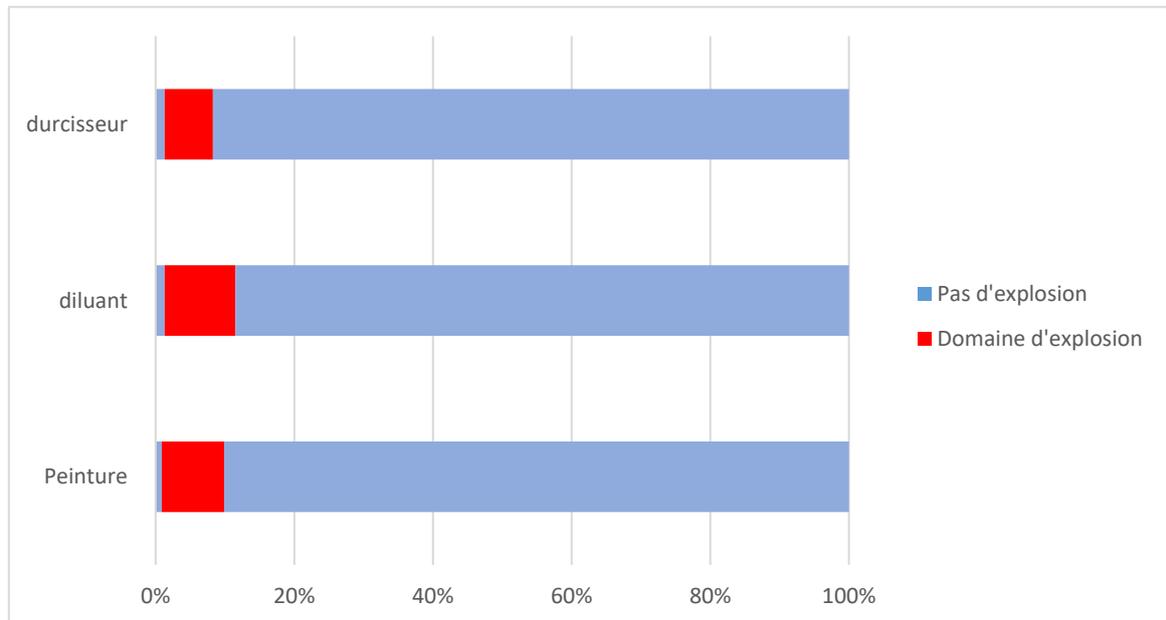


Figure 4-11: Domaine d'explosibilité de chaque produits utilisé dans la peinture d'un véhicule

Tableau 4-9: Limites d'explosibilités de la peinture, diluant et durcisseur

Produits	Densité (kg/m3)	Seuil minimal	Volume explosif Minimal (m3)	Quantité min (kg)	Seuil maximal	Volume explosif maximal (m3)	Quantité max (kg)
Peinture	4,15	1%	4,95	20,543	10%	49,5	205,425
Diluant	4,09	1.5%	7,425	30,368	11.5%	56,925	232,823
Durcisseur	4,00	1,4%	6,93	27,72	7,6%	37,62	150,48

L’applicabilité de la première condition de notre arbre conduit à l’occurrence d’une explosion dans la cabine de peinture. Sinon, c’est-à-dire si la concentration est en dessous ou en dessus des limites d’explosibilité la présence d’étincelle n’aura aucun effet.

Le volume de la cabine :

$$Quantité = V_{explosif} \times d_{pondérée}$$

### 4.5.3 L'impact des conséquences sur les catégories d'impact

Les conséquences illustrées dans la figure 4-14 ont un impact direct ou indirect sur les Cinq (05) catégories d'impact étudiés.

La figure 4-14 montre la relation entre les catégories d'impact et les conséquences en générale.

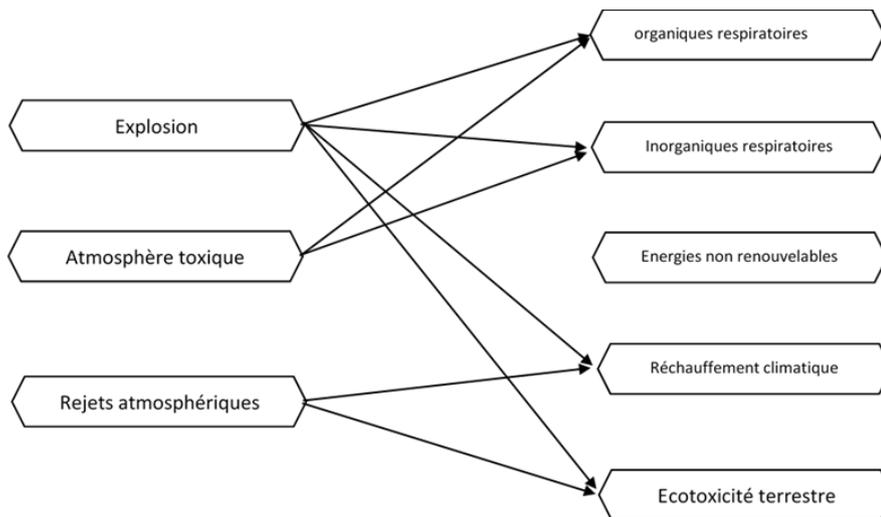


Figure 4-12: Impact des conséquences sur les catégories d'impact

Le tableau 4-10 donne les détails sur l'impact de conséquences sur les catégories d'impact

Tableau 4-10: Impact des conséquences sur les catégories d'impact dans la phase d'application de peinture

	Toxicité de l'atmosphère	Explosion	Intensification des rejets atmosphériques
Les énergies non renouvelables	/	Le processus de récupération et la gestion des déchets suite à une explosion consomme une énergie significative.	Pas d'impact direct
Le réchauffement climatique	/	La consommation d'énergie et la gestion des déchets pour la récupération provoquent des impacts sur de réchauffement climatique (émission des gaz à effet de serre) ; Emissions de gaz à effet de serre (COV) qui peuvent contribuer à la formation d'ozone au niveau du sol et peuvent également réagir avec d'autres polluants pour former des polluants secondaires, tels que le smog.	Émissions de gaz à effet de serre qui forment l'ozone troposphérique contribue au réchauffement de l'atmosphère.
Effets respiratoires inorganiques	Aggravation des impacts des substances inorganiques sur le système respiratoire dans les conditions normales	Emission des matières particulaires fines (PM) et composés organiques volatils (COV) inhalables dans le système respiratoire causant des problèmes des voies respiratoires.	Pas d'impact direct
Effets respiratoires organiques	Aggravation des impacts des substances organiques sur le système respiratoire dans les conditions normales.	Emission des composés organiques volatils (COV) et les PM inhalable causant des problèmes sur le système respiratoire et des effets potentiellement cancérigènes. Emission des sensibilisants respiratoires (les isocyanates) qui déclenchent des réactions allergiques ou une sensibilisation respiratoire.	Pas d'impact direct
L'écotoxicité terrestre	/	Contamination du sol par les COV qui causent la perturbation de la qualité et la fertilité des terres.	Les émissions atmosphériques (COV) qui peuvent se disperser dans l'air et contribuer

