



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
Ecole Nationale Polytechnique

**sanofi**

Département : Génie des Procédés et Environnement

Entreprise : SANOFI

## Mémoire de fin d'études

Pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'État en Génie des Procédés et Environnement

---

# Amélioration de la durabilité des filtres dans les centrales de traitement d'air dans l'industrie pharmaceutique

---

**Nessrine Mounia HABANI**

*Présenté et Soutenu le 11 juillet 2024, Devant les membres du jury :*

<b>Président</b>	M. Abdelmalek CHERGUI	Professeur, ENP
<b>Promoteur</b>	M. Yacine KERCHICH	Professeur, ENP
<b>Examineur</b>	M. Ammar SELATNIA	Professeur, ENP





المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
Ecole Nationale Polytechnique

sanofi

Département : Génie des Procédés et Environnement  
Entreprise : SANOFI

## Mémoire de fin d'études

Pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'État en Génie des Procédés et Environnement

---

# Amélioration de la durabilité des filtres dans les centrales de traitement d'air dans l'industrie pharmaceutique

---

Nessrine Mounia HABANI

*Présenté et Soutenu le 11 juillet 2024, Devant les membres du jury :*

<b>Président</b>	M. Abdelmalek CHERGUI	Professeur, ENP
<b>Promoteur</b>	M. Yacine KERCHICH	Professeur, ENP
<b>Examineur</b>	M. Ammar SELATNIA	Professeur, ENP

# Dédicace

“

*À toutes celles et ceux qui m'ont soutenue et encouragée,*

*Votre aide et votre présence ont été inestimables,*

*Merci du fond du cœur.*

”

*- Nessrine*

# Remerciements

Je tiens à remercier chaleureusement **M. Abdelmalek Chergui** et **M. Ammar Selatnia** d'avoir accepté de juger et d'évaluer ce travail. Leur expertise a été une source de motivation et d'inspiration, et je leur suis profondément reconnaissant pour leur temps et leurs conseils.

Je souhaite également exprimer ma profonde gratitude à mon encadrant, **M. Yacine Kerchich**, pour son soutien inestimable et ses conseils avisés tout au long de ce projet. Sa guidance et son encouragement ont été essentiels pour la réalisation de ce mémoire.

Je tiens également à remercier toute l'équipe de SANOFI, en particulier à **M. Nazim Bendaas** et **M. Walid Delmi**. Leur soutien constant et leur aide précieuse m'ont permis non seulement de mener à bien mon stage, mais également de favoriser mon développement professionnel. Grâce à leur encadrement et à leur confiance, j'ai pu progresser et m'épanouir dans un environnement professionnel enrichissant. Je les remercie de m'avoir donné la chance de réaliser ce travail dans des conditions exceptionnelles.

Enfin, je tiens à exprimer ma sincère reconnaissance à toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont apporté leur contribution, directe ou indirecte à l'élaboration de ce mémoire. Je pense particulièrement à **M. Younes FERRAH** et à **M. Riad SOULAMI** pour leur aide précieuse avec le logiciel ANSYS. Leur disponibilité et leurs compétences ont été cruciales pour la réussite de ce projet.

## ملخص

كان الهدف الرئيسي من هذا العمل هو تصميم ومحاكاة نظام معالجة أولي لتقليل الحمل الجزيئي وإطالة عمر المرشحات في وحدة معالجة الهواء في صناعة الأدوية لشركة سانوفي، و هذا مع الحفاظ على جودة الهواء وسلامة الموظفين. تم اختيار مرشح سيكلوني لهذه المعالجة الأولية. تتراوح أحجام الجزيئات المستهدفة للإزالة بين 1 و10 ميكرومتر. كانت إعدادات تصميم المرشح السيكلوني هي معدل تدفق 3500 م<sup>3</sup>/ساعة، ودرجة حرارة 25 درجة مئوية، وكفاءة بنسبة 89%. تم إجراء تصميم وتحسين الترشيح السيكلوني باستخدام برنامج HYSYS وتم تنفيذ محاكاة CFD باستخدام HYSYS Aspen و ANSYS. أظهرت المحاكاة صحة تصميم السيكلون وأظهرت تقليلاً كبيراً للجزيئات التي تصل إلى مرشحات وحدة معالجة الهواء الرئيسية، مما يؤكد فعاليته.

---

### كلمات مفتاحية :

معالجة الهواء، جزيئات، الترشيح، سيكلون ، Aspen Hysys ، Ansys

---

# Abstract

The main objective of this work was to design and simulate a pretreatment system to reduce particle load and extend the lifespan of the air treatment central (CTA) filters at Sanofi's pharmaceutical industry, while maintaining air quality and employee safety. A cyclone filter was chosen for this pretreatment. The targeted particle fractions for removal range between 1 and 10  $\mu\text{m}$ . The design parameters of the cyclone filter were a flow rate of 3500  $\text{m}^3/\text{h}$ , a temperature of 25°C, and an efficiency of 89%. The design and optimization of the cyclone filter were carried out using HYSYS software, and the CFD simulation was performed with Aspen HYSYS and ANSYS. The simulations validated the design of the cyclone and showed a significant reduction in particles reaching the main CTA filters, confirming its effectiveness.

---

**Keywords :** Air treatment, particle, CTA filter, Cyclone, Aspen HYSYS, ANSYS

---

# Résumé

L'objectif principal de ce travail était de dimensionner et simuler un système de pré-traitement pour réduire la charge de particules et prolonger la durée de vie des filtres de la centrale de traitement de l'air (CTA) de l'industrie pharmaceutique Sanofi, tout en maintenant la qualité de l'air et la sécurité des employés. Un filtre cyclonique a été choisi pour ce pré-traitement. Les fractions de particules ciblées pour l'élimination variaient entre 1 et 10  $\mu\text{m}$ . Les paramètres de dimensionnement du filtre cyclonique étaient un débit de 3500  $\text{m}^3/\text{h}$ , une température de 25°C et une efficacité de 89%. La conception et l'optimisation du filtre cyclonique ont été effectuées à l'aide du logiciel HYSYS, et la simulation CFD avec Aspen HYSYS et ANSYS. Les simulations ont validé la conception du cyclone et montré une réduction significative des particules atteignant les filtres de la CTA principale, confirmant son efficacité.

---

## Mots clés :

Traitement d'air, particule, filtre CTA, Cyclone, Aspen HYSYS, ANSYS

---

# Table des matières

Liste des figures

Liste des tableaux

Liste des acronymes

<b>Introduction générale</b> . . . . .	<b>12</b>
<b>1 Présentation de l'Entreprise SANOFI</b> . . . . .	<b>15</b>
1.1 Introduction . . . . .	16
1.2 Présentation du Groupe Sanofi . . . . .	16
1.3 Historique de la Société . . . . .	17
1.4 Sanofi en Algérie . . . . .	17
1.5 L'usine de SIDI ABDELLAH : . . . . .	17
1.5.1 Plan de Masse de l'Usine Sanofi de Sidi Abdellah . . . . .	18
1.5.2 La Fabrication Pharmaceutique à Sidi Abdellah . . . . .	18
1.5.3 Liste des Médicaments Fabriqués . . . . .	18
1.5.4 Flux des Médicaments dans le Processus de Production . . . . .	19
1.5.5 Processus Production de Médicaments . . . . .	20
1.5.6 Processus de Fabrication des Comprimés . . . . .	22
1.5.7 La Gestion des Poudres lors de la Fabrication des Comprimés . . . . .	23
1.6 Formalisation de la Problématique . . . . .	23
<b>2 La Pollution Atmosphérique</b> . . . . .	<b>24</b>
2.1 Introduction . . . . .	25
2.2 Pollution de l'Air . . . . .	25
2.2.1 Source de la Pollution Atmosphérique . . . . .	26
2.2.2 Polluants Atmosphériques . . . . .	26
2.2.3 Classification des Polluants . . . . .	26
2.2.4 Les Polluants Atmosphériques Règlementés . . . . .	26
2.2.5 Les Mécanismes de la Pollution Atmosphérique . . . . .	27
2.2.6 Impact de la Pollution de l'Air . . . . .	29
2.2.7 Pollution Particulaire de l'Air . . . . .	30
2.3 Unités de Traitement de l'Air . . . . .	35
2.3.1 Centrale de Traitement d'Air . . . . .	36
2.3.2 Les Filtre CTA . . . . .	36
2.4 Technologies de Contrôle des Émissions de Particules . . . . .	38
2.5 Le Séparateur Cyclonique . . . . .	39

2.5.1	Principes de Fonctionnement des Cyclones . . . . .	39
2.5.2	Structure et Matériaux d'un Séparateur Cyclonique . . . . .	39
2.5.3	Types de Cyclone . . . . .	40
2.5.4	Options de Configuration : Séries et Parallèles . . . . .	41
2.6	Conclusion . . . . .	42
<b>3</b>	<b>Méthodologie de Conception et de Simulation d'un Cyclone . . . . .</b>	<b>43</b>
3.1	Introduction . . . . .	44
3.2	Méthodologie de Travail . . . . .	44
3.3	Détermination des Conditions de Fonctionnement . . . . .	45
3.4	Identification de l'Efficacité de Séparation Requise . . . . .	45
3.5	Détermination des Dimensions du Cyclone . . . . .	45
3.5.1	Définition de la Simulation . . . . .	45
3.5.2	Les Etapes de Simulation . . . . .	46
3.6	Conception des Composants du Cyclone . . . . .	50
3.7	Réalisation d'une simulation CFD . . . . .	51
3.7.1	Principe de la CFD . . . . .	51
3.7.2	Modèle de turbulence : . . . . .	51
3.7.3	Modèle de la Phase Discrète . . . . .	53
3.7.4	L'Environnement Ansys Workbench . . . . .	53
3.7.5	Le Simulateur Ansys-Fluent . . . . .	53
3.7.6	Principe de Fonctionnement de l'ANSYS . . . . .	54
3.7.7	Méthodologie Détaillée de la Simulation . . . . .	54
3.8	Conclusion . . . . .	57
<b>4</b>	<b>Résultats et Discussion . . . . .</b>	<b>58</b>
4.1	Introduction . . . . .	59
4.2	Analyse des Simulations avec Aspen HYSYS . . . . .	59
4.3	Analyse des Simulations avec ANSYS . . . . .	61
4.3.1	Le Maillage . . . . .	61
4.3.2	La Convergence . . . . .	61
4.3.3	Vitesse Magnitude . . . . .	64
4.3.4	Champs de vitesse radiale . . . . .	65
4.3.5	Champs de vitesse axiale . . . . .	68
4.3.6	Concentration . . . . .	69
4.4	Conclusion . . . . .	72
	<b>Conclusion Générale . . . . .</b>	<b>73</b>
	<b>Bibliographie . . . . .</b>	<b>81</b>
	<b>Annexes . . . . .</b>	<b>81</b>
<b>A</b>	<b>Réglementations environnementales et normes de qualité de l'air en Algérie . . . . .</b>	<b>82</b>
<b>B</b>	<b>Les étapes de la simulation CFD sous ANSYS . . . . .</b>	<b>86</b>

# Table des figures

1.1	Les 5 Entités Globales de Sanofi . . . . .	16
1.2	Plan de Masse de l'Usine . . . . .	18
1.3	Flux de Matières Général . . . . .	20
1.4	Schéma Synoptique de la Ligne de Fabrication Liquide . . . . .	20
1.5	Schéma Synoptique de la Ligne de Fabrication en Sachets . . . . .	21
1.6	Schéma Synoptique de la Ligne de Fabrication des Formes Solides . . . . .	21
1.7	Équipement de Granulation pour la Compression des Comprimés . . . . .	22
2.1	Le Cycle de la Pollution Atmosphérique . . . . .	27
2.2	Comparaison de la Visibilité en Milieu Urbain . . . . .	32
2.3	Trajectoire des Particules dans l'Appareil Respiratoire . . . . .	34
2.4	Structure d'un Séparateur cyclonique . . . . .	40
2.5	Types de Cyclones . . . . .	41
3.1	Démarrage du projet . . . . .	46
3.2	Ajout des composants . . . . .	47
3.3	Sélection du "Fluid Package" . . . . .	48
3.4	Entrée des Données d'Alimentation . . . . .	49
3.5	Configuration du Cyclone . . . . .	50
3.6	Interface du logiciel SOLDWORKS . . . . .	50
3.7	Interface Ansys Workbench . . . . .	53
3.8	Fonctionnement de Base de Fluent . . . . .	54
3.9	Schéma Représentatif du Maillage POLY-HEXCORE . . . . .	55
3.10	Illustration du Maillage avec Couches . . . . .	55
3.11	Interface de fluent Meshing . . . . .	56
4.1	Un Cyclone Unique avec une Efficacité de 89% . . . . .	60
4.2	Quatre cyclones en parallèle avec une efficacité de 95% . . . . .	60
4.3	Résultat de Maillage de Simulation Numérique . . . . .	61
4.4	Évolution de la convergence dans l'analyse du cyclone . . . . .	64
4.5	Contours de vitesse magnitude dans le plan $x=0$ . . . . .	64
4.6	Contours de vitesse magnitude pour différentes positions de $y$ . . . . .	65
4.7	Contours de vitesse magnitude dans le plan $z=0$ . . . . .	65
4.8	Contours du champs de vitesse radiale . . . . .	67
4.9	Contours du champs de vitesse axiale . . . . .	69
4.10	Concentration de particules en coupe longitudinale . . . . .	70
4.11	Concentration de particules en coupe transversale . . . . .	71
4.12	Concentration des particules à l'entrée du cyclone . . . . .	71
4.13	Concentration des particules à la sortie supérieure du cyclone . . . . .	72

4.14	Concentration des particules à la sortie inférieure du cyclone . . . . .	72
A.1	Perspectives relatives à la surveillance de la qualité de l'air . . . . .	83
A.2	Valeurs limites des paramètres de rejets atmosphériques 1 . . . . .	84
A.3	Valeurs limites des paramètres de rejets atmosphériques 2 . . . . .	85
B.1	Les étapes de la simulation CFD sous ANSYS 1 . . . . .	87
B.2	Les étapes de la simulation CFD sous ANSYS 2 . . . . .	88
B.3	Les étapes de la simulation CFD sous ANSYS 3 . . . . .	89
B.4	Les étapes de la simulation CFD sous ANSYS 4 . . . . .	90
B.5	Les étapes de la simulation CFD sous ANSYS 5 . . . . .	91

# Liste des tableaux

1.1	Liste des Médicaments Fabriqués a SAA . . . . .	19
2.1	Normes de Qualité de l’Air en Algérie pour PM . . . . .	35
2.2	Tableau des Valeurs Limites Recommandées par l’Union Européenne [31] . . . . .	35
2.3	Tableau des Valeurs Limites des PM à l’Échelle Mondiale [32] . . . . .	35
2.4	Classification des filtres selon différents niveaux d’efficacité [38] . . . . .	37
2.5	Technologies de Collecte des Particules . . . . .	38
2.6	Tableau d’Efficacité de Collecte du Cyclone [40] . . . . .	41
3.1	Conditions de Fonctionnement du Cyclone . . . . .	45
3.2	Propriétés Physiques de l’air . . . . .	56
3.3	Paramètres des Conditions aux Limites . . . . .	57

# Liste des acronymes

<b>CFD</b>	<i>Computational Fluid Dynamics En Français Mécanique des fluides numérique</i>
<b>CTA</b>	<i>Centrale de traitement d'air</i>
<b>DPM</b>	<i>Modèle de la phase discrète</i>
<b>HVAC</b>	<i>Heating, ventilation and air-conditioning</i>
<b>OCDE</b>	<i>Organisation de coopération et de développement économiques</i>
<b>OMS</b>	<i>Organisation mondiale de la santé</i>
<b>PM</b>	<i>Particulate Matter</i>
<b>RSM</b>	<i>Reynolds Stress Model</i>
<b>SAA</b>	<i>Sanofi Algérie</i>

La pollution de l'air est un problème environnemental majeur qui affecte la santé humaine et les écosystèmes. Elle est causée par une variété de sources, y compris les émissions industrielles, les transports, les activités agricoles et les incendies de forêt. Les industries pharmaceutiques, en particulier, contribuent de manière significative à la pollution atmosphérique par le rejet de poussières médicamenteuses et d'autres particules fines qui sont générées au cours de divers processus de fabrication, tels que la granulation, le mélange, le conditionnement et le transport des matières premières. Ces poussières peuvent contenir des substances actives et des excipients, ce qui pose des risques pour la santé des travailleurs et pour l'environnement [1].

Les systèmes de ventilation et de filtration sont utilisés pour capturer et contrôler ces émissions. Cependant, les filtres dans les systèmes de traitement de l'air peuvent se colmater rapidement en raison de la nature fine et adhésive des particules pharmaceutiques. Le colmatage des filtres réduit leur efficacité et augmente la résistance au flux d'air, nécessitant des remplacements fréquents et coûteux [2].

Le colmatage des filtres est un problème courant dans les systèmes de traitement de l'air des installations pharmaceutiques. Lorsque les filtres se bouchent, ils perdent leur capacité à capturer les particules, ce qui peut entraîner une augmentation des émissions atmosphériques et une diminution de la qualité de l'air intérieur. De plus, le colmatage des filtres augmente la consommation d'énergie des systèmes de ventilation, car des pressions plus élevées sont nécessaires pour maintenir le débit d'air souhaité [3].

Le remplacement fréquent des filtres est une solution, mais elle est coûteuse. Les filtres à haute efficacité pour les particules (HEPA) et les filtres à charbon actif, couramment utilisés dans l'industrie pharmaceutique, sont particulièrement coûteux en raison de leur complexité et de leurs matériaux spécialisés [4]. En outre, le processus de remplacement des filtres peut interrompre la production, entraînant des pertes économiques supplémentaires. Plusieurs stratégies peuvent être adoptées pour prolonger la durée de vie des filtres dans les systèmes de traitement de l'air. L'une des approches consiste à prétraiter l'air avant qu'il n'atteigne les filtres principaux. Les pré-filtres peuvent capturer les particules plus grosses et prolonger la durée de vie des filtres HEPA et des filtres à charbon actif [5].

L'amélioration de l'entretien et de la maintenance des systèmes de filtration est également essentielle. Des inspections régulières et le nettoyage des filtres peuvent aider à prévenir le colmatage et à maintenir l'efficacité des systèmes de traitement de l'air [6]. Les séparateurs cycloniques, ou cyclones, sont des dispositifs de séparation des particules qui utilisent la force centrifuge pour éliminer les particules solides de l'air. Les cyclones sont couramment utilisés dans diverses industries pour le dépoussiérage en raison de leur simplicité, de leur faible coût et de leur efficacité pour capturer les particules de taille moyenne à grande [7]. Dans le contexte des émissions pharmaceutiques, les cyclones peuvent être utilisés comme une étape de prétraitement pour réduire la charge de poussière sur les filtres principaux. En éliminant une partie significative des particules avant qu'elles n'atteignent les filtres HEPA ou les filtres à charbon actif, les cyclones peuvent prolonger la

durée de vie de ces filtres et réduire les coûts de maintenance [8].

Les cyclones peuvent être conçus et optimisés pour des applications spécifiques. Par exemple, des études ont montré que l'ajout de dispositifs de vanne et de régulation de débit peut améliorer l'efficacité de séparation des cyclones et réduire les pertes de charge [9]. De plus, des configurations multicycloniques, où plusieurs cyclones sont utilisés en parallèle, peuvent augmenter la capacité de traitement et l'efficacité globale du système [10].

Dans ce contexte, nous avons réalisé dans ce travail une étude sur un système de prétraitement de type cyclonique pour le proposer à l'entreprise pharmaceutique SANOFI. Cette étude vise à réduire les émissions de poussières et à prolonger la durée de vie des filtres dans leurs installations de traitement de l'air. Le système de prétraitement cyclonique permet de capturer une grande partie des particules avant qu'elles n'atteignent les filtres principaux, réduisant ainsi le colmatage et les coûts associés au remplacement fréquent des filtres. En proposant cette solution, nous espérons contribuer à une gestion plus efficace des émissions de poussières et à une réduction des impacts environnementaux de l'industrie pharmaceutique.

# Chapitre 1

## Présentation de l'Entreprise SANOFI

### 1.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons présenter l'entreprise Sanofi Algérie, ses activités et son rôle dans l'industrie pharmaceutique mondiale. Nous commencerons par une présentation générale du groupe Sanofi, son historique et son implantation en Algérie, notamment à travers l'usine de Sidi Abdellah. Nous détaillerons ensuite les médicaments produits par Sanofi Algérie ainsi que leurs procédés de fabrication, en soulignant l'importance des installations de traitement de l'air pour maintenir des conditions de production optimales. Enfin, nous aborderons la problématique liée à la gestion des filtres dans ces installations, une question cruciale pour l'efficacité et la durabilité des processus de production, et nous proposerons des solutions pour optimiser les coûts et prolonger la durée de vie des filtres.

### 1.2 Présentation du Groupe Sanofi

Sanofi, l'entreprise biopharmaceutique transnationale française, occupe une place de leader mondial dans le secteur de la santé en participant activement à toutes les étapes du processus de développement, de la recherche initiale à la fabrication et à la commercialisation des produits de santé, y compris des médicaments destinés à prévenir, diagnostiquer, traiter ou guérir des maladies. Avec une présence mondiale étendue, Sanofi emploie plus de 150 000 personnes réparties dans plus de 110 pays, à la fois sur les marchés traditionnels tels que les États-Unis et la France, ainsi que dans les régions émergentes comme l'Afrique et le Moyen-Orient, et possède plus de 112 sites industriels dans 40 pays. Cette équipe diversifiée et talentueuse est dédiée à l'innovation et à l'excellence dans la recherche médicale, ce qui lui permet de maintenir sa position de leader dans l'industrie pharmaceutique.

L'engagement de Sanofi envers l'innovation et la qualité se reflète dans son portefeuille de produits variés, qui comprend cinq aires thérapeutiques présentées dans la figure 1.1. Cette diversité de produits témoigne de l'engagement de Sanofi à répondre aux besoins médicaux non satisfaits et à améliorer la qualité de vie des patients à travers le monde.



FIG. 1.1 : Les 5 Entités Globales de Sanofi

Sanofi investit massivement dans la recherche et le développement de nouvelles thérapies et solutions de santé, avec des équipes dédiées à l'exploration de nouvelles avenues de traitement et à la découverte de médicaments novateurs. Ces investissements soutenus visent à relever les défis médicaux les plus pressants et à apporter des solutions innovantes aux patients du monde entier.

Grâce à sa présence mondiale et à ses partenariats stratégiques avec des organisations de santé, des institutions académiques et des gouvernements, Sanofi contribue activement à

façonner l'avenir de la santé publique. En collaborant avec ces partenaires, Sanofi vise à promouvoir l'accès aux soins de santé, à améliorer les normes de sécurité et d'éthique dans l'industrie pharmaceutique et à relever les défis mondiaux de santé publique

### 1.3 Historique de la Société

Fondée en 1973 sous le nom d'Omnium financier Aquitaine pour l'hygiène et la santé, Sanofi est le fruit de fusions et d'acquisitions avec divers laboratoires et entreprises pharmaceutiques historiques. Ces partenariats stratégiques, incluant la fusion avec Aventis et l'acquisition de Genzyme en 2011, ont renforcé sa position sur le marché. Ils ont été le résultat de collaborations avec des entreprises telles que les Laboratoires Midy, Dausse, Robert & Carrière, Wittmann et Poulenc Jeune, Rorer, Hoescht, et l'Institut Biologique Mérieux, devenu Sanofi Pasteur. Ces alliances ont permis à Sanofi de développer des traitements innovants pour répondre aux besoins de santé mondiaux. Donec fermentum dui fermentum maximus rutrum.

### 1.4 Sanofi en Algérie

Sanofi Algérie domine le marché pharmaceutique du pays, avec une forte présence dans des secteurs clés comme l'oncologie, le système nerveux central, la thrombose, la cardiologie, le diabète, la médecine interne, et les vaccins de Sanofi Pasteur. Fondée en 1991, la filiale emploie près de 900 collaborateurs répartis dans les domaines y afférant à l'industrie pharmaceutique en particulier : le Médical, le Règlementaire, Le Marketing, la Supply-chain ainsi que la production. Cette dernière est assurée par deux usines de production, la première, située à Oued Smar, est spécialisée dans les formes sèches, et la deuxième à Sidi Abdallah, Rahmania, spécialisée dans les formes liquides, solides et sachets, permettant à Sanofi Algérie de proposer localement 50le marché, dont Triatec®, Amarel®, Rovamycine®, Doliprane®, Sectral®, Rhinathiol®, Maxilase®, Maalox® et Biocaliptol®

### 1.5 L'usine de SIDI ABDELLAH :

Le complexe de Sidi Abdallah représente le plus important site de production de médicaments de Sanofi en Afrique et au Moyen-Orient, occupant une superficie de 6,6 hectares, dont 3,5 hectares sont dédiés aux bâtiments, ce qui représente un investissement majeur de près de 10,6 milliards de dinars (environ 85 millions d'euros).

Ce site est divisé en deux entités interconnectées cruciales pour les activités de SAA. Les Affaires Industrielles (IA) sont responsables du développement, de la production et du conditionnement des médicaments. Les Affaires Commerciales, quant à elles, se chargent de la vente et de la distribution des produits Sanofi sur tout le territoire algérien.

### 1.5.1 Plan de Masse de l'Usine Sanofi de Sidi Abdellah

La figure 1.2 illustre la disposition et la structure de l'usine de Sidi Abdellah, détaillant ses différentes zones et installations.

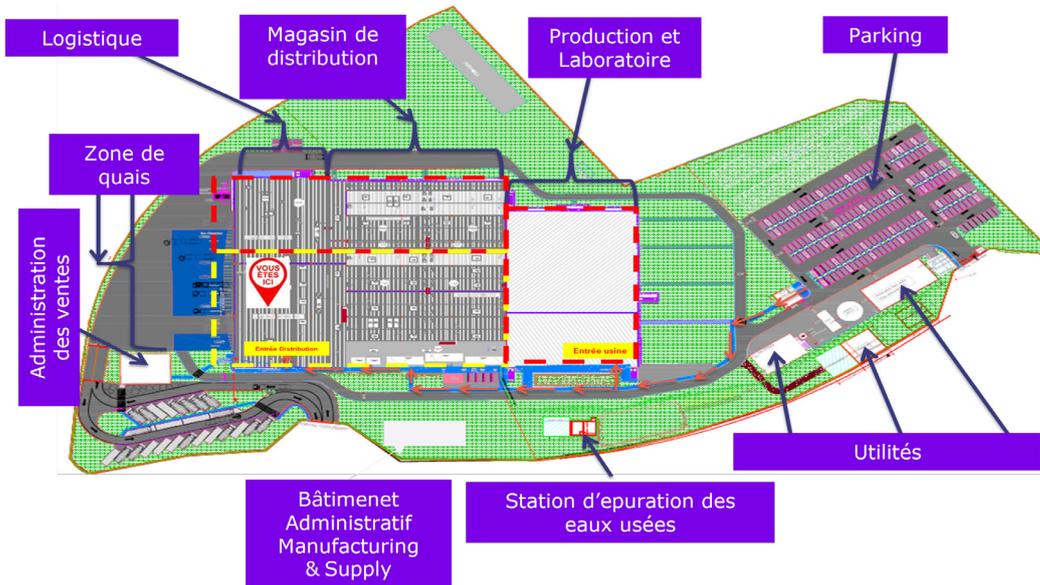


FIG. 1.2 : Plan de Masse de l'Usine

### 1.5.2 La Fabrication Pharmaceutique à Sidi Abdellah

Comme évoqué précédemment, l'usine de Sidi Abdellah de SAA est engagée dans la production de trois formes de médicaments : liquides, sachets et comprimés.

