



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de L'enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
جامعة أمحمد بوقرة ببومرداس
Université M'Hamed Bougara de Boumerdès
كلية المحروقات والكيمياء
Faculté des Hydrocarbures et de la Chimie



Département Génie des Procédés Chimiques et Pharmaceutiques

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

En vue d'obtention de diplôme de Master

Spécialité : Génie des Procédés

Option : Hygiène Sécurité et Environnement (HSE)

Thème

Ingénierie de Sécurité Intégrée : Une Approche à la Réalité Virtuelle

Présenté par :

CHAOUCH Oussama Abdelkader

Devant les jurys :

BRIKI	Meryem	MCB	UMBB	Président
BOUBKEUR	Bahia	MCA	UMBB	Examineur
BENRAHOU	Fatma Zohra	MCB	UMBB	Encadrant

REMERCIEMENTS

De cette opportunité, je voudrais d'abord remercier Dieu Tout-Puissant de m'avoir accordé le succès et pour toutes ses bénédictions pour mener à bien ce projet.

Nous tenons à exprimer notre gratitude à Madame BENRAHOU Fatima, professeur à la faculté des hydrocarbures et de la chimie, pour avoir encadré le projet et d'avoir accepté le thème proposé.

Nous tenons à la remercier sincèrement pour son soutien, son orientation précieuse, ses conseils avisés et ses corrections approfondies de ce travail.

J'exprime ma sincère gratitude aux jurées, pour le temps et les efforts inestimables qu'ils ont consacrés à nous guider vers une meilleure voie. Votre dévouement et votre perspicacité va jouer un rôle déterminant dans notre croissance et notre développement.

Nous adressons également nos remerciements spéciaux à notre ami KHOUISSAT Abdelhakim, un doctorant spécialisé dans le forage, à l'université du North Dakota, États-Unis d'Amérique, pour sa présence constante à nos côtés et l'aide qu'il nous a apportée dans de nombreuses situations.

Et la même gratitude va à M. ZAIDI Yazid, chef de service HSE à L'organisation OURHOUD, pour avoir accepté notre thème, et nous aider au niveau de stage.

DEDICACES

À mes parents précieux, je rends hommage pour chaque effort et chaque soutien sans faille. Maman, tes soins et ton amour inébranlable ont façonné mon être et m'ont aidé à atteindre cet état. Papa, tes leçons sages et éclairantes ont fait de moi l'homme que je suis aujourd'hui. Merci infiniment pour tout votre amour et votre dévouement.

Je voudrais saisir cette occasion pour exprimer ma profonde gratitude à tous ceux qui m'ont aidé à mener à bien ce projet. À mes amis, dont les encouragements et la compréhension m'ont donné la force d'aller de l'avant, Ce projet témoigne de l'effort collectif et du soutien de toutes ces personnes incroyables, et je suis profondément reconnaissant à chacun d'entre vous.

Je tiens également à exprimer ma gratitude envers tous ceux qui ont aidé, et tout particulièrement à ZAAK Mounir El-Hak, pour son soutien indéfectible et sa présence constante à mes côtés.

SOMMAIRE

REMERCIEMENTS	2
DEDICACES	3
LISTE DES ABREVIATIONS	8
LISTE DES FIGURES	9
INTRODUCTION GENERALE	12
CHAPITRE I.....	14
I-1 L'unité de Gaz de Combustion (Fuel Gas).....	15
I-2 L'importance de l'unité de gaz de combustion	17
I-3 Évaluation du système de sécurité actuel dans l'unité de Gaz de Combustion.....	19
I-4 Détection de feu et gaz	20
I-3-1 Les Détecteurs de feu et gaz.....	21
I-3-2 Détecteurs de Flammes	22
I-3-3 Les Détecteurs de gaz.....	22
I-4 Le système LockOut-TagOut (LOTO).....	23
I-4-1 LockOut.....	23
I-4-2 TagOut.....	23
I-5 La sécurité dans les environnements de travail chauds	25
I-6 Analyse de la sécurité du travail	26
I-7 Permis de Travail	26
I-8 Les Risques associés au travail à chaud	27
I-9 Le scénario d'accident.....	28
I-9-1 Les Conditions de déroulement de l'accident	28
I-9-2 Le Scénario.....	28
I-10 Les procédures conformes.....	29
I-10-1 Les conditions des procédures conformes.....	29
I-10-2 Le Scénario conforme	30

CHAPITRE II	32
II-1 Autodesk AutoCAD Plant 3D.....	33
II-2 Données d'entrée pour AutoCAD Plant 3D (Inputs).....	33
II-3 Conversion des données vers un modèle CAD 3D	34
II-3-1 La Structure.....	34
II-3-2 Les équipements.....	37
II-3-3 La Tuyauterie	41
II-4 Les résultats de la modélisation 3D	43
II-4-1 Modélisation des structures.....	43
II-4-2 Modélisation des équipements.....	44
II-4-3 Modélisation des tuyauteries.....	45
II-5 Dynamique des Fluides Numérique (CFD)	45
II-5-1 Domaines d'applications de la CFD	46
II-5-2 Avantages de la CFD	47
II-6 Logiciel de CFD in:Flux	48
II-6-1 Les fonctionnalités de in:Flux.....	48
II-6-2 Application de in:Flux dans le projet.....	49
II-6-3 Les données d'entrée dans in:Flux.....	50
II-7 Les étapes de la simulation	51
II-7-1 Importation de la géométrie 3D	51
II-7-2 Ajout d'une simulation de ventilation.....	52
II-7-3 Définition du mixte du gaz naturel	53
II-7-4 Ajout d'une fuite de gaz à haute pression.....	54
II-7-5 La simulation	55
II-8 La visualisation des résultats	56
II-9 Les résultats de la simulation.....	56
II-9-1 Les résultats 2D.....	56

II-9-1-1 Fraction volumique des gaz inflammables	57
II-9-1-2 Les Rayonnement de l'incident	59
II-9-1-3 La Température.....	61
II-9-2 Les résultats 3D.....	63
CHAPITRE III.....	66
III-1 La réalité virtuelle.....	67
III-1-1 Définition.....	67
III-1-2 Composants clés de la réalité virtuelle	67
III-1-3 Applications de la réalité virtuelle.....	68
III-1-4 Défis et orientations futures.....	69
III-2 La philosophie du scenario étudié dans la RV	69
III-3 Matériels et les logiciels	70
III-3-1 Matériels	70
III-3-2 Logiciels	70
III-3-2-1 Le logiciel de conception 3D Blender 4.0	70
III-3-2-2 L'utilisation de Blender dans la simulation de RV.....	71
III-3-2-3 Le Logiciel de développement de RV Unity	73
III-3-2-4 L'utilisation d'Unity dans le projet	73
III-4 Les avantages de l'expérience RV dans la formation de sécurité	74
III-4-1 Amélioration de l'engagement et de la rétention	74
III-4-2 Simulations réalistes	74
III-4-3 Des solutions de formation rentables.....	74
III-4-4 Environnement sécurisé et contrôlé.....	75
III-4-5 Accessibilité et flexibilité	75
III-4-6 Amélioration du moral et de la satisfaction des employés	76
III-5 La vision de ce projet.....	76
III-5-1 Aperçu du prototype	76

III-5-2 Expansion future.....	76
III-5-3 Une plateforme unifiée avec des capacités de personnalisation.....	77
III-5-4 Des solutions sur mesure pour les clients	77
CONCLUSION GENERALE	78
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	79

LISTE DES ABREVIATIONS

AGP	Arrêt Générale du Process
API	American Petroleum Institute
CAD	Computer-aided design
CFD	Computational fluid dynamics
CPF	Central Processing Facilities
DCS	Distributed Control System
EPA	Environmental Protection Agency
EPI	Équipement de protection Individuelle
ESDV	Emergency Shutdown Valve
FG	Fuel Gas
HF	Fluorure d'Hydrogène
HP	High Pressure
IHM	Interfaces Homme-Machine
IOGP	The International Association of Oil&Gas Producers
ISO	International Organization for Standardization
LIE	Limite Inférieure d'Explosivité
LOTO	LockOut TagOut
LP	Low Pressure
LES	Limite Inférieure d'Explosivité
NFPA	National Fire Protection Association
OSHA	Occupational Safety and Health Administration
P&iD	Piping and Instrumentation Diagram
PFD	Process Flow Diagram
RV, VR	Réalité Virtuelle, Virtual Reality
SDV	Shutdown Valve
UV	Ultra-Violet

LISTE DES FIGURES

Figure I - 1: Schéma de principe de l'unité de FG	16
Figure I - 2: Logigramme de sécurité de l'unité de FG	18
Figure I - 3: Diagramme des limites d'explosivités LIE & LES	21
Figure I - 4: Etiquetage du système LOTO	24
Figure II - 1: Les fonctions de travail sur AutoCAD Plant 3D	35
Figure II - 2: La fenêtre de création de la grille et la grille créée dans la scène.....	35
Figure II - 3: La fenêtre de paramétrage des semelles et l'emplacement sur la grille.....	36
Figure II - 4: La fenêtre des paramètres de charpentes et L'emplacement sur la grille	36
Figure II - 5: La fenêtre des paramètres de balustrade et L'emplacement sur la grille.....	37
Figure II - 6: L'emplacement de l'échelle et la plateforme.....	37
Figure II - 7: La fonction « Create Equipment » sur AutoCAD Plant 3D	38
Figure II - 8: Fenêtre de création d'un nouvel équipement.....	38
Figure II - 9: La fenêtre de modification des équipements	39
Figure II - 10: Fenêtre d'attribution de Tag	39
Figure II - 11: L'emplacement de l'équipement dans la scène	40
Figure II - 12: La fenêtre de modification de bride	40
Figure II - 13: Fonction de routage des canalisations dans le menu « Home ».....	41
Figure II - 14: Exemple de routage de canalisations	41
Figure II - 15: Les types de vannes, supports, instruments dans les palettes d'outils.....	42
Figure II - 16: L'emplacement des vannes dans les pipes.....	42
Figure II - 17: Structure de l'unité de FG en 3D	43
Figure II - 18: Les équipements de l'unité de FG en 3D.....	44
Figure II - 19: Tuyauterie de système FG avec supports (résultats finale)	45
Figure II - 20: Quelques domaines d'application de la CFD	47
Figure II - 21: L'emplacement du percement dans la géométrie	51
Figure II - 22: L'importation de la géométrie 3D	52
Figure II - 23: Ajout de la simulation de ventilation.....	52
Figure II - 24: Ajout des conditions météorologiques.....	53
Figure II - 25: Les étapes d'ajout d'une mixture des gazes.....	54

Figure II - 26: Ajout d'une fuite de gaz à haute pression	54
Figure II - 27: Ajout des informations nécessaires pour la fuite	55
Figure II - 28: Les étapes essentielles de la simulation d'incendie.....	55
Figure II - 29: Etapes de l'ajout d'un 'contour' pour la visualisation en 2D	56
Figure II - 30: Fraction volumique des gaz inflammables à $z = 2,8$ m	57
Figure II - 31: Les Rayonnement de l'incident à $z = 2,8$ m	59
Figure II - 32: La Température à $z = 2,8$ m.....	61
Figure II - 33: Fraction volumique des gaz inflammables (3D).....	63
Figure II - 34: Rayonnement de l'incident (3D).....	64
Figure II - 35: La Température (3D)	65
Figure III - 1: Le Matériel utilisé dans les simulations de RV	67
Figure III - 2: La transition entre une géométrie CAD vers une géométrie optimisée	72
Figure III - 3: Le traitement de la géométrie CAD dans Blender	72

LISTE DES TABLEAUX

Table 1: Les dommages dus aux intensités de rayonnement incidentes	60
---	----

INTRODUCTION GENERALE

La sécurité est une préoccupation majeure dans l'industrie pétrolière et gazière, régie par neuf principes de prévention. Parmi ces principes, la formation est essentielle pour doter le personnel des connaissances et des compétences nécessaires à l'accomplissement de ses tâches de manière sûre et efficace. Ce projet explore les systèmes de sécurité en place dans l'unité de gaz combustible de l'organisation Ourhoud à Hassi Messaoud.

Un aspect essentiel de cette étude consiste à simuler un scénario d'incident potentiel de feu de jet. Pour ce faire, nous avons développé un modèle CAD 3D de l'unité, qui a été utilisé pour effectuer une simulation de dynamique des fluides numérique (CFD). Cette simulation nous aide à comprendre le comportement de l'incendie et les dommages potentiels qu'il pourrait infliger aux travailleurs se trouvant à proximité.

En nous appuyant sur le modèle CAD 3D, nous avons créé un programme interactif de formation à la sécurité en réalité virtuelle (RV). Ce module de formation est conforme aux normes ISO 45001 et offre un environnement réaliste et immersif permettant aux travailleurs d'apprendre et de suivre efficacement les procédures de sécurité. Grâce à cette approche innovante, nous visons à améliorer la culture générale de la sécurité et la préparation de la main-d'œuvre à faire face aux situations dangereuses.

Le projet actuel sert de prototype pour une initiative plus vaste à l'avenir, soulignant l'importance de la formation continue et de l'adoption de technologies de pointe pour améliorer la sécurité dans les environnements à haut risque. Nous montrons comment les travailleurs peuvent suivre les procédures de sécurité préalables au travail en Réalité Virtuelle, réduisant ainsi les risques et améliorant les performances globales en matière de sécurité dans l'industrie pétrolière et gazière. Ce prototype établit les bases pour une application à plus grande échelle, visant à généraliser cette approche innovante à d'autres unités et sites, renforçant ainsi la sécurité de l'ensemble des opérations pétrolières et gazières grâce à une formation avancée et à des technologies de simulation de pointe.

Dans le premier chapitre, nous avons expliqué brièvement le fonctionnement de l'unité de gaz de combustion, ainsi que le système de sécurité mis en œuvre au sein de cette unité pour atténuer les risques potentiels. Le chapitre présente ensuite un scénario d'incident hypothétique. Ce scénario, axé sur un feu de jet, sert d'étude de cas pour analyser l'efficacité des systèmes de sécurité susmentionnés. En disséquant cette menace potentielle, nous obtenons des informations précieuses

sur le rôle critique que jouent ces mesures de protection dans le maintien d'une exploitation sûre et fiable des gaz combustibles.