		Perturbation des interactions écologiques et les chaînes alimentaires.	à la formation de smog et d'ozone au niveau du sol. Ou même pénétrer dans les feuilles des plantes, inhibant leur capacité à effectuer la photosynthèse et entraînant des dommages à la chaîne alimentaire.
--	--	--	---

#### **4.5.4 Recommandations**

Après avoir déterminé les défaillances et leurs impacts, voici quelques recommandations pour assurer la non occurrence des défaillances.

##### **Pour le système de traitement d'air :**

- Assurer une inspection régulière et maintenance du système de traitement d'air (AHU) ;
- Remplacer les filtres régulièrement pour éviter leur obstruction ;
- Assurer un nettoyage régulier des équipements internes tel que les bobines pour éviter l'accumulation de saletés et dépôts.

##### **Pour les filtres de peinture :**

- Assurer un nettoyage et entretien réguliers ;
- Assurer un changement périodique des filtres ;
- Faire des bilans des rejets périodiquement.

##### **Pour la présence d'une source d'étincelle :**

- Assurer le respect des règles de prévention pour éviter la présence d'étincelle ;
- Assurer l'entretien régulier de l'humidificateur ;
- Assurer l'entretien régulier des équipements électriques et les systèmes d'isolation.

##### **Pour les détecteurs et capteurs :**

- Assurer le calibrage et l'entretien réguliers des capteurs.

##### **Gestion du personnel:**

- Formation du personnel sur les bonnes pratiques lors de l'application, la manipulation et le stockage de la peinture ;
- Sensibilisation et formation du personnel sur les zones ATEX ;
- Suivi de l'état de santé des opérateurs.

## 4.6 Application de l'arbre des causes et conséquences sur le système du séchage

### 4.6.1 Application des arbres de défaillances sur le système du séchage

Nous avons schématisé les dysfonctionnements mentionnés dans le tableau 4-1 dans les arbres de défaillances qualitatives suivants :

#### 4.6.1.1 Présence du gaz

La présence inhabituelle du gaz naturel dans la cabine du séchage revient à l'absence d'étincelle ou une fuite de gaz.

La figure 4-15 illustre les dysfonctionnements qui peuvent conduire à la présence du gaz dans la salle tel que le tableau 4.10 définit la codification de la figure.

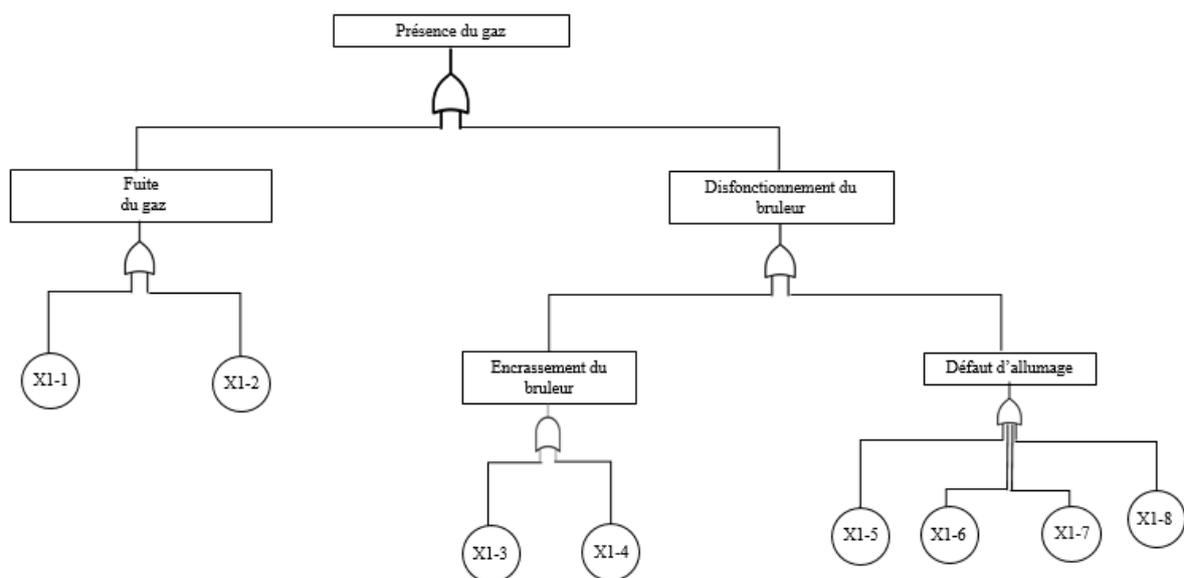


Figure 4-13: Arbre de panne de la présence de gaz

Tableau 4-11: Codification des évènements élémentaires de la présence de gaz

X1-1	Rupture de la conduite
X1-2	Mauvaise connexion des conduites
X1-3	L'accumulation de dépôts de suie, de résidus ou de matières étrangères
X1-4	Manque d'entretien
X1-5	Electrodes d'allumage défectueuses.
X1-6	Une alimentation électrique inadéquate.
X1-7	Des connexions défectueuses.
X1-8	Des problèmes liés à l'allumeur.

### 4.6.1.2 Défaillance du détecteur

Le détecteur de gaz peut être défaillant à cause de la défaillance de son capteur, problème de calibrage ainsi que les défaillances électriques et mécaniques.