### 1.5.3 Liste des Médicaments Fabriqués

La liste des médicaments produits à l'usine de Sidi Abdellah est présentée dans le tableau 1.1 :

TAB. 1.1 : Liste des Médicaments Fabriqués a SAA

Forme Liquide	Forme Sachet	Forme Comprimé
Dépakine 200mg/ml	Aspegic 100mg	Amarel 1mg
Doliprane 2,4%	Aspegic 250mg	Amarel 2mg
Maalox 250ml	Aspegic 500mg	Amarel 3mg
RHA 5% 125ml	Aspegic 1000mg	Amarel 4mg
Toplexil 33mg	Doliprane 500mg	Aprovasc 300mg/5mg
RHE 6,25g/100ml	Doliprane 1000mg	Aprovel 300mg/150mg
		CoAprovel 150mg/12.5 mg
		CoAprovel 300mg/12.5 mg
		CoAprovel 150mg/25 mg
		Dépakine chrono 500mg
		Doliprane 500mg
		Doliprane 1000mg
		Plavix 75mg
		Profenid 100mg
		Solian 200mg
		Telfast 120mg
		Triatec 1,25mg
		Triatec 10mg
		Tritazide 5mg/12.5 mg
		Tritazide 10mg/25 mg
		Zemiglo 50mg

#### 1.5.4 Flux des Médicaments dans le Processus de Production

La figure 1.3 illustre le parcours des médicaments depuis l'approvisionnement en matières premières jusqu'à leur distribution finale,

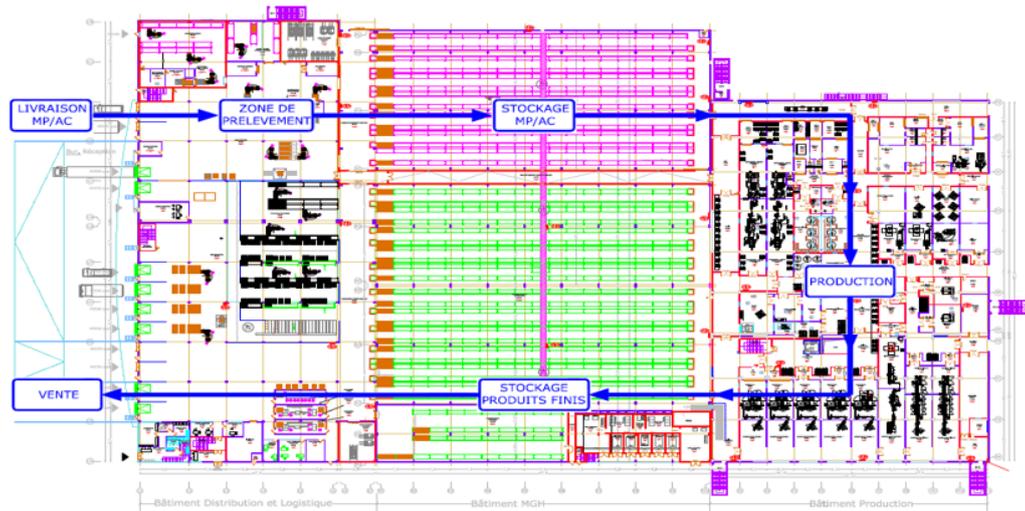


FIG. 1.3 : Flux de Matières Général

### 1.5.5 Processus Production de Médicaments

Les schémas 1.4, 1.5 et 1.6 représentent respectivement les processus de fabrication des médicaments sous forme liquide, en sachets et en comprimés.

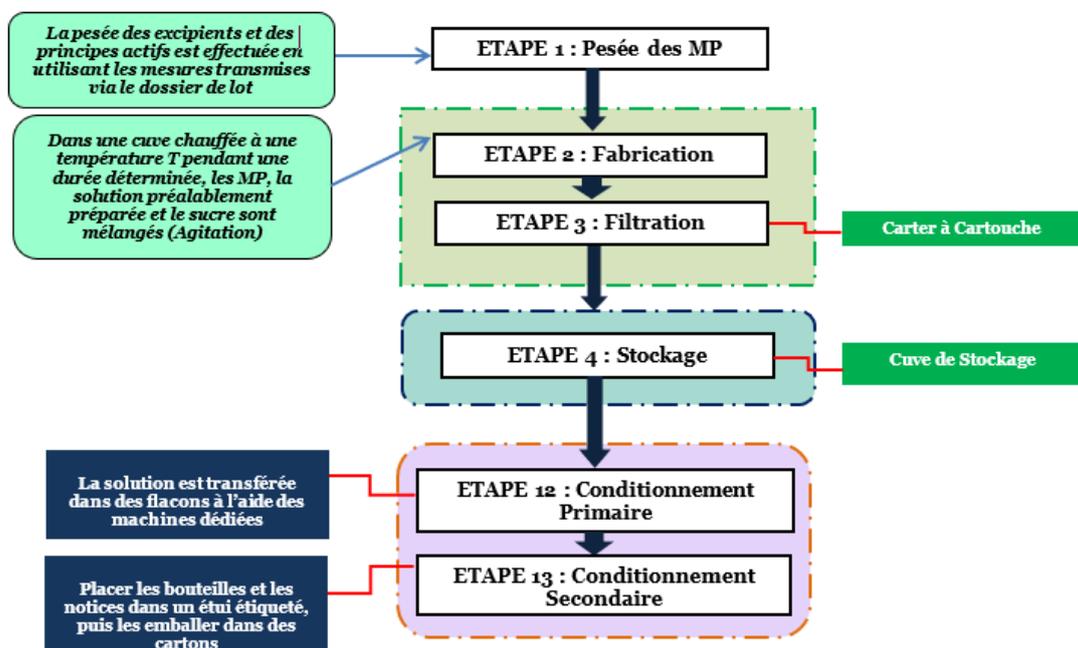


FIG. 1.4 : Schéma Synoptique de la Ligne de Fabrication Liquide

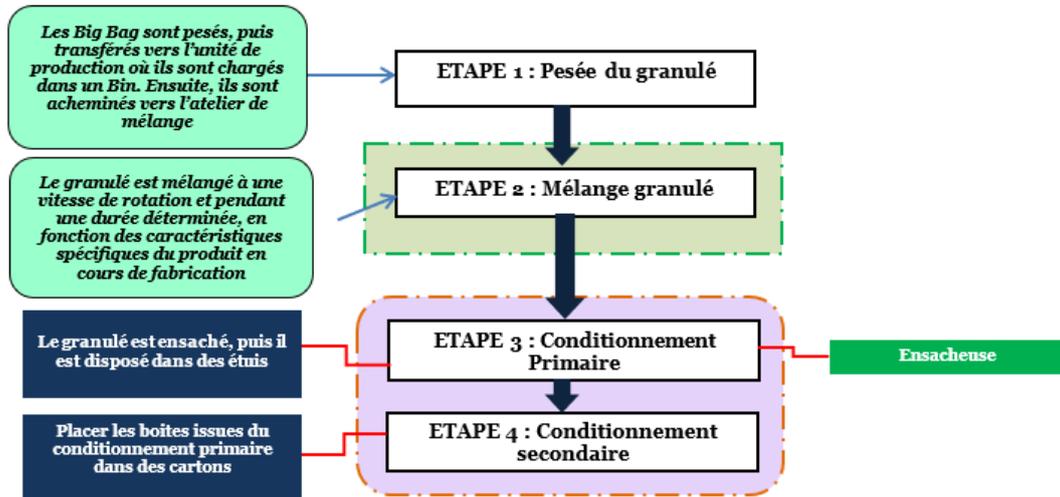


FIG. 1.5 : Schéma Synoptique de la Ligne de Fabrication en Sachets

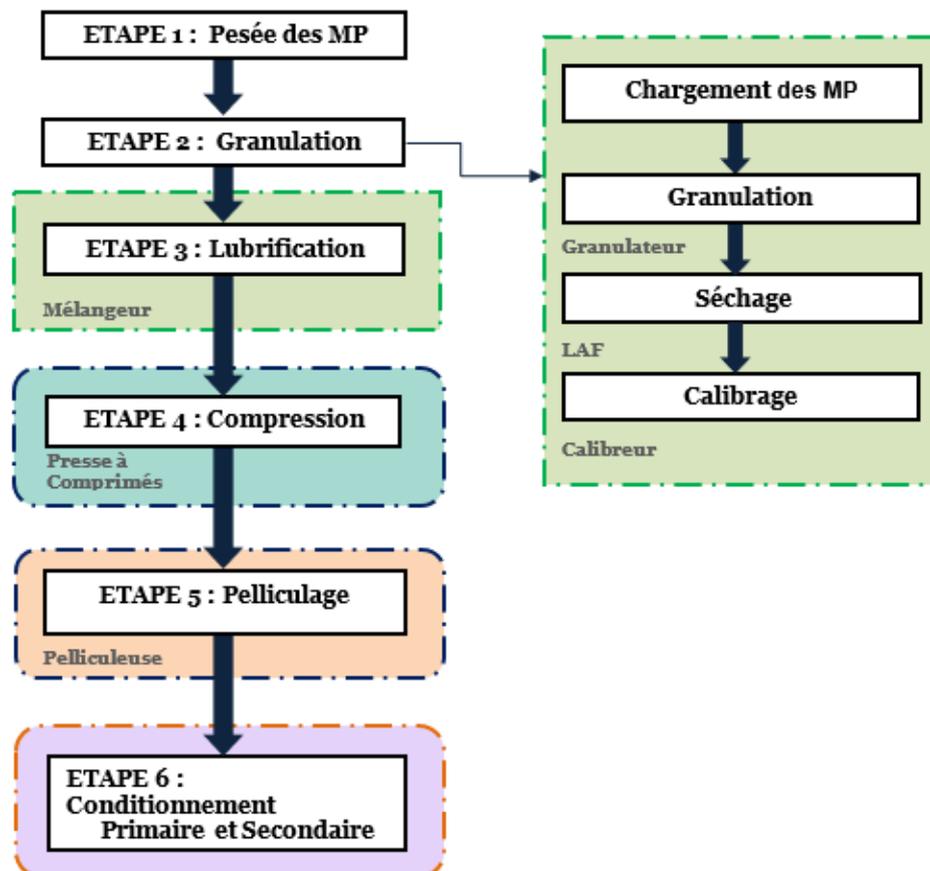


FIG. 1.6 : Schéma Synoptique de la Ligne de Fabrication des Formes Solides

### 1.5.6 Processus de Fabrication des Comprimés

Le processus de fabrication des comprimés chez Sanofi débute par la pesée précise des matières premières, incluant les excipients et les principes actifs, effectuée dans des cabines de pesée dédiées. L'entreprise dispose de deux cabines distinctes : l'une dédiée aux multi-produits et l'autre spécifiquement réservée au Doliprane en raison de son volume de production élevé. Ensuite, vient l'étape de la granulation, où les matières premières sont chargées dans des bacs appropriés, puis déchargées dans l'équipement de granulation, qui comprend le granulateur, le LAF (Lit d'Air Fluidisé), et le calibreur. Dans le granulateur, les différentes poudres subissent une granulation humide et sont transformées en grains, qui sont ensuite séchés dans le LAF. Après séchage, les grains sont calibrés pour assurer une homogénéité parfaite. Ce processus est employé pour les multiproduits, tandis que pour le Doliprane, tant la granulation que le séchage se font exclusivement dans le LAF. Le mélange final est ensuite introduit dans un lubrificateur où il est agité et combiné avec d'autres matières sèches.



FIG. 1.7 : Équipement de Granulation pour la Compression des Comprimés

Après le processus de lubrification, la phase de compression commence. Cette étape est assurée par des machines de compression, où la poudre est transformée en comprimés bruts. Sanofi dispose de quatre presses à comprimés pour cette étape, garantissant ainsi une production efficace et continue.

La phase suivante est le pelliculage, qui consiste à appliquer une couche externe protectrice sur certains produits afin de masquer le goût amer du médicament et d'améliorer sa dissolution dans l'estomac. Cette étape n'est réalisée que pour certains médicaments spécifiques ; par exemple, le Doliprane n'est pas soumis à cette phase.

Enfin, la dernière étape est le conditionnement, divisé en deux parties : le conditionnement primaire, où les comprimés sont mis sous blister à l'aide de machines dédiées, et le conditionnement secondaire, où les blisters, les notices et les boîtes sont regroupés dans un emballage final étiqueté et mis dans des cartons, prêts à être expédiés.

### 1.5.7 La Gestion des Poudres lors de la Fabrication des Comprimés

Durant le processus de fabrication des comprimés, divers problèmes peuvent survenir en lien avec la gestion des poudres, notamment la contamination croisée et la dispersion des particules dans l'air, qui peuvent compromettre la qualité du produit final et affecter la qualité de l'air ambiant. Cette dégradation de l'air, tant à l'intérieur qu'à l'extérieur des sites de production, est devenue un sujet de grave préoccupation en raison de ses effets néfastes sur la santé humaine, l'environnement, et le climat local et mondial. C'est pour cette raison que des réglementations strictes ont été imposées, obligeant les entreprises à adopter des mesures de contrôle rigoureuses pour minimiser les risques associés à la dispersion des particules et à la contamination. Pour se conformer à ces exigences réglementaires, Sanofi a mis en place des centrales de traitement de l'air sophistiquées. Ces systèmes filtrent et purifient l'air des zones de production, réduisant ainsi la présence de contaminants potentiellement nocifs et assurant un environnement de travail qui respecte les normes de sécurité et de qualité les plus élevées. Ces efforts continus pour améliorer les systèmes de traitement de l'air démontrent l'engagement de Sanofi à protéger ses employés, ses consommateurs ainsi que l'environnement.

## 1.6 Formalisation de la Problématique

Sanofi, un leader dans le secteur pharmaceutique, rencontre un problème majeur avec les filtres de ses installations de traitement de l'air qui se colmatent rapidement à cause de la grande quantité de poudres utilisées. Ce problème entraîne la nécessité de remplacer fréquemment ces filtres, générant des coûts opérationnels significatifs en raison du prix élevé de ces derniers.

Pour cela, je vais entreprendre de développer des solutions visant à optimiser les coûts et à prolonger la durée de vie de ces filtres.

## Chapitre 2

# La Pollution Atmosphérique

### 2.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous explorons en profondeur la pollution atmosphérique, un problème environnemental majeur aux multiples conséquences sur la santé humaine et les écosystèmes. Nous débuterons par une présentation générale de la pollution de l'air avant de nous concentrer sur la pollution particulaire, particulièrement pertinente pour notre étude. Ensuite, nous présenterons la méthode utilisée par Sanofi pour traiter l'air avant de le rejeter, à savoir les centrales de traitement d'air (CTA). Enfin, nous aborderons d'autres technologies de traitement de l'air afin de comprendre comment elles peuvent contribuer à réduire la pollution atmosphérique.

### 2.2 Pollution de l'Air

La pollution atmosphérique est un phénomène connu de tout temps. L'Organisation de coopération et de développement économiques (OCDE) a défini la pollution comme « l'introduction, directe ou indirecte par l'homme, de substances ou d'énergie dans l'atmosphère qui entraîne des conséquences préjudiciables de nature à mettre en danger la santé humaine, à nuire aux ressources biologiques et aux systèmes écologiques, à porter atteinte aux agréments ou à gêner les autres utilisations légitimes de l'environnement » [11].

En Algérie, la définition légale de la pollution atmosphérique est encadrée par l'article **44** de la Loi N° **03-10** du **19 juillet 2003** relative à la protection de l'environnement dans le cadre du développement durable. Selon cette loi, constitue une pollution atmosphérique toute introduction dans l'atmosphère et les espaces clos de substances susceptibles de :

- Mettre en danger la santé humaine ;
- Influencer les changements climatiques ou appauvrir la couche d'ozone ;
- Nuire aux ressources biologiques et aux écosystèmes ;
- Compromettre la sécurité publique ;
- Causer des désagréments à la population ;
- Provoquer des nuisances olfactives ;
- Porter préjudice à la production agricole et aux produits agro-alimentaires ;
- Altérer les constructions et porter atteinte au caractère des sites ;
- Détériorer les biens matériels (Annexe A).

### 2.2.1 Source de la Pollution Atmosphérique

La pollution atmosphérique est principalement issue de deux sources : anthropiques et naturelles. Les sources anthropiques, liées aux activités humaines, comprennent le transport, l'industrie, l'agriculture et les tâches ménagères. Ces activités, qui se sont intensifiées depuis la première révolution industrielle, contribuent de manière significative à la dégradation de la qualité de l'air. Par ailleurs, les sources naturelles telles que les éruptions volcaniques, les poussières et les émissions de composés organiques volatils par les plantes ont également un impact notable sur l'atmosphère [12].

### 2.2.2 Polluants Atmosphériques

Les polluants atmosphériques, localisés principalement dans les niveaux inférieurs de l'atmosphère, essentiellement dans la troposphère et la stratosphère [13], se manifestent sous trois formes principales :

- **Gazeuse** : se distingue par l'apparition de nouveaux gaz ou l'augmentation de la concentration de certains gaz existants.
- **Solide** : constituée de poussières de différentes tailles qui restent en suspension dans l'air.
- **Liquide (moins fréquente)** : comprend les aérosols et le brouillard [11].

Bien que la concentration de ces polluants soit généralement très faible, généralement exprimée en microgrammes par mètre cube d'air ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) ou en parties par million (ppm) pour les particules, ils représentent des risques significatifs pour l'environnement et la santé des êtres vivants [13].

### 2.2.3 Classification des Polluants

Les polluants atmosphériques se classent en deux grandes catégories bien distinctes : les polluants primaires et les polluants secondaires.

- **Polluants primaires** : Ce sont des polluants émis directement à la source [14], tels que le monoxyde de carbone (CO), souvent émis par les moteurs à combustion [15].
- **Polluants secondaires** : Ces polluants ne sont pas directement émis dans l'atmosphère, mais résultent de transformations physico-chimiques des polluants primaires pendant leur séjour dans l'air [14]. Un exemple typique est l'ozone, qui se forme à partir des oxydes d'azote et des composés organiques volatils (COV) sous l'effet du rayonnement solaire [16].

### 2.2.4 Les Polluants Atmosphériques Règlementés

La liste des polluants atmosphériques est longue. Cependant, certains sont spécifiquement surveillés parce qu'ils sont caractéristiques de certains types de pollution et sont

bien connus pour leurs effets nocifs sur la santé et l'environnement. Ces polluants sont regroupés sous le terme « indicateurs de pollution atmosphérique ». Parmi eux, six ont été spécialement sélectionnés pour une surveillance accrue :

- Le dioxyde de soufre ( $\text{SO}_2$ ) ;
- Les particules ou poussières en suspension ;
- Les oxydes d'azote ( $\text{NO}_x$ ) ;
- L'ozone ( $\text{O}_3$ ) ;
- Le monoxyde de carbone ( $\text{CO}$ ) ;
- Les composés organiques volatils (COV) .

### 2.2.5 Les Mécanismes de la Pollution Atmosphérique

La pollution atmosphérique représente un défi complexe, principalement à cause de la diversité des polluants qui peuvent se trouver dans l'air. Après leur émission dans l'atmosphère, ces substances sont transportées et dispersées par les courants aériens. Avec le temps, elles finissent par retomber sur le sol, ce qui va causer sa pollution [11].

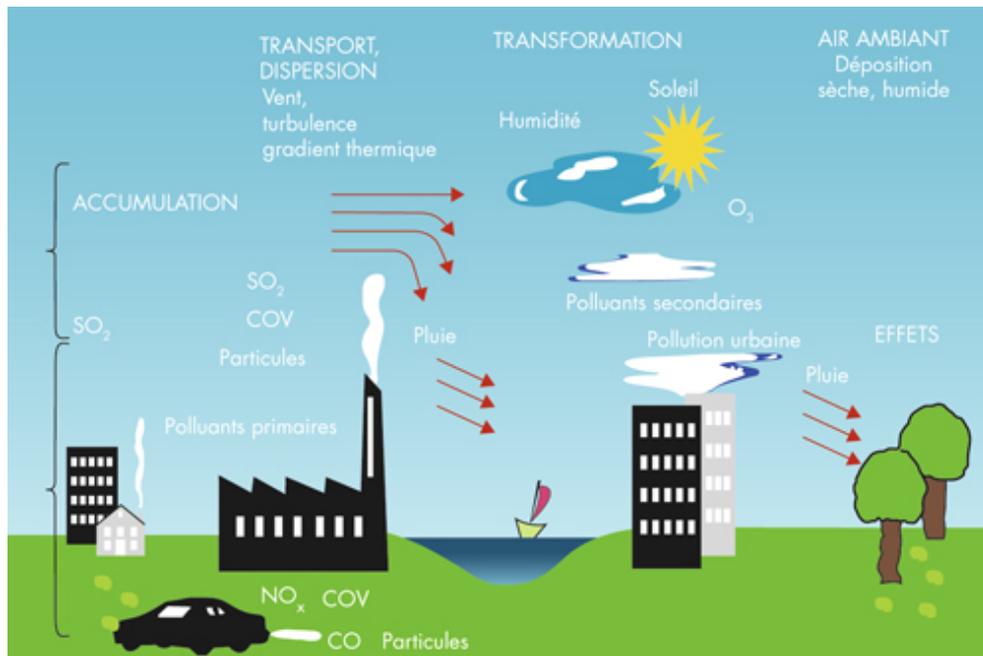


FIG. 2.1 : Le Cycle de la Pollution Atmosphérique

### 2.2.5.1 Transport et Dispersion

Les polluants atmosphériques, principalement issus de sources anthropiques, sont émis directement dans l'air où ils subissent le transport et la dispersion sous l'influence de deux types principaux de facteurs : conditions météorologiques et topographie locale [11].

- **Conditions météorologiques :** Ces facteurs jouent un rôle crucial dans la manière dont les polluants se dispersent et incluent :
  - **Vent :** Un élément crucial qui affecte la dispersion par sa vitesse et sa direction. La vitesse du vent, qui augmente avec l'altitude, facilite la dispersion, tandis que des vents faibles peuvent provoquer une accumulation locale de polluants ;
  - **Pression atmosphérique :** En situation de basses pressions, la forte turbulence atmosphérique favorise une bonne dispersion. Cependant, des situations anticycloniques avec hautes pressions limitent la dispersion et favorisent l'accumulation des polluants ;
  - **Stabilité atmosphérique :** Dépendante de la température de l'air. Une atmosphère stable limite le mouvement vertical des polluants, pouvant mener des pics de pollution, tandis qu'une atmosphère instable favorise une meilleure dispersion [17].
- **Topographie locale :** La configuration géographique de la région peut également influencer la dispersion des polluants. L'altitude, le relief et la proximité des cours d'eau ou de la mer sont des éléments clés qui modifient la manière dont les polluants se dispersent dans l'atmosphère.

Ces interactions entre conditions météorologiques et topographie sont essentielles pour comprendre les dynamiques de la pollution atmosphérique et son impact environnemental [11].

### 2.2.5.2 Transformation Chimique

Pendant leur dispersion, les polluants subissent des réactions chimiques complexes qui peuvent transformer les polluants primaires en polluants secondaires, tels que l'ozone (O<sub>3</sub>) et certains composés organiques volatils (COV) [11].

### 2.2.5.3 Déposition

Dépôt, déposition, retombée de polluants, ou retombée atmosphérique sont des termes qui correspondent mieux aux divers modes de transfert des polluants primaires ou secondaires de l'air vers le sol. Ces expressions mettent en lumière la diversité des dépôts qui ne se limitent pas seulement aux phénomènes humides, car dans le langage courant, les phénomènes de retombée de la pollution atmosphérique sont souvent et à tort appelés « pluies acides ». Ce terme est peu approprié, reflétant une compréhension limitée des dépôts de polluants, qui sont en réalité beaucoup plus variés et ne se produisent pas uniquement sous forme humide. Ils peuvent être classifiés en deux types :

- **Retombées Humides** : Ces dépôts proviennent de précipitations telles que la pluie, la neige, la bruine, le brouillard, la brume ou le givre. Ils résultent soit de la solubilisation de polluants gazeux au sein de gouttelettes d'eau formées autour de fines particules, soit de l'entraînement mécanique de particules durant des événements pluvieux.
- **Retombées Sèches** : Ils comprennent des gaz et diverses particules solides (poussières, aérosols, etc.), où les molécules de gaz et les particules sont transférées directement depuis l'atmosphère jusqu'à la surface du sol ou de l'eau. Les particules impliquées sont généralement de taille inférieure à 2 micromètres [18].

### 2.2.6 Impact de la Pollution de l'Air

- Sur l'environnement :
  - **Altérations visibles chez les plantes** : jaunissement des feuilles, réduction du nombre de fleurs, décollement de l'épiderme foliaire [18].
  - **Acidification des lacs et des sols** : nuit aux écosystèmes aquatiques et forestiers, lessive les nutriments essentiels du sol, intensifie la sécheresse, compromet la santé des forêts [19].
  - **Eutrophisation** : provoque des anoxies qui entraînent la mort massive d'organismes aquatiques et des perturbations des cycles biogéochimiques.
  - **Effet de serre** : risque planétaire, réchauffement de la Terre, hausse du niveau des mers, surprises climatiques, effets collatéraux.
  - **Trou dans la couche d'ozone** [18].
- Sur la santé humaine :
  - **Problème respiratoire** : diminution de la fonction respiratoire, développement de cancers pulmonaires, effets délétères sur la croissance pulmonaire chez les enfants.
  - **Problème cardiovasculaire** : augmentation des risques de maladies cardiovasculaires, décès.
  - **Problème nerveux central** : retard de développement psychomoteur chez les enfants.
  - **Effets psychiatriques** : risques accrus de troubles psychiatriques.
  - **Effets métaboliques** : augmentation de la prévalence du diabète, obésité.
  - **Autres organes** : potentiels effets sur les yeux, le foie, le tractus intestinal et les reins [20].
- Sur le bâti :
  - **Corrosion chimique** : causée par la réaction entre le dioxyde de soufre, d'autres polluants gazeux, et l'humidité, cette interaction attaque les matériaux de construction tels que la pierre et le métal, entraînant une dégradation structurelle des façades.

- **Noircissement des surfaces** : provoqué par les cendres issues de la combustion, ces particules s'accumulent sur les façades, affectant leur esthétique et compromettant leur intégrité structurelle.
- **Formation de croûtes** : les particules accumulées sur les zones abritées des pluies forment avec le temps des croûtes noires gypseuses, difficiles à enlever et nuisibles aux surfaces sous-jacentes.
- **Érosion différentielle** : Les zones exposées à des pluies intenses subissent un lessivage, entraînant une érosion par dissolution des matériaux. Cela modifie le profil et la structure des façades.
- **Développement de micro-organismes** : La combinaison de l'humidité et des nutriments apportés par les polluants favorise le développement de mousses, lichens, et autres micro-organismes sur les surfaces des bâtiments, entraînant une biodétérioration.
- **Impact sur la durabilité des matériaux** : L'interaction continue des polluants avec différents substrats de construction (ciment, mortier, béton, verre) réduit considérablement la durabilité et la résistance des matériaux, nécessitant des réparations fréquentes et coûteuses.
- **Altération des propriétés physiques et esthétiques** : Les effets cumulatifs de la pollution altèrent la couleur, la texture, et la forme des éléments architecturaux, compromettant ainsi l'héritage esthétique et culturel des zones urbaines [11]

### 2.2.7 Pollution Particulaire de l'Air

Une particule est souvent, et à tort, appelée un aérosol. En réalité, un aérosol est un mélange d'un gaz, généralement de l'air, et de particules fines en suspension [22]. Ces particules, généralement de formes irrégulières [23], sont donc l'un des constituants d'un aérosol, mais elles ne sont pas des aérosols en elles-mêmes [22].

Ces petites parties de matière, connues sous le nom de particules en suspension (PM), peuvent être liquides et/ou solides et constituent un mélange diversifié de substances. Leur capacité à rester en suspension dans l'air dépend de leur vitesse de chute, qui doit être très faible [24].