S'appuyant sur l'évaluation initiale des risques, le chapitre deux se penche sur les spécificités de la simulation d'un incendie de jet. Le processus méticuleux de construction d'un modèle CAD 3D reproduisant l'unité de gaz combustible y est décrit. Ce modèle sert ensuite de base à une simulation CFD complète, analysant méticuleusement le comportement du feu de jet et son impact potentiel. En disséquant minutieusement les résultats de la simulation, on obtient des informations nécessaires sur les procédures à suivre pour travailler en toute sécurité à l'atténuation d'un tel événement.

Le chapitre trois explore le domaine de la technologie de la réalité virtuelle (RV). Après un aperçu fondamental des capacités de la RV, le chapitre détaille le processus de transformation du modèle CAD 3D établi en une représentation RV réaliste. Cette transformation ouvre la voie au développement d'une application de sécurité VR révolutionnaire. En tirant parti de cette plateforme immersive, le chapitre conclut en décrivant la vision future du projet, qui englobe les améliorations potentielles et les domaines à explorer au-delà de la portée de ce travail initial.

CHAPITRE I

L'unité de Gaz de Combustion (Fuel Gas) : Composantes de sécurité et scénario d'accident

I-1 L'unité de Gaz de Combustion (Fuel Gas)

Le gaz combustible est un composant essentiel dans de nombreuses applications industrielles, notamment dans le secteur pétrolier et gazier. Composé d'un mélange de gaz d'hydrocarbures tels que le méthane, l'éthane, le propane et le butane, avec une prédominance de méthane, il remplit divers rôles essentiels au fonctionnement efficace des processus industriels.

L'une des fonctions principales du gaz combustible réside dans son rôle central d'agent de combustion. Il élève les températures nécessaires aux fours, aux appareils de chauffage et aux turbines, générant ainsi la chaleur et l'électricité nécessaires pour faire fonctionner divers équipements et processus au sein des installations industrielles. De plus, le gaz combustible alimente les instruments critiques, contrôle les vannes et facilite le bon fonctionnement des équipements essentiels au traitement et au transport du pétrole et du gaz. Lors des procédures de démarrage et d'arrêt des unités de traitement, il allume les brûleurs et fournit l'énergie initiale nécessaire aux activités opérationnelles.

Dans les cas nécessitant l'élimination en toute sécurité de l'excès de gaz, le gaz combustible apparaît comme une option privilégiée en raison de ses propriétés de combustion propre et contrôlée lorsqu'il est utilisé dans les torchères. Cela atténue les rejets de gaz nocifs dans l'atmosphère, garantissant ainsi le respect de la conformité environnementale et des normes de sécurité.

Au niveau du CPF (Central Processing Facility) dans le cadre organisationnel d'OURHOUD, l'approvisionnement en gaz combustible est orchestré à travers un processus précisément conçu. Dans un premier temps, la colonne de déshydratation produit du gaz sec, qui subit ensuite un refroidissement et une réduction de pression à travers un échangeur thermique gaz/gaz liquéfié, pour atteindre finalement une pression de 24 BarG à l'entrée du régulateur de pression. Le liquide résultant du processus de refroidissement du gaz est séparé dans le tambour du refroidisseur de gaz combustible avant d'être renvoyé vers le compresseur en tête de colonne pour un traitement ultérieur dans le refroidisseur de gaz combustible. Pendant ce temps, le gaz du liquide séparé subit une surchauffe dans le refroidisseur, suivie d'une filtration pour éliminer les particules de liquide

CHAPITRE I

L'unité de Gaz de Combustion (Fuel Gas) : Composantes de sécurité et scénario d'accident

(>5 μ). Ce gaz purifié est ensuite dirigé soit vers le système Fuel Gas HP, soit vers le système Fuel Gas LP, en fonction des exigences de régulation de pression. [01]

Le gaz combustible surchauffé produit deux niveaux de pression distincts :

- Fuel Gas HP, fonctionnant à 24 BarG, remplit des fonctions critiques telles que l'alimentation des compresseurs de turbine à gaz, le maintien de l'intégrité de l'étanchéité au gaz dans le compresseur et le support de l'unité de flottation des gaz dissous. [01]
- Fuel Gas LP, fonctionnant à 4 BarG, remplit des rôles spécifiques tels que le ravitaillement des fours, servir de pilote de torche, contribuer aux processus de fractionnement du glycol et créer une atmosphère gazeuse contrôlée dans les réservoirs. Grâce à ce système complet, le gaz combustible joue un rôle indispensable dans l'efficacité, la sécurité et l'excellence opérationnelle dans les environnements industriels, garantissant le bon déroulement des processus vitaux et le respect de normes réglementaires strictes. [01]

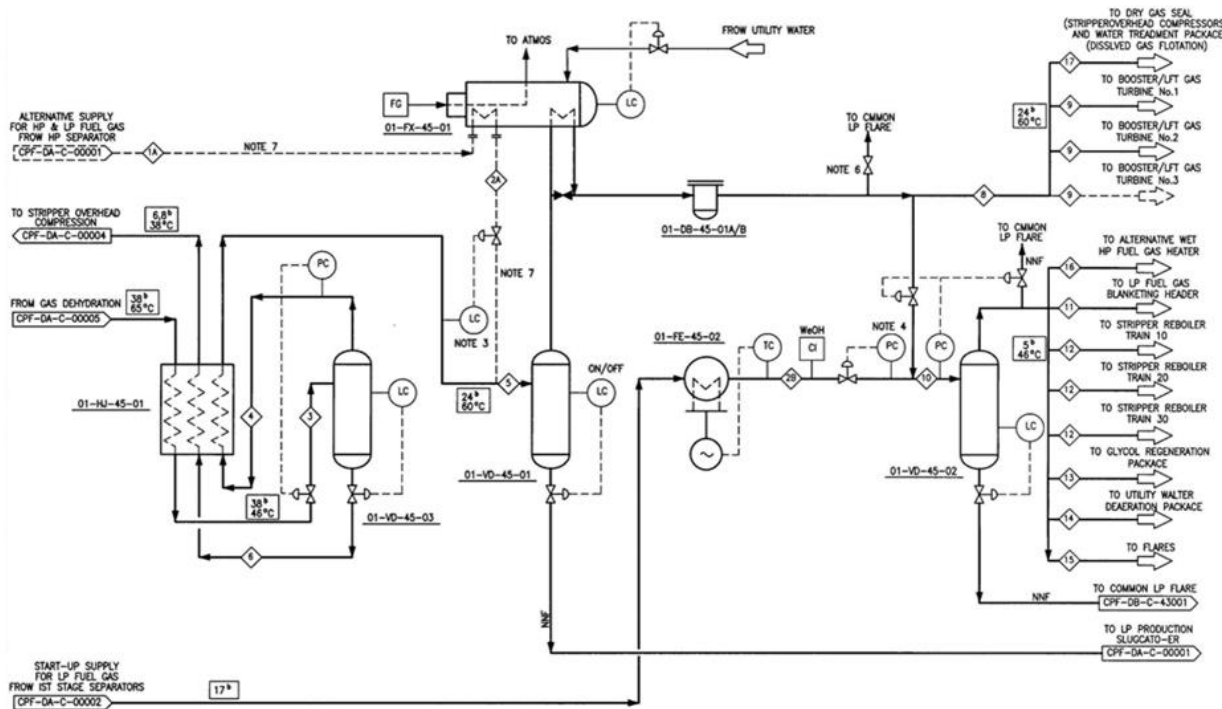


Figure I - 1: Schéma de principe de l'unité de FG

I-2 L'importance de l'unité de gaz de combustion

L'unité supervise le fonctionnement du CPF et joue un rôle central, étendant son influence sur un éventail de systèmes critiques au sein de l'installation. Parmi ses différentes responsabilités, l'unité est chargée de l'exploitation et de la gestion de deux turbines à gaz et de trois fours, chacun essentiel au bon fonctionnement des différents processus. De plus, il sert de gardien de l'intégrité des réservoirs de stockage, y compris ceux contenant du glycol et du pétrole hors spécifications (off spec), en utilisant du gaz combustible pour sceller et protéger ces réservoirs des dangers potentiels. De plus, l'unité joue un rôle dans le contrôle des torchères, garantissant l'élimination sûre et efficace des gaz excédentaires. Cependant, à mesure que l'importance de cette unité continue de croître, le spectre des risques et des défis potentiels augmente également. La complexité de ses opérations la rend vulnérable à un large éventail de problèmes potentiels, chacun étant susceptible de lui infliger des dommages physiques et financiers grave. Conformément au logigramme de sécurité, l'unité évolue dans un paysage rempli de scénarios potentiels, chacun pouvant potentiellement catalyser une cascade de problèmes aux implications considérables. [01]

Dans le cadre de cette complexité d'opérations, une multitude de facteurs contribuent à accroître la fragilité de l'unité face aux événements indésirables. Des dysfonctionnements des équipements aux erreurs humaines, l'éventail des vulnérabilités potentielles est vaste et multiforme, nécessitant un cadre solide d'atténuation des risques et de planification d'urgence. De plus, l'interdépendance des différents systèmes au sein du CPF aggrave le problème, car des perturbations dans un domaine peuvent précipiter des effets d'entraînement sur l'ensemble des opérations.

Dans ce contexte de risque, l'importance de mesures préventives devient très claire. Grâce à la mise en œuvre de protocoles de sécurité, de programmes de formation complets et de pratiques de maintenance, l'unité s'efforce de renforcer ses défenses contre les événements indésirables.

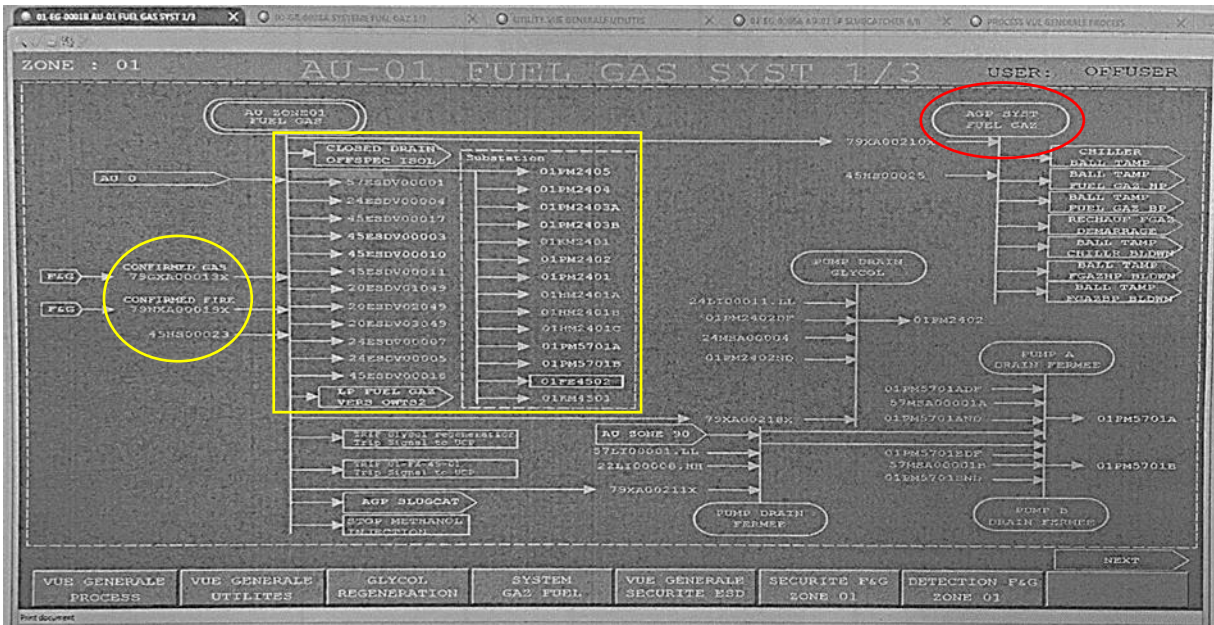


Figure I - 2: Logigramme de sécurité de l'unité de FG

Comme indiqué sur l'interface du système de contrôle distribué (DCS), une fuite de gaz ou un incendie identifié déclenche un mécanisme de réponse automatisé, déclenchant rapidement la fermeture de toutes les vannes d'arrêt d'urgence (ESDV) et des vannes d'arrêt (SDV), comme mentionné dans le protocole du système. Cette réponse procédurale, conçue pour atténuer les dangers potentiels et sauvegarder l'intégrité opérationnelle, active également la fonction de production automatisée de gaz (AGP) au sein de l'unité de gaz combustible, garantissant ainsi la sécurité et la stabilité. [02]

Le caractère critique de l'unité de gaz combustible au sein de CPF est souligné par son rôle multiforme dans l'alimentation des turbines à gaz, des fours et le contrôle des torchères, ainsi que dans la protection des réservoirs de stockage contenant du glycol et du pétrole hors spécifications. Les perturbations opérationnelles ou les dysfonctionnements au sein de ce système présentent des risques importants, pouvant entraîner des dommages physiques et financiers importants et nécessiter des arrêts du CPF. Des mesures préventives, notamment une maintenance rigoureuse, une formation complète et une surveillance continue, sont impératives pour améliorer la fiabilité, la résilience et la sécurité de l'unité de gaz combustible, en atténuant les risques et en garantissant une continuité opérationnelle ininterrompue tout en protégeant le personnel et les actifs.

I-3 Évaluation du système de sécurité actuel dans l'unité de Gaz de Combustion

Cette unité, conforme à la norme ISO 45001 (2018), est conçue pour détecter et localiser rapidement divers risques, notamment les fuites de gaz combustibles, les fuites de gaz toxiques, les faibles niveaux d'oxygène et les débuts d'incendie. Elle ne se contente pas d'identifier ces risques, elle déclenche également les mesures de protection appropriées et établit les configurations de sécurité nécessaires. Pièce maîtresse des infrastructures industrielles, cette unité assure la sécurité et la protection contre les risques d'incendie et de gaz, tout en garantissant une gestion systématique de la santé et de la sécurité au travail conformément aux exigences de la norme ISO 45001.