La figure 4-15 illustre l’arbre de défaillance du détecteur de gaz et le tableau 4-11 définit les codifications

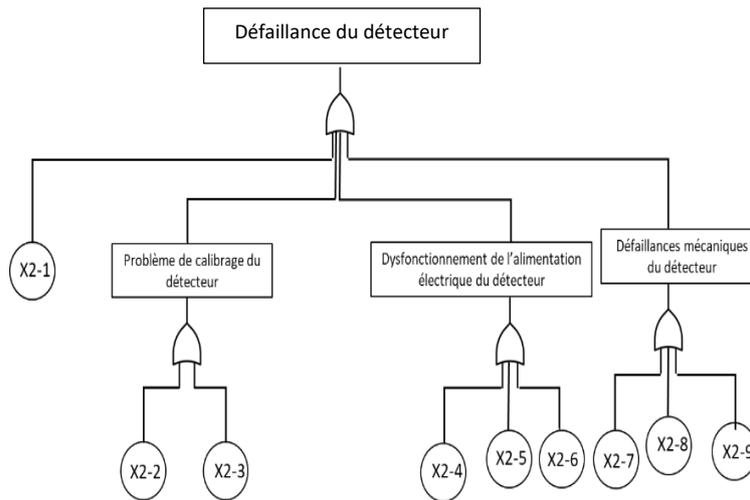


Figure 4-14: Arbre de panne relative au dysfonctionnement du détecteur

Tableau 4-12: Codification des évènements élémentaires relatifs au dysfonctionnement du détecteur

X2-1	Défaillance du capteur
X2-2	Le détecteur n'est pas correctement calibré
X2-3	La calibration n'est pas effectuée aux intervalles recommandés
X2-4	Les surtensions.
X2-5	Les pannes de courant
X2-6	Niveaux de batterie faibles
X2-7	Câbles endommagés.
X2-8	Connecteurs cassés.
X2-9	Alarmes défectueuses

### 4.6.1.3 Présence inhabituelle d’une source d’ignition

La source d’inflammation dans la cabine de séchage peut être présente soit par l’allumage tardif du brûleur ou présence d’une autre source d’étincelle mécanique, électrique ou une décharge électrostatique incomplète

L’arbre de défaillance est illustré dans la figure 4-16

Les codes sont définis dans le tableau 4-12

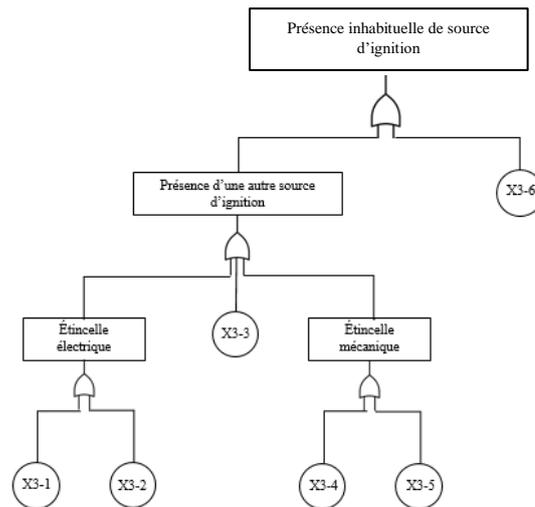


Figure 4-15: Arbre de panne relatif à la présence inhabituelle de source d'ignition

Tableau 4-13: Codification des causes

X3-1	Équipement électrique défectueux.
X3-2	Mauvaise isolation des équipements électriques
X3-3	Décharge électrostatique insuffisante
X3-4	Contacts entre les pièces métalliques
X3-5	Les outils défectueux
X3-6	Allumage tardif du bruleur

#### 4.6.1.4 Dysfonctionnement du système de traitement d'air

Le système de traitement d'air dans le système sec consiste à utiliser des filtres, donc leurs dysfonctionnements ou le dysfonctionnement du système de soufflage va entraîner le non traitement d'air ce qui peut provoquer une aggravation des rejets atmosphériques.

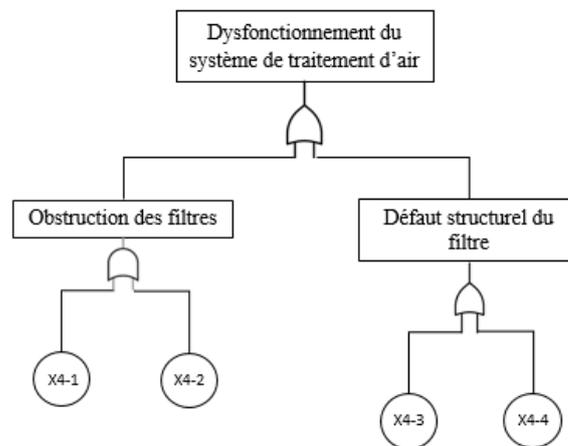


Figure 4-16: Arbre de panne du dysfonctionnement du système de traitement d'air

Tableau 4-14: Codification des événements élémentaires relatifs au dysfonctionnement du système de traitement d'air

X4-1	Accumulation de dépôt et de poussières
X4-2	Absence d'entretien
X4-3	Rupture du filtre
X4-4	Usure du filtre

#### 4.6.2 Application de l'arbre des causes et conséquences

L'arbre des causes et conséquences présenté dans la figure 4-17 montre la combinaison des arbres de défaillances présentés dans les Figure 4-13, Figure 4-14 et Figure 4-15, où nous avons une seule condition et deux conséquences.