#### 2.2.7.1 Composition Chimique des PM

Les particules atmosphériques constituent un mélange complexe et hétérogène composé de substances organiques, inorganiques et biologiques. La partie inorganique est principalement formée d'espèces hydrosolubles telles que les ions sulfate, nitrate, ammonium, chlorure, sodium, divers métaux, métalloïdes et le carbone inorganique. Les composés organiques volatils (COV) et les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) dominent la fraction organique. La fraction biologique inclut souvent des bactéries, des champignons, des fragments végétaux et des pollens. La composition chimique des particules peut varier selon le lieu, les conditions météorologiques et climatiques (comme la

direction et la vitesse du vent, la température, la saison) ainsi que les sources d'émission environnantes [25].

### 2.2.7.2 Origine des Particules

Les émissions naturelles de particules, évaluées à environ 2105 millions de tonnes par an au niveau mondial, proviennent de diverses sources telles que l'abrasion des sols due à l'érosion, les embruns marins, les éruptions volcaniques, les feux de forêt, et divers phénomènes biologiques. D'autre part, les émissions anthropiques, qui totalisent environ 408 millions de tonnes par an mondialement, sont principalement issues de la combustion, des processus industriels, des transports, et des incinérateurs de déchets [26].

### 2.2.7.3 Classification

Considérées comme une catégorie de polluants atmosphériques, les particules se divisent en plusieurs sous-classes, qui s'étendent jusqu'à un diamètre de 100 $\mu\text{m}$ . Chaque sous-classe, composée de diverses compositions chimiques, représente un vecteur significatif de pollution [24]. Selon leur diamètre aérodynamique, on peut les classer en plusieurs catégories principales, chacune ayant des implications distinctes pour la santé et l'environnement [25] :

- **Les fumées noires** : Constituées de particules carbonées, principalement des suies issues des processus de combustion. Leur diamètre varie entre 0,1 et 0,5 $\mu\text{m}$  [17].
- **Brouillards et Brumes** : Ils se forment par la suspension de gouttelettes liquides dans l'air. Les brumes, composées de gouttelettes de plus de 1  $\mu\text{m}$ , réduisent la visibilité à une distance de 1 à 2 km. Les brouillards, quant à eux, se caractérisent par une visibilité réduite à moins de 1 000 mètres [24].
- **Les Poussières** : Englobent une large variété de particules dont les dimensions varient de 0,001 à 100 $\mu\text{m}$ . Les plus grosses d'entre elles ont tendance à se déposer près de leur source d'émission [17].
- **Les Particules en suspension** :
  - **Grosses particules** : Classées dans la catégorie des PM10, ces particules ont un diamètre aérodynamique supérieur à 2,5 $\mu\text{m}$  et peuvent s'étendre jusqu'à 10  $\mu\text{m}$  [27]. Elles peuvent pénétrer dans le système respiratoire et ont été définies par l'EPA (*Environmental Protection Agency*) comme un indicateur de la qualité de l'air. Elles représentent entre 40 à 70% des particules totales en suspension [17].
  - **Particules fines** : Avec un diamètre inférieur ou égal à 2,5  $\mu\text{m}$ , ces particules sont incluses dans les mesures de PM2,5 [19]. Capables d'atteindre les alvéoles pulmonaires, elles posent un risque important pour la santé. Elles sont également l'objet de surveillances spécifiques et de nombreuses études épidémiologiques [24].

- **Particules ultrafines** : Ces particules possèdent un diamètre inférieur ou égal à  $0,1\mu\text{m}$  [27]. Elles sont essentielles pour les études d'échantillonnage et d'impact sanitaire, bien qu'elles ne soient généralement pas régulées par les normes officielles [24].
- **Nanoparticules** : Extrêmement petites, ces particules ont un diamètre compris entre quelques nanomètres et 100 nanomètres [27].

### 2.2.7.4 Devenir des Particules dans l'Atmosphère

Dans l'atmosphère, le comportement des PM est influencé par leur taille, leur composition chimique, et leur concentration, ainsi que par les conditions météorologiques. Les particules de grande taille ont tendance à se déposer rapidement sous l'effet de la gravité, tandis que les plus fines peuvent rester en suspension et être transportées sur de longues distances. Les particules ultrafines, en particulier, se diffusent rapidement et peuvent coaguler avec des particules plus grandes ou croître par condensation en quelques heures. Les particules fines, quant à elles, peuvent demeurer dans l'air plusieurs jours et être transportées sur des distances considérables. Leur retrait de l'atmosphère s'effectue principalement par lessivage lors des précipitations ou par impaction [17].

### 2.2.7.5 Impact des PM

- **Sur L'Environnement** :

- **Impact sur la visibilité** : Les PM<sub>2.5</sub> sont les principaux responsables de la réduction de la visibilité, phénomène souvent décrit comme de la brume. Cette brume se forme lorsque les rayons du soleil interagissent avec de minuscules particules de pollution dans l'air, altérant ainsi la clarté et la couleur de ce que nous observons [18].



FIG. 2.2 : Comparaison de la Visibilité en Milieu Urbain

- **Impact sur le climat** : Les PM jouent un rôle significatif dans les modifications climatiques en raison de leurs divers effets thermiques. Le carbone noir est un exemple de particule qui contribue au réchauffement global en absorbant la chaleur dans l'atmosphère. À l'inverse, les particules contenant des sulfates ont un effet de refroidissement sur le climat en réfléchissant la lumière solaire loin de la Terre [25].
- **Impact sur l'écosystème** : Les PM nuisent aux écosystèmes en altérant la croissance des plantes et en dégradant la qualité de l'eau. Les dépôts de PM absorbés par les plantes ou accumulés dans l'eau peuvent contenir des composés métalliques et organiques nuisibles. En outre, la salissure des surfaces par ces particules affecte également l'environnement [15].
- **Sur la santé** :  
Les PM présentent des risques particuliers pour la santé, comparativement aux polluants gazeux, en raison de leur capacité à être sélectivement inhalées et déposées dans les voies respiratoires. Elles ont des impacts variés, allant des symptômes aigus tels que les céphalées et les irritations des muqueuses à des conséquences plus graves comme les intoxications. À court terme, les PM sont associées à des réactions immédiates telles que irritations oculaires. Avec le temps, elles peuvent exacerber les maladies respiratoires, augmenter les sensibilités allergiques. Ainsi, ces particules ont un double effet :

↔ **Un effet lié à leur taille** :

- **Grosse particules** : Principalement retenues dans les voies respiratoires supérieures [28], ces particules sont rapidement évacuées par mouchage ou déglutition [17].
- **Particules fines** : Ces particules atteignent le segment trachéo-bronchique [28] et peuvent entraîner des problèmes cardiaques, des obstructions pulmonaires et des pneumonies, augmentant ainsi la mortalité [17].
- **Particules très fines** : Considérées comme respirables et particulièrement dangereuses, elles peuvent pénétrer profondément dans le système respiratoire jusqu'aux alvéoles pulmonaires [29], et même libérer dans la circulation sanguine les contaminants chimiques adsorbés à leur surface pour ensuite être distribués aux différents organes du corps humain [25].
- **Particules ultrafines** : En raison de leur taille moléculaire, ces particules sont inhalées et exhalées sans être retenues, réduisant leur potentiel de dommages directs aux poumons [28].

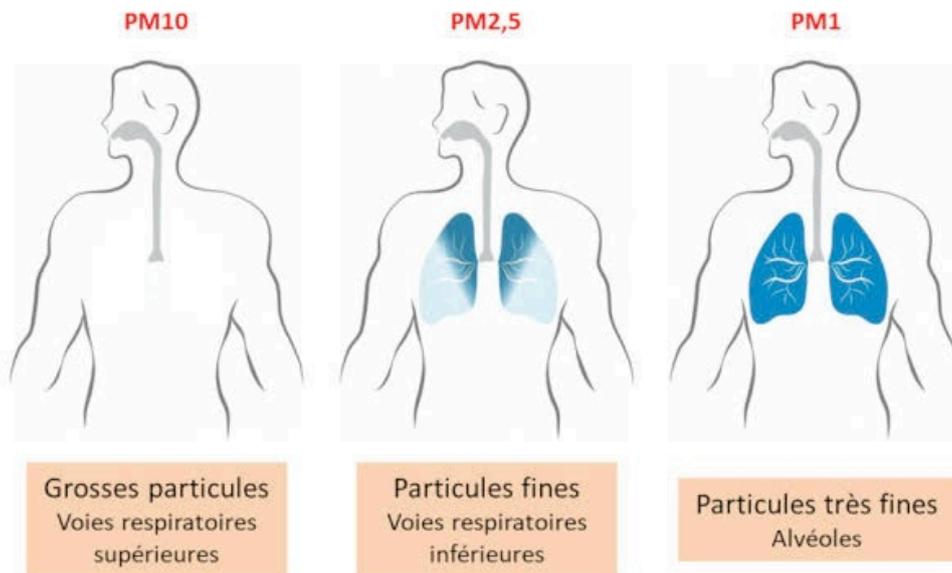


FIG. 2.3 : Trajectoire des Particules dans l'Appareil Respiratoire

↔ **Effet lié à leurs caractéristiques toxicologiques, physicochimiques et microbiologiques :**

- **Composants toxiques :** Les PM peuvent contenir des substances nocives, y compris les métaux lourds [28] ainsi que certains composés organiques comme les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) et les polychlorobiphényles (PCB). Parmi ces HAP, le benzo[a]pyrène est particulièrement notoire ; il est reconnu pour son potentiel cancérogène élevé, ce qui est associé à un risque accru de cancers du poumon, de la peau et de la vessie [29]
- **Caractéristiques physicochimiques :** La dangerosité des particules est également influencée par leur état cristallographique, la surface des composés et leur solubilité, qui affectent la manière dont elles interagissent avec le corps humain [28].
- **Contamination microbiologique :** Les particules peuvent aussi transporter des micro-organismes vivants comme des moisissures, des bactéries ou des virus, ainsi que des fragments microbiens ou des composés organiques volatiles d'origine microbienne. Ces particules biologiques, obéissant aux mêmes lois physiques que les particules inertes, peuvent induire des maladies graves telles que la légionellose, diverses pneumopathies et des intoxications [28].

### 2.2.7.6 Cadre Réglementaire et Normes pour la Gestion des PM

La pollution par les poussières a été ressentie depuis longtemps par les populations, ce qui a conduit à l'établissement de réglementations bien avant une compréhension complète de la toxicité des particules, souvent considérée comme moins grave que celle de nombreux autres polluants gazeux [30]. En conséquence, les normes concernant les concentrations ambiantes de particules, exprimées en  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , varient d'un pays à l'autre, résultant en des réglementations de degrés divers de sévérité [24].

- **En Algérie :**

En Algérie, la législation ne fait pas de distinction entre les différentes particules ; elle les traite globalement de la manière suivante :

TAB. 2.1 : Normes de Qualité de l’Air en Algérie pour PM

Critère	Valeur ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )
Objectif de qualité	50
Valeur limite	80

- **Au niveau européen :**

TAB. 2.2 : Tableau des Valeurs Limites Recommandées par l’Union Européenne [31]

Polluant	Valeur limite ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Durée d’exposition
PM <sub>2.5</sub>	25	Moyenne sur 24h
	10	Moyenne annuelle
PM <sub>10</sub>	50	Moyenne sur 24h
	20	Moyenne annuelle

- **Au niveau mondial :**

TAB. 2.3 : Tableau des Valeurs Limites des PM à l’Échelle Mondiale [32]

Polluant	Valeur guide ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Durée d’exposition
PM <sub>2.5</sub>	25	Moyenne sur 24h
	10	Moyenne annuelle
PM <sub>10</sub>	50	Moyenne sur 24h
	20	Moyenne annuelle

### 2.3 Unités de Traitement de l’Air

La qualité de l’air intérieur est essentielle, étant donné que la plupart des gens passent jusqu’à 90% de leur temps dans des espaces clos, respirant entre 15 et 20 m<sup>3</sup> d’air chaque jour [33]. C’est pour cette raison que les centrales de traitement d’air (CTA), aussi connues sous l’acronyme HVAC pour *Heating, Ventilation, and Air-Conditioning*, ont été imposées dans les bâtiments [34]. C’est également pour cette raison que Sanofi les a employées, non seulement pour créer un climat artificiel sur son site, mais aussi pour contrôler les émissions des polluants.

### 2.3.1 Centrale de Traitement d’Air

Une CTA est conçue pour contrôler la température, l’humidité et la qualité de l’air dans les environnements commerciaux, industriels et résidentiels [35]. Cette unité, qui se présente sous la forme d’une grande boîte métallique, est équipée d’un ventilateur, de dispositifs de chauffage ou de refroidissement, et de chambres de filtrage qui purifient l’air. Ce système aspire l’air extérieur, le filtre minutieusement pour éliminer les polluants et les particules fines afin d’introduire un air neuf dans le bâtiment tout en gérant de manière optimale les conditions climatiques internes. L’unité incorpore également des atténuateurs de bruit et des registres pour ajuster le débit d’air [36]. Elle vise principalement à :

- Gérer la température et l’humidité des locaux, améliorant ainsi le confort des occupants [35].
- Renouveler l’air dans les environnements intérieurs, assurant ainsi un approvisionnement continu en air frais et sain [36].
- Filtrer et purifier l’air afin de réduire le transport des polluants, aussi bien de l’extérieur vers l’intérieur [36] que de l’intérieur vers l’extérieur, une pratique adoptée par des entreprises comme Sanofi pour se conformer aux normes des émissions atmosphériques.
- Contribuer à la protection de la santé des occupants [37].

### 2.3.2 Les Filtre CTA

Les filtres des CTA jouent un rôle crucial en garantissant la pureté de l’air que nous respirons, retenant efficacement les particules fines, les polluants, la poussière, les bactéries, le pollen, les spores et les moisissures [35]. En faisant passer un air, vecteur d’aérosols, à travers le filtre CTA, les particules sont retenues. Ces particules obstruent progressivement les pores du filtre, ce qui améliore l’efficacité de la capture tout en augmentant la perte de charge [37].

#### 2.3.2.1 Matériaux Constitutifs des Filtres

Les filtres sont principalement constitués de fibres issues de matériaux de base tels que la cellulose, le verre, le quartz, et l’acier inoxydable, auxquels sont ajoutés des additifs tels que des résines et des liants acryliques qui améliorent leur tenue mécanique. Cette amélioration se traduit par une meilleure résistance des filtres aux contraintes physiques telles que la pression, les chocs et les vibrations. Parmi les différents types de fibres utilisés dans les filtres, on trouve :

- **Fibres organiques d’origine naturelle** : Incluant des fibres végétales, animales et protéiniques.
- **Fibres de cellulose régénérée.**

- **Fibres synthétiques** : Composées de polymères, ces fibres sont particulièrement résistantes aux oxydants, aux acides, aux bases et aux fluctuations de température.
- **Fibres inorganiques** : Telles que les fibres minérales, de verre, métalliques et de carbone, reconnues pour leur solidité et leur durabilité [37]

### 2.3.2.2 Classification des Filtres

Le tableau ci-dessous classe les filtres selon leur niveau d'efficacité : moyenne, haute et très haute.

TAB. 2.4 : Classification des filtres selon différents niveaux d'efficacité [38]

Gamme de filtre	Niveau d'efficacité	Classement
Faible et moyenne efficacité (préfiltres)	< 40%	G1 à G4
	< 20%	MERV1 à MERV4
	20 - 70%	MERV4 à MERV8
Haute efficacité (filtres fins)	40 - 95%	M5 à F9
	≥ 85 à 90%	MERV9 à MERV11
	≥ 90 à 95%	MERV12 à MERV16
Très haute efficacité (filtres absolus, HEPA, ULPA)	85 - 95%	H10 à H11
	99.5 - 99.95%	H12 à H14
	99.995 - 99.9995%	U15 à U17

La filtration se déroule en deux étapes distinctes. Le premier niveau consiste en une filtration grossière, avec l'emploi de filtres de faible efficacité (Filtres G et F) [37] en tant que préfiltres. Ces filtres grossiers capturent les grandes particules et les débris, tout en protégeant les ventilateurs et les composants mécaniques du système de ventilation. Cependant, ces préfiltres, bien qu'économiques, ne sont pas conçus pour retenir les particules inférieures au micromètre [36]. La seconde étape de filtration fine vise à éliminer les particules plus petites, utilisant pour cela des filtres des catégories F, H et U [37].

### 2.3.2.3 Colmatage des Filtres

Le colmatage des filtres des centrales de traitement d'air survient lorsque des particules s'accumulent dans le média filtrant, formant une couche dense nommée 'gâteau de particules'. Cette accumulation augmente la perte de charge, nécessitant plus d'énergie

pour maintenir le débit d'air. Lorsque cette perte de charge atteint un seuil critique, il devient nécessaire de remplacer ou de nettoyer les filtres afin de préserver l'efficacité du système et la qualité de l'air intérieur [58].

### 2.4 Technologies de Contrôle des Émissions de Particules

Mettre en œuvre des équipements de contrôle de la pollution est crucial afin de réduire les émissions de polluants dans l'atmosphère et de minimiser les impacts néfastes sur la santé humaine, les écosystèmes et le climat mondial. Parmi les technologies utilisées pour atteindre ces objectifs, nous retrouvons [39] :

TAB. 2.5 : Technologies de Collecte des Particules

Type	Mode de Fonctionnement [39]	Particules ( $\mu\text{m}$ ) [40]	Collecte [40]
Cyclone centrifuge	Séparent les particules du flux de gaz grâce à la force centrifuge générée par un mouvement en vortex.	5-25	50-90 %
Précipitateur électrostatique (ESP)	Utilisent un champ électrique pour charger les particules et les attirer vers une électrode collectrice.	>1	95-99 %
Laveur humide	Utilisent des liquides pour capturer les particules à travers divers mécanismes comme l'impaction et la diffusion.	>0.5	80-99 %

Ces technologies de collecte présentent des caractéristiques diverses, comprenant à la fois des avantages significatifs et des inconvénients qu'il est essentiel de considérer. Passons maintenant en revue ces aspects en détail.

#### 1) Le Cyclone

##### Avantages :

- Structure simple
- Coût initial faible
- Perte de charge faible
- Traitement continu
- Faible encombrement

##### Inconvénients :

- Ne convient pas pour les particules très fines
- Sensible à la charge et au débit de gaz
- Nécessite des chambres d'entrée de gaz

### 2) Précipitateur électrostatique (ESP)

#### Avantages :

- Utilisation dans les systèmes humides et secs
- Peu de perte de charge
- Efficace pour les poussières fines

#### Inconvénients :

- Sensible à la charge initiale et du gaz
- Ne convient pas pour les poussières explosives

### 3) Laveur humide

#### Avantages :

- Minimise la poussière secondaire
- Traite les gaz à haute température et chargés
- Convient pour les environnements corrosifs

#### Inconvénients :

- Coût de fonctionnement élevé
- Coût d'entretien élevé
- Traitement des eaux usées nécessaire [40].

## 2.5 Le Séparateur Cyclonique

Le cyclone à gaz, connu pour sa structure simple et économique, est très efficace pour réduire les émissions des processus industriels et de fabrication [41]. Ce dispositif, qui excelle dans l'élimination des particules de plus de  $2 \mu\text{m}$  [39], est fréquemment utilisé soit comme unité de collecte finale, soit comme pré-nettoyeur avant des équipements tels que les précipitateurs électrostatiques, les filtres laveurs ou les filtres à tissu [42].

### 2.5.1 Principes de Fonctionnement des Cyclones

Lorsque le gaz chargé de particules entre dans le cyclone et atteint le cône, il est accéléré en raison de la réduction de la section transversale, ce qui favorise la création d'un tourbillon ascendant [43]. Ce tourbillon initial s'intensifie en suivant une trajectoire circulaire, formant ainsi un vortex. La force centrifuge pousse les particules du centre vers la paroi du cyclone, alors que la résistance de l'air oppose une force de traînée. Quand la force centrifuge surpasse la traînée, les particules heurtent la paroi et sont dirigées vers la trémie à poussière en bas du cyclone, où elles sont collectées et évacuées [39]. Cependant, les petites particules, moins influencées par la force centrifuge, sont emportées avec le flux sortant [44].

### 2.5.2 Structure et Matériaux d'un Séparateur Cyclonique

Ce séparateur cyclonique est constitué d'une section rectangulaire qui se prolonge par une partie conique. Il peut être fabriqué à partir de divers matériaux, tels que le métal

ou la céramique, capables de résister à des températures élevées et à la nature corrosive des particules. La surface intérieure du cyclone est lissée pour permettre aux particules de glisser facilement vers le bas de la trémie à poussière [39].

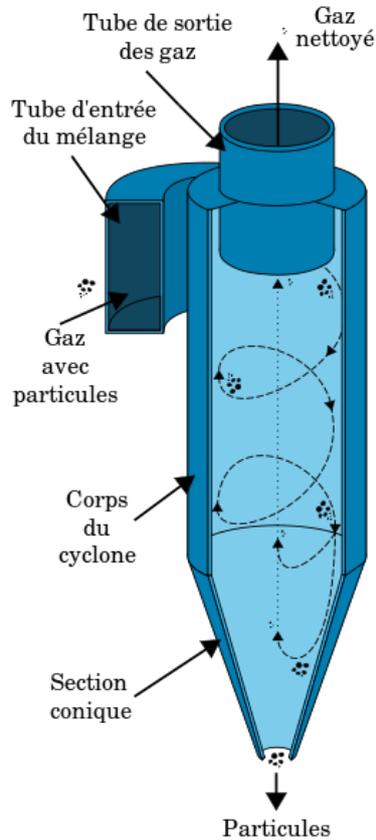


FIG. 2.4 : Structure d'un Séparateur cyclonique

### 2.5.3 Types de Cyclone

Les cyclones sont typiquement classés en trois catégories, selon la manière dont le flux gazeux entre et sort de l'unité :

- Entrée tangentielle avec évacuation axiale des poussières.
- Entrée axiale à travers des ailettes à tourbillon avec évacuation axiale des poussières.
- Entrée axiale à travers des ailettes de turbulence avec évacuation périphérique des poussières [59] .

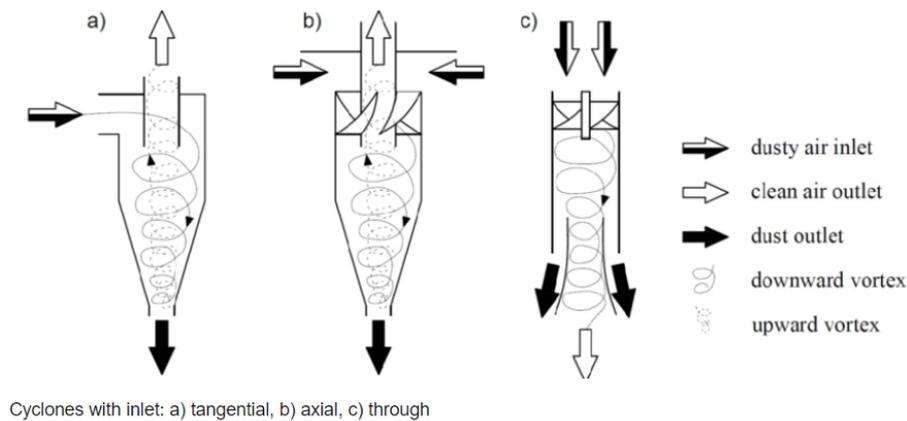


FIG. 2.5 : Types de Cyclones

Parallèlement à cette classification, les cyclones se divisent également en deux types selon leur efficacité de collecte : les cyclones à haut rendement et les cyclones à haut débit.

- A. Les cyclones à haut rendement, petits et dotés de longs cônes, exploitent une forte force centrifuge pour capter efficacement les particules.
- B. Les cyclones à haut débit, également appelés cyclones conventionnels, sont plus grands et traitent de grands volumes de gaz avec une efficacité modérée [40].

TAB. 2.6 : Tableau d'Efficacité de Collecte du Cyclone [40]

Gamme de taille des particules ( $\mu\text{m}$ )	Efficacité de collecte haut rendement (%)	Efficacité de collecte à haut débit, (%)
Moins de 5	Moins de 50	50 - 80
5 - 20	50 - 80	80 - 95
20 - 40	80 - 95	95 - 99
Plus de 40	95 - 99	95 - 99

Les niveaux d'efficacité sont définis comme suit : la faible efficacité se situe entre 50 et 80%, l'efficacité moyenne entre 80 et 95%, et la haute efficacité entre 95 et 99%

### 2.5.4 Options de Configuration : Séries et Parallèles

Les cyclones peuvent être configurés en série ou en parallèle selon les besoins spécifiques de séparation des particules.

- i. En série : Utilisés pour une séparation plus efficace, surtout quand les débits de gaz sont élevés ou pour protéger des cyclones à haut rendement contre les particules abrasives.
- ii. En parallèle : Traitent de plus grands volumes de gaz, mais nécessitent une gestion attentive pour éviter les déséquilibres de pression qui peuvent réduire l'efficacité [40].

### 2.6 Conclusion

La pollution atmosphérique, due à diverses sources anthropiques et naturelles, demeure un défi majeur pour l'environnement et la santé publique. Pour atténuer ses effets, il est crucial de mettre en place des stratégies efficaces de contrôle des émissions. Après avoir exploré plusieurs technologies, nous avons choisi de nous concentrer sur le séparateur cyclonique. Cette solution permet de réduire significativement les émissions de particules, de prolonger la durée de vie des filtres principaux, et de diminuer les coûts de maintenance. En adoptant le séparateur cyclonique, nous visons à améliorer la qualité de l'air et à minimiser l'impact environnemental, contribuant ainsi à une gestion plus durable des émissions dans l'industrie pharmaceutique.

## Chapitre 3

# Méthodologie de Conception et de Simulation d'un Cyclone

### 3.1 Introduction

Sanofi, dans sa quête de conformité avec les normes d'émission visant à protéger l'environnement, a mis en place des centrales de traitement de l'air pour réduire les particules avant leur émission dans l'atmosphère. Malgré la sophistication de ces systèmes, des problèmes tels que le colmatage rapide des filtres persistent, soulignant le besoin de solutions innovantes pour améliorer l'efficacité et la durabilité des installations. Pour répondre à ce problème, j'ai proposé une solution de prétraitement utilisant des cyclones comme pré-nettoyeurs avant la CTA. L'objectif de ce chapitre est de décrire la méthodologie de travail pour étudier et confirmer l'efficacité de cette solution.

### 3.2 Méthodologie de Travail

La conception et la simulation d'un séparateur cyclonique sont essentielles pour garantir son efficacité et ses performances. La méthodologie pour y parvenir comporte plusieurs étapes :

1. **Détermination des conditions de fonctionnement** : La première étape consiste à établir les conditions de fonctionnement, incluant le débit et la température du gaz, ainsi que la distribution granulométrique des particules.
2. **Identification de l'efficacité de séparation requise** : L'efficacité de séparation nécessaire varie selon l'application, allant de 50% à 99%.
3. **Détermination des dimensions du cyclone** : Les dimensions du cyclone sont définies en fonction du débit de gaz et de l'efficacité de séparation requise.
4. **Conception des composants du cyclone** : La conception des composants du cyclone, tels que le corps du cyclone, l'entrée tangentielle, le cône inférieur, l'évacuation axiale des poussières et le conduit d'échappement, est cruciale pour atteindre l'efficacité de séparation souhaitée.
5. **Réalisation d'une simulation CFD** : Une simulation CFD est effectuée pour prédire les performances du séparateur cyclonique dans différentes conditions de fonctionnement. Cette simulation fournit des informations sur les motifs d'écoulement et l'efficacité de séparation.
6. **Optimisation de la conception** : La conception du séparateur cyclonique est optimisée en fonction des résultats de la simulation CFD. L'optimisation consiste à modifier les dimensions et la conception des composants du cyclone pour améliorer l'efficacité de séparation et minimiser la chute de pression.
7. **Validation de la simulation** : Les résultats de la simulation sont validés en les comparant à des données expérimentales. Cette étape assure la précision de la simulation et renforce la confiance dans la conception optimisée.
8. **Fabrication du séparateur cyclonique** : La dernière étape consiste à fabriquer le séparateur cyclonique en se basant sur la conception optimisée [44].