Sa conception remplit deux fonctions essentielles :

Premièrement, il détecte tout signe d'incendie ou de gaz nocifs dans l'environnement, ce qui est essentiel pour anticiper les dangers potentiels et y répondre rapidement. Il utilise une gamme variée d'instruments et d'équipements de terrain, notamment des détecteurs de gaz sensibles à des composés tels que le fluorure d'hydrogène (HF) et l'infrarouge (IR), ainsi que des détecteurs de flammes utilisant le rayonnement ultraviolet (UV). Intégrés à des électrovannes et à des pompes à incendie, ces dispositifs assurent une surveillance constante et une réaction immédiate aux menaces. [03]

Deuxièmement, il assure une protection efficace contre les incendies grâce à une coordination étroite entre les automates programmables et les interfaces homme-machine (IHM). Les automates agissent comme le cerveau du système, en traitant les données des capteurs et en prenant des décisions en temps réel pour déclencher les actions nécessaires. Les IHM facilitent l'interaction intuitive avec le système, offrant aux opérateurs une vue d'ensemble claire de la situation et des outils pour prendre des mesures rapides et précises. [03]

Dès qu'il détecte un incendie ou une fuite de gaz, le système lance une série d'actions préprogrammées pour assurer la sécurité du personnel et des installations. Des alarmes visuelles et sonores alertent immédiatement le personnel, tandis que les agents d'extinction appropriés, tels que le dioxyde de carbone (CO₂) ou la poudre, sont automatiquement activés pour contenir et

éteindre l'incendie. Simultanément, l'alimentation en gaz est coupée pour éviter que la situation ne s'aggrave. [03]

Cette solution intégrée de détection et de protection contre les incendies et les gaz dans les environnements industriels associe des instruments de terrain sophistiqués, des automates programmables réactifs et des interfaces conviviales. Elle garantit une réponse rapide et efficace aux risques potentiels, préservant ainsi le bien être des personnes et des biens. [03]

I-4 Détection de feu et gaz

La détection de feu et de gaz à l'aide de la limite inférieure d'explosivité (LIE) et de la limite supérieure d'explosivité (LSE) est une méthode courante utilisée dans divers contextes industriels pour assurer la sécurité des installations et des personnes. Ces limites définissent les concentrations minimale et maximale de gaz dans l'air nécessaires pour former un mélange explosif.

► Limite Inférieure d'Explosivité (LIE)

Désigne la concentration minimale de gaz dans l'air nécessaire pour qu'un mélange soit inflammable ou explosif. En dessous de cette concentration, le mélange est trop pauvre en gaz pour soutenir une combustion. La détection de la LIE est cruciale car elle permet de détecter les concentrations potentiellement dangereuses de gaz avant qu'elles ne deviennent un risque d'explosion. Les capteurs utilisés pour détecter la LIE sont généralement des détecteurs de gaz, tels que des détecteurs de gaz catalytiques ou des détecteurs de gaz infrarouges. Ces capteurs sont conçus pour détecter les concentrations de gaz à des niveaux très faibles, souvent en parties par million (ppm) ou en pourcentage de la LIE. [04]

► Limite Supérieure d'Explosivité (LSE)

Elle correspond à la concentration maximale de gaz dans l'air au-delà de laquelle un mélange n'est plus inflammable ou explosif car il est trop riche en gaz pour réagir avec l'oxygène présent dans l'air. La détection de la LSE est tout aussi importante que celle de la LIE car elle permet de surveiller les concentrations de gaz qui pourraient représenter un risque d'explosion si elles dépassent un certain seuil. Les capteurs utilisés pour détecter la LSE sont similaires à ceux utilisés pour détecter la LIE, mais ils sont configurés pour détecter des concentrations plus élevées de gaz.

Ces capteurs peuvent également être équipés de mécanismes de protection supplémentaires pour éviter les risques d'explosion en cas de détection de concentrations élevées de gaz. [05]

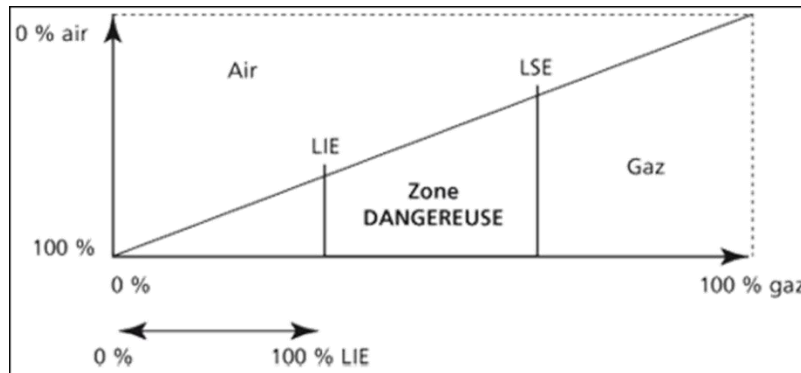


Figure I - 3: Diagramme des limites d'explosivités LIE & LSE

La détection de la limite inférieure d'explosivité (LIE) et de la limite supérieure d'explosivité (LSE) joue un rôle crucial dans la prévention des accidents liés aux explosions dans divers environnements industriels. En utilisant des capteurs spécialement conçus pour surveiller ces concentrations de gaz, les entreprises peuvent prendre des mesures proactives pour protéger leurs installations, leur personnel et leur environnement.

I-3-1 Les Détecteurs de feu et gaz

Les détecteurs d'incendie et de gaz dans l'industrie pétrolière et gazière sont des instruments spécialisés utilisés pour détecter les incendies, les gaz combustibles et les gaz toxiques dans les environnements industriels. Ces détecteurs sont des éléments essentiels des systèmes de sécurité. Ils surveillent en permanence le milieu environnant pour détecter les dangers potentiels et déclenchent des alarmes ou des mesures de contrôle pour atténuer les risques pour le personnel, l'équipement et l'environnement. [06]

Ils utilisent diverses technologies de détection, telles que les capteurs infrarouges, catalytiques et électrochimiques, pour détecter la présence de gaz spécifiques ou les signatures caractéristiques des flammes. [07]

Ces détecteurs sont installés stratégiquement dans les installations pétrolières et gazières, y compris les plates-formes de forage, les raffineries, les pipelines et les installations de stockage, afin d'assurer une couverture complète et une détection précoce des menaces potentielles.

En alertant rapidement le personnel de la présence d'incendies ou de gaz dangereux, ces détecteurs jouent un rôle crucial dans la prévention des accidents, la réduction des dommages matériels et la sécurité des travailleurs de l'industrie pétrolière et gazière. [08]

Dans une unité de gaz combustible, plusieurs types de détecteurs sont utilisés pour assurer la sécurité et la surveillance des conditions environnementales.

I-3-2 Détecteurs de Flammes

Les détecteurs de flammes sont des capteurs spécialisés conçus pour détecter la présence de flammes résultant de processus de combustion. Ils utilisent divers mécanismes de détection, notamment les ultraviolets (UV), les infrarouges (IR) et la détection multi spectrale, pour identifier les signatures uniques des flammes. Les détecteurs de flammes UV détectent le rayonnement ultraviolet émis par les flammes, tandis que les détecteurs de flammes IR détectent le rayonnement infrarouge produit par la combustion. Les détecteurs de flammes multi spectraux combinent plusieurs technologies de détection afin d'améliorer la précision et la fiabilité de la détection. Les détecteurs de flammes sont particulièrement efficaces dans les environnements où les détecteurs de fumée conventionnels peuvent être moins fiables, tels que les zones extérieures, les environnements poussiéreux ou ceux où le rayonnement de fond est élevé. [09]

I-3-3 Les Détecteurs de gaz

Les détecteurs de gaz sont conçus pour surveiller la concentration de gaz dans l'environnement ambiant et fournir une alerte rapide en cas de conditions dangereuses. Ces détecteurs peuvent détecter des gaz inflammables, tels que le méthane (CH_4), le propane (C_3H_8) et l'hydrogène (H_2), ainsi que des gaz toxiques, tels que le monoxyde de carbone (CO), le sulfure d'hydrogène (H_2S) et l'ammoniac (NH_3). Les technologies de détection de gaz comprennent les capteurs à billes catalytiques, les capteurs infrarouges, les capteurs électrochimiques et les capteurs à semi-conducteurs. Les capteurs à billes catalytiques reposent sur la combustion des gaz sur une surface

chauffée, tandis que les capteurs infrarouges détectent l'absorption du rayonnement infrarouge par les molécules de gaz. Les capteurs électrochimiques utilisent des réactions chimiques pour générer des signaux électriques proportionnels aux concentrations de gaz, tandis que les capteurs à semi-conducteurs s'appuient sur les changements de conductivité électrique. Et ils sont tous essentiels pour prévenir les incidents liés au gaz, tels que les fuites, les déversements ou l'accumulation de gaz toxiques dans des espaces confinés. [10]

I-4 Le système LockOut-TagOut (LOTO)

Le verrouillage et l'étiquetage (LOTO) constituent une procédure essentielle pour garantir la sécurité sur le lieu de travail, en particulier dans les environnements où la maintenance des machines et des équipements est courante. Ce processus implique une approche systématique de l'arrêt, de la sécurisation et de l'étiquetage des machines, afin d'éviter toute remise sous tension involontaire, en particulier en cas de collaboration avec des entités externes. [11]

I-4-1 LockOut

La procédure de verrouillage et d'étiquetage repose sur un principe simple mais fondamental : l'arrêt systématique du système ou de la machine visée. [11] Voici comment cela fonctionne :

- **Shutdown:** Le technicien chargé de la maintenance initie le processus en arrêtant le système ou la machine défaillante.
- **Lockout:** Après l'arrêt, le technicien verrouille le mécanisme d'alimentation à l'aide d'un cadenas LOTO. Cette étape garantit que la machine reste immobilisée, Ce qui réduit considérablement le risque de redémarrage accidentel.

I-4-2 TagOut

Une fois la machine bien verrouillée, la phase d'étiquetage commence, ajoutant une couche supplémentaire de sécurité et de communication : [11]

- **Étiquetage :** Une étiquette LOTO est apposée sur le cadenas et fournit des informations cruciales concernant la consignation. Ces informations sont généralement les suivantes :

- Raison de la consignation: La raison pour laquelle la machine ou le système a été verrouillé.
 - Moment de l'arrêt : Indique quand l'arrêt a été effectué, afin de garantir la clarté de la durée du verrouillage.
 - Durée du verrouillage : Préciser la durée du verrouillage, afin d'assurer une planification et une coordination efficaces.
 - Nature des travaux : Description des travaux de maintenance ou de réparation effectués sur la machine.
 - Responsabilité : Identification de la personne responsable de la mise en œuvre et de la supervision de la procédure de verrouillage.
- **Assurer la sécurité par la conformité** : Le respect du protocole de verrouillage et d'étiquetage est essentiel pour promouvoir une culture de la sécurité sur le lieu de travail. En suivant ces procédures, les organisations atténuent les risques potentiels associés à la maintenance des équipements, protégeant ainsi le personnel contre les accidents du travail.

The image shows two LOTO (Lock Out Tag Out) tags from GROUPEMENT BERKINE SONATRACH - ANADARKO.

Left Tag (DANGER DO NOT OPERATE):

- Isolation N° TAG: 02843
- DANGER DO NOT OPERATE
- DANGER NE PAS OPÉRER
- ISOLATED BY / ISOLÉ PAR:
 - EXP Exploitation
 - ELEC Electrique
 - MEC Mécanique
 - EP Engineering & Production
 - INST Instrumentation
- ISOLATION POINT REF: Référence du point d'isolation :
- EQUIPEMENT: Équipement
- PERMIT NUMBER: Numéro de permis :
- NAME: Nom :
- ISOLATION DATE: Date d'isolement :
- ISOLATION CERTIFICATE NO: N° DU CERTIFICAT D'ISOLATION
- LOCK OUT BOX N°
- GROUPEMENT BERKINE SONATRACH - ANADARKO

Right Tag (DANGER):

- DANGER
- THIS ISOLATION TAG MUST NOT BE MOVED OR REMOVED WITHOUT INSTRUCTION FROM THE ASSET HOLDER
- DANGER
- CETTE PANCARTE D'ISOLEMENT NE DOIT PAS ETRE DEPLACÉE OU ENLEVÉE SANS L'INSTRUCTION DU RESPONSABLE DU SITE
- FURTHER INFORMATION AUTRES RENSEIGNEMENTS
- GROUPEMENT BERKINE SONATRACH - ANADARKO

Figure I - 4: Etiquetage du système LOTO

En fin, la déconnexion est la pierre angulaire de la sécurité sur le lieu de travail, car elle offre une approche structurée de l'entretien des machines qui donne la priorité à la sécurité des employés et à l'intégrité des opérations. Grâce à des procédures complètes de verrouillage et d'étiquetage, les organisations démontrent leur engagement à créer un environnement de travail sûr et sécurisé pour tous.

I-5 La sécurité dans les environnements de travail chauds

Le travail à chaud englobe les tâches qui génèrent des potentiels d'inflammation dans des environnements contenant des hydrocarbures ou des substances inflammables. Ces sources d'inflammation peuvent être des flammes nues ou des sources de chaleur capables d'enflammer les matériaux présents à proximité, tels que le soudage, le meulage, le fumage, le chalumeau, la manipulation de matières dangereuses, le fonctionnement de moteurs à combustion interne, les réactions chimiques et la manipulation de batteries... [12]

Travailler dans des environnements chauds présente des défis uniques en matière de sécurité, car les risques associés aux activités à haute température sont multiples et peuvent entraîner des conséquences graves. [12]

Avant de commencer un travail à chaud, il est impératif de gérer les substances inflammables et les sources d'inflammation potentielles :

- Identifier et réguler les sources d'inflammation.
- En confirmant l'enlèvement ou l'isolement des matériaux inflammables
- Obtenir les autorisations nécessaires
- Vérifier la réalisation d'un test de gaz avant d'entamer un travail à chaud dans des zones dangereuses.
- Assurer une surveillance continue des gaz pendant toute la durée des travaux.

I-6 Analyse de la sécurité du travail

Dans tout environnement de travail, la sécurité est primordiale. Pour garantir la sécurité de l'ensemble du personnel impliqué dans les tâches, ainsi que l'intégrité du lieu de travail, il est impératif d'adopter une approche systématique de l'identification et de l'atténuation des risques.

Le processus d'analyse de la sécurité au travail consiste à :

- Reconnaître les actions fondamentales impliquées dans l'accomplissement d'une tâche.
- Identifier les risques liés à chaque action, y compris les dangers potentiels découlant d'autres activités simultanées dans le voisinage.
- Proposer des mesures pour éradiquer ou réduire chaque danger identifié.