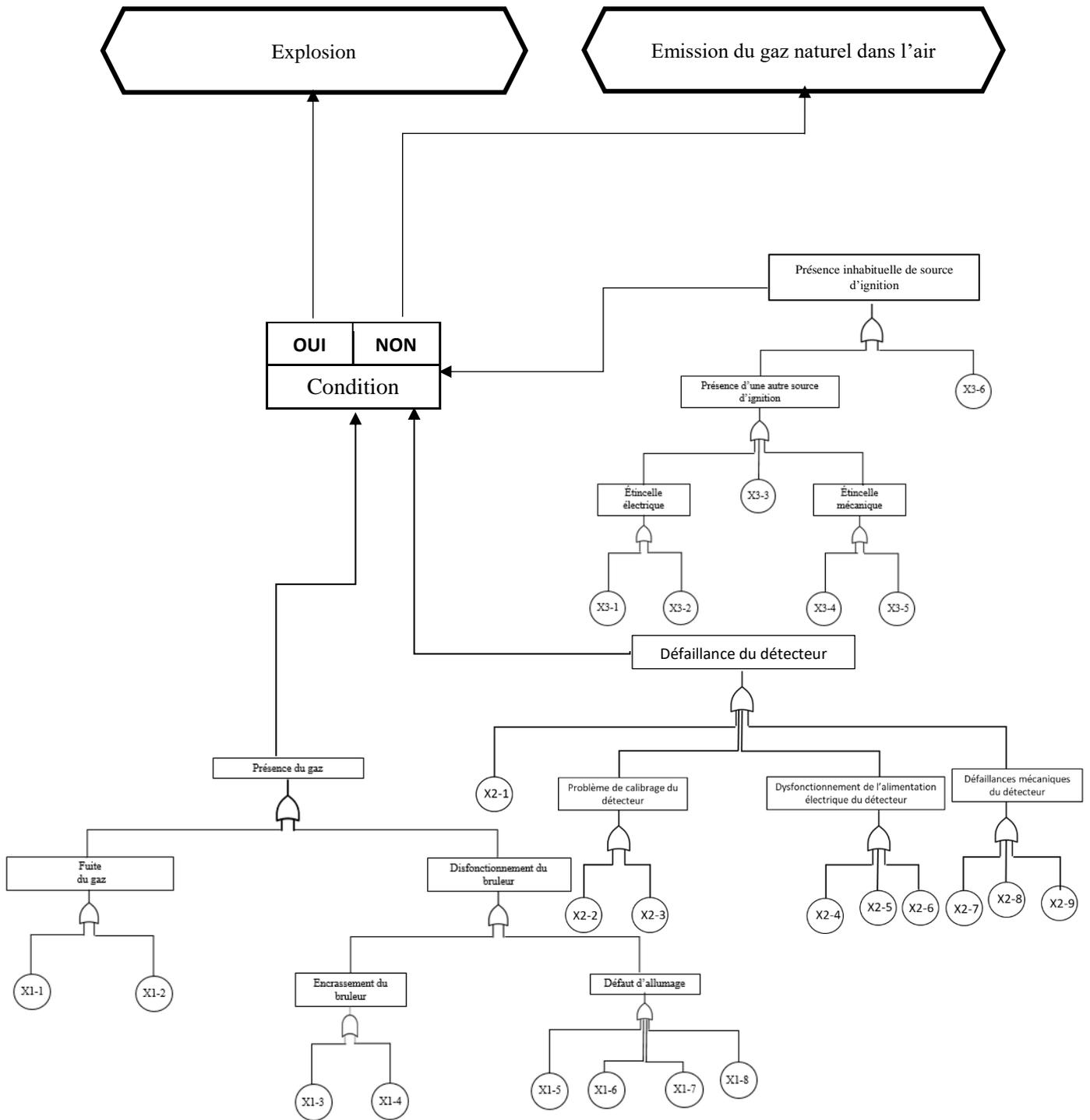


Figure 4-17: Arbre des causes et conséquences de la phase du séchage

**Condition d'occurrence:**

La seule condition dans notre arbre concerne « le domaine d'explosibilité du gaz naturel ».

La cabine de peinture est un milieu confiné, donc, l'applicabilité de cette condition avec les défaillances entraîne l'occurrence d'une explosion.

matière	température	Limite inférieure d'explosibilité	Limite supérieure d'explosibilité
Gaz naturel	25°C	4,9%	14,9%

**4.6.3 L'impact des conséquences sur les catégories d'impact**

La figure 4-18 représente l'impact des conséquences déduits à partir de l'arbre des causes et conséquences sur les cinq catégories d'impact étudiés.

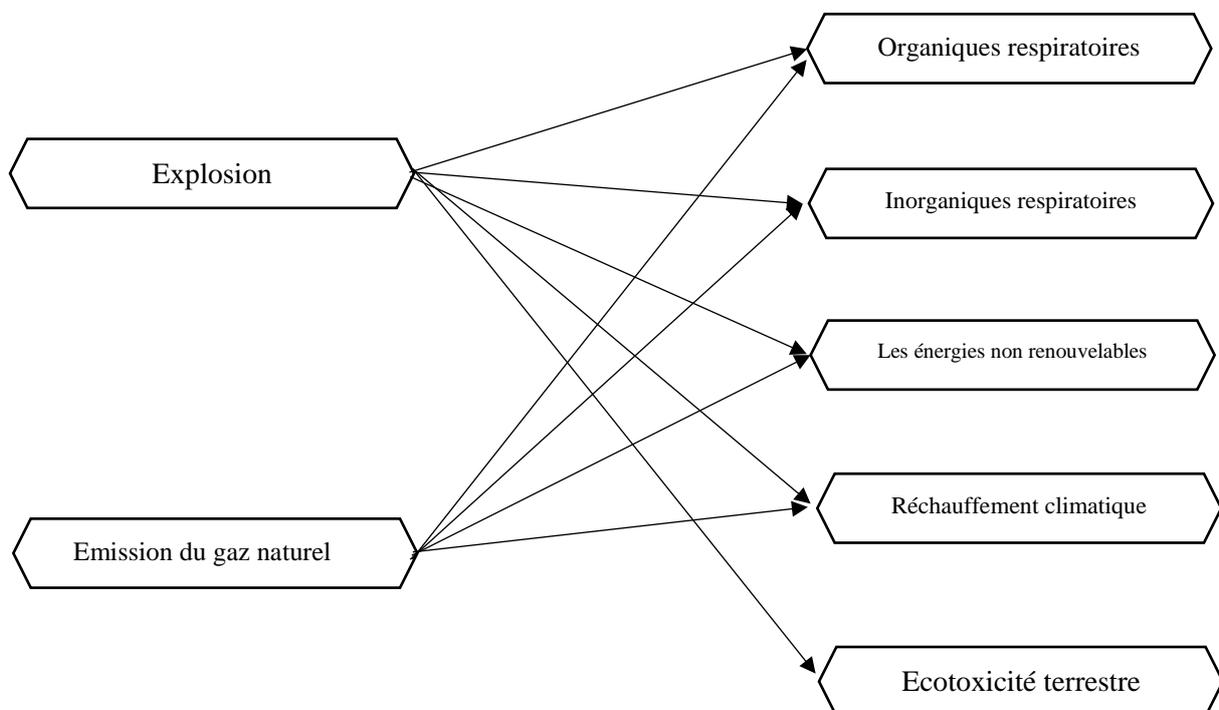


Figure 4-18: Impact des conséquences de l'ACC sur les catégories d'impact étudiés

Nous avons interprété la figure 4-18 dans le tableau 4-15 qui donne en détails les impacts probables des conséquences sur les catégories d'impact.