### 3.3 Détermination des Conditions de Fonctionnement

Pour déterminer ces conditions, il est essentiel de localiser précisément la zone de colmatage. Dans le cas de Sanofi, l'encrassement se manifeste au niveau des filtres du CTA de l'équipement LAF, utilisé pour la compression des médicaments comprimés. Comprendre cette situation permet de savoir exactement où installer le cyclone pour qu'il serve de pré-nettoyeur, réduisant ainsi la charge de particules sur les filtres et améliorant la durabilité et l'efficacité du système de traitement de l'air.

Après avoir localisé la zone de colmatage, nous avons pu déterminer les conditions de fonctionnement suivantes :

TAB. 3.1 : Conditions de Fonctionnement du Cyclone

Paramètre	Valeur
Débit de gaz	3500 m <sup>3</sup> /h
Température du gaz	25°C
Distribution granulométrique des particules	0.1 µm, 0.3 µm, 0.5 µm, 1 µm, 3 µm, 5 µm, 10 µm et supérieures à 10 µm

### 3.4 Identification de l'Efficacité de Séparation Requise

Pour notre cyclone, nous avons choisi une efficacité de séparation de 89%. Ce choix sera expliqué plus en détail lors de l'étape de dimensionnement.

### 3.5 Détermination des Dimensions du Cyclone

Pour cette étape nous utiliserons le logiciel **Aspen HYSYS V10** afin de définir les dimensions optimales des composants du cyclone. Ces dimensions seront établies en fonction du débit de gaz et de l'efficacité de séparation requise.

#### 3.5.1 Définition de la Simulation

Aspen HYSYS est un logiciel de simulation de procédés qui permet de modéliser des phénomènes physiques en utilisant des modèles mathématiques simplifiés pour décrire et analyser leur comportement. Les principales fonctionnalités d'Aspen HYSYS comprennent :

- La résolution des bilans de matière et d'énergie.
- Le dimensionnement des équipements.

- L'évaluation technico-économique des procédés.
- L'optimisation des procédés.
- La détermination des performances des équipements.
- L'étude des effets des paramètres de fonctionnement sur les résultats obtenus [45].

### 3.5.2 Les Etapes de Simulation

\* Première étape :

Lancez le logiciel en appuyant deux fois sur l'icône d'Aspen HYSYS, puis cliquez sur "New" dans l'interface d'accueil pour démarrer un nouveau projet.

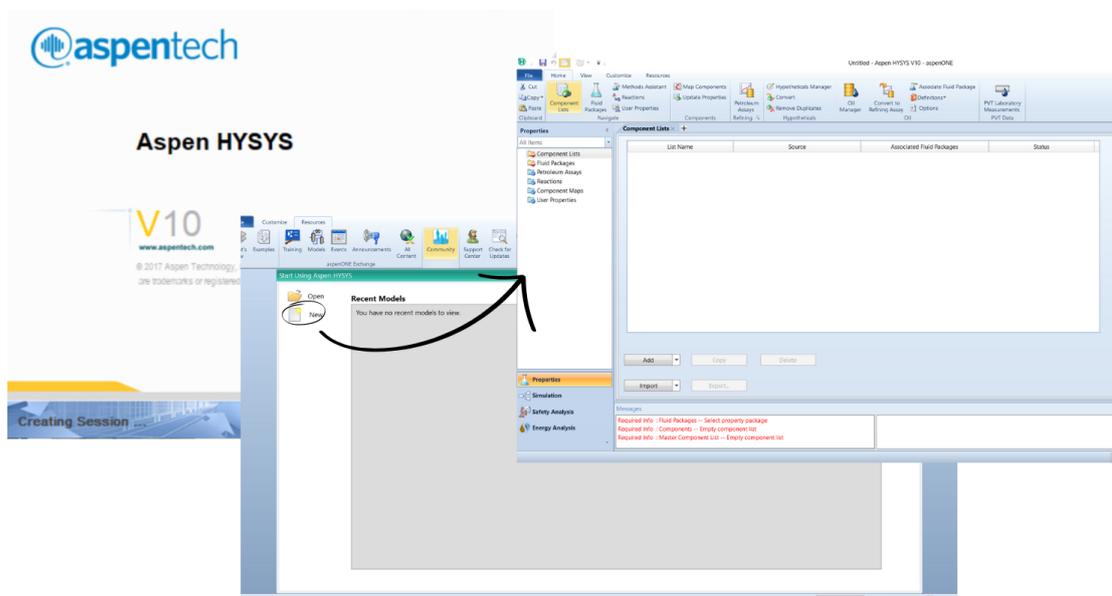


FIG. 3.1 : Démarrage du projet

\* Deuxième étape :

Après avoir démarré le projet, cliquez sur "Component List", puis sur "Add" pour accéder à l'endroit où tous les composants et leurs propriétés peuvent être spécifiés. Dans notre cas, nous avons un fluide qui est de l'air chargé de particules solides.

Nous commençons par spécifier les propriétés de l'air. Dans "Select", choisissez "Pure Component", puis dans "Search for", recherchez "Air". Une fois trouvé, cliquez sur "Add" pour l'ajouter à notre "Databank". Ensuite, pour les particules

solides, nous ne pouvons pas les trouver dans la liste "Pure Components" car nous ne connaissons pas la nature exacte du solide, seulement qu'il s'agit d'un mélange de principes actifs et d'excipients. Par conséquent, nous devons spécifier leurs caractéristiques, telles que la densité et le poids moléculaire, manuellement dans la simulation. Pour ce faire, cherchez dans "Select" l'option "Hypothetical Solid". Une case apparaîtra où nous pourrions entrer les caractéristiques nécessaires.

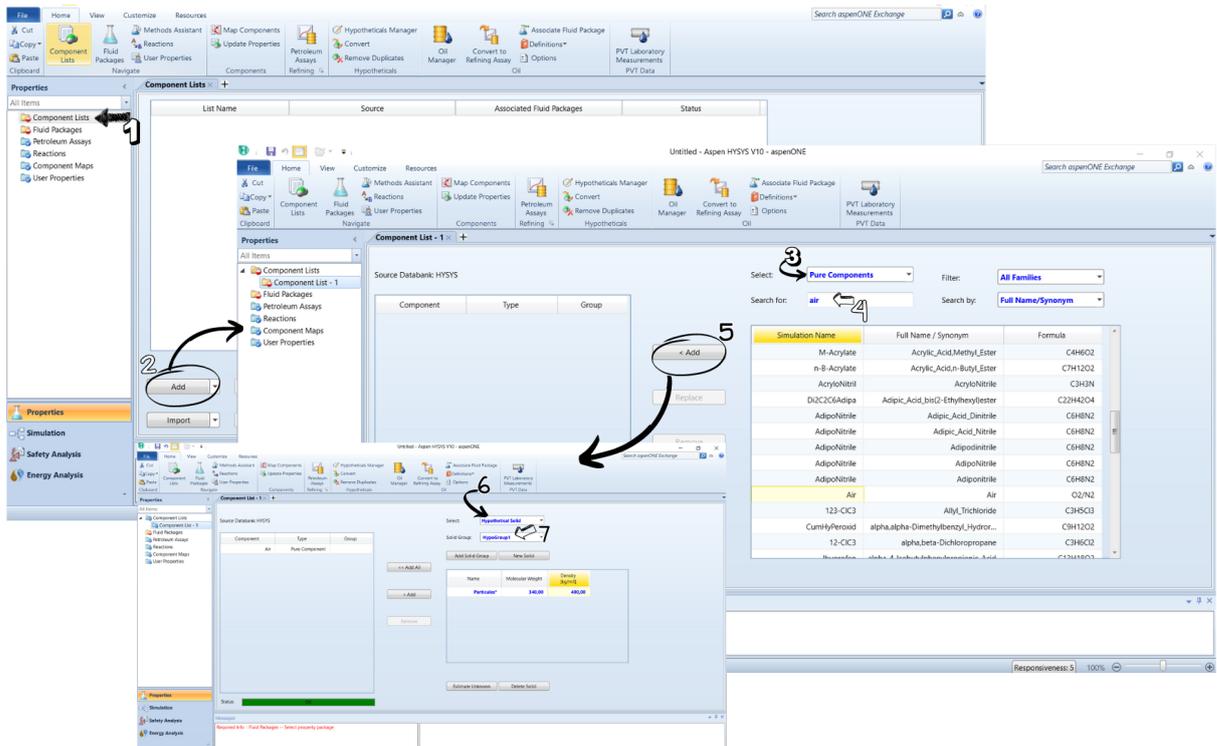


FIG. 3.2 : Ajout des composants

\* Troisième étape :

Après avoir ajouté les composants, nous devons choisir le modèle thermodynamique pour simuler le comportement des mélanges de composés chimiques. Les modèles thermodynamiques sont des représentations mathématiques du comportement des systèmes chimiques basées sur les principes de la thermodynamique, et ils sont utilisés pour prédire les propriétés des fluides, telles que la pression, la température et la composition, dans différentes conditions [46].

Nous allons choisir le modèle Peng-Robinson car c'est le plus utilisé. Pour ce faire, appuyez sur l'icône "Fluid Packages", qui ouvre une autre fenêtre où vous trouverez différents types de modèles thermodynamiques proposés par le simulateur Aspen HYSYS. Une fois le modèle souhaité sélectionné, cliquez sur l'icône "Add".

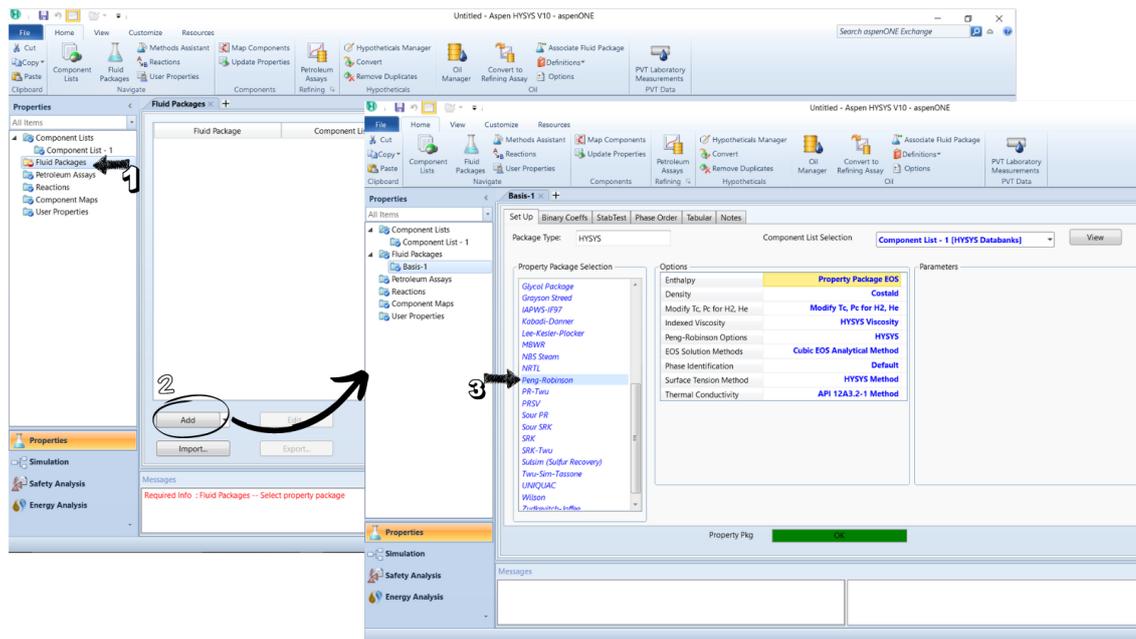


FIG. 3.3 : Sélection du "Fluid Package"

\* Quatrième étape :

Après avoir sélectionné le modèle thermodynamique, nous allons entrer les données d'alimentation pour le processus. Pour ce faire, choisissez l'icône de la simulation ; une fenêtre s'ouvrira, affichant une flèche bleue en haut ; cliquez sur cette flèche et faites-la glisser jusqu'à l'espace de simulation, puis relâchez-la pour la positionner. Ensuite, faites un double clic sur l'icône d'alimentation pour entrer les données ; une nouvelle fenêtre apparaîtra où vous pourrez spécifier les propriétés du flux.

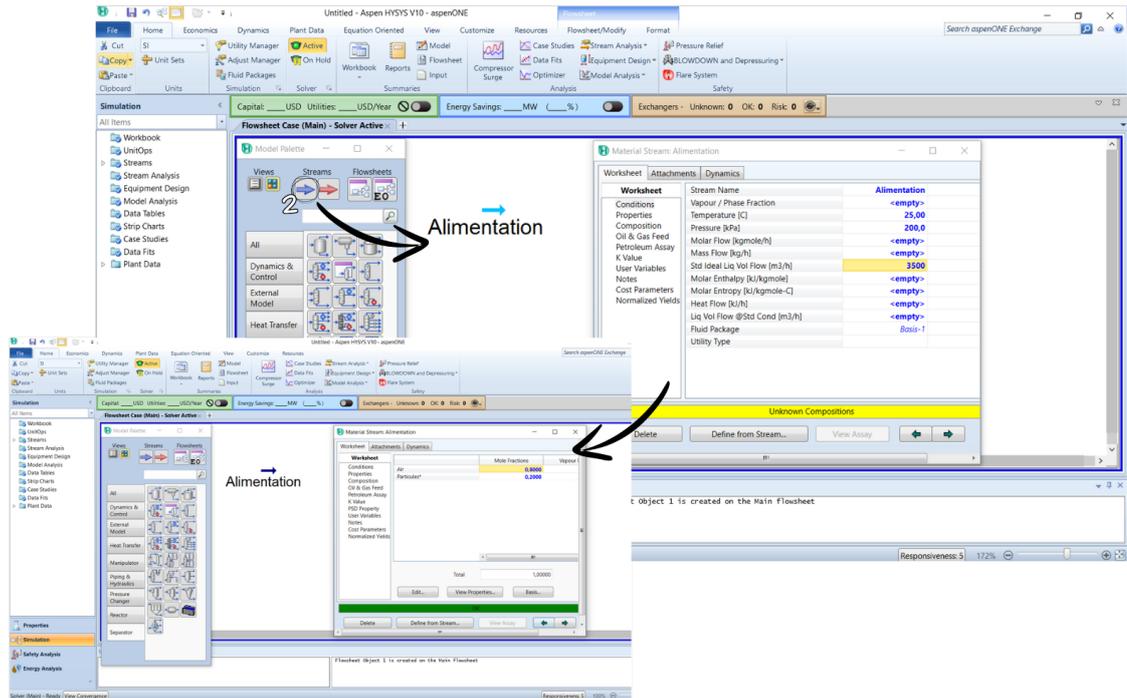


FIG. 3.4 : Entrée des Données d'Alimentation

\* Cinquième étape :

Après avoir ajouté l'alimentation, connectez le cyclone directement à celle-ci. En cliquant sur le cyclone, une fenêtre de configuration s'ouvrira. Dans cette fenêtre, sélectionnez l'onglet "Design" et accédez à la section "Connections" pour définir les deux sorties. Poursuivez en cliquant sur "Parameters" pour ajuster l'efficacité de séparation. Terminez par la section "Solids" où vous spécifierez le diamètre des particules.

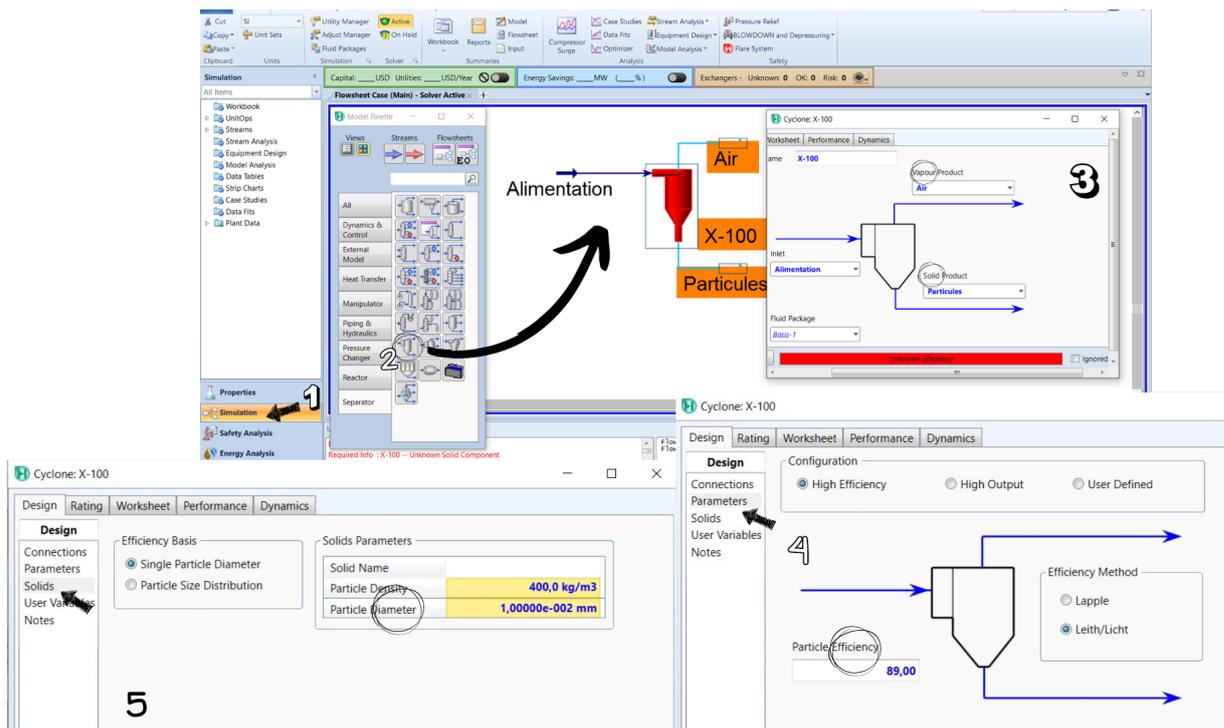


FIG. 3.5 : Configuration du Cyclone

## 3.6 Conception des Composants du Cyclone

Nous avons utilisé SolidWorks pour concevoir notre cyclone. SolidWorks est un logiciel de modélisation puissant et intuitif, qui permet de créer rapidement des modèles 3D. Ce dernier est facile à utiliser et ne nécessite pas de compétences en programmation [57], c'est pourquoi nous l'avons choisi.

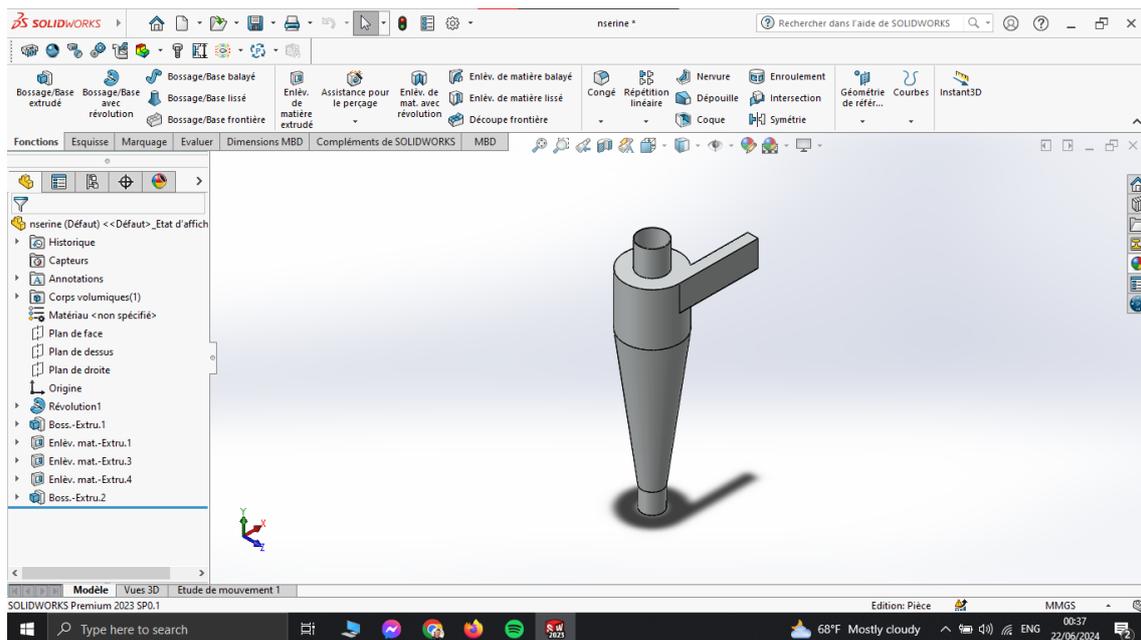


FIG. 3.6 : Interface du logiciel SOLIDWORKS

## 3.7 Réalisation d'une simulation CFD

Au cours de la dernière décennie, les outils de simulation numérique, en particulier la Dynamique des Fluides Numérique (CFD), sont devenus essentiels pour comprendre divers phénomènes physiques et résoudre des problèmes industriels [47]. Cette technique, qui exploite la puissance de calcul informatique pour résoudre les équations régissant l'écoulement des fluides, a prouvé son immense utilité, notamment dans l'optimisation de processus industriels [48].

### 3.7.1 Principe de la CFD

Le principe des logiciels CFD repose sur la résolution des équations de Navier-Stokes, qui régissent l'écoulement d'un fluide newtonien [49]. Ces équations assurent la conservation de la masse et de la quantité de mouvement du fluide, permettant ainsi de déterminer la vitesse et la pression en chaque point de l'écoulement :

$$\operatorname{div} \vec{u} = 0 \quad (3.1)$$

$$\rho \left( \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + (\vec{u} \cdot \nabla) \vec{u} \right) = -\nabla P + \mu \Delta \vec{u} + \rho \vec{f} \quad (3.2)$$

Où  $\rho$  représente la masse volumique,  $P$  la pression,  $\mu$  la viscosité,  $u$  la vitesse d'écoulement, et  $f$  la force externe [50].

La résolution de ces équations dépend de la nature de l'écoulement, qui peut être de deux types : laminaire ou turbulent. Un écoulement laminaire se caractérise par un mouvement fluide et parallèle des couches de liquide, tandis qu'un écoulement turbulent se distingue par des tourbillons et des mouvements chaotiques, fréquemment observés près d'obstacles ou dans les zones où le fluide change de direction [51]. Étant donné que les mouvements de l'air sont souvent turbulents [49], je vais présenter les différents modèles numériques utilisés pour résoudre les équations de Navier-Stokes spécifiques aux écoulements turbulents.

### 3.7.2 Modèle de turbulence :

L'étude approfondie de la turbulence a conduit au développement de nombreux modèles pour sa modélisation [51]. Ansys-Fluent, un logiciel complet de dynamique des fluides numérique (CFD), offre divers modèles de turbulence adaptés à une multitude d'applications :

- Le modèle Spalart-Allmaras ;
- Le modèle (k-  $\epsilon$ ) (Standard, RNG, Réalisable) ;
- Les modèles (k-w) (Standard, SST) ;
- Les modèles de transition SST ;

- Le modèle RSM (Reynolds Stress Model) ;
- Le modèle SAS (Scale-Adaptive Simulation) ;
- Le modèle DES (Detached Eddy Simulation) ;
- Le modèle LES (Large Eddy Simulation) ;
- Le modèle RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes) [52].

Le modèle des contraintes de Reynolds (RSM) s'avère être le plus adéquat pour la simulation des écoulements dans les cyclones [53]. Contrairement à d'autres modèles qui supposent une turbulence isotrope, le RSM prend en compte l'anisotropie de la turbulence, ce qui est essentiel pour reproduire fidèlement la complexité des écoulements dans les cyclones. Bien que ce modèle soit plus coûteux en termes de calcul, son approche détaillée des composantes individuelles de la tension de Reynolds rend ses prédictions plus fiables pour ce type d'application .

Dans le modèle RSM, l'équation de transport est exprimée de cette manière [54] :

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho u'_i u'_j) + \frac{\partial}{\partial x_k} (\rho u'_k u'_i u'_j) = D_{ij} + P_{ij} + \Pi_{ij} + \varepsilon_{ij} + S \quad (3.3)$$

Les deux termes à gauche représentent respectivement les dérivées locales temporelles des contraintes et la convection. Quant aux cinq termes à droite, ils symbolisent :

- Terme de diffusion Turbulente :

$$D_{T,ij} = -\frac{\partial}{\partial x_k} [\rho u'_i u'_j u'_k + (\overline{p'u'})\delta_{ik} + (\overline{p'u'})\delta_{jk}] \quad (3.4)$$

- Terme de diffusion visqueuse :

$$D_{L,ij} = \frac{\partial}{\partial x_k} \left[ \mu \left( \frac{\partial}{\partial x_k} u'_i u'_j \right) \right] \quad (3.5)$$

- Tenseur de production de contrainte :

$$P_{ij} = -\rho \left[ \overline{u'_i u'_k} \frac{\partial \overline{u'_j}}{\partial x_k} + \overline{u'_j u'_k} \frac{\partial \overline{u'_i}}{\partial x_k} \right] \quad (3.6)$$

- Corrélation pression-taux de déformation :

$$\phi_{ij} = p \left( \frac{\partial u'_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u'_j}{\partial x_i} \right) \quad (3.7)$$

- Tenseur de dissipation turbulente :

$$\varepsilon_{ij} = -2\mu \left( \frac{\partial u'_i}{\partial x_k} \frac{\partial u'_j}{\partial x_k} \right) ; \quad (3.8)$$

- Terme de source :

$$S. \quad (3.9)$$

### 3.7.3 Modèle de la Phase Discrète

Le modèle de la phase discrète (DPM) est une approche de simulation des particules dans un fluide, où le fluide est traité comme un milieu continu et les particules sont simulées individuellement sans influencer le volume du fluide. Les trajectoires des particules sont suivies par des équations différentielles qui calculent leur position, vitesse et autres propriétés [55]. Ce modèle utilise l'approche Euler-Lagrange. Pour que cette approche soit applicable, la concentration des particules doit être inférieure à 10% du volume total [54].

### 3.7.4 L'Environnement Ansys Workbench

Ansys Workbench est un environnement de simulation intégré développé par ANSYS Inc., permettant aux ingénieurs et scientifiques de concevoir, simuler et valider virtuellement leurs produits avant la production physique. Il inclut des outils de simulation multiphysiques et des modules de modélisation pour divers domaines de la physique, tels que la mécanique, l'électronique et la thermique. Dans notre cas, nous utiliserons Ansys Fluent [56].

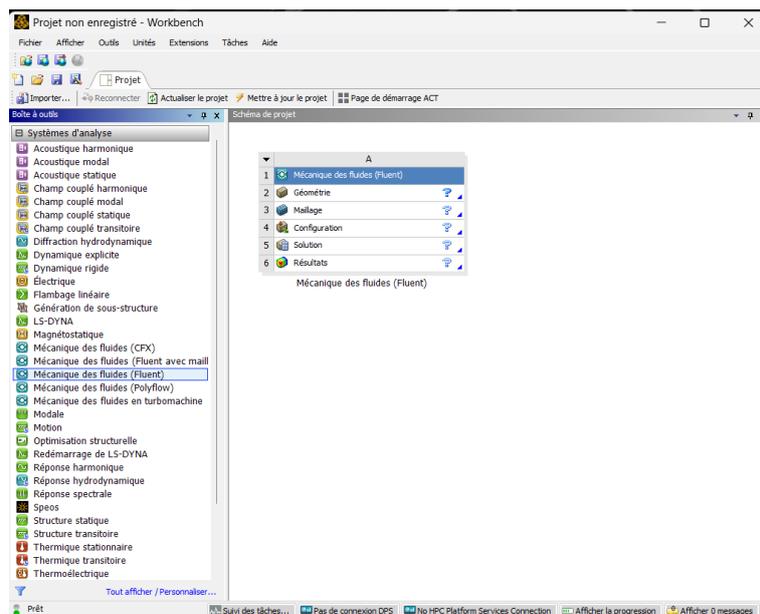


FIG. 3.7 : Interface Ansys Workbench

### 3.7.5 Le Simulateur Ansys-Fluent

Ansys-Fluent est un logiciel complet de dynamique des fluides numérique (CFD) développé par ANSYS Inc., largement utilisé dans des secteurs tels que l'énergie, l'environnement et l'industrie pharmaceutique. Ce logiciel offre des capacités avancées pour simuler une diversité de phénomènes fluides, y compris les écoulements laminaires, turbulents et multiphasiques [56].