L'analyse de la sécurité au travail est rédigée dans la langue parlée par le groupe de travail, en veillant à ce qu'il la comprenne en fonction de son niveau d'alphabétisation. Lorsque le niveau d'alphabétisation le permet, l'équipe de travail rédige l'analyse ou des personnes étroitement associées à la tâche y contribuent, avec la participation active des superviseurs de première ligne et des membres de l'équipe. Ces derniers sont chargés de superviser le travail afin de garantir la mise en œuvre des contrôles de sécurité identifiés dans l'analyse de la sécurité des tâches.

Les risques de ligne de feu font l'objet d'une attention particulière dans l'analyse de la sécurité au travail, englobant divers scénarios tels que la chute d'objets, le balancement de charges, les décharges de pression, les mouvements d'outils ou d'équipements, les charges hissées susceptibles de se balancer ou de tomber, et les sources potentielles d'énergie telles que l'électricité, l'hydraulique, la chaleur ou la pression. [13]

I-7 Permis de Travail

La direction du chantier établit des critères pour la délivrance des permis de travail, les superviseurs procédant à des évaluations des risques pour déterminer si des tâches spécifiques nécessitent un permis ou si une analyse de la sécurité au travail suffit. Des mécanismes sont mis en place pour éviter les conflits entre les multiples systèmes de permis de travail sur un chantier, afin de garantir la clarté et la coordination. Chaque activité de travail nécessite un seul permis, qui définit les responsabilités du personnel concerné et prévoit la formation nécessaire. Les permis ne

sont pas modifiables sur le terrain sans une approbation complète, et les plans de travail sont communiqués avant le début de l'activité. Le titulaire du permis vérifie l'inspection du site, la conformité et l'état de préparation à la sécurité avant le début des travaux. Tous les permis ont une durée définie et des procédures sont en place pour identifier et clôturer les permis en retard et pour assurer un transfert sans heurts entre les équipes. [13]

Les inspections de clôture des permis le confirment :

- Validation que toutes les tâches ont été accomplies de manière satisfaisante ou qu'elles ont été temporairement interrompues si nécessaire.
- Assurance que les isolations et les arrêts temporaires de travail ont été rétablis et que leur efficacité a été minutieusement évaluée.
- Garantie que l'équipement a été remis dans un état jugé sûr pour le fonctionnement.
- Évaluation de la propreté et de l'organisation de l'espace de travail pour répondre à des normes acceptables.
- Assurer une communication efficace avec les parties concernées concernant la conclusion des tâches assignées.

I-8 Les Risques associés au travail à chaud

- Incendies et Explosions: Les températures élevées augmentent le risque d'incendie et d'explosion, surtout en présence de substances inflammables comme les gaz, les liquides inflammables ou les poussières combustibles. [12]
- Brûlures et Blessures thermiques: Les contacts directs avec des surfaces chaudes, des liquides brûlants ou des vapeurs peuvent causer des brûlures sévères. De plus, l'exposition prolongée à des températures élevées peut entraîner des coups de chaleur et d'autres problèmes de santé graves. [12]
- Détérioration des équipements: Les environnements chauds peuvent accélérer l'usure des équipements et des infrastructures, augmentant ainsi le risque de défaillance et d'accidents.
- Exposition aux produits chimiques: Dans de nombreux environnements chauds, les travailleurs peuvent être exposés à des produits chimiques dangereux, dont les effets peuvent être exacerbés par la chaleur. [12]

I-9 Le scénario d'accident

I-9-1 Les Conditions de déroulement de l'accident

- Mauvais étalonnage des détecteurs de feu et de gaz : Les détecteurs de gaz à proximité de la zone de travail étaient mal étalonnés
- Environnement bruyant : L'environnement industriel était caractérisé par un bruit constant et assourdissant, principalement généré par le gaz à haute pression
- Maintenance en cours : Le technicien effectuait des travaux de maintenance de routine sur une ligne de gaz
- Ignition : Une étincelle provenant de la soudure a été suffisante pour déclencher une explosion violente
- Réaction des travailleurs : Après l'explosion, les travailleurs à proximité ont réagi rapidement pour tenter de secourir le technicien blessé.

I-9-2 Le Scénario

Dans l'unité de Fuel Gas, un travailleur effectue des réparations de routine sur une ligne de gaz. Cependant, un mauvais étalonnage des détecteurs de feu et de gaz et un environnement bruyant, conduit à un accident tragique.

Acte 1 :

- Introduction à l'environnement industriel, avec des machines bruyantes et des travailleurs s'affairant dans un décor industriel.
- La victime, un technicien expérimenté, est chargé de la maintenance des installations de gaz de l'usine.

Acte 2 :

- Le technicien commence ses travaux de maintenance, dont la soudure d'une fermeture de vanne défectueuse à l'aide d'une clé à fer.

- Pendant ce temps, un détecteur de gaz à proximité, mal étalonné, ne parvient pas à détecter une fuite de gaz à quelques mètres.

Acte 3 :

- Alors que le technicien est concentré sur sa tâche, le bruit assourdissant du gaz à haute pression dans les tuyaux masque le son de la fuite de gaz à proximité.
- La fuite de gaz, non détectée, s'accumule lentement dans l'air, créant un environnement potentiellement explosif autour de ce technicien.

Acte 4 :

- Soudain, une étincelle provenant de la soudure déclenche une explosion violente, projetant des débris et déclenchant un incendie.
- Les travailleurs à proximité sont alertés par l'explosion et tentent de secourir le technicien, mais il est gravement blessé dans l'explosion.

Épilogue :

- Malgré les efforts des secouristes, le technicien succombe à ses blessures.
- Une enquête révèle que le mauvais étalonnage des détecteurs de gaz et le bruit ambiant ont contribué à l'accident évitable.
- L'usine prend des mesures immédiates pour améliorer la sécurité, notamment en renforçant les procédures de maintenance et en ré-étalonnant correctement les détecteurs de gaz.

I-10 Les procédures conformes

I-10-1 Les conditions des procédures conformes

- Priorité à la sécurité : l'accident tragique survenu dans l'unité a incité la direction de l'usine à donner la priorité aux mesures de sécurité. Donc il faut obtenir un permis de travail à chaud avant de commencer toute activité de travail à chaud.

- Sensibilisation à la sécurité : avant de commencer le travail, le technicien a participé à une session de sensibilisation à la sécurité.
- Équipement de protection approprié (EPI) : le technicien portait un équipement de protection approprié
- Isolation énergétique : mettre en œuvre des procédures d'isolation énergétique afin de déconnecter en toute sécurité l'équipement des sources d'énergie.
- Étalonnage et entretien de l'équipement : le technicien a méticuleusement vérifié les détecteurs de gaz situés à proximité pour s'assurer qu'ils étaient correctement étalonnés et fonctionnaient.
- Vigilance constante : tout au long des travaux de maintenance, le technicien est resté attentif à l'environnement, faisant des pauses régulières pour inspecter visuellement les tuyaux afin de détecter les fuites et d'être à l'écoute de tout signe d'échappement de gaz.
- Ventilation : avant d'entamer toute opération de soudage, le technicien s'est assuré d'une bonne ventilation pour dissiper tout gaz potentiellement dangereux.
- Amélioration continue : favoriser une culture d'amélioration continue, en encourageant l'amélioration permanente des protocoles et des pratiques de sécurité.

I-10-2 Le Scénario conforme

Après l'accident tragique dans cette unité, des mesures de sécurité strictes sont mises en place pour prévenir de futurs incidents.

Acte 1 :

- Introduction à l'environnement industriel, avec des machines bruyantes et des travailleurs s'affairant dans un environnement industriel.
- L'accident précédent a incité la direction de l'usine à renforcer les mesures de sécurité pour protéger les travailleurs.

Acte 2 :

- Le technicien est désigné pour effectuer les réparations sur la ligne de gaz, avec un accent particulier mis sur la sécurité.

- Avant de commencer le travail, le technicien participe à une séance de sensibilisation à la sécurité, mettant en évidence les dangers potentiels, y compris les fuites de gaz et les risques d'explosion.

Acte 3 :

- Le technicien commence ses travaux de maintenance, en prenant soin de porter un équipement de protection approprié, y compris des lunettes de sécurité et un casque antibruit pour se protéger du bruit ambiant.
- Avant de commencer toute opération de soudure, il vérifie méticuleusement les détecteurs de gaz à proximité pour s'assurer qu'ils sont correctement étalonnés et fonctionnent correctement.

Acte 4 :

- Pendant le travail, il est attentif à son environnement, prenant régulièrement des pauses pour vérifier visuellement les tuyaux à la recherche de fuites et écoutant attentivement tout signe de gaz s'échappant.
- Avant de procéder à toute soudure, il s'assure que la zone est correctement ventilée pour évacuer tout gaz potentiellement dangereux.

Épilogue :

- Grâce à la vigilance de technicien et à la mise en œuvre de mesures de sécurité strictes, les réparations sont effectuées sans incident.
- L'usine met en avant l'importance de la formation continue en matière de sécurité et de la vigilance sur le lieu de travail pour éviter les accidents futurs.

CHAPITRE II

Approche Méthodologique de la Modélisation CAD 3D et de la Simulation CFD

II-1 Autodesk AutoCAD Plant 3D

Autodesk AutoCAD Plant 3D est un logiciel fourni par la société principale Autodesk, réalisé par un groupe de programmeurs dirigé par John Walker en 1982, constitue la pierre angulaire dans le domaine de la conception d'installations industrielles, offrant aux ingénieurs et aux concepteurs un ensemble d'outils puissants pour conceptualiser, concevoir et documenter des aménagements d'usines complexes avec une efficacité et une précision sans précédent. Ce progiciel, une émanation spécialisée de la célèbre plateforme AutoCAD, a redéfini les normes de conception d'usines, en rationalisant les processus et en améliorant la collaboration tout au long du cycle de vie du projet. [14]

Plant 3D offre des outils automatisés pour générer des dessins, rapports et nomenclatures, garantissant l'exactitude et la cohérence de la documentation du projet. Ses outils d'analyse avancés permettent d'évaluer les performances et la sécurité des conceptions en simulant le débit, la pression et les contraintes des fluides, optimisant ainsi la conception pour une efficacité maximale. Grâce à ses fonctionnalités robustes et son intégration fluide, permet aux ingénieurs de gérer la conception d'usines avec précision. C'est un outil essentiel pour améliorer la productivité, la collaboration et la réussite dans le secteur industriel moderne. [14]

Puisque notre projet est orienté autour d'un scénario réel, on doit donc travailler sur la modélisation d'une représentation 3D de l'unité basée sur des mesures réelles.

II-2 Données d'entrée pour AutoCAD Plant 3D (Inputs)

Pour créer une installation pétrolière et gazière sur AutoCAD Plant 3D, il est nécessaire de disposer des informations spécifiques relatives à ce domaine. Tout d'abord, une compréhension approfondie des processus et des équipements utilisés dans l'industrie pétrolière et gazière est essentielle. [15]

- **Données de Conception** : Cela inclut les plans P&ID, les schémas, les dessins de conception et toute autre documentation pertinente liée au projet. Ces données servent de base pour créer et modéliser les installations industrielles dans AutoCAD Plant 3D. [16]

- **Bibliothèques de Composants** : AutoCAD Plant 3D utilise une variété de composants préfabriqués pour la conception d'installations industrielles (des réservoirs, des pompes, des vannes, des tuyauteries, des échangeurs de chaleur, etc.). [16]
- **Données de Terrain** : Si le projet implique des éléments situés à l'extérieur ou nécessite une intégration avec le terrain. Ces données peuvent inclure des relevés de terrain, des cartes, des données, etc. [16]
- **Normes et Réglementations** : Connaître les normes et réglementations industrielles pertinentes est crucial pour garantir la conformité de votre conception. [16]
- **Données d'Ingénierie** : telles que les spécifications techniques des équipements, les données de performance, les exigences de matériaux, etc. Ces informations permettront de guider les décisions de conception et assureront la fonctionnalité et la sécurité des installations. [16]
- **Informations de Projet** : Toute autre information spécifique au projet, telle que les spécifications du client, les contraintes budgétaires, les délais de livraison, etc. [16]

La principale chose dont nous avons besoin en général pour notre projet est un P&iD et un PFD, ainsi que les fiches techniques du projet. Ces documents permettent de comprendre l'installation et d'identifier les mesures de chaque équipement. Pour notre projet, nous avons utilisé les documents de l'unité de Gaz de combustion (Fuel Gas) au CPF de SONATRACH-ORGANISATION OURHOUD.

II-3 Conversion des données vers un modèle CAD 3D

Afin de créer un modèle CAD 3D Version 2022 de l'unité de Fuel Gas, nous utilisons différents documents en plusieurs étapes, séparant le travail en 3 étapes principales. [17]

II-3-1 La Structure

La première chose qu'on doit faire c'est examiner les dessins architecturaux pour comprendre la disposition et les dimensions de la structure où sera située l'unité de Fuel Gas. Les étapes nécessaires pour concevoir une structure sur AutoCAD Plant 3D est la suivante :

- Créer un cadre de base en utilisant la fonction GRID pour concevoir la structure du squelette de l'unité, cette grille sera utilisée pour définir les emplacements des charpentes de structure, des semelles, des plaques de sol et d'autres éléments comme l'échelle et les escaliers.