Tableau 4-15: Impact des conséquences sur les catégories d'impact

	explosion	Pollution atmosphérique
Les énergies non renouvelables	Consommation des énergies non renouvelables pour la récupération des dommages.	Perte d'énergie non renouvelable non utilisée (gaz naturel)
Le réchauffement climatique	L'émission soudaine et concentrée des gaz à effet de serre qui contribuent au réchauffement de la planète en piégeant la chaleur dans l'atmosphère.	Emission du gaz naturel dans l'air
Effets respiratoires inorganique	Libération de gaz toxiques et les particules fines (PM) qui peuvent être inhalées profondément dans le système respiratoire causant des dommages.	Aggravation des impacts des substances inorganiques sur le système respiratoire dans les conditions normales
Effets respiratoire organique	Libération de composés organiques volatils (COV) qui peuvent irriter le système respiratoire, provoquant des symptômes tels que la toux, la respiration sifflante et l'essoufflement. Formation de polluants secondaires tels que l'ozone et les particules fines (PM <sub>2,5</sub> ) qui peuvent aggraver d'avantage les problèmes respiratoires.	Aggravation des impacts des substance organiques sur le système respiratoire dans les conditions normales
L'écotoxicité terrestre	Émissions des PM qui peuvent se disperser dans l'air et se déposer sur le sol, entraînant une contamination de l'environnement et potentiellement affectant la faune, la flore et les organismes vivants. Emissions des gaz à effet de serre qui peuvent se propager dans l'air et être inhalés par les organismes vivants. Perturbation des écosystèmes terrestres par les ondes de choc, la chaleur intense et les projections de matériaux qui peuvent détruire ou endommager les habitats naturels, perturbant ainsi la biodiversité et les équilibres écologiques.	/

#### **4.6.4 Recommandation**

##### **Pour la présence du gaz et étincelle :**

- Mettre en place des détecteurs de gaz et assurer leurs calibrages réguliers ;
- Assurer le nettoyage et entretien réguliers du bruleur ;
- Inspection régulière de l'état du sécheur et des équipements électriques.

##### **Formations et sensibilisation :**

- Formation et sensibilisation des opérateurs sur les zones ATEX ;
- formation sur l'habilitation électrique.

A travers ce chapitre nous avons pu identifier les dysfonctionnements que les systèmes critiques du processus optimal (le système sec) pour l'environnement peuvent faire face durant leurs fonctionnements.

L'outil arbre des causes et conséquences nous a permis de combiner les dysfonctionnements probables avec des conditions liées aux seuils minimaux d'exposition et les domaines d'explosibilité des matières utilisées pour l'occurrence des conséquences.

Les conséquences déduites à partir de l'arbre des causes et conséquences ont des impacts plus ou moins importants sur les Cinq (05) catégories d'impact étudiés mais leurs plus important effet c'est l'aggravation de l'impact des produits dans les conditions normales.

D'après le registre des accidents, le système sec fonctionne en toute sécurité jusqu'à présent. Cependant, nous avons proposé des recommandations à suivre afin d'éviter toute sorte de dysfonctionnement qui pourrait avoir un impact négatif significatif sur l'environnement.

## Conclusion générale

En conclusion, il est crucial de reconnaître que la pollution générée par l'industrie automobile ne se limite pas seulement à la phase d'utilisation des véhicules, mais également à toutes les étapes de production, en particulier la phase de peinture. Cette étape est souvent négligée, mais elle représente une source significative de pollution environnementale.

L'entreprise SAPPL-Mercedes Benz, consciente de la valeur de l'environnement, a prouvé son professionnalisme en cherchant toujours à utiliser les moyens les plus optimaux vis-à-vis l'environnement. Cette entreprise est dotée de deux processus de peinture des véhicules un est humide et l'autre est sec. Ces systèmes comprennent 4 phases qui sont : préparation de véhicule, préparation de la peinture, application de la peinture et traitement des rejets et enfin le Séchage.

L'objectif principal de ce projet était d'assister l'entreprise dans l'identification du processus le plus optimal sur le plan environnemental, tout en fournissant des recommandations pour gérer les risques associés afin de maintenir et même réduire efficacement son impact environnemental, tout en préservant sa performance globale en matière de productivité.

Ce projet est partagé en deux parties, Dans la première partie nous avons appliqué les étapes de la démarche de l'analyse du cycle de vie (ACV), qui sont la détermination de l'objectif et champs d'application, la réalisation de l'inventaire, l'évaluation des résultats d'inventaire et l'interprétation respectivement, sur les deux processus de peinture sec et humide et nous avons pu conclure que le système sec génère moins d'impact, avec une différence de 8 mpt, sur les cinq catégories d'impact choisis qui sont : le réchauffement climatique, l'utilisation des ressources, organiques respiratoires, inorganiques respiratoires et écotoxicité terrestre.

A travers le logiciel SIMAPRO nous avons constaté que parmi les phases du processus optimal, deux sont critiques, c'est-à-dire, elles ont un taux de contribution dans l'impact total élevé. Ces phases sont l'application de la peinture et le Séchage.

Cela nous a conduit à la deuxième partie de notre projet où nous avons appliqué des outils pour trouver des moyens pour une meilleure maîtrise du processus sec. Ces outils sont la décomposition SADT qui nous a permis de mieux détailler le processus afin de déterminer les équipements utilisés, les dysfonctionnements qui peuvent apparaître et leurs effets sous forme d'une analyse de modes de défaillances et leurs effets (AMDE). Ensuite nous avons schématisé les résultats du tableau de l'AMDE sous forme d'arbres de défaillance (ADD) qualitatives. Le

dernier outil était l'arbre des causes et conséquences qui nous a permis de combiner les arbres de défaillances (ADD) avec des conditions pour avoir les conséquences.

Les conséquences déduites à partir de l'arbre des causes et conséquences ont un impact plus ou moins important sur les catégories d'impact étudiées. Ces conséquences sont : explosion, rejets atmosphériques et toxicité de l'atmosphère à l'intérieur des cabines. Nous avons fini cette partie du projet en donnant quelques recommandations que l'entreprise SAPPL-Mercedes Benz doit prendre en considération pour une meilleure maîtrise du système.

La pollution générée par l'industrie automobile pendant la phase de production, en particulier, la phase de peinture, ne peut être ignorée. Des efforts significatifs doivent être déployés pour adopter des technologies plus propres et les maîtriser, améliorer la gestion des déchets et sensibiliser les acteurs de l'industrie.