### 3.7.6 Principe de Fonctionnement de l'ANSYS

L'étude des écoulements dans un cyclone nécessite l'utilisation d'un logiciel de calcul CFD performant, tel que Fluent. Le schéma ci-dessous illustre son principe de fonctionnement.

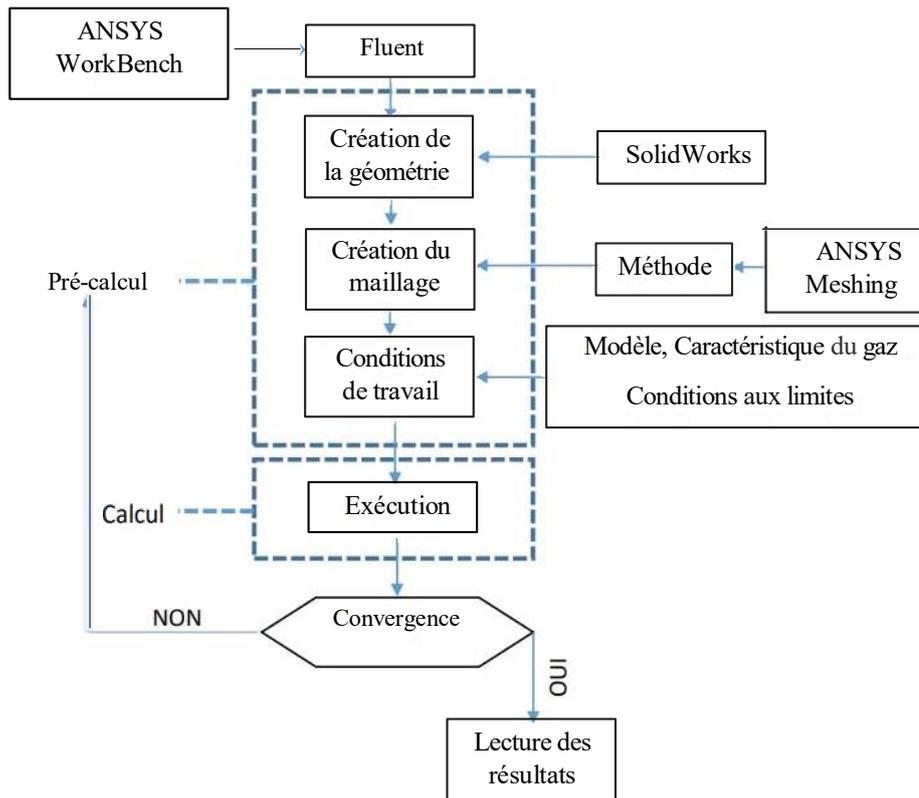


FIG. 3.8 : Fonctionnement de Base de Fluent

Le pré-calcul est réalisé à l'aide de plusieurs programmes complémentaires qui facilitent la création des géométries avec SolidWorks et la génération du maillage via ANSYS Meshing. Les étapes de simulation et d'interprétation des résultats sont ensuite menées dans Fluent (voir annexe B) [54].

### 3.7.7 Méthodologie Détaillée de la Simulation

- \* **Création de la géométrie** : Dans cette étape, nous allons importer notre géométrie, dont les dimensions ont été spécifiées par le logiciel Aspen HYSYS et ensuite conçues à l'aide de SolidWorks, pour poursuivre l'analyse et la validation du cyclone.

- \* **Choix du Maillage** : Pour effectuer les calculs sur la géométrie, il est nécessaire de la diviser en plusieurs petits morceaux discrets appelés cellules de calcul ou volumes de contrôle. Cela peut être accompli en utilisant une grille, également appelée maillage. Le maillage dépend principalement de la géométrie du problème posé [56]. Dans notre cas, et après plusieurs essais, nous avons opté pour le maillage POLY-HEXCORE, car il s'adapte parfaitement à notre forme de la géométrie.

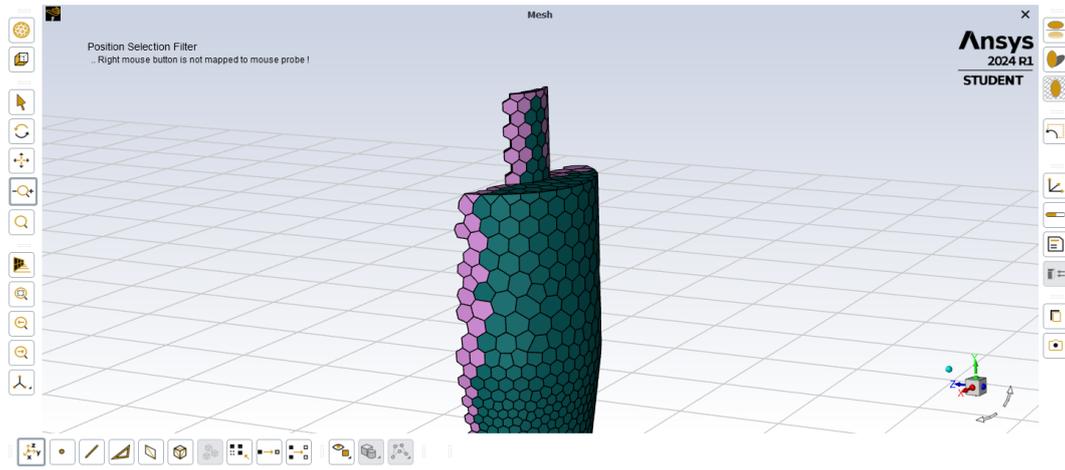


FIG. 3.9 : Schéma Représentatif du Maillage POLY-HEXCORE

Avant le maillage, nous avons ajouté deux couches près des parois. Ce maillage peut offrir une meilleure convergence et une résolution plus élevée.

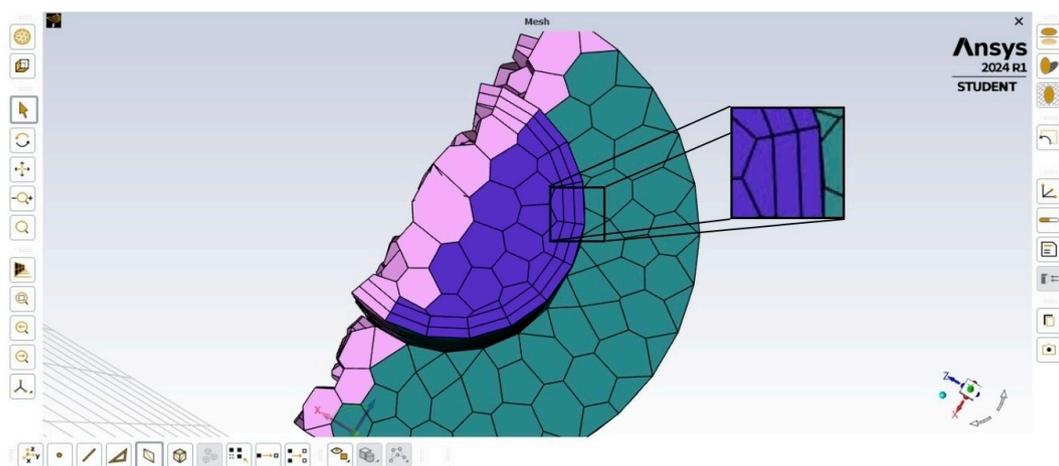


FIG. 3.10 : Illustration du Maillage avec Couches

Pour générer ce maillage, nous utilisons Fluent Meshing, un module de maillage intégré à Fluent qui permet de créer des grilles numériques à l'aide d'un algorithme de maillage automatisé [56].

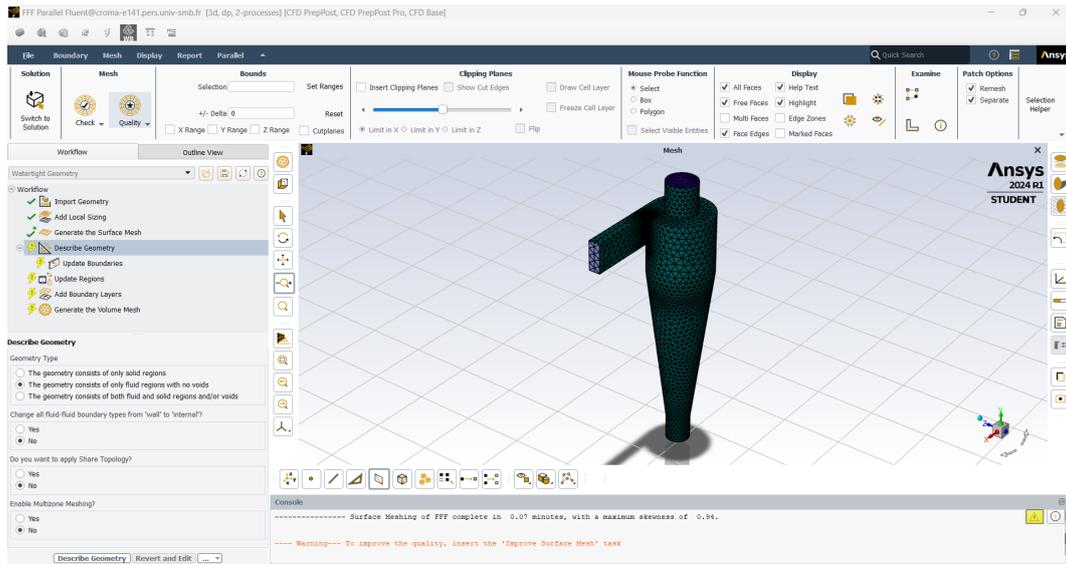


FIG. 3.11 : Interface de fluent Meshing

- \* **Sélection du Modèle de calcul** : Dans le cadre de notre simulation, nous avons utilisé le modèle de turbulence RSM ainsi que le modèle de phase discrète Euler-Lagrangien, qui ont été décrits auparavant.
- \* **Conditions initiales** : L'air est caractérisé par sa densité et sa viscosité, définies comme suit :

TAB. 3.2 : Propriétés Physiques de l'air

Propriétés	Unités	Méthode	Valeurs
Densité	kg/m <sup>3</sup>	constant	33.96
Viscosité	kg/m.s	constant	1.3159e-5

- \* **Conditions aux limites** :

- **La vitesse d'entrée** : Elle est donnée par la formule :

$$V_{\text{entr}} = \frac{Q}{A}$$

où  $Q$  représente le débit d'air à l'entrée et  $A$  la surface de la section transversale.

- **Diamètre hydraulique** : Il est défini comme le rapport entre la surface de la section de passage et son périmètre mouillé par le fluide. Dans notre étude, nous avons calculé le diamètre hydraulique des tubulures d'entrée et de sortie comme suit [54] :

$$D_h = \frac{4A}{P} \begin{cases} D_{h/e} = \frac{4a \cdot b}{2(a+b)} \\ D_{h/s} = \frac{4 \cdot \frac{\pi D^2}{4}}{\pi D} = D \end{cases} \quad (3.10)$$

où  $Q$  représente le débit d'air à l'entrée,  $A$  l'air de la section de passage du fluide (tubulure d'entrée/sortie ducyclone), et  $P$  le périmètre mouillé de cette section (tubulure d'entrée/sortie du cyclone).

Le tableau suivant présente les valeurs définies pour les conditions aux limites de notre simulation, notamment la vitesse et les diamètres hydrauliques aux points d'entrée et de sortie : Paramètres des Conditions aux Limites

TAB. 3.3 : Paramètres des Conditions aux Limites

Paramètre	Valeur
Vitesse (m/s)	4.38
Diamètre hydraulique entrée (m)	0.425
Diamètre hydraulique sortie (m)	0.745

- \* **Conditions de Parois** : Nous avons appliqué une condition de non-glissement et d'absence de transfert de chaleur sur les parois du cyclone.
- \* **Approches de résolution** : La modélisation précise des phénomènes fluidiques exige la résolution des équations de conservation de la masse et de la quantité de mouvement, assurant ainsi une cohérence des champs de pression et de vitesse à chaque étape de la simulation [56]. C'est dans ce cadre que nous avons choisi la méthode SIMPLE pour le couplage de la pression et de la vitesse.
- \* **L'Initialisation** : Après avoir introduit les données, l'étape suivante est dédiée au calcul, réalisé en deux phases complémentaires. La première phase consiste à initialiser le calcul pour évaluer la convergence de la solution. La seconde phase implique de réaliser plusieurs itérations jusqu'à ce que la solution converge

### 3.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons détaillé la méthodologie de conception et de simulation d'un cyclone, une technologie essentielle pour le traitement de l'air dans l'industrie pharmaceutique. Nous avons commencé par définir les conditions de fonctionnement et l'efficacité de séparation requise, puis déterminé les dimensions optimales du cyclone. Ensuite, nous avons décrit les différentes étapes de simulation, en mettant l'accent sur l'utilisation de la dynamique des fluides numérique (CFD) et des outils spécifiques tels qu'Ansys Workbench et Ansys-Fluent.

# Chapitre 4

## Résultats et Discussion

### 4.1 Introduction

Pour réduire le colmatage rapide des filtres, diminuer les coûts de maintenance de la centrale de traitement de l'air (CTA) et respecter les normes de qualité de l'air, nous avons envisagé de mettre en place en amont de la CTA un système de prétraitement par un filtre cyclonique. Ce système permettra de réduire de manière significative la concentration des poussières en amont de la CTA. Pour confirmer notre approche, des simulations ont été réalisées en utilisant deux outils de modélisation :

- **Aspen HYSYS** : Permet de modéliser les processus et d'optimiser les paramètres opérationnels pour améliorer l'efficacité de la séparation des particules dans les cyclones.
- **ANSYS** : Aide à simuler les écoulements et les concentrations de particules dans les cyclones, ce qui est crucial pour valider leur efficacité.

Ce chapitre est structuré en deux parties principales :

- **Résultats des Simulations avec Aspen HYSYS** : Cette section présentera les résultats obtenus pour différentes configurations de cyclones et analysera les performances en termes de réduction des particules.
- **Résultats des Simulations avec ANSYS** : Cette section présentera les résultats des simulations des écoulements et des concentrations de particules, analysera les profils de vitesse et la répartition des particules, et discutera l'efficacité de la configuration choisie.

### 4.2 Analyse des Simulations avec Aspen HYSYS

Les simulations effectuées avec Aspen HYSYS ont permis d'évaluer deux configurations de cyclones. Voici les résultats obtenus pour chaque cas :

- **1er cas** : Un cyclone unique avec une efficacité de 89% et un diamètre de 1,49m

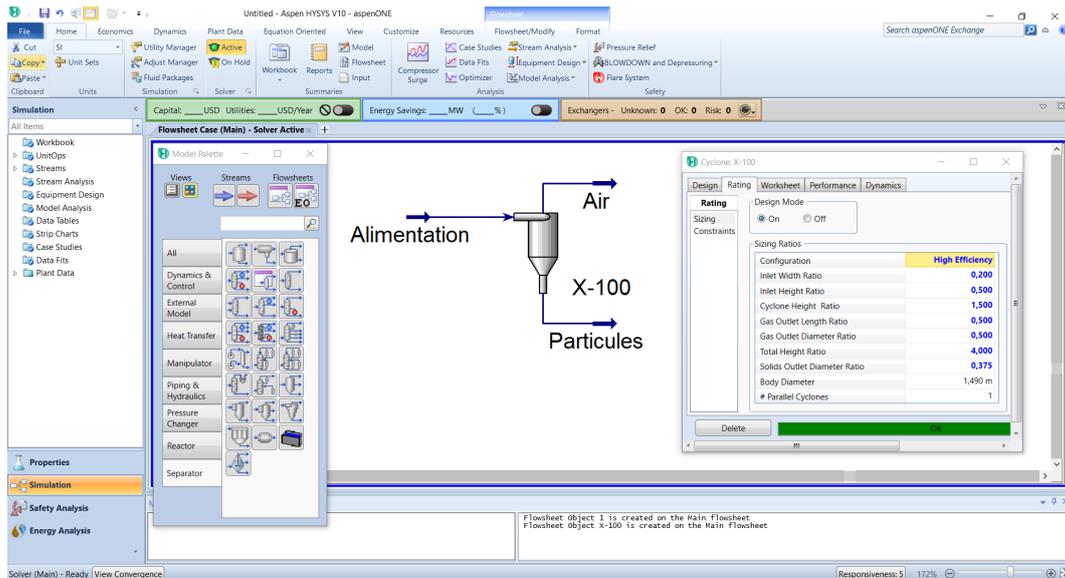


FIG. 4.1 : Un Cyclone Unique avec une Efficacité de 89%

- 2ème cas : Quatre Cyclones en Parallèle avec une Efficacité de 95% et un diamètre de 0,7605

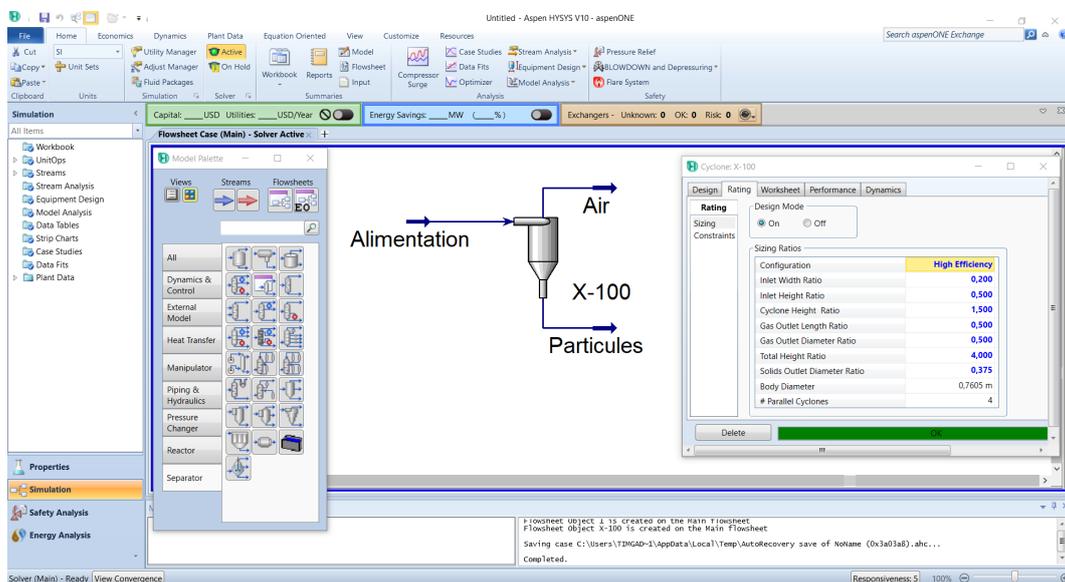


FIG. 4.2 : Quatre cyclones en parallèle avec une efficacité de 95%

Après avoir analysé les résultats des deux configurations de cyclones simulées, le choix final s'est porté sur la solution du Cas 1 avec un seul cyclone en amont de la centrale de traitement de l'air (CTA). Bien que cette solution soit légèrement moins performante en termes d'efficacité de séparation des particules par rapport au Cas 2 (89% contre 95%), elle semble être la plus adaptée aux besoins et aux contraintes de Sanofi, car elle nécessite moins d'espace avec une conception et un coût de maintenance plus simples.

## 4.3 Analyse des Simulations avec ANSYS

Les simulations effectuées avec ANSYS ont permis d'analyser les écoulements et les concentrations de particules à l'intérieur du cyclone. Les résultats obtenus sont cruciaux pour valider l'efficacité du cyclone choisi. Cette section présente une analyse détaillée des profils de vitesse, de la répartition des particules et des phénomènes dynamiques observés dans le cyclone.

### 4.3.1 Le Maillage

Le maillage comporte 76 248 cellules, créées en seulement 0.30 minutes, illustrant ainsi une grande efficacité dans le processus de maillage. La qualité orthogonale du maillage est évaluée à 0.21, ce qui est classifié comme 'Bon' selon les normes ANSYS.

Un maillage de cette qualité assure que les cellules sont bien formées, ce qui est fondamental pour la précision des simulations CFD. De plus, un maillage bien formé favorise une meilleure convergence, car il permet une résolution précise et uniforme des équations de dynamique des fluides [75] .

```

Console
Merging zones...

Cleaning up dead entities...

Merging Domains...
done.

-----
name      id cells (quality < 0.05)  minimum quality cell count
-----
volume-volume  66                        0      0.21323374      76248
-----
name      id cells (quality < 0.05)  minimum quality cell count
-----
Overall Summary  none                       0      0.21323374      76248

Total Number of Cell Zones : 1

[Quality Measure : Orthogonal Quality]

----- 76248 cells were created in : 0.30 minutes
----- The mesh has a minimum Orthogonal Quality of: 0.21
    
```

FIG. 4.3 : Résultat de Maillage de Simulation Numérique

### 4.3.2 La Convergence

La convergence est un aspect crucial des méthodes numériques et des simulations informatiques, particulièrement avec des logiciels comme ANSYS. Une procédure est dite convergente si les erreurs diminuent progressivement au cours des itérations, et une solution est considérée convergée lorsque les itérations successives n'entraînent plus de changements significatifs dans les variables. Ce principe garantit la précision et la fiabilité des résultats obtenus.

Dans les simulations numériques, la convergence se réfère au processus par lequel

les solutions se stabilisent après un certain nombre d'itérations. Une simulation convergente signifie que les erreurs diminuent jusqu'à atteindre un niveau acceptable. Une étude explique que la convergence est atteinte lorsque les résidus des équations discrétisées deviennent suffisamment petits pour que les solutions soient considérées exactes dans les tolérances définies [59].

Dans ANSYS, la convergence des résultats est essentielle pour obtenir des simulations précises. Comme mentionné précédemment, ANSYS utilise diverses méthodes numériques pour résoudre des équations différentielles partielles (EDP) modélisant des phénomènes physiques, telles que les équations de Navier-Stokes pour la dynamique des fluides ou les équations de Maxwell pour l'électromagnétisme. La précision des résultats dépend fortement de cette convergence. Pour évaluer la convergence, ANSYS utilise des critères basés sur les résidus des équations. Le résidu mesure l'écart entre les solutions successives d'une équation discrétisée. Un faible résidu indique que la solution ne change plus de manière significative entre les itérations, signalant ainsi que la solution est convergée. Les critères de convergence couramment utilisés incluent les résidus relatifs et absolus, ainsi que des critères basés sur l'énergie et les forces [60].

La qualité du maillage est cruciale pour la convergence des simulations. Un maillage adéquat permet de capturer avec précision les gradients de la solution, ce qui est essentiel pour obtenir des résultats précis. Il a été démontré que des maillages fins et bien distribués permettent une meilleure résolution des détails physiques, conduisant à une convergence plus rapide et plus précise [61]. Le processus de pré-calcul, incluant la génération du maillage et la définition des conditions initiales et aux limites, est déterminant pour la convergence. Un mauvais choix de maillage ou des conditions aux limites inadéquates peuvent entraîner des résultats erronés ou une non-convergence des simulations. Des techniques de raffinement adaptatif du maillage peuvent améliorer la convergence en ajustant automatiquement le maillage pour mieux capturer les zones de forts gradients [62].

Plusieurs stratégies peuvent être adoptées pour améliorer la convergence des simulations dans ANSYS. L'utilisation de solveurs avancés, de méthodes de relaxation et de techniques de sous-relaxation permet de stabiliser et d'accélérer la convergence. L'utilisation de préconditionneurs efficaces peut également réduire le nombre d'itérations nécessaires pour atteindre la convergence [63].

Dans notre étude, nous avons examiné la convergence des simulations numériques dans un cyclone d'élimination de poussières, en calculant le résidu à chaque étape de l'équation choisie. Dès que le résidu dépasse une valeur fixée, le processus s'arrête, indiquant que les calculs ont convergé et passent au pas de temps suivant. Nos itérations ont été réalisées pour un pas de temps de 0,001, avec 1500 itérations, et la convergence a été obtenue à une précision de  $10^{-3}$ . Autrement dit la simulation a été exécutée sur une longue période jusqu'à ce que la solution parvienne à un état quasi-stable. Une fois cette stabilité obtenue, les moyennes en termes de temps et les variations dans les directions axiale et radiale ont été calculées.

Dans une étude récente sur les modèles de turbulence dans les cyclones d'élimination de poussières, l'importance de la résolution du maillage et du choix des modèles de turbulence a été mise en avant pour assurer une convergence précise. L'étude a comparé différents modèles, concluant que les modèles LES offrent une meilleure précision que les modèles RANS. Bien que leur approche ait utilisé un maillage non uniforme, les principes de convergence et de précision restent pertinents pour notre méthode [64].

Une autre recherche s'est concentrée sur l'utilisation de méthodes numériques pour améliorer l'efficacité des cyclones d'élimination de poussières. En utilisant des techniques de raffinement adaptatif du maillage, cette étude a démontré que l'ajustement dynamique du maillage autour des zones de forts gradients de vitesse permet d'obtenir des résultats plus précis avec moins d'itérations. Cette approche complète notre utilisation de maillages fins pour capturer les détails physiques, en incorporant une adaptation continue du maillage pour améliorer la convergence [65].

Une autre étude a analysé l'impact des paramètres opérationnels sur la performance des cyclones à l'aide de simulations CFD. Les résultats ont souligné l'importance critique des conditions aux limites et des paramètres de fonctionnement, comme la vitesse d'entrée des gaz et la géométrie du cyclone, sur la convergence des simulations. En ajustant les pas de temps et en appliquant des critères de convergence stricts, cette étude a réussi à obtenir des résultats précis et stables, similaires à notre approche de réglage du pas de temps pour assurer une convergence fiable [66].

On peut dire que les différentes études montrent bien que la qualité du maillage, le choix des modèles de turbulence, et l'ajustement des paramètres de simulation sont essentiels pour obtenir des résultats précis et fiables.

Dans notre étude, grâce à notre choix de maillage fin et de modèles de turbulence appropriés, nous avons pu obtenir des résultats précis et fiables. La convergence des simulations a été atteinte avec succès, garantissant que les résultats sont conformes aux tolérances définies et fournissant ainsi une base solide pour évaluer l'efficacité du cyclone sélectionné.