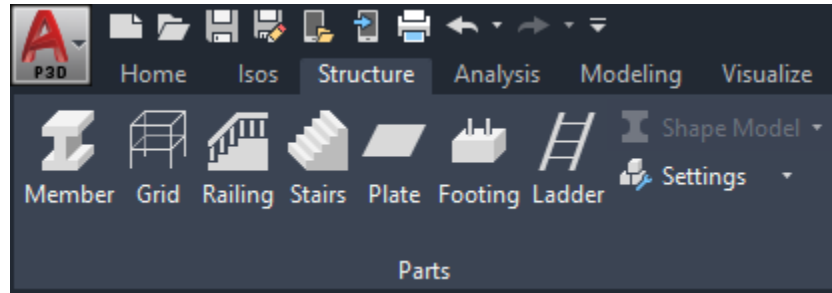


Figure II - 1: Les fonctions de travail sur AutoCAD Plant 3D

- On clique sur « Grid », la fenêtre ci-dessous apparaîtra pour définir les mesures en millimètres sur les axes x, y, z et on ajoute autant de lignes que l'on veut, juste en ajoutant un "," après chaque chiffre, et quand on appuie sur « Create » la grille sera créée et nous pourrons la placer dans notre scène. (Figure II – 03)

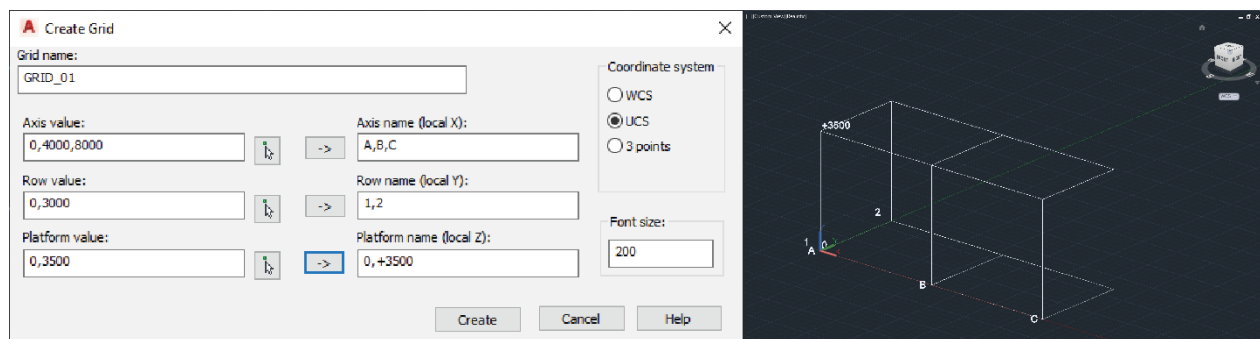


Figure II - 2: La fenêtre de création de la grille et la grille créée dans la scène

- Une fois la grille créée, on appuie sur le bouton « Footing Settings » et on modifie les dimensions des semelles, puis on appuie sur « Footing » pour placer les semelles à leur place. (Figure II - 04)

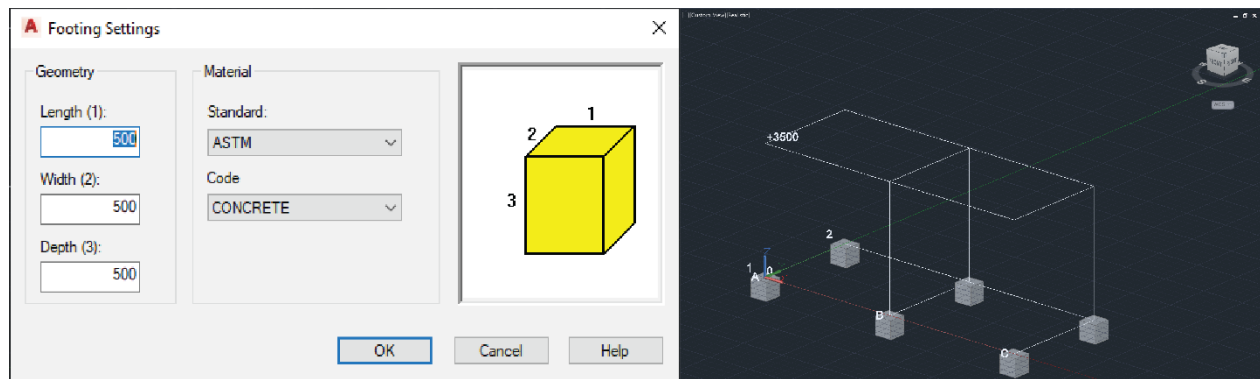


Figure II - 3: La fenêtre de paramétrage des semelles et l'emplacement sur la grille

- Désormais, on choisit les charpentes des structures en fonction des normes de l'industrie en appuyant sur les "Member Settings" comme illustré sur la Figure II-05, il existe deux paramètres principaux : le type de charpente et la taille de la charpente.

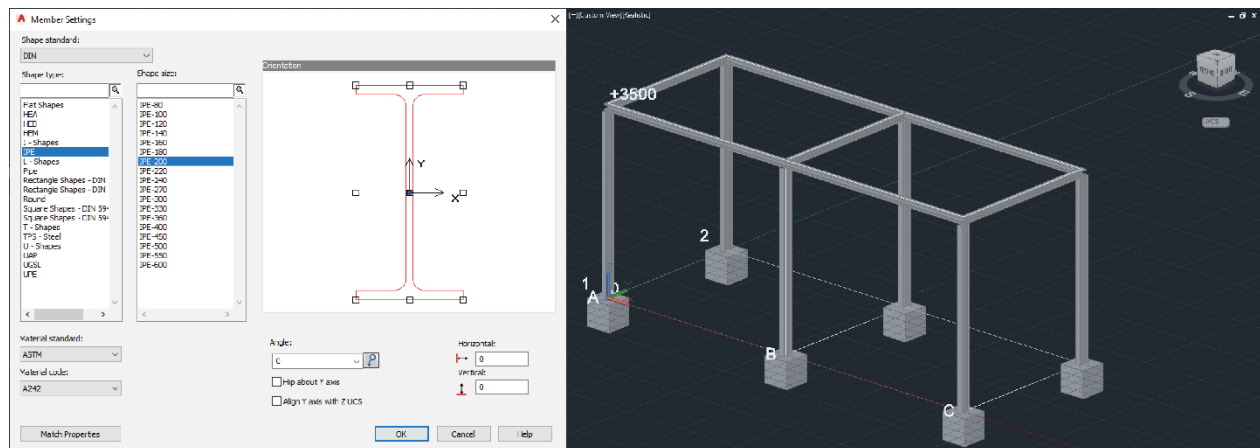


Figure II - 4: La fenêtre des paramètres de charpentes et L'emplacement sur la grille

- Une fois le choix des paramètres a été effectué, appuyer sur OK et commencer la conception de la charpente sur la grille pour définir la structure. Il est possible de modifier la structure pour qu'elle soit uniforme.
- Par la suite, on intègre les dispositifs de sécurité tels que les balustrades, on peut les modifier dans « Railing Settings ». Après confirmation des paramètres, on conçoit les balustrades sur la grille tout en intégrant l'échelle. (Figure II - 06)

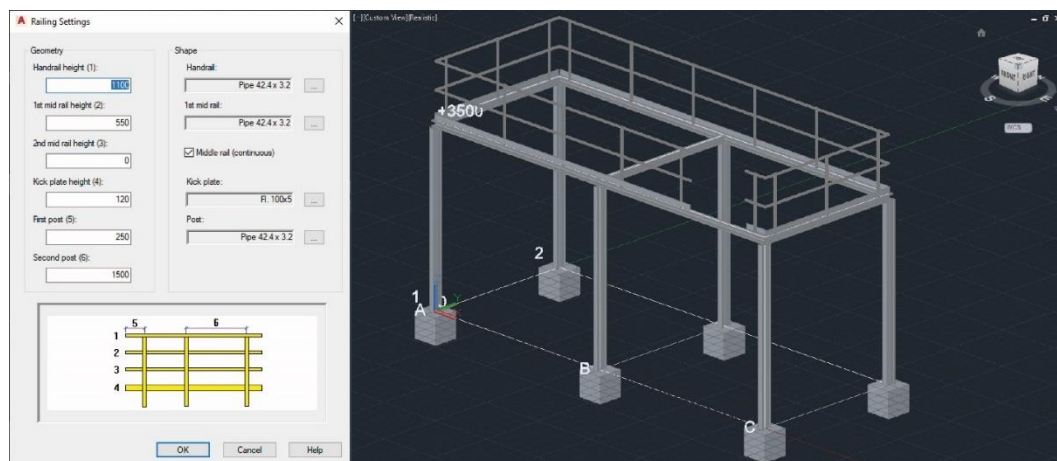


Figure II - 5: La fenêtre des paramètres de balustrade et L'emplacement sur la grille

- Pour la conception de la plateforme, on répète les mêmes étapes précédentes

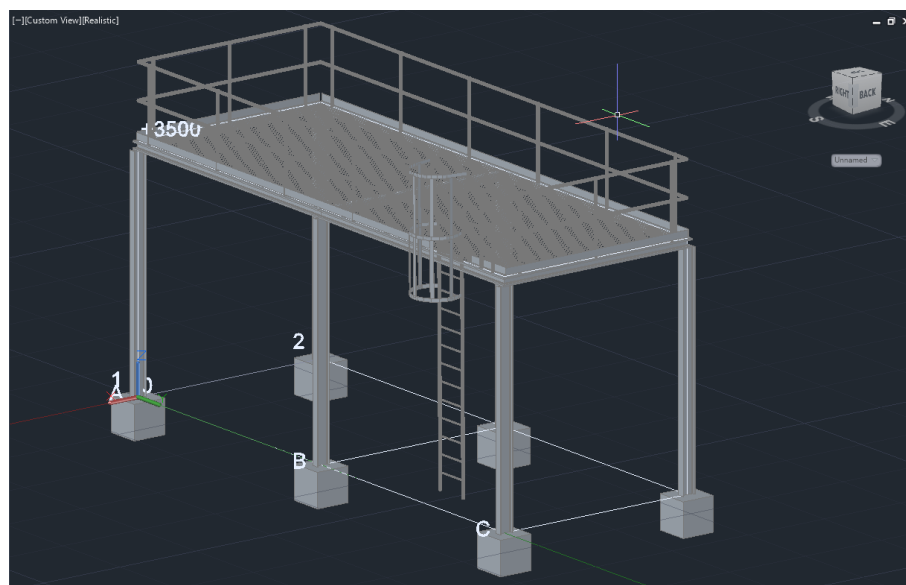


Figure II - 6: L'emplacement de l'échelle et la plateforme

II-3-2 Les équipements

- Dans un premier temps, nous avons étudié les spécifications des équipements à travers les documents techniques. Dans un second temps, nous avons réalisé la version 3D de sept

équipements. Pour ce faire, on utilise le logiciel AutoCAD Plant 3D en utilisant la fonction « Create Equipment » dans la fenêtre principale « Home ».

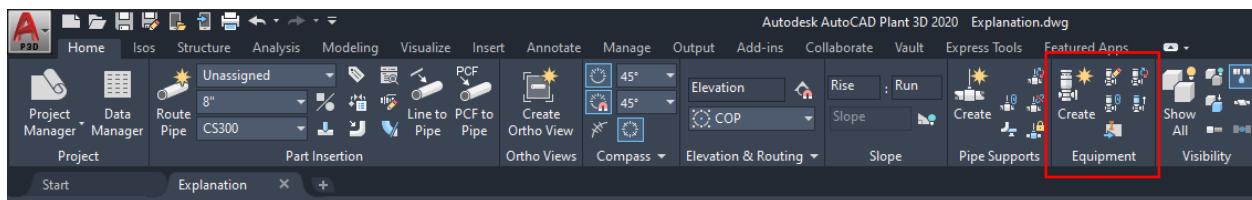


Figure II - 7: La fonction « Create Equipment » sur AutoCAD Plant 3D

- Une fenêtre apparaîtra et on choisit parmi ces équipements ceux déjà réalisés tout en effectuant les modifications. Il est toujours possible de modéliser précisément un équipement personnalisé en fonction des spécifications ou des dimensions du fournisseur. (Figure II - 09)

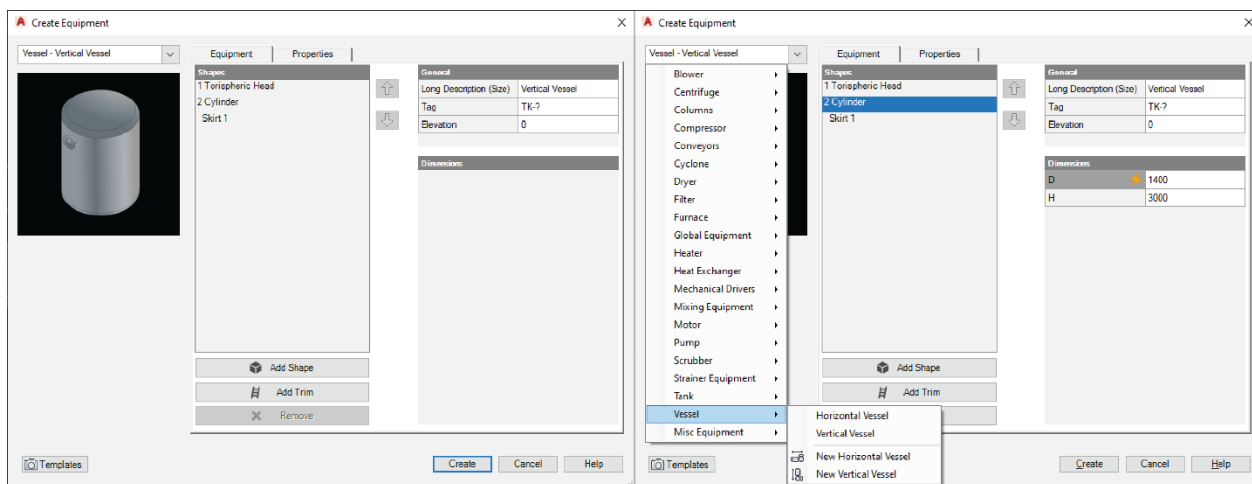


Figure II - 8: Fenêtre de création d'un nouvel équipement

- Pour la création d'un nouvel équipement, on peut sélectionner le type d'équipement, puis y ajouter plus de formes et modifier leurs dimensions en fonction des mesures. On peut également supprimer des formes en cliquant sur "Add Shape" ou "Remove", et la modification est accessible dans le menu. (Figure II - 10)