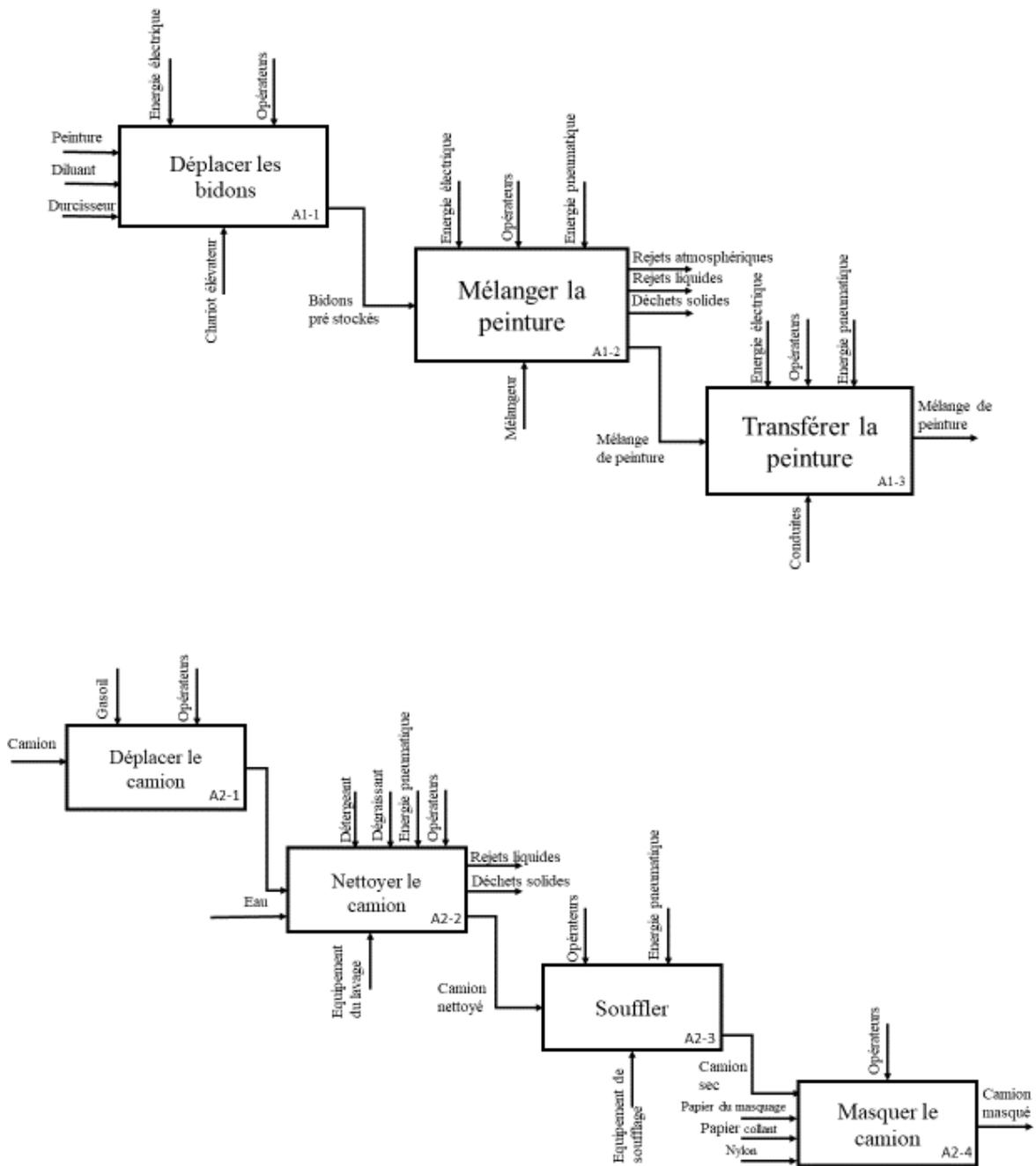
## Références bibliographiques

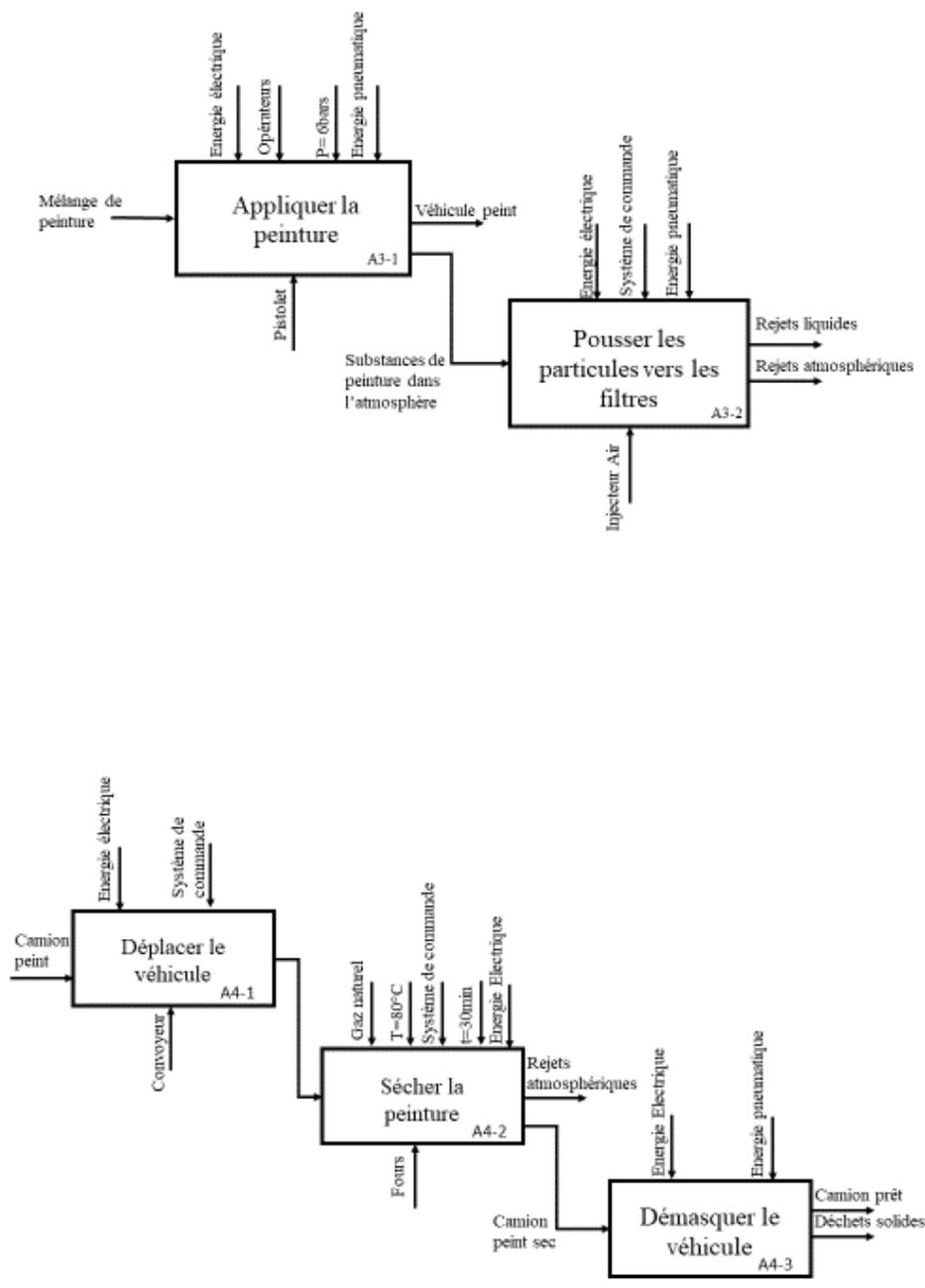
- [1] M. A. Bornarel, Usines Berliet Afrique à Rouiba (Alger), 1959, p13-16.
- [2] Documents internes de l'entreprise SNVI.
- [3] J.L Rivera, T. Rayes-corillo, A framework for environmental and energy analysis of the automobile painting process, 2014, 171-175.
- [4] Documents internes de l'entreprise SAPPL-Mercedes Benz.
- [5] S. Berkat, Industrie automobile : tout savoir sur les régimes CKD, SKD et CBU, consulté le 22/03/2023, Disponible sur <https://dzmotion.dz/>
- [6] FILTRATION TECHNOLOGIES, consulté le 03/03/2023, Disponible sur : <https://products.freudenberg-filter.com/en/detail/8719/paint-mist-arrestors/edrizzi-vario-fine-medium-and-coarse/>
- [7] Isofilter, consulté le 03/03/2023, Disponible sur : <https://www.isofilter.fr/produit/rouleau-ou-panneau-de-media-filtrant-en-fibre-de-verre/>
- [8] PLASTECHPLUS, Le but des études environnementales, consulté le 20/02/2023, disponible sur : <http://www.plastechplus.ca/>
- [9] N.T Rabhaoui, Bilan des Emissions de gaz à effet de serre selon la méthode Bilan carbon , 2013.
- [10] ISO 14040, « Management environnemental – Analyse du cycle de vie - principes et carte », 2006.
- [11] O. Cenric, H. Rechberger, Material flow analysis with software STAN, 2008
- [12] S. Sidler, Manuel EIE, 2009.
- [13] D.Vose, Risk Analysis a quantitative guide, 2008, p7-8.
- [14] DKrypton, Cycle de vie des panneaux solaires au silicium cristallin, disponible sur : [https://d-krypton.fr/index.php/site\\_content/item/720-cycle-vie-panneau-solaire](https://d-krypton.fr/index.php/site_content/item/720-cycle-vie-panneau-solaire)
- [15] M. Belkhir, K. Louahab, H. Bahloul, N. Dellala, L. Samar, S.Bougherara, « guide pratique de la mise en place de la démarche de l'Analyse du cycle de vie selon la norme ISO 14040 , 14044 », CALEC reseau Algerien d'economie circulaire