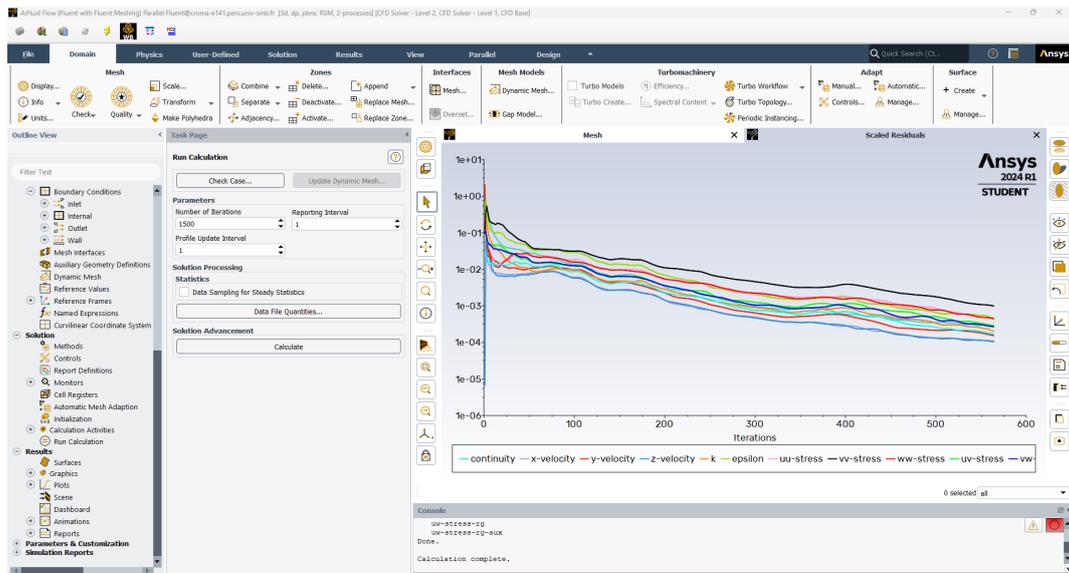


FIG. 4.4 : Évolution de la convergence dans l'analyse du cyclone

### 4.3.3 Vitesse Magnitude

La figure ci-dessous présente les résultats de la simulation de la vitesse magnitude dans un cyclone d'élimination de poussières. Les profils de vitesse sont affichés pour trois plans différents :

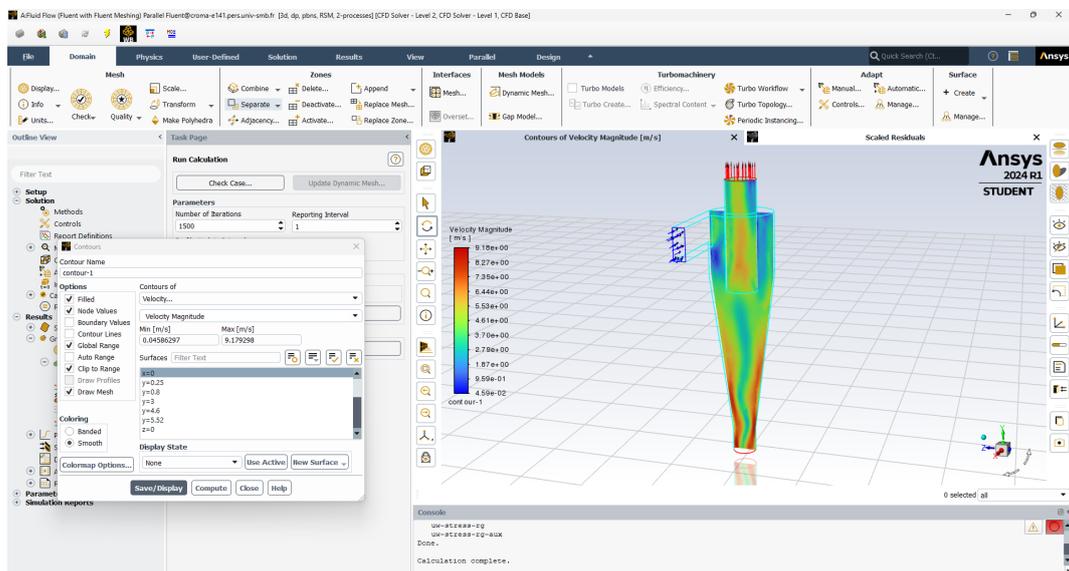


FIG. 4.5 : Contours de vitesse magnitude dans le plan  $x=0$

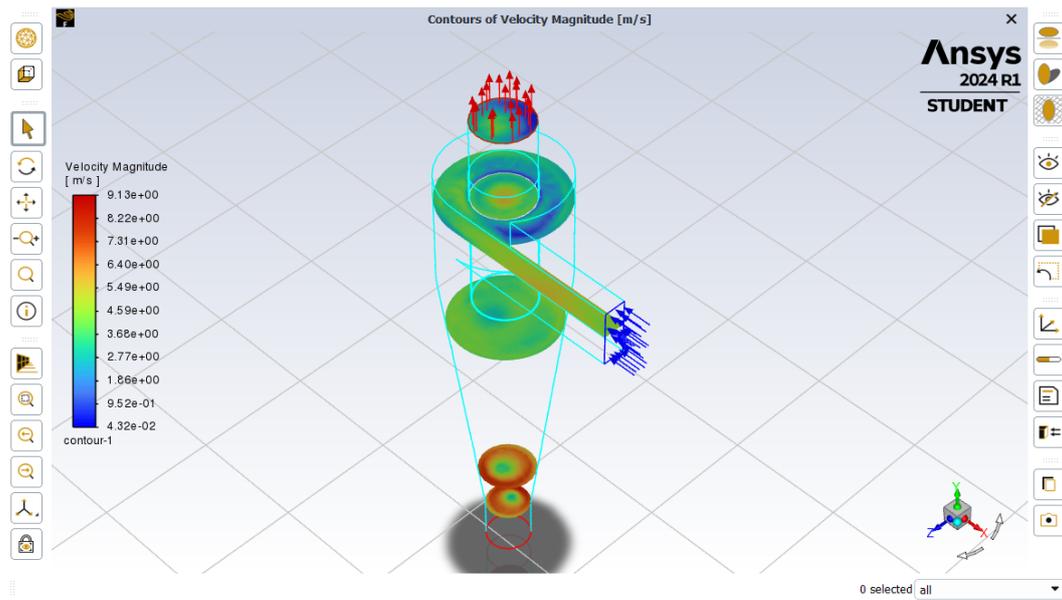


FIG. 4.6 : Contours de vitesse magnitude pour différentes positions de  $y$

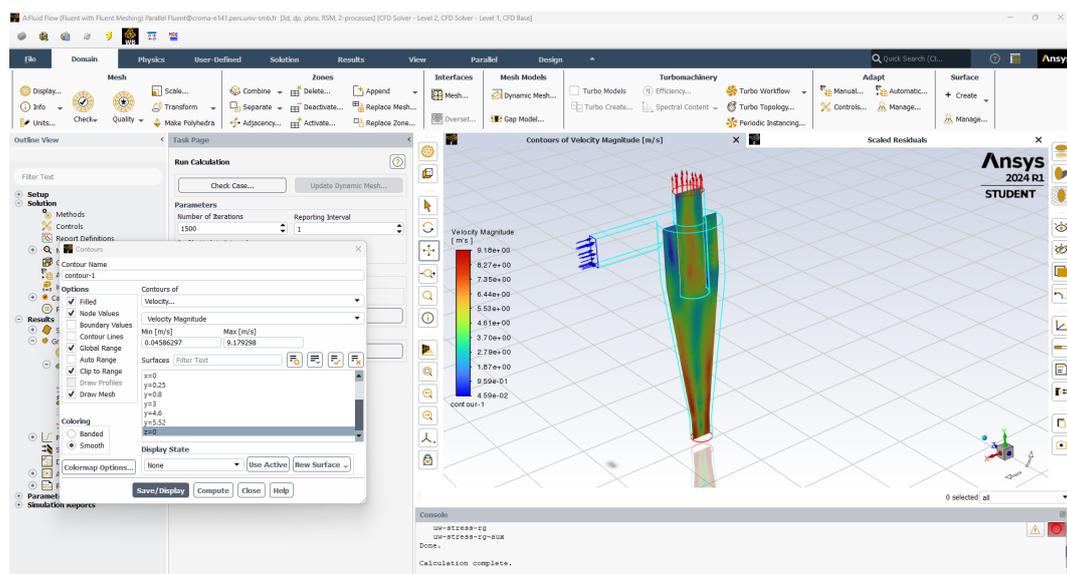


FIG. 4.7 : Contours de vitesse magnitude dans le plan  $z=0$

Pour les trois plans ( $x=0$ ,  $z=0$  et les plans de  $y$ ), la vitesse augmente de haut en bas et du centre vers les parois. Elle est maximale près des parois du cyclone et diminue progressivement vers le centre. Cette distribution est due aux forces centrifuges générées par le mouvement tourbillonnaire des gaz à l'intérieur du cyclone. Les particules en mouvement circulaire subissent des forces centrifuges qui augmentent leur vitesse près des parois du cyclone. La diminution de la vitesse vers le centre est due à la réduction des forces centrifuges et à l'augmentation des forces de traînée [64].

### 4.3.4 Champs de vitesse radiale

La figure 4.7 révèle un comportement complexe du vortex forcé dans un cyclone d'élimination de poussières. Le vortex forcé du centre est un cylindre torsadé en hélice, ce

qui signifie que le mouvement de rotation du fluide forme une spirale complexe qui ne suit pas une ligne droite mais plutôt une trajectoire hélicoïdale. Cela peut être dû à la combinaison de forces centrifuges et de traînée dans un environnement tridimensionnel. L'axe du vortex n'est pas parfaitement aligné avec l'axe géométrique du cyclone, ce qui résulte souvent d'imperfections dans la conception ou d'asymétries dans le flux d'entrée, créant un déséquilibre dans le champ de vitesse du cyclone. L'axe du vortex n'est pas rectiligne mais légèrement courbé. Cette courbure indique une instabilité dynamique dans le cyclone, résultant de l'interaction complexe entre les forces centrifuges et les forces de traînée. Ce phénomène peut être aggravé par des fluctuations dans le flux d'entrée et des variations de la géométrie interne du cyclone. On distingue que la distribution de la vitesse radiale augmente du centre vers les parois, indiquant que les particules sont poussées vers l'extérieur par la force centrifuge. Cela est typique dans les cyclones où les particules sont séparées du gaz porteur par des forces centrifuges. Il est également noté que la vitesse radiale augmente brusquement vers la sortie (A-A). Ce phénomène peut être attribué à la géométrie de la tubulure de sortie qui influence le champ de vitesse et la trajectoire des particules.

Près de l'entrée (plan B-B ) de la tubulure de sortie, la vitesse radiale montre un écoulement vers l'intérieur (valeurs négatives), mais cet écoulement change rapidement sous l'influence de la force centrifuge, devenant positif. Cette inversion rapide de la vitesse radiale peut provoquer des instabilités dans le cyclone, affectant ainsi son efficacité et ses performances globales. Les instabilités peuvent mener à une mauvaise séparation des particules et à une augmentation des pertes de charge. Il est visible sur les figures que la distribution de la vitesse radiale est positive d'un côté et négative de l'autre, à cause de la forme asymétrique de la tubulure d'entrée.

Plusieurs études ont expliqué l'impact des asymétries géométriques sur les performances des cyclones. Les caractéristiques des écoulements tourbillonnaires dans les cyclones et l'importance des forces centrifuges et de la géométrie sur le comportement des vortex ont été explorées, montrant que des asymétries dans le flux d'entrée peuvent provoquer des instabilités similaires à celles observées dans notre étude [67]. L'impact des asymétries géométriques sur les performances des cyclones, notamment l'effet des variations de la tubulure d'entrée et de sortie sur la distribution des vitesses et la stabilité du vortex, a été examiné, révélant que les asymétries peuvent entraîner des fluctuations de la vitesse radiale et des instabilités similaires aux observations de notre étude [68]. Les caractéristiques des écoulements dans les cyclones ont été investiguées à l'aide de simulations numériques, mettant en lumière les instabilités causées par des conditions de bord non idéales et des asymétries structurelles, confirmant que des forces centrifuges variables peuvent causer des fluctuations de la vitesse radiale et des courbures dans l'axe du vortex [69]. Les effets des configurations de la tubulure d'entrée sur le comportement dynamique des cyclones, incluant l'impact sur les profils de vitesse radiale et les instabilités vortex, ont également été discutés, avec des techniques de raffinement adaptatif du maillage montrant une amélioration de la convergence et de la précision des résultats, en ligne avec vos observations sur les instabilités causées par des asymétries géométriques [62].

## Chapitre 4. Résultats et Discussion

En conclusion, le profil de vitesse dans un cyclone, tel qu'observé dans la figure 4.7, reflète des interactions complexes entre la géométrie, les forces centrifuges, et les caractéristiques d'entrée/sortie du fluide. Les instabilités résultantes et la distribution asymétrique des vitesses radiales sont des phénomènes bien documentés dans la littérature scientifique et nécessitent une attention particulière pour optimiser la performance des cyclones d'élimination de poussières.

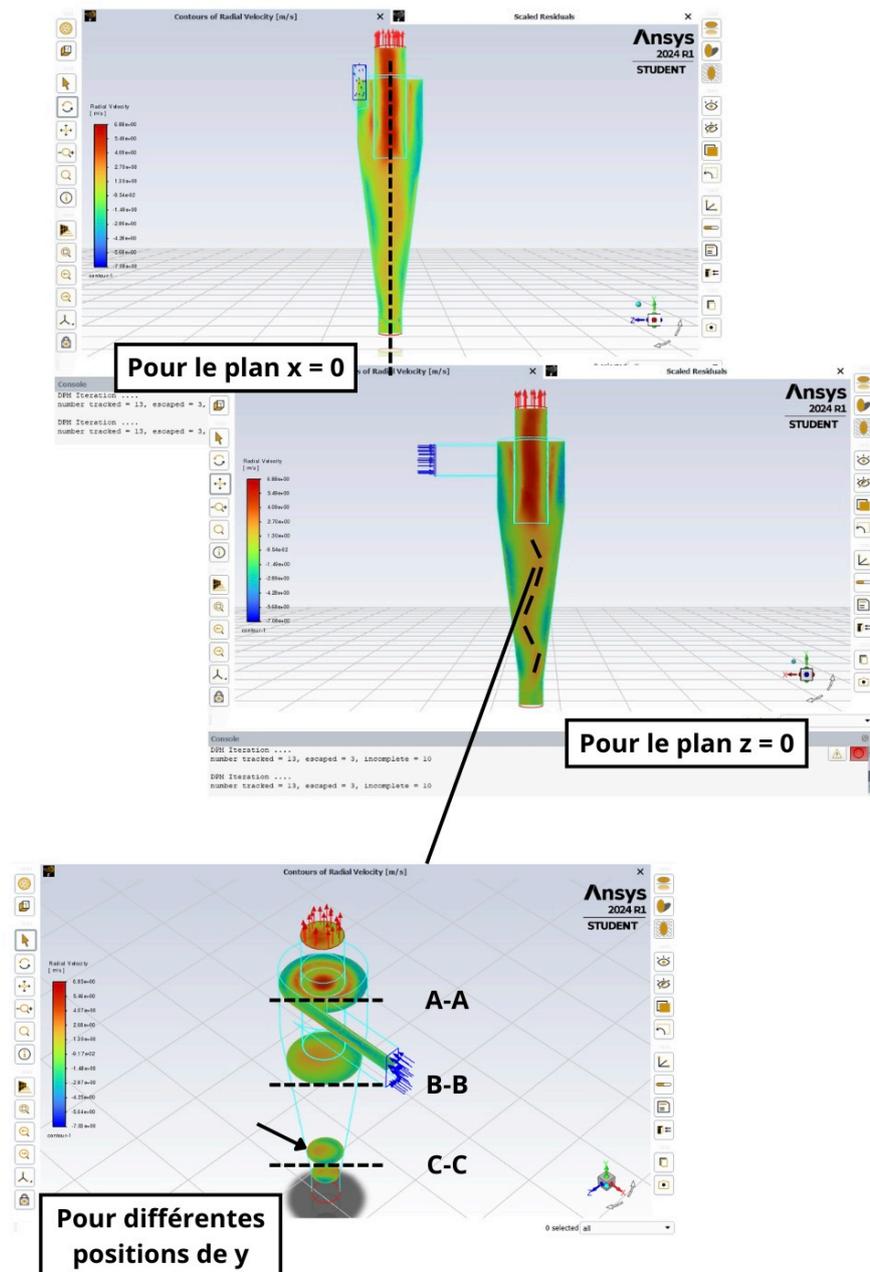


FIG. 4.8 : Contours du champ de vitesse radiale

### 4.3.5 Champs de vitesse axiale

La figure 4.8 montre que le vortex forcé est un cylindre hélicoïdal torsadé et non totalement symétrique axialement, en particulier dans la partie conique. On distingue deux valeurs, une négative sur un côté et l'autre positive de l'autre côté. De ce fait, on remarque un dipôle d'écoulement à section axiale qui est formé comme représenté sur la figure 3. L'orientation du dipôle est observée localisée vers le haut le long de la ligne centrale du cyclone parce que le tourbillon tourne en même temps que l'écoulement autour de l'axe géométrique du cyclone et présente une structure hélicoïdale prononcée. En outre, puisque le flux de gaz ascendant rencontre une singularité (rétrécissement de la section) à l'entrée de la tubulure de sortie, la vitesse axiale atteint une valeur maximale à cet endroit. On distingue aussi dans la figure III.9 (B-B) que le centre de l'écoulement ascendant ne coïncide pas avec le centre géométrique du cyclone. Cela devrait être l'une des principales raisons pour lesquelles une tubulure de sortie excentrique est prévue pour certains cyclones afin de réduire la chute de pression et d'affaiblir le flux chaotique.

Plusieurs études ont exploré l'impact des asymétries géométriques et des conditions de fonctionnement sur les profils de vitesse axiale dans les cyclones. Les fluctuations dans la vitesse axiale peuvent être causées par des configurations asymétriques de la tubulure d'entrée, entraînant des variations significatives dans le comportement du vortex [70]. Les effets des configurations de la tubulure de sortie sur les performances des cyclones ont été analysés, et il a été trouvé que les modifications géométriques peuvent considérablement affecter la distribution des vitesses axiales et la stabilité des écoulements [71]. Des simulations numériques ont été utilisées pour étudier les caractéristiques des écoulements dans les cyclones, montrant comment les singularités et les rétrécissements de section influencent la formation des crêtes de vitesse axiale. Ces effets peuvent provoquer des instabilités et affecter les performances globales du cyclone [72]. Les dynamiques des flux dans les cyclones avec différentes géométries ont été investiguées, démontrant que l'utilisation de tubulures de sortie excentriques peut aider à réduire les fluctuations de vitesse et à améliorer la stabilité du flux [73].

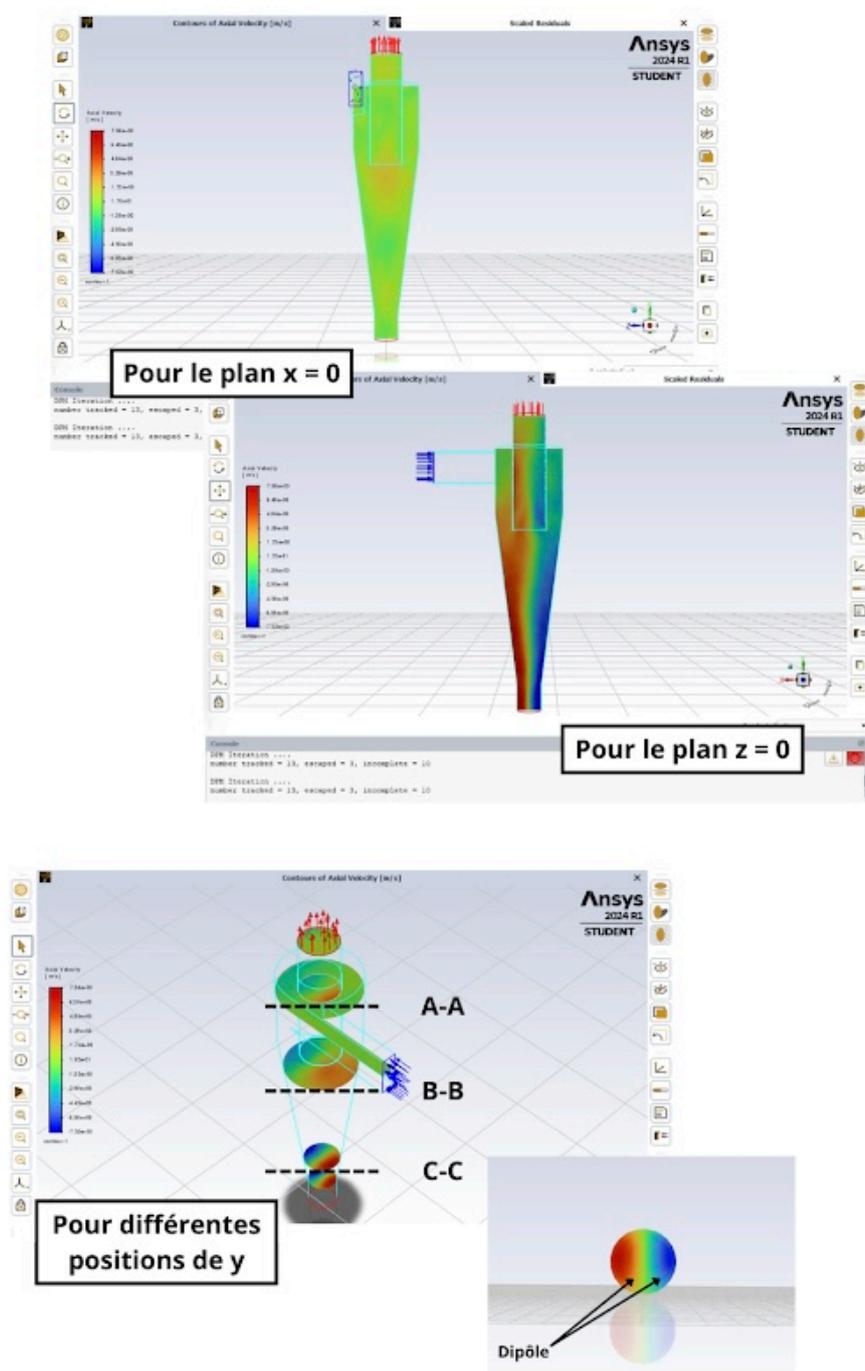


FIG. 4.9 : Contours du champs de vitesse axiale

### 4.3.6 Concentration

Les figures ci-dessus présentent les résultats de la simulation de la concentration des particules dans un cyclone d'élimination de poussières. Pour la visualisation de la simulation d'élimination des particules, une coupe longitudinale (figure 4.9) et une coupe transversale (figure 4.10) ont été étudiées.

Selon les résultats de la simulation présentés sur la figure 4.9, on remarque que concentration plus élevée des particules se retrouve le long des parois du cyclone. Cette distribution est due aux forces centrifuges générées par le mouvement tourbillonnaire des gaz à l'intérieur du cyclone. Les particules, étant plus denses que le l'air aspiré, sont projetées vers l'extérieur du flux central et se concentrent le long des parois du cyclone [64]. La concentration des particules diminue progressivement vers le centre du cyclone , où les forces centrifuges sont contrebalancées par les forces de traînée [65]. Les zones de forte concen [66].

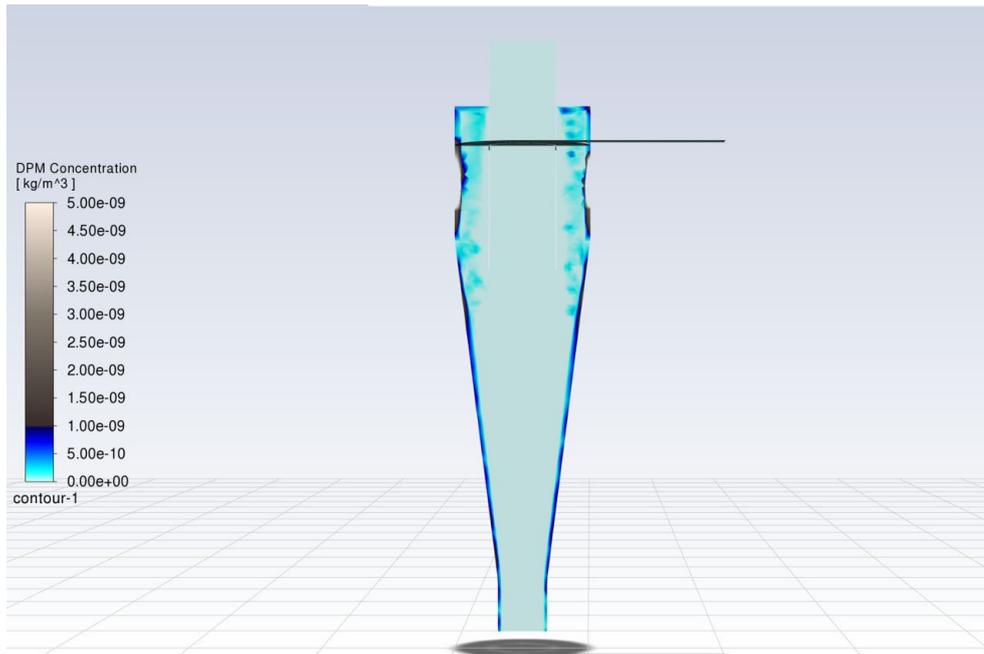


FIG. 4.10 : Concentration de particules en coupe longitudinale

La figure 4.10 présente une vue de coupe transversale de la distribution de la concentration des particules à l'intérieur du cyclone. Selon les résultats trouvés, la concentration la plus élevée se trouve près des parois extérieures du cyclone, formant un anneau de particules concentrées. Le centre de cette coupe montre une concentration beaucoup plus faible, illustrant l'effet de la force centrifuge qui pousse les particules vers l'extérieur [74] d'où une bonne séparation des particules pour l'efficacité et dimensions du cyclone calculées.

La distribution annulaire des particules dans la vue de coupe transversale confirme que le cyclone fonctionne correctement, en séparant les particules du flux de gaz et en les forçant vers les parois, où elles peuvent être collectées et retirées du système [65].

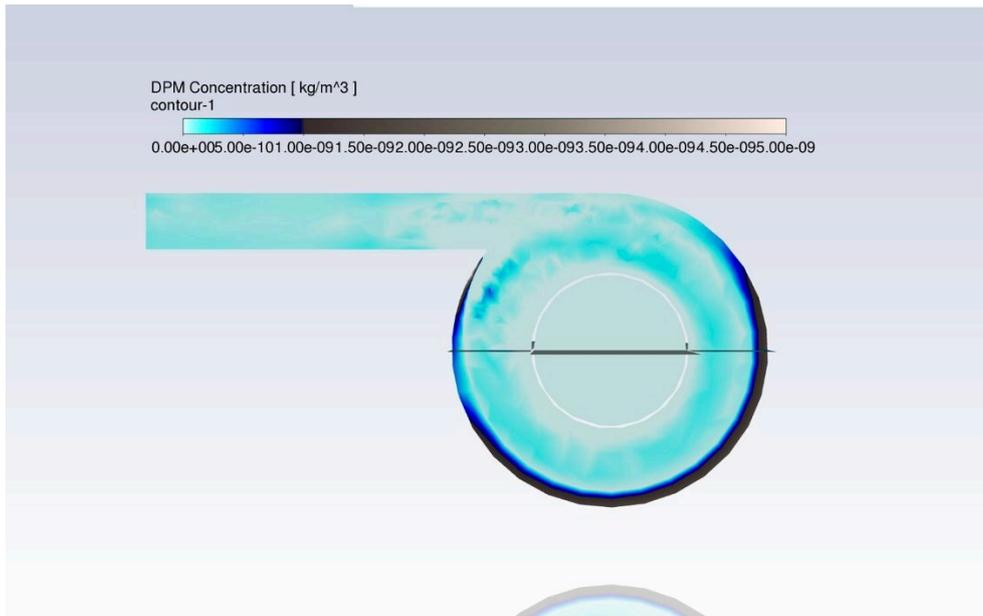


FIG. 4.11 : Concentration de particules en coupe transversale

L'analyse de la concentration des particules dans le cyclone, illustrée par les graphes de simulation 4.11, 4.12, 4.13, montre une séparation efficace des particules grâce aux forces centrifuges [66]. Les concentrations élevées près des parois et les faibles concentrations au centre indiquent que le cyclone est capable de capturer et de retirer efficacement les particules du flux de gaz.