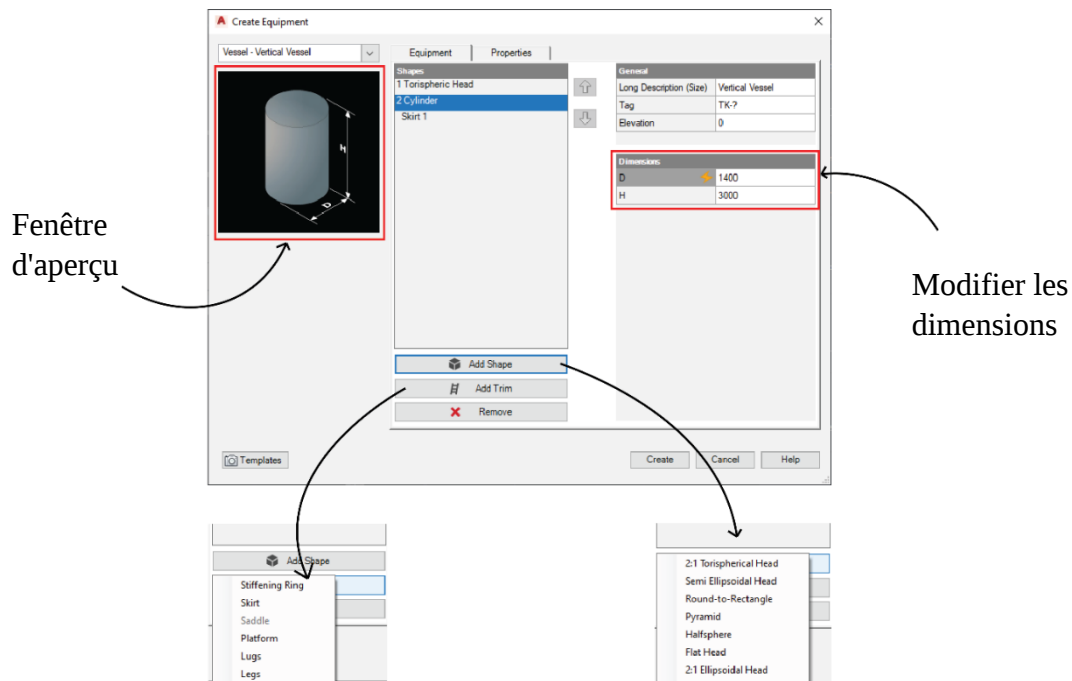


Figure II - 9: La fenêtre de modification des équipements

- Pour l'ajout des garnitures, d'une plate-forme ou les pieds de l'équipement en cliquant sur « Add Trim », ce qui permet de créer les échelles de secours. Avant de cliquer sur « Create », on attribue un Tag à l'équipement pour faciliter la détection de problèmes. Pour ce faire on clique sur "Tag" pour ouvrir la fenêtre d'attribution. AutoCAD Plant 3D peut générer automatiquement un numéro d'étiquette en appuyant sur les flèches, accélérant ainsi le travail. (Figure II - 11)

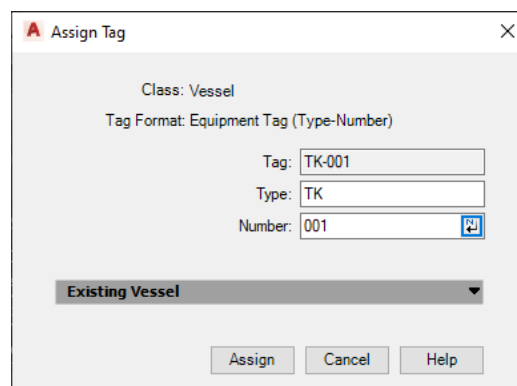


Figure II - 10: Fenêtre d'attribution de Tag

A la fin du réglage des paramètres de l'équipement, on peut disposer ce dernier au sein de la structure pour optimiser l'utilisation de l'espace, l'accessibilité pour la maintenance et un flux de travail efficace. Et aussi, inclure des systèmes de support en concevant des structures de support, des plates-formes et des supports de montage selon les besoins pour installer et entretenir l'équipement en toute sécurité.



Figure II - 11: L'emplacement de l'équipement dans la scène

Pour insérer les brides de l'équipement, il suffit d'appuyer sur « Ctrl + Bouton gauche de la souris » sur la bride, une petite fenêtre apparaîtra et permettra d'éditer la taille et la classe de pression de la bride, ainsi que son emplacement, dans ce cas, nous devons vérifier les spécifications P&iD de l'équipement pour savoir quel type de buse doit être ajoutée. (Figure II-13)

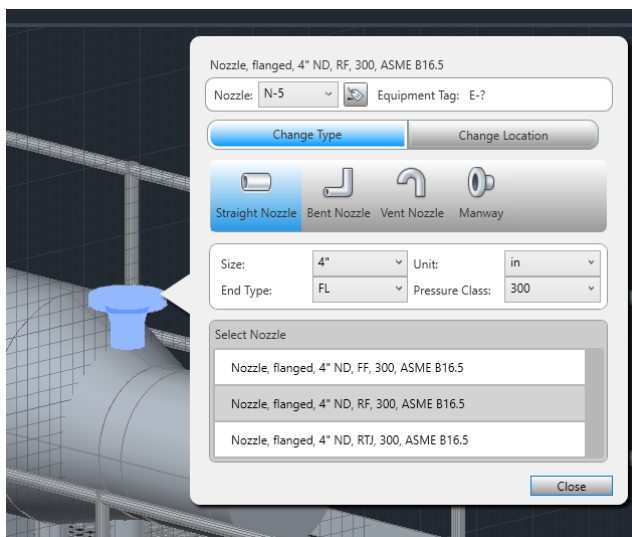


Figure II - 12: La fenêtre de modification de bride

II-3-3 La Tuyauterie

Pour concevoir la tuyauterie il faut planifier le routage des canalisations et déterminer les itinéraires optimaux pour les canalisations permettant de connecter divers équipements et composants au sein de l'unité, en tenant compte de facteurs tels que la direction du flux, les exigences de pression et les contraintes d'espace.

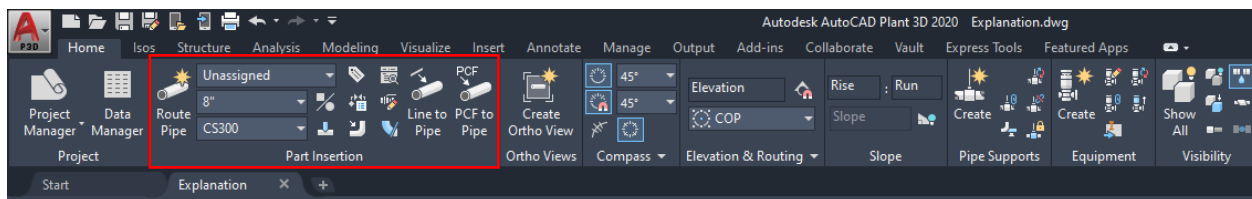


Figure II - 13: Fonction de routage des canalisations dans le menu « Home »

Nous pouvons acheminer un tuyau en configurant la taille et la pression du tuyau dans le menu « Home », puis attribuer un tag au tuyau, après nous pouvons appuyer sur « Route Pipe » et faire glisser la souris vers la bride pour le créer.

Remarque : la taille du tuyau et la pression de classe doivent correspondre à la taille de la buse et à la pression de classe afin qu'aucune erreur n'apparaisse.

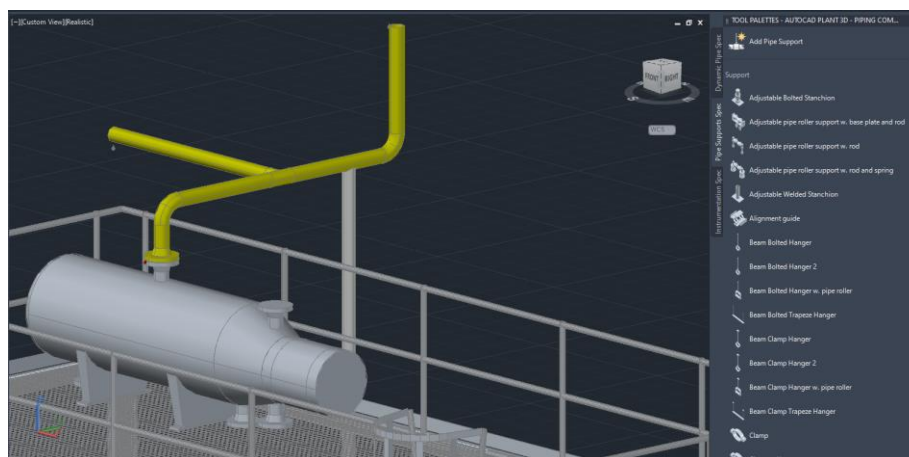


Figure II - 14: Exemple de routage de canalisations

Nous pouvons maintenant créer les tuyaux en fonction du schéma P&iD et PFD, comprendre les coudes, les jonctions, et également ajouter des supports, et aussi ajouter les vannes tout dépend de

schéma P&iD. Nous pouvons accéder aux vannes, supports et instruments dans les palettes d'outils sur le côté, et il y en a de tous les types, nous pouvons simplement cliquer et faire glisser sur le tuyau pour les placer sur le tuyau.

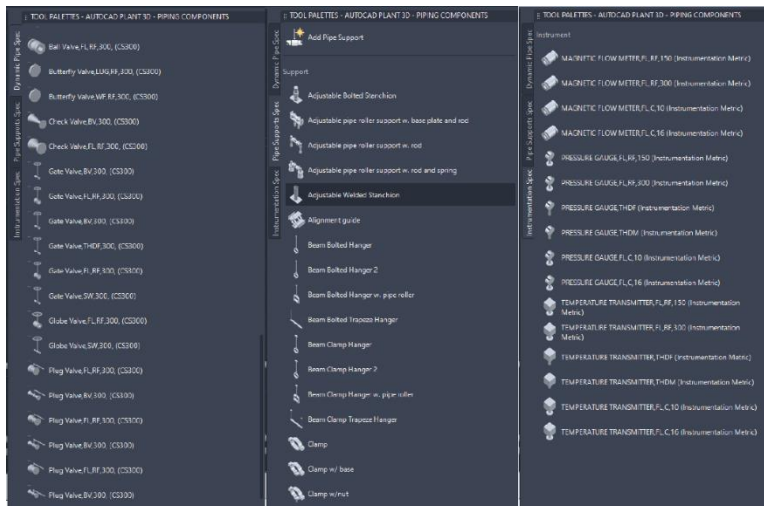


Figure II - 15: Les types de vannes, supports, instruments dans les palettes d'outils

Il faut aussi tenir compte de la sécurité et intégrer des fonctionnalités telles que des soupapes de surpression, des vannes d'isolement et des systèmes de détection de fuites pour garantir le fonctionnement sûr du réseau de tuyauterie.

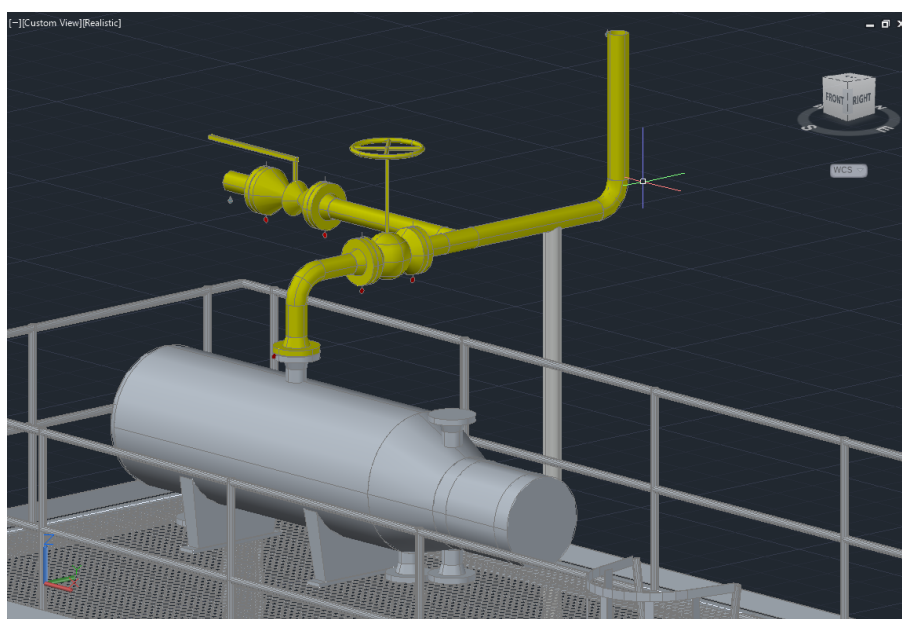


Figure II - 16: L'emplacement des vannes dans les pipes

II-4 Les résultats de la modélisation 3D

Dans ce projet, des procédures identiques sont utilisées pour exécuter la représentation de l'unité Fuel Gas, tout en conservant les informations fournies par le P&ID. Nous avons structuré le travail en trois étapes principales, attribuant chaque étape à une couche distincte.

II-4-1 Modélisation des structures

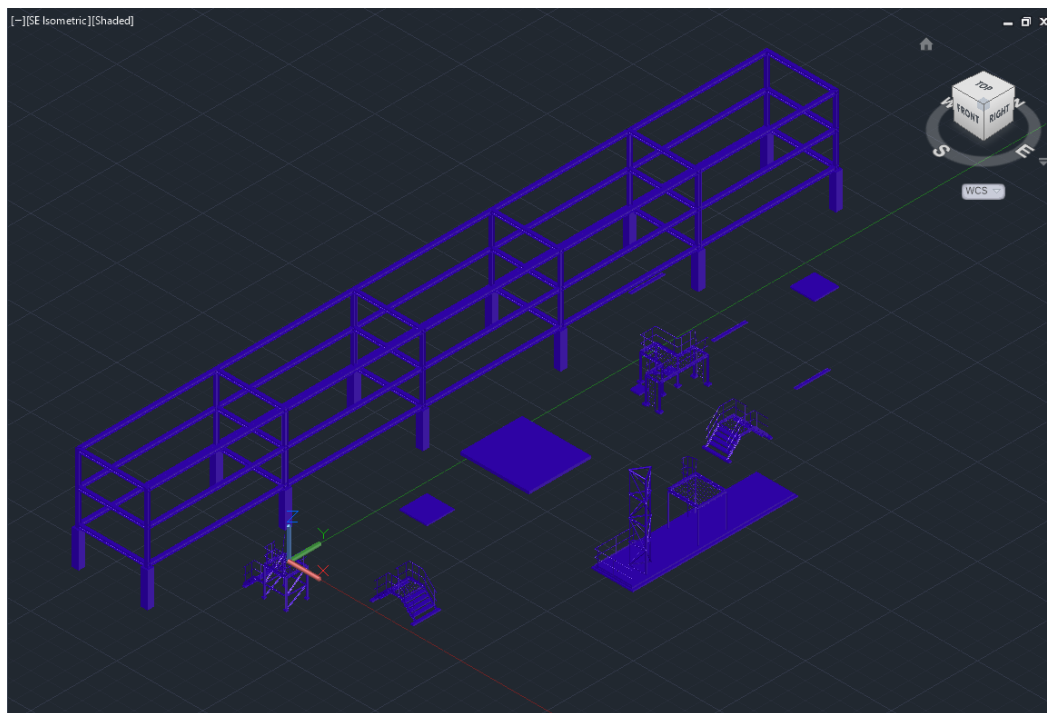


Figure II - 17: Structure de l'unité de FG en 3D

Tout au long de ce processus, nous avons mis en place l'infrastructure requise pour l'équipement, ainsi que les structures d'accès telles que les escaliers. Cela facilitera un accès optimal du personnel au sein de l'unité, améliorant à la fois l'efficacité opérationnelle et le réalisme de la simulation.