- [16] ISO 14044, Management environnemental — Analyse du cycle de vie — Exigences et lignes directrices, 2006.
- [17] O. Jolliet, M. Saadé, P. Crettaz, S. Shakedet. G. Soucy , Environmental life cycle assessment, 2015,
- [18] B.V. Babu, Life Cycle Inventory Analysis (LCIA), 2006, p 12- 25.
- [19] M.Z Mainschild, R K rosenbaum, R.I Olsen, Life Cycle Inventory Analysis, LCA theory and practice, 2018, p171-194
- [20] T.A Bicalho, « Les limites de l’ACV, étude de la soutenabilité d’un Biodiesel issu de l’huile de palme brésilienne », 2013,
- [21] E Meijer, Midpoint and endpoint methods give different levels of detail, consulté le 15/03/2023, disponible sur: <https://pre-sustainability.com/articles/consider-your-audience-when-doing-lca/>
- [22] M.Z. Hauschild, A.Bonou S.I. Olsen, Life Cycle Interpretation, LCA theory and practice, 2018, p 323- 325
- [23] UVED, Analyse fonctionnelle, consulté le 04/04/2023, Disponible sur : [http://stockage.univ-valenciennes.fr/EcoPEM/BoiteK/co/K3\\_P.html](http://stockage.univ-valenciennes.fr/EcoPEM/BoiteK/co/K3_P.html)
- [24] ISO 31010, « Gestion des risques – Techniques d’évaluation des risques », 11/2009
- [25] IEC 61025, « Analyse par arbre de panne (APP) », 12-2006
- [26] Enno Ruijters, Marielle Stoelinga, “Fault Tree Analysis: A survey of the state-of-the-art in modeling, analysis and tools”.
- [27] European organization for the safety of air navigation, “fault tree analysis (FTA) Guidance material”.

# ANNEXES

ANNEXE A:  
Decomposition SADT





## ANNEXE B :

Rapports d'inventaire du  
processus de peinture sec

Réalisé par: BENHASSIR Chaima Youstra				date de réalisation : 20/04/2023		
Identification du processus élémentaire: Préparation de peinture				Site objet du compte rendu : SAPPL-MB		
Période : 3 mois						
Description du processus élémentaire : la préparation du mélange ce fait dans une salle spéciale et consiste à mélanger le durcisseur la peinture et le diluant						
Type de flux		Matière	Unité	Quantité	Description des méthodes d'échantillonnage	Origine
Entrants	Matière première	Peinture acrylique	Kg	21	calculé à partir du compteur de niveau	compteur de niveau
		Diluant	Kg	7		compteur de niveau
		durcisseur	Kg	3		compteur de niveau
	Energie électrique	Sortie du moteur du ventilateur d'alimentation	Kw	2,2	Fiche technique du HVAC	Fournisseur
		Sortie du moteur EF	kw	2,2		Fournisseur
		Capacité de chauffage	kcal/h	30000		Fournisseur
		Capacité de refroidissement	kcal/h	40000		Fournisseur
	gaz	Gaz naturel	m <sup>3</sup> /h	20		fournisseur
Sortants	rejets atmosphériques	X	X	X	X	X

Réalisé par: BENHASSIR Chaima Yousra				date de réalisation : 29/04/2023		
Identification du processus élémentaire: Préparation de véhicule				Site objet du compte rendu : SAPPL-MB		
Période : 03 mois						
Description du processus élémentaire : La préparation du véhicule consiste à nettoyer ce dernier et le masquer afin qu'il soit prêt pour la phase d'application de peinture						
Type de flux		Matière	Unité	Quantité	Description des méthodes d'échantillonnage	Origine
Entrants	Consommation d'eau	Eau	l	600	calculé	Karcher
	masquage	papier masquage	m	35	mesurer avec un ruban métrique	Fournisseur
		papiers collant	m	60		
		Nylon	m	20		
Détergeant	Savon liquide	l	1,5	Présence lors de l'opération		
Sortants	Déchets solides	chiffons	p		3	
Sortants	paramètres	MES	mg/l	8	Bilan des rejets liquides	laboratoire
		DCO		130		
		DBO5		3		
		Indice de phénol		0.1		
		hydrocarbures totaux		18		
		cuivre		0.1		
		plomb		0.2		
		Nickel		0.2		
		Zinc		0.5		
		fer		9		