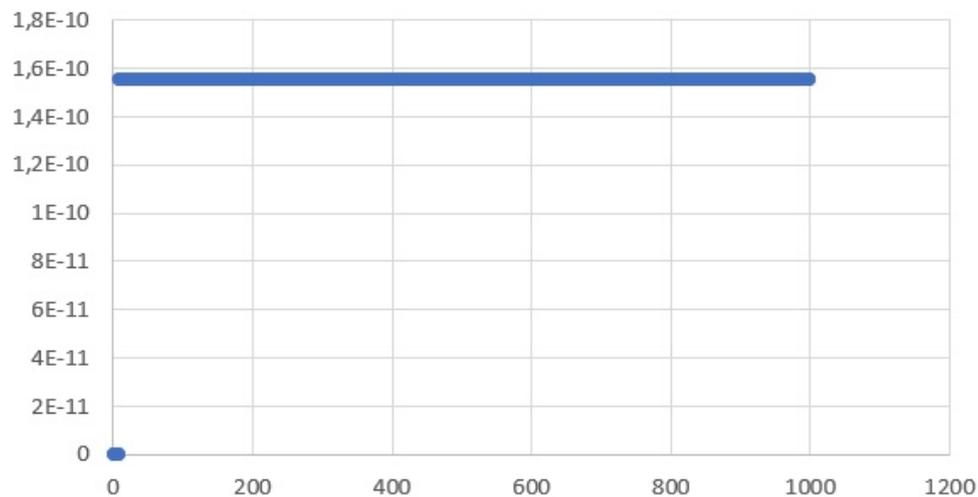


FIG. 4.12 : Concentration des particules à l'entrée du cyclone

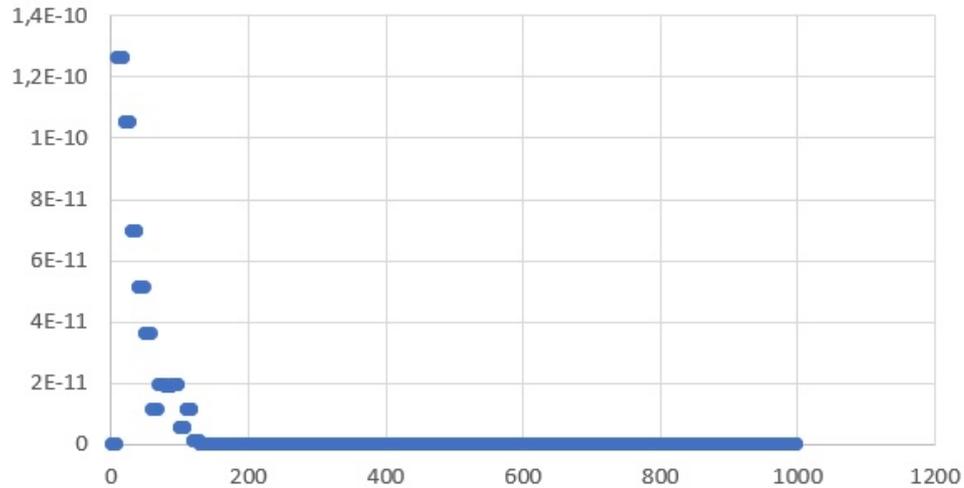


FIG. 4.13 : Concentration des particules à la sortie supérieure du cyclone

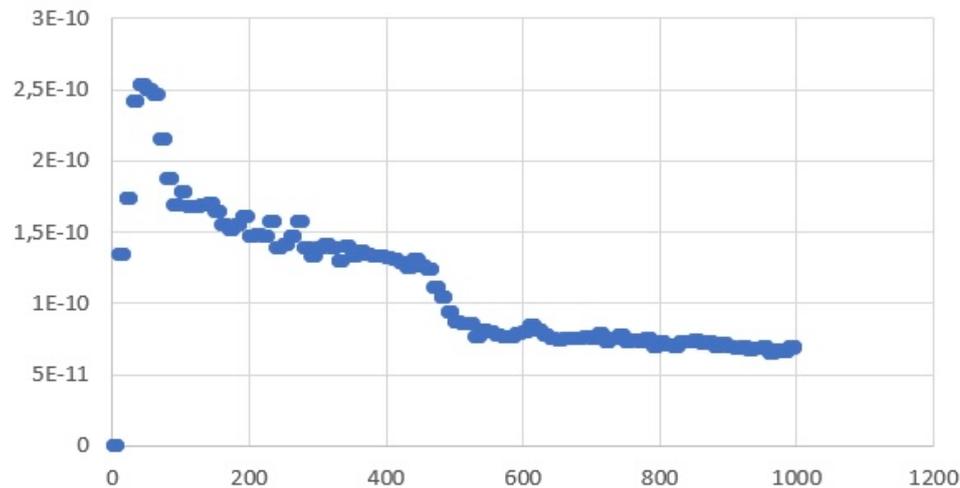


FIG. 4.14 : Concentration des particules à la sortie inférieure du cyclone

## 4.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté et analysé les résultats des simulations effectuées pour évaluer la performance du cyclone conçu. Utilisant Aspen HYSYS et ANSYS, nous avons reproduit les conditions réelles de fonctionnement et validé l'efficacité du cyclone dans la capture des particules. Les analyses des paramètres tels que la vitesse des particules, les champs de vitesse radiale et axiale, et les concentrations de particules ont démontré que le cyclone réduit efficacement la quantité de particules atteignant les filtres principaux. Cela permet de prolonger la durée de vie des filtres et de réduire les coûts de maintenance, confirmant ainsi la viabilité du cyclone comme solution de prétraitement dans les installations de traitement de l'air de l'industrie pharmaceutique, contribuant à améliorer la qualité de l'air et à protéger la santé des employés.

# Conclusion Générale

Le travail réalisé dans la présente étude a été motivé par la nécessité de répondre à des problématiques environnementales et économiques liées au colmatage rapide des filtres dans les systèmes de traitement d'air. Les filtres, essentiels pour capturer les particules fines générées lors des divers processus de fabrication pharmaceutique, se colmataient fréquemment, entraînant des coûts de maintenance élevés et des interruptions de production.

L'objectif de notre étude était de dimensionner et simuler un système de prétraitement pour réduire la charge de particules sur les filtres de la centrale de traitement de l'air de l'industrie pharmaceutique Sanofi et prolonger leur durée de vie tout en maintenant la qualité de l'air et la sécurité des employés. Le choix du système de prétraitement s'est porté sur le filtre cyclonique. Pour ce faire, une méthodologie a été adoptée pour mener à bien le projet, comprenant plusieurs étapes clés allant de la détermination des conditions de fonctionnement à la simulation CFD, en passant par la conception et l'optimisation du cyclone à l'aide du logiciel HYSYS.

Les conditions de fonctionnement ont été définies en tenant compte des spécificités des installations de Sanofi, notamment le débit de  $3500 \text{ m}^3/\text{h}$ , la température du gaz de  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ , ainsi que la distribution granulométrique des particules (1 à plus de  $10 \text{ }\mu\text{m}$ ). Le choix d'une efficacité de séparation de 89% pour le cyclone a été guidé par un compromis entre performance et complexité de la conception. Le dimensionnement par le logiciel HYSYS du filtre cyclonique a permis d'obtenir des dimensions de 1 m de diamètre, 0,5 diamètre d'entrée et 0,7 m de diamètre de sortie. Les simulations effectuées avec les logiciels Aspen HYSYS et ANSYS ont permis de valider la conception du cyclone et de prévoir ses performances en conditions réelles.

Les résultats des simulations ont montré une réduction significative des particules atteignant les filtres principaux grâce à l'utilisation du cyclone, confirmant ainsi son efficacité en tant que solution de prétraitement. L'analyse des écoulements et des concentrations de particules a révélé une distribution favorable des vitesses et des particules, assurant une séparation efficace.

Les résultats obtenus ont démontré le potentiel des systèmes de prétraitement cycloniques pour améliorer la durabilité des filtres dans les centrales de traitement d'air de l'industrie pharmaceutique. Ces résultats ouvrent la voie à des applications plus larges de cette technologie dans d'autres secteurs industriels confrontés à des problématiques similaires. La poursuite des recherches et des développements dans ce domaine promet de contribuer à des solutions plus durables et économiques pour la gestion des émissions de poussières industrielles.

Les perspectives futures pour ce projet incluent des études expérimentales pour valider les résultats des simulations et optimiser encore davantage la conception du cyclone.

# Références bibliographiques

- [1] Gurjar, B. R., Molina, L. T., & Ojha, C. S. P. Air Pollution: Health and Environmental Impacts. CRC Press, 2016.
- [2] Kulkarni, P., Baron, P. A., & Willeke, K. Aerosol Measurement: Principles, Techniques, and Applications. 3rd ed. John Wiley & Sons, 2011.
- [3] Datta, A., Ghosh, S., & Sarkar, S. A review on filter clogging and its solution in air filtration systems. Environmental Technology Reviews. 2015, vol. 4, n°. 1, pp. 1-12.
- [4] Chung, K., Seo, D., & Kim, S. Performance evaluation of HEPA filters for removing nanoparticles in cleanroom applications. Journal of Aerosol Science. 2013, vol. 67, pp. 99-109.
- [5] Liu, Y., Wu, X., & Gao, J. Pre-filtration techniques in air filtration systems. Indoor and Built Environment. 2017, vol. 26, no. 3, pp. 355-363.
- [6] Wu, T., Zheng, Y., & Tang, G. Maintenance and cleaning strategies for air filtration systems. Building and Environment. 2018, vol. 142, pp. 25-34.
- [7] Chen, J., Zhang, X., & Liu, X. Performance of a cyclone separator for removing ultrafine particles. Separation and Purification Technology. 2014, vol. 134, pp. 24-30.
- [8] Wang, L., Cheng, Y., & Yu, G. Application of cyclone separators in the pharmaceutical industry for the control of dust emissions. Chemical Engineering Research and Design. 2019, vol. 144, pp. 382-389.
- [9] Tang, H., Li, Z., & Huang, X. Performance analysis of cyclone separators with different vortex finder lengths. Powder Technology. 2020, vol. 360, pp. 1016-1023.
- [10] Li, X., Wang, Z., & Zhang, Y. Optimization of cyclone separation efficiency and pressure drop by using different inlet section shapes. Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers. 2016, vol. 63, pp. 113-120.
- [11] RAHAL, Farid. Modélisation et simulation de la pollution atmosphérique, le cas de la région d'Alger. Thèse de doctorat : Chimie. Oran : Université de Science et de la Technologie Mohamed Boudiaf, 2015. Référence
- [12] PHAM, Huu Thien. Contribution à l'étude de la dépollution de l'air chargé en composés organiques volatils par un procédé associant un plasma de décharge à barrière diélectrique impulsionnelle et des catalyseurs. Thèse de doctorat : Énergétique. Orléans : Université d'Orléans, 2014. Référence
- [13] GERMAIN, Gaston. La pollution atmosphérique. Observatoire des nuisances aériennes, 2006. Référence
- [14] LACOUR, Stéphanie. Inventaires d'émissions. Champs sur Marne : Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, pp. 1-47. Référence
- [15] CHOUKI, Yahia et AIT ALLALA, Lucia. Étude de la pollution de l'air par les particules et leur impact sur les panneaux solaires . Mémoire de fin d'études : Génie de l'Environnement. Alger : ENP, 2021. Référence
- [16] TEBANI, Mohaemd. Pollution de l'environnement. Chlef : Université de Hassiba Ben Bouaali, pp. 29. Référence
- [17] DIEME, Denis. Caractérisation physicochimique et étude des effets toxiques sur des cellules pulmonaires BEAS-2B des polluants particuliers de la ville de Dakar (Sénégal). Thèse de doctorat : Toxicologie. Hauts-de-France : Université du Littoral Côte d'Opale, 2011. Référence
- [18] BELHADJ, Hanane. Détection de la pollution atmosphérique à l'aide du lichen Xanthoria parietina (L.) bio-accumulateur d'éléments traces métalliques dans le centre urbain de la ville de Sidi Bel Abbes

- (Algérie occidentale). Thèse de doctorat : Sciences de l'Environnement. Sidi Bel Abbes : Université Djillali Liabes de Sidi Bel Abbès, 2015. Référence
- [19] CUNIASSE, Benjamin ; FEUTREN, Etienne ; VIEIRA DA ROCHA, Thamara ; ALLEMAND, Nadine. Acidification, eutrophisation et pollution photochimique. In : Citepa. Rapport Secten édition 2020. Référence
- [20] BOCZKOWSKI, Jorge; LANONE, Sophie. Impacts de la pollution de l'air sur la santé humaine. Paris : Institut Mines-Télécom, 2019, pp. 17-21. Référence
- [21] LEOZ-GARZIANDIA, Eva. Les impacts de la pollution de l'air. Paris : Institut Mines-Télécom, 2019, pp. 9-12. Référence
- [22] FONTAN, Jacques. Les particules polluantes de l'air : de quoi s'agit-il ? In : Encyclopédie de l'Environnement. Référence
- [23] BELHADJI, Mohamed Redha. Étude de la pollution atmosphérique par les métaux lourds réglementés et les aérosols acides véhiculés par les PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>1</sub> à Alger. Mémoire de fin d'études : Génie de l'Environnement. Alger : ENP, 2020. Référence
- [24] LE COQ, Laurence. Élimination des particules. Techniques de l'Ingénieur. 2006, pp. 2-4. Disponible sur la plateforme Techniques de l'Ingénieur.
- [25] BADRAN, Ghidaa. Pollution atmosphérique particulaire : caractérisation physico-chimique et comparaison des effets toxiques des fractions extractible et non-extractible des PM<sub>2.5</sub>. Thèse de doctorat : Toxicologie. Hauts-de-France : Université du Littoral Côte d'Opale; Conseil National de la Recherche Scientifique (Liban), 2019. Référence
- [26] ABADIE, Marc Olivier. Contribution à l'étude de la pollution particulaire : rôle des parois, rôle de la ventilation. Thèse de doctorat : Génie Civil et sciences de l'habitat. La Rochelle : Université de la Rochelle, 2000. Référence
- [27] SEIGNEUR, Christian. La pollution photochimique : les particules. In : Pollution atmosphérique : Concepts, théorie et applications. France: Belin : Education, 2018, pp. 206-241. Référence
- [28] EL HIJRI, Jawad. Contribution expérimentale et numérique à l'étude de la remise en suspension des particules par l'activité humaine. Thèse de doctorat : Génie Civil et sciences de l'habitat. La Rochelle : Université de la Rochelle, 2008. Référence
- [29] Masclat, Pierre<sup>1</sup>; CACHIER, Hélène<sup>2</sup>. L'aérosol atmosphérique : Caractéristiques physico-chimiques. Laboratoire TEPE. 1998, vol. 26, n° 9, pp 11-17. Référence
- [30] Canada.ca. Pluies acides : causes et effets. Référence
- [31] GUTH, Jonathan. Modélisation des aérosols à l'aide du modèle de chimie transport MOCAGE : application à la qualité de l'air dans le bassin méditerranéen. Thèse de doctorat : Océanographie. Toulouse : Université Toulouse 3 Paul Sabatier, 2015. Référence
- [32] World Health Organization. What are the main health impacts of particulate matter ? 2019. Référence
- [33] GONAZALEZ, Luisa; JOUBERT Aurélie; ANDRES, Yves; LIARD, Myriam; RENNER, Christophe; LE COQ, Laurence. Filtration performances of HVAC filters for PM<sub>10</sub> and microbial aerosols-Influence of management in a lab-scale air handling unit. Aerosol Science and Technology [En ligne]. 2016, vol. 50, n°6, pp. 555-567. Référence

- [34] BANDALY, Victor; JOUBERT, Aurélie; LE CANN, Pierre; ANDRES, Yves. Comparaison du comportement et caractérisation de deux bioaérosols viraux sur les filtres d'une centrale de traitement de l'air (CTA). In : Congrès Français sur les Aérosols. Référence
- [35] DELTRIAN. Filtre CTA : Qu'est-ce que c'est. Référence
- [36] ABD ZAID ABD ALI, Safaa. Filtration performances of antimicrobial and regular HVAC filters regarding PM10 and microbial aerosols in laboratory and realistic conditions. Thèse de doctorat : Génie des Procédés et Bioprocédés. Nantes : Ecole nationale supérieure Mines-Télécom Atlantique, 2018. Référence
- [37] GONZALEZ, Luisa Fernanda. Influence de la gestion des centrales de traitement d'air des réseaux de ventilation de bâtiments sur le développement d'aérosols microbiens. Thèse de doctorat : Environnement. Nantes : Ecole nationale supérieure Mines, 2014. Référence
- [38] FORTHOMME, Audrey. I Caractérisation du comportement des aérosols microbiens dans les réseaux de ventilation d'espaces occupés [En ligne]. Thèse de doctorat : Environnement. Nantes : Ecole nationale supérieure Mines, 2012. Référence
- [39] SAHU, Manoranjan; MALYAN, Vasudev; MAYYA, Yelia. Technologies for Controlling Particulate Matter Emissions from Industries. In : SINGH, Swatantra Pratap. RATHINAM, Karthik; GUPTA, Tarun; AGARWAL, Avinash Kumar. Pollution control technologies, Current Status and Future prospects. India : 2021, pp. 253-290. Référence
- [40] SONGKHAM, Wanpen. A Study on Designed and Constructed of Multi-cyclone for Dust Removal in Surfboard Sanding Process. Master of Science Thesis : Environmental Science, Engineering. Thailand : Mahidol University, 2004. Référence
- [41] PARK, Donggeun; GO, Jeung Sang. Design of Cyclone Separator Critical Diameter Model Based on Machine Learning and CFD. Processes. 2020, vol. 8, pp. 1-13. Référence
- [42] KUBRA, Kadeejathul Kubra. 3D-Simulation of Cyclone Separator. International Conference on Systems, Energy & Environment. 2019, pp. 1-7. Référence
- [43] STENDAL, Erik A. R. Multiphase Flows in Cyclone Separators, Modeling the classification and drying of solid particles using CFD. Master of Science Thesis : Engineering, Environmental Science. Gothenburg : Chalmers university of technology, 2013. Référence
- [44] BHAGHAT, Sakshi; SONUNE, Vaibhav; ANSARI, Rafey; DOKHPANDE, Sonali. Simulation and designing of cyclone separator. International Research Journal of Modernization in Engineering Technology and Science. 2023, vol. 5, pp. 3973-3943. Référence
- [45] HANNOU, Hadjer . Étude de l'influence de la température sur les performances du solvant DEA utilisé dans la désulfuration de GPL par le logiciel Aspen . Mémoire de projet de fin d'études : Génie des Procédés et de l'Environnement. Alger : École Nationale Polytechnique, 2023.
- [46] REDJEB, Youcef. Modèles thermodynamiques du Logiciel Aspen Hysys. In : Simulateurs de procédés. El Oued. Université d'El Oued : 2023. Référence
- [47] ZEGHID, Abderrahim; TALBI, Kamel. Comparaison des différents modèles de turbulence d'un écoulement aérodynamique dans un cyclone. Revue des Energies Renouvelables CISM'08 Oum El Bouaghi. 2008, pp. 311-324. Référence
- [48] SIMSCALE. What is CFD | Computational Fluid Dynamics ? Référence

- [49] KIMOUCHE, Nedjmeddine. Utilisation des méthodes CFD pour Simuler le Phénomène de la Ventilation Naturelle dans les Locaux. Thèse de doctorat : Génie Climatique. Constantine : Université frères Mentouri, 2018. Référence
- [50] SOUALMI, Riadh. Simulation CFD de la distribution des temps de séjour dans un réacteur agité en utilisant le logiciel Ansys-Fluent. Mémoire de Projet de Fin d'Etudes : Génie Chimique . Alger : École Nationale Polytechnique, 2023. Référence
- [51] OUALHA, Khaled. Étude expérimentale et numérique de l'hydrodynamique de l'écoulement dans un réacteur continu. Thèse de doctorat : Mécanique des fluides Paris. Université Sorbonne Paris Cité, 2017. Référence
- [52] BOOTS, Mitchell. Ansys Software Tutorial, Introduction to Ansys Fluent #1: First CFD Simulation. The University of Newcastle Australia, 2024. Référence
- [53] K.W. Chu; B. Wang; D.L. Xu; Y.X. Chen; A.B. Yu. CFD-DEM simulation of the gas-solid flow in a cyclone separator. *Chemical Engineering Science*. 2011, vol. 66, pp. 834-847. Référence
- [54] ATLAOUI, Mahdi ; BENKORTBI, Hadjer. Dimensionnement des principaux équipements de la station de compression GR4 et étude de l'efficacité de séparation et du comportement hydrodynamique du gaz dans les micro-cyclones. Mémoire de fin d'études : Master en Transport et Distribution. Université M'Hamed BOUGARA de Boumerdes, 2016.
- [55] Main Resource of Computational Fluid Dynamics. Discrete Phase Model (DPM). Référence
- [56] Ansys Fluent. Ansys Fluent Theory Guide. ANSYS Inc. 2021, pp. 1069. Référence
- [57] SOLIDWORKS. Qu'est-ce que SOLIDWORKS CAO 3D ? Référence
- [58] PAVARD, Gaëtan; JOUBERT, Aurélie; ANDRES, Yves; LE CANN, Pierre. Performance de filtration particulaire et microbiologique des filtres d'unités de traitement d'air dans un bâtiment de bureaux à faible consommation d'énergie sur 12 mois. *Buildings*, 2022, vol. 12, n° 1475, pp. 1-16.
- [59] Zhang, X., Liu, F., & Chen, Z. Advances in numerical methods for fluid dynamics. *Annual Review of Fluid Mechanics*. 2020, vol. 52, pp. 409-435
- [60] Xie, Y., He, S., & Sun, J. Evaluation of convergence criteria in computational fluid dynamics simulations. *International Journal of Numerical Methods in Fluids* [en ligne]. 2019, vol. 90(4), pp. 301-318.
- [61] Guo, Z., Zhang, L., & Chen, X. Computational fluid dynamics and its applications in energy, environment, and biomedicine. *Journal of Computational Physics*. 2021, no. 448, art. 110652.
- [62] Liu, Y., Wu, X., & Gao, J. Adaptive mesh refinement techniques for large-scale numerical simulations. *Computers & Fluids*. 2022, no. 232, art. 105183.
- [63] Wang, H., Li, Q., & Zhang, S. Preconditioners for iterative solvers in computational fluid dynamics. *Advances in Engineering Software*. 2021, no. 157, art. 103012.
- [64] Elsayed, K., & Lacor, C. The effect of modeling and meshing on the simulation of cyclones. *Powder Technology*. 2011, vol. 214(2), pp. 276-282.
- [65] Huang, J., & Zhang, X. Numerical study on the performance of cyclone separators with adaptive mesh refinement. *Chemical Engineering Journal*. 2020, no. 391, art. 123512.

- [66] Kuan, B., & Schwarz, M. P. CFD simulation of cyclone separators to improve efficiency. *Minerals Engineering*. 2014, vol. 56, pp. 103-112.
- [67] Gupta, A., & Mohanty, A. K. Characteristics of swirling flows in cyclones: A review. *Powder Technology*. 2007, vol. 171(1), pp. 25-42.
- [68] Salcedo, R., & Candido, J. Performance of cyclones with different inlet geometries. *Chemical Engineering and Processing*. 2001, vol. 40(3), pp. 279-287.
- [69] Hoekstra, A. J., Derksen, J. J., & Van den Akker, H. E. A. An experimental and numerical study of turbulent swirling flow in gas cyclones. *Chemical Engineering Science*. 1999, vol. 54(13-14), pp. 2055-2065.
- [70] Chen, X., & Shi, W. Effects of inlet configurations on the flow field and performance of cyclones. *Powder Technology*. 2019, no. 346, pp. 112-121.
- [71] Zhao, J., Wang, L., & Zhang, Y. Influence of outlet tube configurations on the performance of gas cyclones. *Chemical Engineering Journal [en ligne]*. 2020, no. 380, art. 122506.
- [72] Li, Y., & Wang, X. Numerical simulation of gas flow and particle separation in cyclones with different cone lengths. *Advanced Powder Technology*. 2021, vol. 32(4), pp. 1274-1286.
- [73] Wang, S., & Zhang, T. Investigation of flow dynamics in cyclones with eccentric outlet tubes. *Journal of Aerosol Science*. 2022, no. 160, art. 105870.
- [74] Fluent Inc. *Fluent 6.3 User's Guide*. 2006.
- [75] ADAM, Nor Mariah Adam & ATTIA, Osam & AL-SULTTANI, Ali Omran & MAHMOOD, Hussein Adel. CFD Letters Numerical Analysis for Solar Panel Subjected with an External Force to Overcome Adhesive Force in Desert Areas. *CFD letter*. 2020, 12, Issue 9, pp.60-75. Référence

# Annexes

## Annexe A

# Réglementations environnementales et normes de qualité de l'air en Algérie

12	JOURNAL OFFICIEL DE LA REPUBLIQUE ALGERIENNE N° 43	20 Jomada El Oula 1424 20 juillet 2003
<p>Le mandat doit être donné par écrit par chaque personne concernée.</p> <p>L'association qui exerce une action en justice en application des alinéas précédents peut exercer devant toute juridiction pénale les droits reconnus à la partie civile</p> <p style="text-align: center;"><b>TITRE III</b></p> <p style="text-align: center;"><b>DES PRESCRIPTIONS DE PROTECTION ENVIRONNEMENTALE</b></p> <p>Art. 39. — La présente loi institue les prescriptions de protection :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- de la diversité biologique ;</li> <li>- de l'air et de l'atmosphère ;</li> <li>- de l'eau et des milieux aquatiques ;</li> <li>- de la terre et du sous-sol ;</li> <li>- des milieux désertiques ;</li> <li>- du cadre de vie.</li> </ul> <p style="text-align: center;">Chapitre 1</p> <p style="text-align: center;"><b>Des prescriptions de protection relatives à la diversité biologique</b></p> <p>Art. 40. — Nonobstant les dispositions des lois relatives à la chasse et à la pêche et lorsqu'un intérêt scientifique particulier ou que les nécessités ayant trait au patrimoine biologique national justifient la conservation d'espèces animales non domestiques ou végétales non cultivées, sont interdits :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- la destruction ou l'enlèvement des oeufs ou des nids, la mutilation, la destruction, la capture ou l'enlèvement, la naturalisation d'animaux de ces espèces ou, qu'ils soient vivants ou morts, leur transport, leur colportage, leur utilisation, leur mise en vente, leur vente ou leur achat ;</li> <li>- la destruction, la coupe, la mutilation, l'arrachage, la cueillette ou l'enlèvement de végétaux de ces espèces ou de leurs fructifications, ou de toute autre forme prise par ces espèces au cours de leur cycle biologique, leur transport, leur colportage, leur utilisation, leur mise en vente, leur vente ou leur achat, ainsi que la détention des spécimens prélevés dans le milieu naturel ;</li> <li>- la destruction, l'altération ou la dégradation du milieu particulier à ces espèces animales ou végétales.</li> </ul> <p>Art. 41. — La liste des espèces animales non domestiques et des espèces végétales non cultivées protégées est fixée, en tenant compte des conditions de reconstitution des populations naturelles en cause ou de leurs habitats et des exigences de protection de certaines espèces animales pendant les périodes et les circonstances où elles sont particulièrement vulnérables .</p> <p>Il est précisé également pour chaque espèce :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- la nature des interdictions mentionnées à l'article 40 ci-dessus qui lui sont applicables ;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- la durée de ces interdictions, les parties du territoire et les périodes de l'année auxquelles elles s'appliquent.</li> </ul> <p>Les modalités d'application de cet article sont fixées par voie réglementaire.</p> <p>Art. 42. — Sans préjudice des dispositions de la présente loi et des textes législatifs en vigueur, toute personne a le droit de détenir un animal, sous réserve des droits des tiers, des exigences du cadre de vie, de santé, de sécurité et d'hygiène, et dans des conditions qui excluent toute atteinte à la vie ou à la santé de celui-ci.</p> <p>Art. 43. — Sans préjudice des dispositions législatives en vigueur relatives aux installations classées pour la protection de l'environnement, l'ouverture des établissements d'élevage d'animaux d'espèces non domestiques, de vente, de location, de transit ainsi que l'ouverture des établissements destinés à la présentation au public de spécimens vivants de la faune locale ou étrangère, doivent faire l'objet d'une autorisation.</p> <p>Les modalités et les conditions de délivrance de cette autorisation ainsi que les règles applicables aux établissements existants sont fixées par voie réglementaire.</p> <p style="text-align: center;">Chapitre 2</p> <p style="text-align: center;"><b>Des prescriptions de protection de l'air et de l'atmosphère</b></p> <p>Art. 44. — Constitue une pollution atmosphérique au sens de la présente loi, l'introduction, directement ou indirectement, dans l'atmosphère et les espaces clos, de substances de nature à :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- mettre en danger la santé humaine ;</li> <li>- influencer sur les changements climatiques ou appauvrir la couche d'ozone ;</li> <li>- nuire aux ressources biologiques et aux écosystèmes ;</li> <li>- compromettre la sécurité publique ;</li> <li>- incommoder la population ;</li> <li>- provoquer des nuisances olfactives ;</li> <li>- nuire à la production agricole et aux produits agro-alimentaires ;</li> <li>- altérer les constructions et porter atteinte au caractère des sites ;</li> <li>- détériorer les biens matériels.</li> </ul> <p>Art. 45. — Les immeubles, les établissements industriels, commerciaux, artisanaux ou agricoles ainsi que les véhicules ou autres objets mobiliers sont construits, exploités ou utilisés selon les exigences de protéger l'environnement, d'éviter et de réduire les pollutions atmosphériques.</p> <p>Art. 46. — Lorsque les émissions polluantes de l'atmosphère constituent une menace pour les personnes, l'environnement ou les biens, leurs auteurs doivent mettre en œuvre toutes dispositions nécessaires pour les supprimer ou les réduire.</p>	