II-4-2 Modélisation des équipements

Dans cette section, nous avons entrepris la modélisation de tous les équipements pertinents composant l'unité, totalisant 7 composants distincts. Chacun de ces composants a été positionné dans son cadre structurel respectif. Cette approche garantit la représentation précise et l'intégration des éléments essentiels de l'équipement, contribuant ainsi à la cohérence et à la fonctionnalité globales de l'unité.

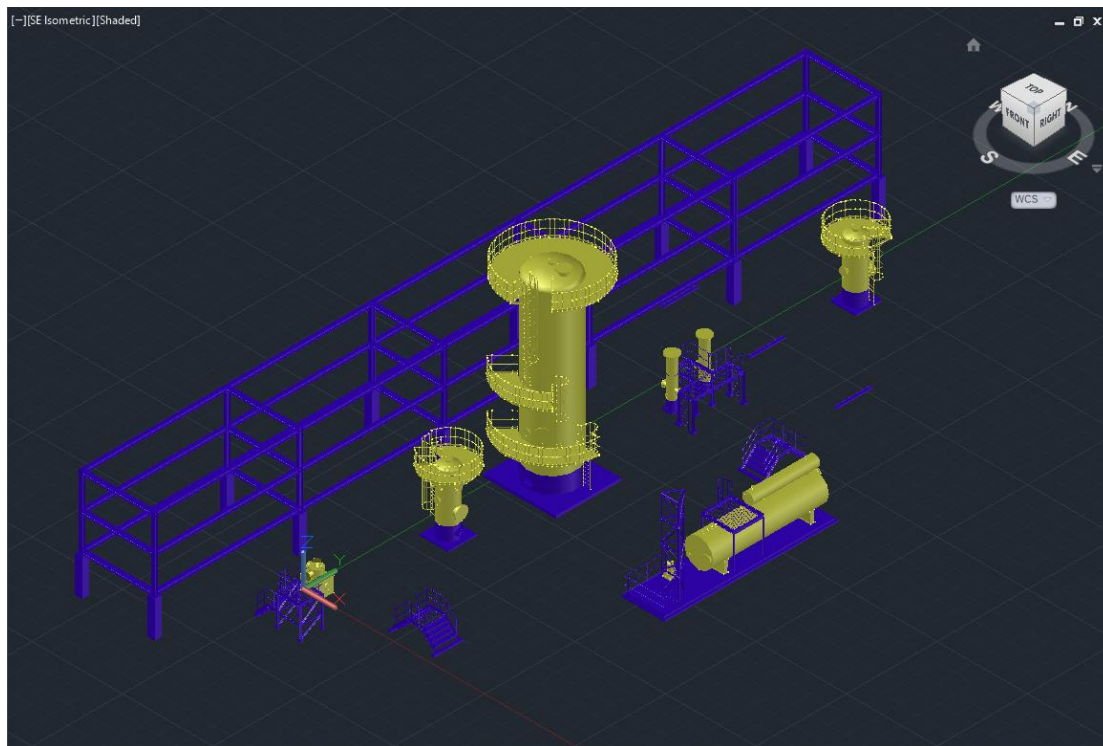


Figure II - 18: Les équipements de l'unité de FG en 3D

Dans cette phase du projet, une attention méticuleuse a été portée à la détermination précise des dimensions des brides et à leur positionnement stratégique. Cet effort délibéré répond à un double objectif : faciliter l'intégration transparente de l'équipement avec les tuyaux correspondants et garantir que les buses sélectionnées offrent des points d'accès pratiques au sein du cadre structurel. Une telle précision améliore non seulement l'efficacité des futurs raccordements équipement-tuyauterie, mais souligne également la planification consciencieuse qui fait partie intégrante du succès du projet.

II-4-3 Modélisation des tuyauteries

La dernière étape consistait à acheminer tous les tuyaux et équipements d'interconnexion conformément au diagramme PFD et P&ID. De plus, des vannes ont été intégrées dans leurs positions désignées pour compléter la configuration du système.

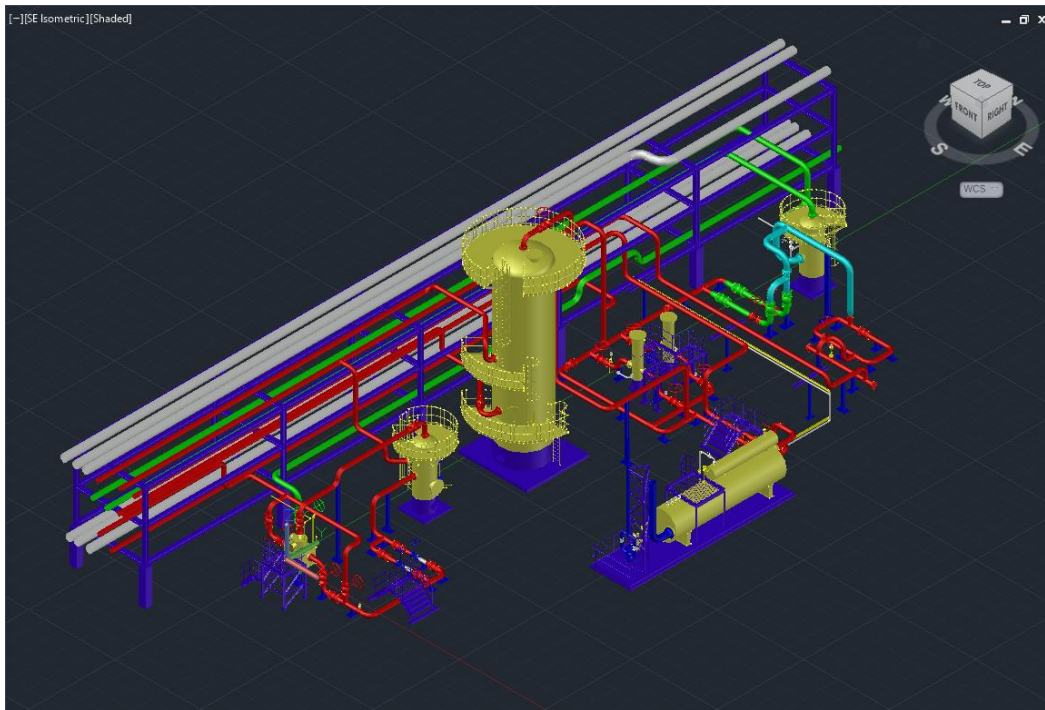


Figure II - 19: Tuyauterie de système FG avec supports (résultats finale)

Et pour garantir une réalisation complète, nous avons incorporé des supports pour les tuyaux, améliorant ainsi l'intégrité structurelle et la fiabilité opérationnelle du système.

Avec l'incorporation de supports de tuyaux, la modélisation de l'unité a été achevée avec succès, rendant le modèle prêt pour l'exportation. Cette avancée ouvre la voie à l'étape suivante : la réalisation de la simulation CFD.

II-5 Dynamique des Fluides Numérique (CFD)

La Computational Fluid Dynamics (CFD), ou Dynamique des Fluides Numérique, implique l'étude des flux de fluides, du transfert de chaleur et de masse, des réactions chimiques, et autres

phénomènes similaires en résolvant mathématiquement les équations gouvernant ces processus. Elle est essentielle pour concevoir des dispositifs fonctionnant avec des fluides, permettant de réaliser de multiples simulations à moindre coût et avec une grande flexibilité dans la variation des paramètres et des configurations. [18]

Bien que les tests expérimentaux demeurent indispensables pour valider les simulations numériques, la CFD réduit le nombre d'essais nécessaires pour de nouveaux dispositifs. Elle complète l'expérimentation en réduisant les efforts et les coûts globaux associés à la collecte de données. Ainsi, la CFD est devenue un outil incontournable pour l'innovation dans la recherche et l'industrie.

La CFD trouve des applications variées, notamment dans :

- Le pré-dimensionnement
- L'optimisation des formes/processus
- Le calcul/dimensionnement des forces sur les structures
- La visualisation des champs de pression, de vitesse, etc.

II-5-1 Domaines d'applications de la CFD

L'analyse CFD a des applications dans plusieurs secteurs pour améliorer ou développer de nouveaux produits. [18] On peut citer celles de :

- Secteurs de l'automobile et de l'aérospatiale
- Industries des procédés et de la chimie
- Turbomachines (ventilateurs, turbines, compresseurs, soufflantes, pompes, etc.)
- Centrales thermiques et nucléaires
- Combustion, incendie et pollution environnementale
- Chauffage et ventilation pour bâtiments, voitures, bus et avions civils
- Prévisions météorologiques
- Applications de défense et spatiales
- Applications biomédicales

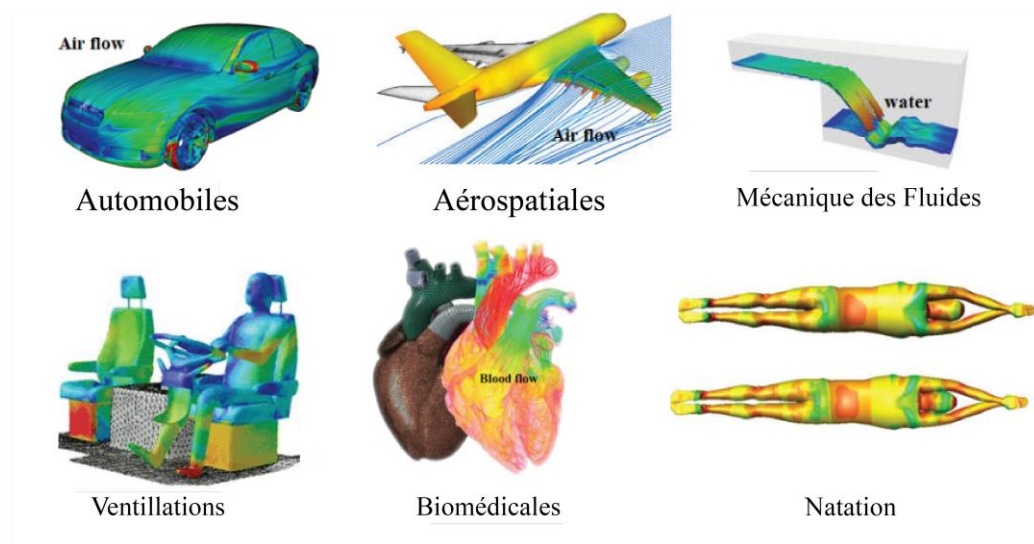


Figure II - 20: Quelques domaines d'application de la CFD

II-5-2 Avantages de la CFD

Coût relativement faible : Utiliser des expériences et des tests physiques pour obtenir des données d'ingénierie essentielles pour la conception peut être coûteux. Les simulations CFD sont relativement peu coûteuses et les coûts sont susceptibles de diminuer à mesure que les ordinateurs deviennent plus puissants.

La rapidité : Les simulations CFD peuvent être exécutées dans un court laps de temps. Un délai d'exécution rapide signifie que les données d'ingénierie peuvent être introduites tôt dans le processus de conception.

Capacité à simuler des conditions réelles : De nombreux processus d'écoulement et de transfert de chaleur ne peuvent pas être (facilement) testés, par ex. écoulement hypersonique. La CFD offre la possibilité de simuler théoriquement n'importe quelle condition physique.

Capacité à simuler des conditions idéales : La CFD permet un grand contrôle sur le processus physique et offre la possibilité d'isoler des phénomènes spécifiques pour étude. Exemple: un processus de transfert de chaleur peut être idéalisé avec des limites adiabatiques, à flux thermique constant ou à température constante.

Informations complètes et compréhensibles : Les expériences ne permettent d'extraire les données qu'à un nombre limité d'emplacements dans le système (par ex. Sondes de pression et de température, jauges de flux thermique...etc.). La CFD permet d'examiner un grand nombre d'emplacements dans la région d'intérêt et fournit un ensemble complet de paramètres de l'écoulement.

II-6 Logiciel de CFD in:Flux

Insight Numerics est une société de logiciels spécialisée dans le développement de solutions logicielles avancées de dynamique des fluides computationnelle (CFD) pour les applications d'ingénierie et scientifiques. Leur produit sont Flux et Detect3D, sont de puissants logiciels de simulation CFD conçus pour fournir aux ingénieurs des outils précis et efficaces pour analyser les phénomènes d'écoulement des fluides et de transfert de chaleur pour l'ingénierie de sécurité.