Réalisé par: BENHASSIR Chaima Yousra				date de réalisation: 29/04/2023		
Identification du processus élémentaire: Application de peinture				Site objet du compte rendu : SAPPL-MB		
Période : 3 mois						
Description du processus élémentaire : L'application de peinture sur le véhicule se fait par pulvérisation en utilisant des pistolets						
Type de flux	Matière	Unité	Quantité	Description des méthodes d'échantillonnage	Origine	
Entrants	Matière première	peinture	g	5000	calculé a partir du compteur de niveau	compteur de niveau
		diluant	g	40		compteur de niveau
		durcisseur	g	800		compteur de niveau
	Energie électrique	luminosité	watt	14*4*80	fiches techniques	Fournisseur
		Capacité de chauffage	Kcal/h	76000		Fournisseur
		Capacité de refroidissement	Kcal/h	105000		Fournisseur
		Moteurs	kw	2*22		Fournisseur
		Sortie du moteur du ventilateur d'alimentation	Kw	60		Fournisseur
		vanne	kw	1,5		Fournisseur
		Sortie du moteur EF	kw	74		Fournisseur
Sortant	Matériel	Bilan des rejets atmosphériques	X	X	X	X

Réalisé par: BENHASSIR Chaima Yousra				date de réalisation: 29/04/2023		
Identification du processus élémentaire: Séchage de la peinture				Site objet du compte rendu : SAPPL-MB		
Période : 3mois						
Description du processus élémentaire : L'opération du séchage consiste à appliquer la chaleur par convection pour assécher les véhicules						
Type de flux		Matière	Unité	Quantité	Description des méthodes d'échantillonnage	Origine
Entrants	Energie électrique	moteur	kw	1.1	Fiches techniques	Fournisseur
				2*2		
		moteur	kw	2		Fournisseur
		Moteur convoyeur	kw	7,5		Fournisseur
		Bruleur	kw	580		Fournisseur
		portes électriques	kw	2*0,37		Fournisseur
		gaz naturel	m <sup>3</sup> /h	25	Fournisseur	
Sortants	rejets atmosphériques	X	X	X	X	X

## ANNEXE C :

Rapports d'inventaire du processus de  
peinture humide

Réalisé par: BENHASSIR Chaima Yousra				date de réalisation : 20/04/2023		
Identification du processus élémentaire: Préparation de peinture				Site objet du compte rendu : SAPPL-MB		
Période : 3 mois						
Description du processus élémentaire : la préparation du mélange ce fait dans une salle spéciale et consiste à mélanger le durcisseur la peinture et le diluant						
Type de flux		Matière	Unité	Quantité	Description des méthodes d'échantillonnage	Origine
Entrants	Matière première	Peinture acrylique	Kg	21	calculé à partir des bidons	Fournisseur
		Diluant	Kg	7		Fournisseur
		durcisseur	Kg	3		Fournisseur
Sortants	rejets atmosphériques	X	X	X	X	X

Réalisé par: BENHASSIR Chaima Yousra				date de réalisation : 29/04/2023		
Identification du processus élémentaire: Préparation de véhicule				Site objet du compte rendu : SAPPL-MB		
Période : 03 mois						
Description du processus élémentaire : La préparation du véhicule consiste à nettoyer ce dernier et le masquer afin qu'il soit prêt pour la phase d'application de peinture						
Type de flux		Matière	Unité	Quantité	Description des méthodes d'échantillonnage	Origine
Entrants	Consommation d'eau	Eau	l	600	calculé	Karcher
	masquage	papier masquage	m	35	mesurer avec un ruban métrique	Fournisseur
		papiers collant	m	60		
		Nylon	m	20		
Détergeant	Savon liquide	l	1,5	Présence lors de l'opération		
Sortants	Déchets solides	chiffons	p			3
Sortants	paramètres	MES	mg/l	8	Bilan des rejets liquides	laboratoire
		DCO		130		
		DBO5		3		
		Indice de phénol		0.1		
		hydrocarbures totaux		18		
		cuivre		0.1		
		plomb		0.2		
		Nickel		0.2		
		Zinc		0.5		
		fer		9		

Réalisé par: BENHASSIR Chaima Youstra				date de réalisation : 29/04/2023		
Identification du processus élémentaire: Application de la peinture				Site objet du compte rendu : SAPPL-MB		
Période : 03 mois						
Description du processus élémentaire : L'application de peinture sur le véhicule se fait par pulvérisation en utilisant des pistolets						
Type de flux		Matière	Unité	Quantité	Description des méthodes d'échantillonnage	Origine
Entrants	Matière première	peinture	g	5000	pesage	fournisseur
		diluant	g	685,74		
		durcisseur	g	714		
	Electricité	Pompe centrifuge	w	450*5	Fiche technique	
		Pompe volumétrique	w	55		
		Pompe doseuse	w	250*3		
		Pompe péristaltique	w	300		
		electroagitateur	kw	30*2		
		Electrovanne	w	20*5		
		Moteur pont racleur	kw	15		
		Pompe à boue cuve	kw	22		
	produits du traitement	acide sulfurique	g	3600	calculé à partir des documents internes	
		coagulant	g	5420		
lait de chaux		g	1800			
Consommation d'eau	eau	litre	208,33		Barrage	
Sortant	Rejets liquides	MES	mg/l	13	Bilan des rejets liquides	laboratoire
		DCO		80		
		DBO5		5		
		indice de phénol		0.1		
		hydrocarbures totaux		5		
		cuivre		0.1		
		plomb		0.2		
		nickel		0.2		
		zinc		0.3		
		fer		0.2		

Réalisé par: BENHASSIR Chaima Yousra				date de réalisation: 29/04/2023		
Identification du processus élémentaire: Séchage de la peinture				Site objet du compte rendu : SAPPL-MB		
Période : 3 mois						
Description du processus élémentaire : L'opération du séchage consiste à appliquer la chaleur par convection pour assécher les véhicules						
Type de flux		Matière	Unité	Quantité	Description des méthodes d'échantillonnage	Origine
Entrants	Énergie électrique	Groupe d'air	kw	92	calculé à partir des fiches techniques	fournisseur
		Bruleurs	kcal/h	1250000		
		ventilateur	kw	55 * 2		
		pompe	kw	7.5 * 2		
			kw	26		
		Lampes	kw	6*3,9		
	Gaz	gaz naturel	m <sup>3</sup> /h	45		
Sortants	rejets atmosphériques	X	X	X	X	