FIG. A.1 : Perspectives relatives à la surveillance de la qualité de l'air

8 Dhou El Hidja 1426 8 janvier 2006	JOURNAL OFFICIEL DE LA REPUBLIQUE ALGERIENNE N° 01	3
<b>DECRETS</b>		
<p style="text-align: center;">-----★-----</p> <p><b>Décret exécutif n° 06-02 du 7 Dhou El Hidja 1426 correspondant au 7 janvier 2006 définissant les valeurs limites, les seuils d'alerte et les objectifs de qualité de l'air en cas de pollution atmosphérique.</b></p> <p>-----</p> <p>Le Chef du Gouvernement,</p> <p>Sur le rapport du ministre de l'aménagement du territoire et de l'environnement,</p> <p>Vu la Constitution, notamment ses articles 85-4° et 125 (alinéa 2) ;</p> <p>Vu la loi n° 90-09 du 7 avril 1990, complétée, relative à la wilaya ;</p>	<p>Vu la loi n° 03-10 du 19 Joumada El Oula 1424 correspondant au 19 juillet 2003 relative à la protection de l'environnement dans le cadre du développement durable ;</p> <p>Vu le décret présidentiel n° 04-136 du 29 Safar 1425 correspondant au 19 avril 2004 portant nomination du Chef du Gouvernement ;</p> <p>Vu le décret présidentiel n° 05-161 du 22 Rabie El Aouel 1426 correspondant au 1er mai 2005 portant nomination des membres du Gouvernement ;</p> <p>Vu le décret exécutif n° 02-115 du 20 Moharram 1423 correspondant au 3 avril 2002 portant création de l'observatoire national de l'environnement et du développement durable ;</p> <p style="text-align: center;"><b>Décète :</b></p> <p>Article 1er. — En application des dispositions de l'article 10 de la loi n° 03-10 du 19 Joumada El Oula 1424 correspondant au 19 juillet 2003, susvisée, le présent décret a pour objet de définir les valeurs limites, les seuils d'alerte et les objectifs de qualité de l'air en cas de pollution atmosphérique.</p> <p>Art. 2. — Au sens du présent décret, il est entendu par :</p> <ul style="list-style-type: none"><li>* <b>Objectifs de qualité</b> : Un niveau de concentration de substances polluantes dans l'atmosphère, fixé sur la base de connaissances scientifiques, dans le but d'éviter, de prévenir ou de réduire les effets nocifs de ces substances sur la santé humaine ou sur l'environnement, à atteindre dans une période donnée.</li><li>* <b>Valeur limite</b> : Un niveau maximal de concentration de substances polluantes dans l'atmosphère, fixé sur la base de connaissances scientifiques.</li><li>* <b>Seuil d'information</b> : Un niveau de concentration des substances polluantes dans l'atmosphère au delà duquel une exposition de courte durée a des effets limités et transitoires sur la santé de catégories de la population particulièrement sensibles.</li><li>* <b>Seuil d'alerte</b> : Un niveau de concentration des substances polluantes dans l'atmosphère au delà duquel une exposition de courte durée présente un risque pour la santé humaine ou pour l'environnement.</li><li>* <b>Centile 98</b> : Pourcentage de valeurs de dépassement autorisé par année civile, soit 175 heures de dépassement autorisées par année civile de 365 jours.</li><li>* <b>Centile 99,9</b> : Pourcentage de valeurs de dépassement autorisé par année civile, soit 24 heures de dépassement autorisées par année civile de 365 jours.</li></ul>	

FIG. A.2 : Valeurs limites des paramètres de rejets atmosphériques 1

4	JOURNAL OFFICIEL DE LA REPUBLIQUE ALGERIENNE N° 01	8 Dhou El Hidja 1426 8 janvier 2006
<p>Art. 3. — La surveillance de la qualité de l'air concerne les substances suivantes :</p> <ul style="list-style-type: none"><li>— le dioxyde d'azote ;</li><li>— le dioxyde de soufre ;</li><li>— l'ozone ;</li><li>— les particules fines en suspension.</li></ul>	<p><b>4. Particules fines en suspension :</b></p> <p>Selon les caractéristiques physiques et chimiques des particules concernées. Les seuils d'alerte sont fixés, le cas échéant, par arrêté conjoint du ministre chargé de l'environnement et du ministre concerné par l'activité engendrant le type de particule considérée.</p>	
<p>Art. 4. — La surveillance de la qualité de l'air est confiée à l'observatoire national de l'environnement et du développement durable.</p> <p>Elle s'effectue selon les modalités techniques fixées par arrêté du ministre chargé de l'environnement.</p>	<p>Art. 9. — Lorsque les seuils d'information et les seuils d'alerte fixés par l'article 8 ci-dessus sont atteints ou risquent de l'être, le ou les walis concernés prennent toutes les mesures visant à protéger la santé humaine et l'environnement ainsi que les mesures de réduction et/ou de restriction des activités polluantes.</p>	
<p>Art. 5. — La détermination des objectifs de qualité de l'air et des valeurs limites de pollution atmosphérique est fixée sur une base moyenne annuelle.</p>	<p>Art. 10. — Le présent décret sera publié au <i>Journal officiel</i> de la République algérienne démocratique et populaire.</p>	
<p>Art. 6. — Les valeurs limites ainsi que les objectifs de qualité de l'air sont fixés comme suit :</p>	<p>Fait à Alger, le 7 Dhou El Hidja 1426 correspondant au 7 janvier 2006.</p>	
<p><b>1. Dioxyde d'azote :</b></p> <ul style="list-style-type: none"><li>a) objectif de qualité : 135 micro grammes/Nm<sup>3</sup> ;</li><li>b) valeur limite : 200 micro grammes/Nm<sup>3</sup> (centile 98).</li></ul>	<p>Ahmed OUYAHIA.</p> <p>-----★-----</p>	
<p><b>2. Dioxyde de soufre :</b></p> <ul style="list-style-type: none"><li>a) objectif de qualité : 150 micro grammes/Nm<sup>3</sup> ;</li><li>b) valeur limite: 350 micro grammes/Nm<sup>3</sup> (centile 99,9).</li></ul>		
<p><b>3. Ozone :</b></p> <ul style="list-style-type: none"><li>a) objectif de qualité : 110 micro grammes/Nm<sup>3</sup> ;</li><li>b) valeur limite : 200 micro grammes/Nm<sup>3</sup>.</li></ul>		
<p><b>4. Particules fines en suspension :</b></p> <ul style="list-style-type: none"><li>a) objectif de qualité : 50 micro grammes/Nm<sup>3</sup> ;</li><li>b) valeur limite : 80 micro grammes/Nm<sup>3</sup>.</li></ul>		
<p>Art. 7. — Les seuils d'information et les seuils d'alerte sont fixés sur une base moyenne horaire.</p>		
<p>Art. 8. — Les seuils d'information et les seuils d'alerte sont fixés comme suit :</p>		
<p><b>1. Dioxyde d'azote :</b></p> <ul style="list-style-type: none"><li>a) seuil d'information : 400 micro grammes/Nm<sup>3</sup> ;</li><li>b) seuil d'alerte : 600 micro grammes/Nm<sup>3</sup>.</li></ul>		
<p><b>2. Dioxyde de soufre :</b></p> <ul style="list-style-type: none"><li>a) seuil d'information : 350 micro grammes/Nm<sup>3</sup> ;</li><li>b) seuil d'alerte : 600 micro grammes/Nm<sup>3</sup>.</li></ul>		
<p><b>3. Ozone :</b></p> <ul style="list-style-type: none"><li>a) seuil d'information : 180 micro grammes/Nm<sup>3</sup> ;</li><li>b) seuil d'alerte : 360 micro grammes/Nm<sup>3</sup>.</li></ul>		

FIG. A.3 : Valeurs limites des paramètres de rejets atmosphériques 2

## **Annexe B**

### **Les étapes de la simulation CFD sous ANSYS**

## Annexe B. Les étapes de la simulation CFD sous ANSYS

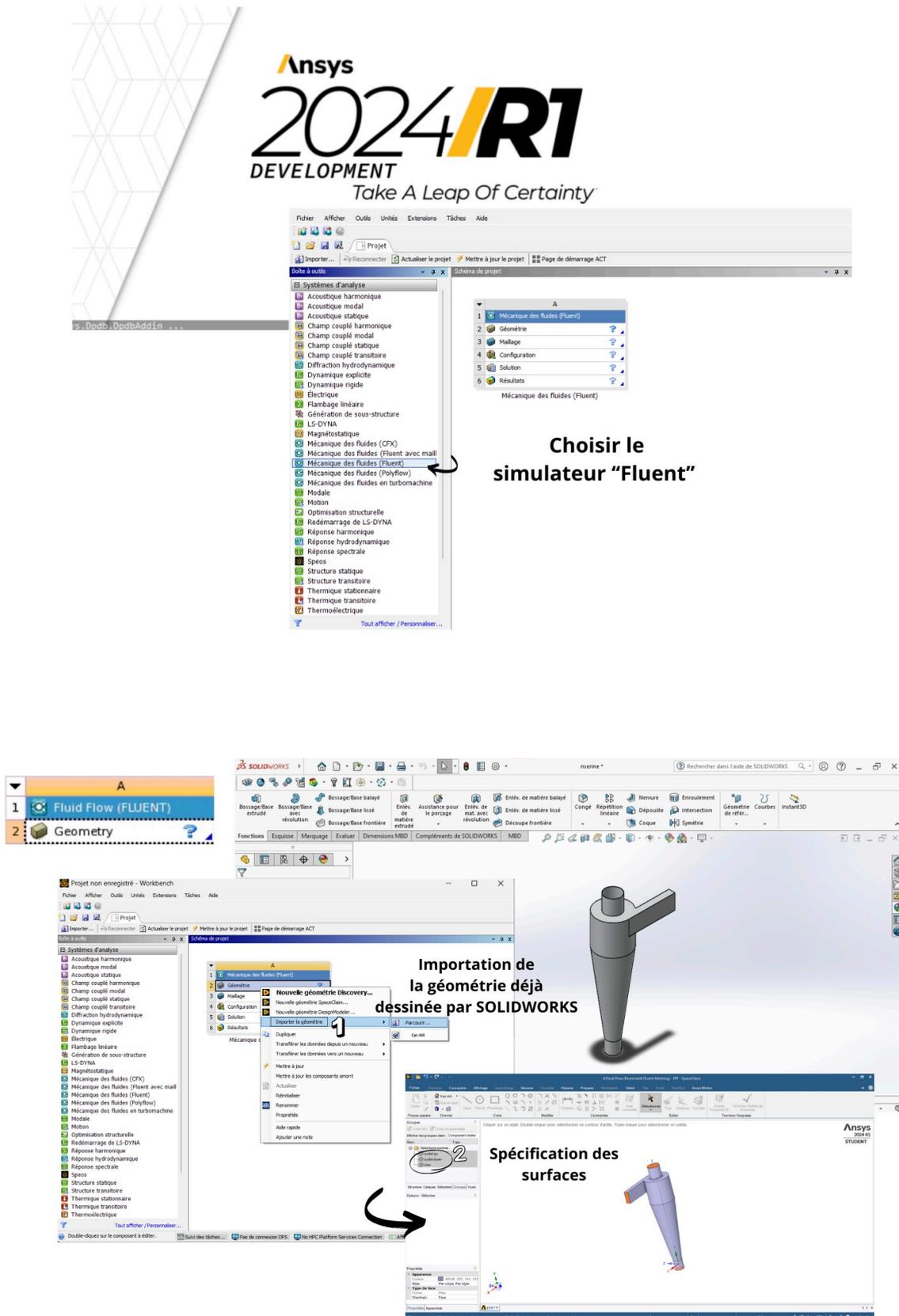


FIG. B.1 : Les étapes de la simulation CFD sous ANSYS 1

## Annexe B. Les étapes de la simulation CFD sous ANSYS

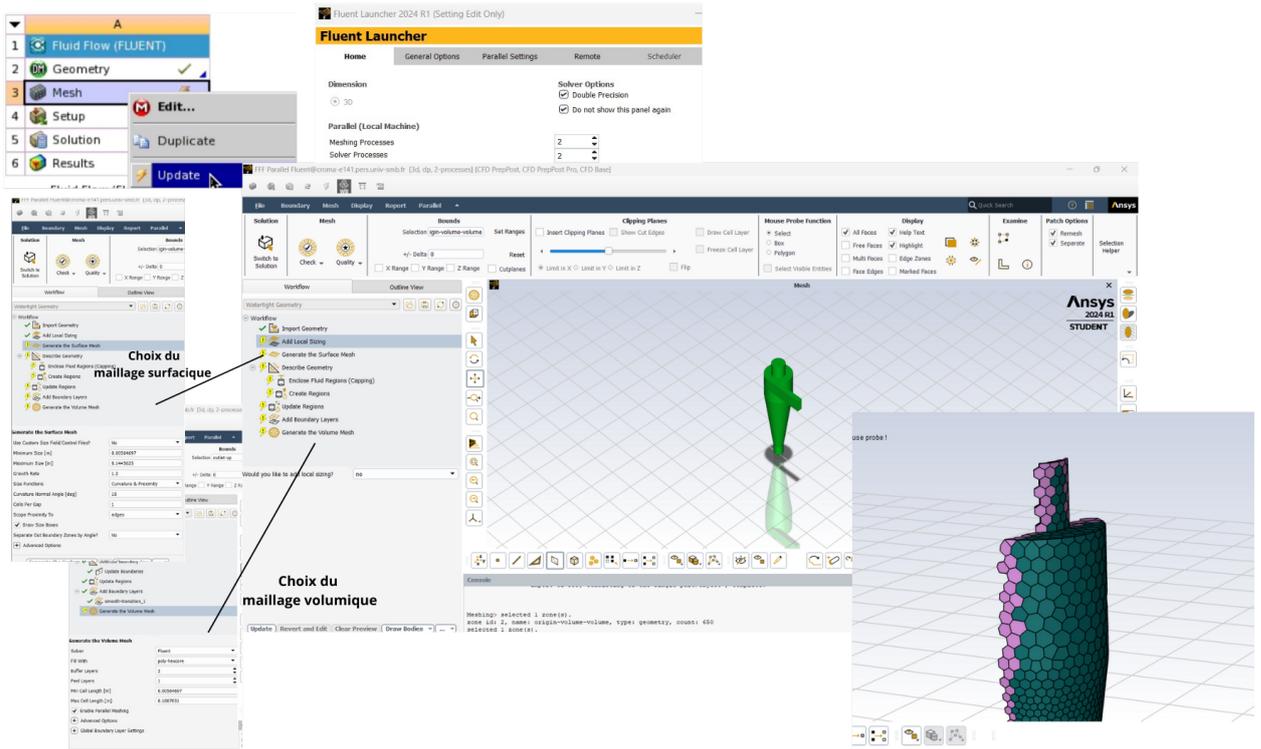


FIG. B.2 : Les étapes de la simulation CFD sous ANSYS 2

# Annexe B. Les étapes de la simulation CFD sous ANSYS

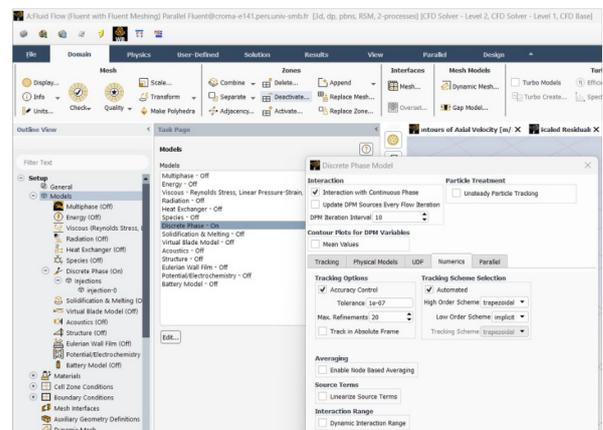
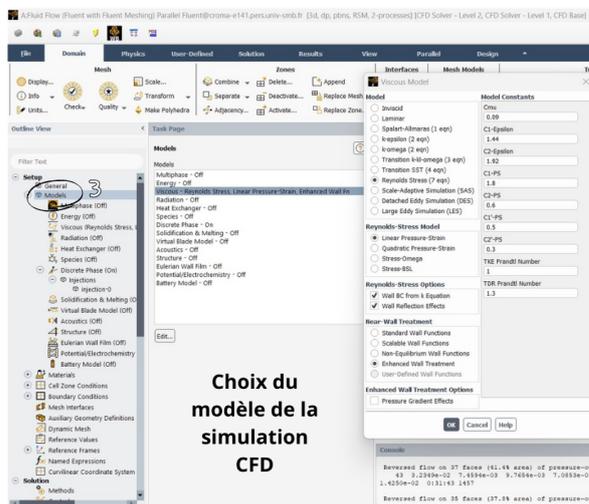
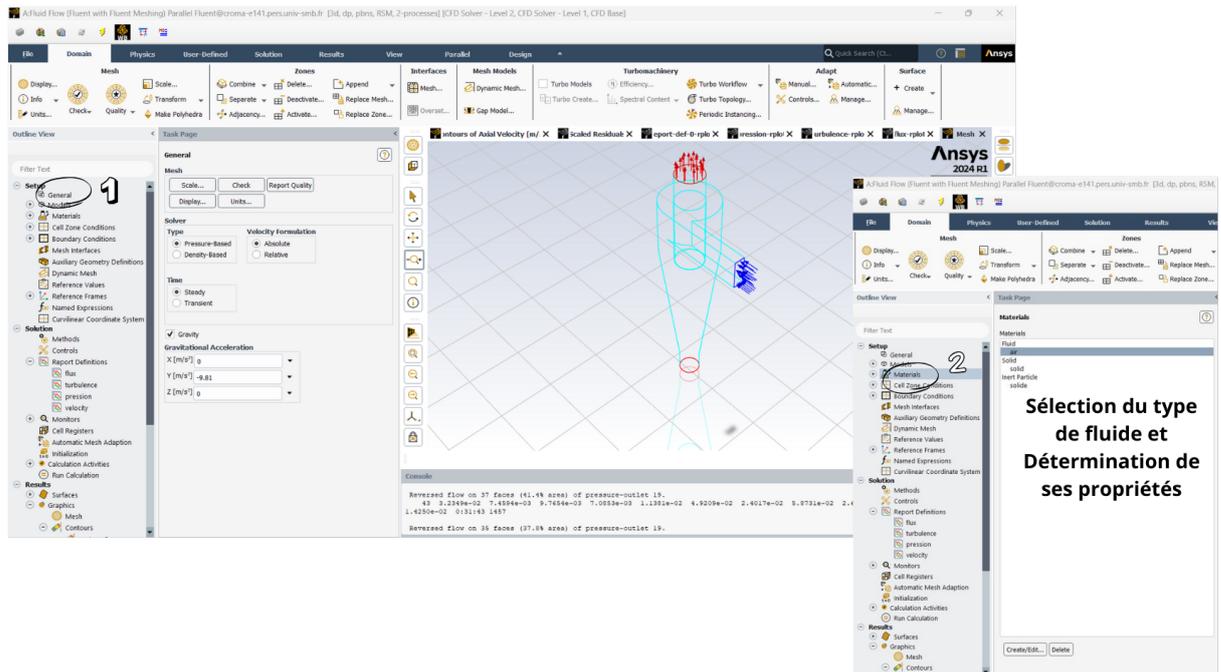


FIG. B.3 : Les étapes de la simulation CFD sous ANSYS 3

## Annexe B. Les étapes de la simulation CFD sous ANSYS

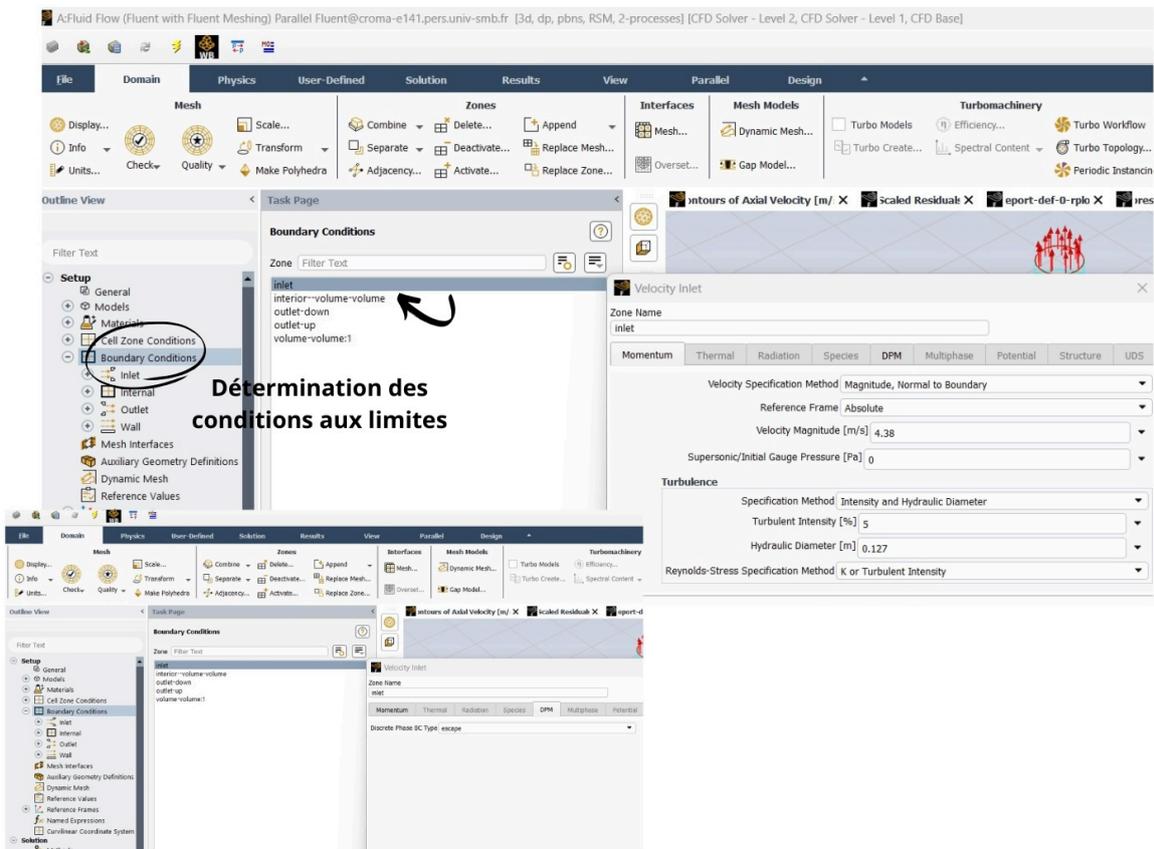


FIG. B.4 : Les étapes de la simulation CFD sous ANSYS 4

# Annexe B. Les étapes de la simulation CFD sous ANSYS

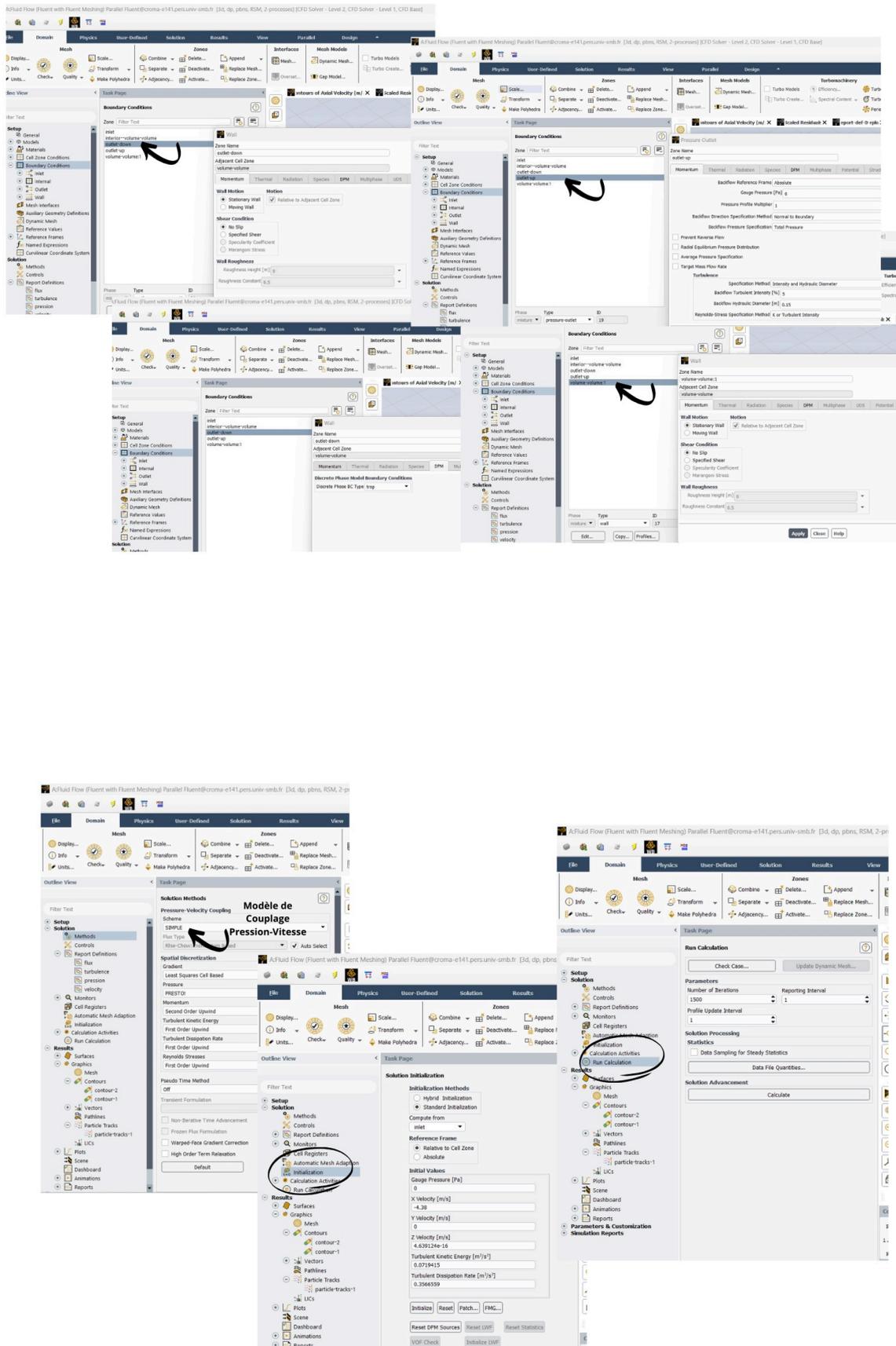


FIG. B.5 : Les étapes de la simulation CFD sous ANSYS 5