Flux révolutionne la simulation CFD avec une plateforme avancée qui automatise entièrement le processus, de la configuration à la résolution. Son adaptabilité de maillage réduit drastiquement les temps de simulation, offrant une précision rapide même pour des géométries 3D complexes. Les utilisateurs, qu'ils soient experts ou novices, peuvent lancer des centaines de simulations en quelques clics, maximisant ainsi la productivité et permettant une exploration plus approfondie des scénarios de conception. [19]

II-6-1 Les fonctionnalités de in:Flux

Ventilation et dispersion : La simulation de ventilation et de dispersion dans Flux est rapide et intuitive. Après l'importation d'un fichier CAD, les paramètres de vent sont définis, et la simulation se configure automatiquement. Les utilisateurs placent simplement les "flux entrants" sur le fichier CAD pour différents scénarios. Les simulations de dispersion s'ajustent automatiquement en fonction des paramètres sélectionnés. Les résultats peuvent être visualisés et exportés vers Excel pour une analyse approfondie. [20]

Cartographie des gaz basés sur le risque : La nouvelle version de Flux révolutionne la cartographie des gaz basée sur le risque. Les utilisateurs peuvent assigner des fréquences de fuite et intégrer des données de probabilité de vent sans effort. Cela automatise la création d'une matrice

complète de simulations, réduisant considérablement le temps d'exécution. Une fois les simulations terminées, les conséquences sont calculées à partir des volumes de nuages de gaz, permettant une évaluation précise du risque pour chaque scénario. Les visualisations des données basées sur le risque aident à la prise de décision et aux stratégies d'atténuation. [20]

Optimisation des détecteurs de gaz : Flux simplifie l'optimisation des détecteurs de gaz en utilisant les données de risque et les matrices de fréquence. Les utilisateurs minimisent les détecteurs tout en garantissant une couverture adéquate grâce à des algorithmes. Le logiciel génère rapidement des options de disposition, réduisant le temps et le coût nécessaires. Les schémas optimisés peuvent être exportés vers Excel pour une utilisation ultérieure, sans besoin d'expertise en CFD. [20]

Modélisation des incendies : Il est possible de modéliser les incendies de jets et de lac par le biais de fuites de gaz à haute pression ou d'entrées de lac d'évaporation. Le logiciel permet des simulations en régime transitoire et en régime permanent pour des scénarios de ventilation interne et externe. Les options de post-traitement (post-processing) standard permettent d'analyser les variables relatives au rayonnement, à la température, à la suie et à la formation de produits. Grâce à la fonction de gestion des risques, des contours de dépassement peut être créés à partir de données provenant de milliers de simulations d'incendie. [20]

Capacités de turbulence de l'Héli-plateforme : Flux fournit un nouveau type de modèle de transport des contraintes de Reynolds intégré, spécialement conçu pour effectuer des analyses de turbulence sur les passerelles. [20]

II-6-2 Application de in:Flux dans le projet

Dans notre projet, nous avons utilisé Flux version 3.0 (64-bit), pour analyser la zone de travail et comprendre son importance. Cette analyse a été cruciale pour identifier les conséquences d'éventuels incendies de jet de feu. En comprenant ces conséquences, nous pouvons déterminer les mesures de sécurité appropriées requises pour effectuer des travaux à chaud dans cette zone. En outre, ces connaissances nous permettent de démontrer les risques potentiels pour les travailleurs par le biais de simulations en réalité virtuelle.

Dans cette simulation, on a modélisé un jet de feu dans Flux, situé dans un tuyau aux niveau des filtres. Le scénario présente une interaction dynamique de forces et d'éléments, où la combustion du gaz génère un puissant jet de flammes à cause d'une étincelle crée par le technicien. Dans l'environnement contrôlé de Flux, des facteurs tels que la température, la pression et la taille de la flamme sont pris en compte, offrant un aperçu détaillé du comportement du jet enflammé. Au cours de son parcours dans la canalisation, la flamme interagit avec les structures, ce qui peut avoir une incidence dangereuse. En simulant ce scénario, nous avons acquis des connaissances inestimables pour optimiser les protocoles de sécurité dans la simulation VR, améliorer les processus industriels et garantir la robustesse des conceptions techniques.

II-6-3 Les données d'entrée dans in:Flux

- Géométrie 3D CAD : nous l'avons déjà fait dans AutoCAD Plant 3D.
- Détails de la ventilation : D'après the site web WeatherSpark.com qui fournit des rapports détaillés sur les conditions météorologiques typiques de 145 449 sites dans le monde entier. La vitesse horaire moyenne du vent à Hassi Messaoud diminue durant l'été jusqu'à 16,7 kilomètres par heure à 14,7 kilomètres par heure au cours de la saison, donc la vitesse moyenne du vent est 15,7 km/h, donc 43.61 m/s. [21]
- Type flux entrant : fuite de gaz à haute pression.
- Évaluation de la composition du gaz : logiciel peut impliquer plusieurs composants et dans l'unité de gaz de combustion, le gaz qui circule est le gaz naturel donc c'est les composantes du gaz naturel :
 - Méthane (CH₄) : 90 %
 - Éthane (C₂H₆) : 5 %
 - Propane (C₃H₈) : 1 %
 - Butane (C₄H₁₀) : 0,2 %
 - Azote (N₂) : 2,2 %
 - Dioxyde de carbone (CO₂) : 1,4 %
- Analyse de la pression et de la température : d'après le service de process, le gaz sort avec une pression environ 24 barG par le ballon HP vers les filtres et une température de 60 °C

mais la pression de la ligne où le percement découle est environs 100 barG et la température 140 °C donc c'est à partir de cette pression qu'on peut simuler l'incendie.

- Identification de la taille, de l'emplacement et de l'orientation du point de fuite : La fuite est localisée au niveau de la ligne en face des filtres, et le diamètre de cette fuite est 10mm, et elle est orientée vers la platform des filtres avec une hauteur de 2.8m. (Figure II-27)

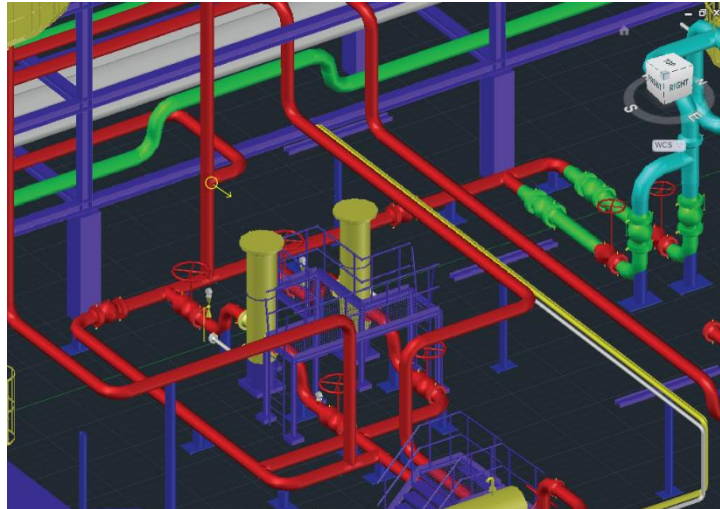


Figure II - 21: L'emplacement du percement dans la géométrie

II-7 Les étapes de la simulation

II-7-1 Importation de la géométrie 3D

La première étape consiste à importer la géométrie CAD dans le logiciel Flux. Pour ce faire, il suffit de se rendre dans la section d'importation (Geometry) et de sélectionner l'option d'importation de la géométrie 3D (import 3D CAD...). (Figure II – 22). [22]

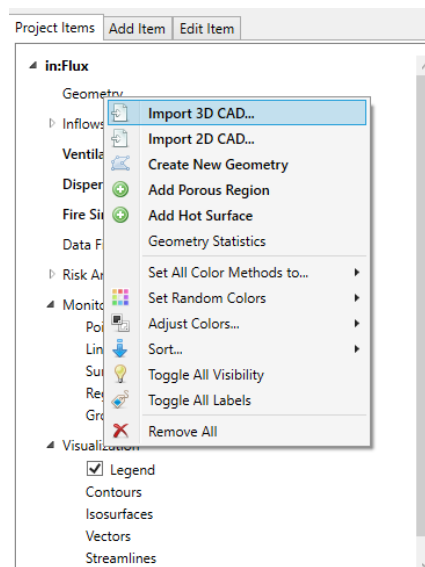


Figure II - 22: L'importation de la géométrie 3D

II-7-2 Ajout d'une simulation de ventilation

Après l'importation de la géométrie, l'étape suivante consiste à lancer une simulation de ventilation. Cela permet de spécifier les conditions météorologiques essentielles pour les procédures de simulation d'incendie ultérieures. (Figure II - 23). [22]

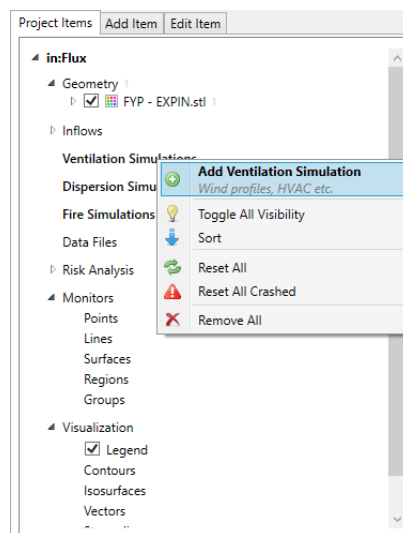


Figure II - 23: Ajout de la simulation de ventilation

Pour commencer le processus de simulation de la ventilation, l'utilisateur navigue jusqu'à la section ventilation et effectue un clic gauche. Ensuite, l'option "ajouter une simulation de ventilation" est sélectionnée pour lancer la simulation souhaitée.

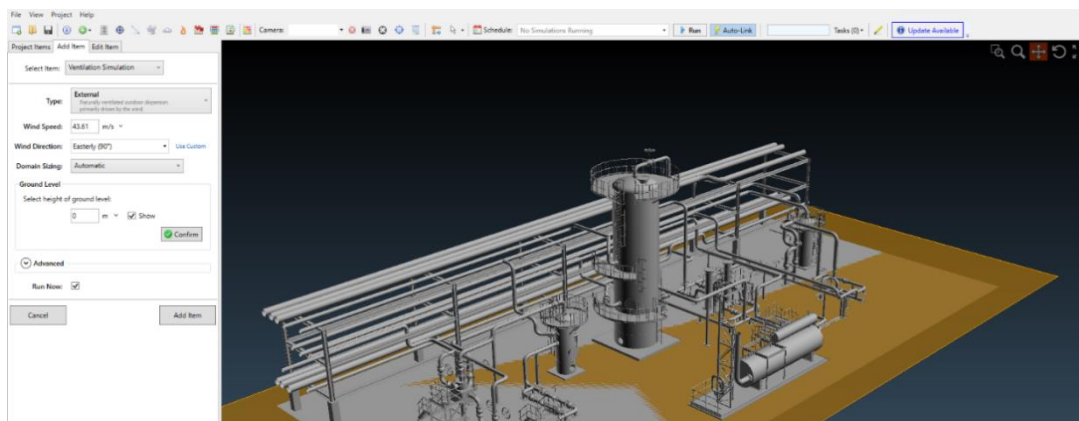


Figure II - 24: Ajout des conditions météorologiques

Lors de la configuration de la simulation de ventilation, toutes les informations pertinentes telles que la vitesse et la direction du vent, ainsi que le niveau du sol, sont définies. Ces paramètres jouent un rôle essentiel dans la modélisation précise des conditions environnementales nécessaires à une simulation efficace, puis nous attendons que le logiciel termine la simulation.

II-7-3 Définition du mixte du gaz naturel

Une autre étape importante consiste à définir le mélange de gaz qui produira la flamme. Pour ce faire, on accède à l'onglet "Add Item" et on sélectionne "Fluid Definition". Dans cette section, on ajoute les composants du mélange de gaz, en veillant à spécifier les concentrations correctes en parties par million (ppm) ou en pourcentage par volume (%vol) (voir section II-6-3). Cette définition précise est essentielle pour simuler et contrôler avec exactitude les caractéristiques de la flamme. [22]

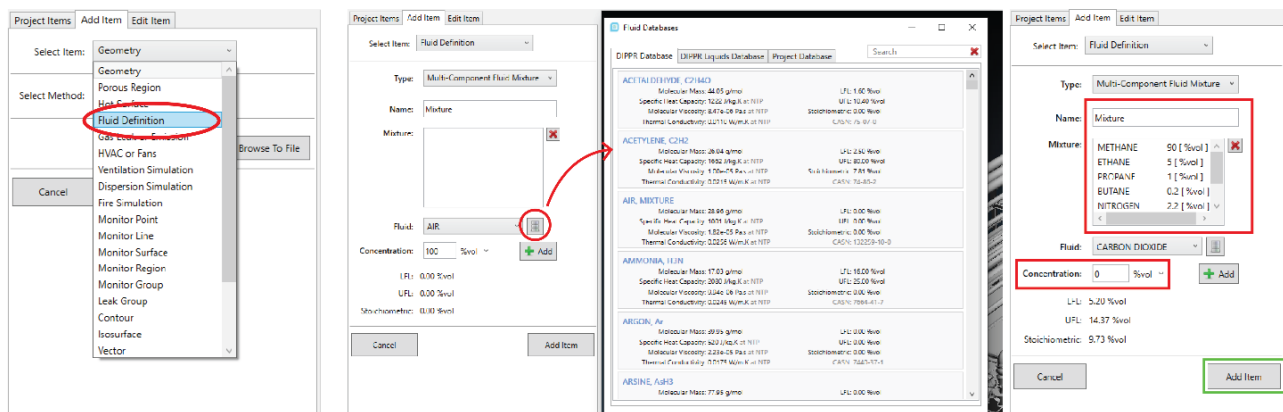


Figure II - 25: Les étapes d'ajout d'une mixture des gaz

II-7-4 Ajout d'une fuite de gaz à haute pression

Après avoir incorporé le mélange dans la simulation, l'étape suivante consiste à préparer la fuite sous haute pression du gaz naturel. [22]

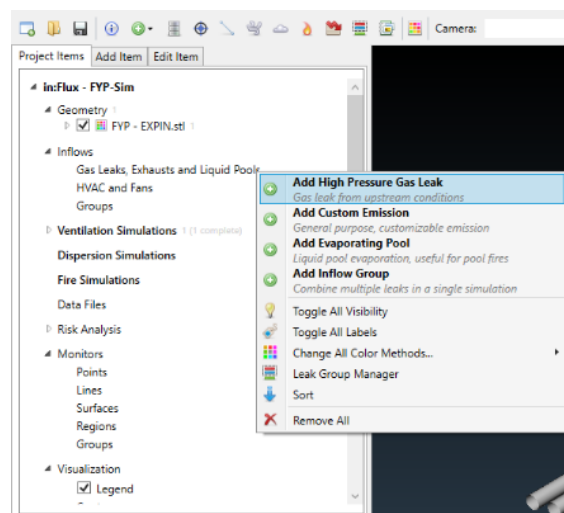


Figure II - 26: Ajout d'une fuite de gaz à haute pression

On Commence par sélectionner le mélange précédemment créé et on le définit comme un gaz. On saisit ensuite la pression et la température de service. En outre, il faut spécifier la taille, l'emplacement et l'orientation de la brèche. Pour déterminer avec précision l'emplacement de la

brèche sur la géométrie, on doit utiliser l'outil "Pick Tool". Cela permet un placement précis directement sur le modèle 3D.

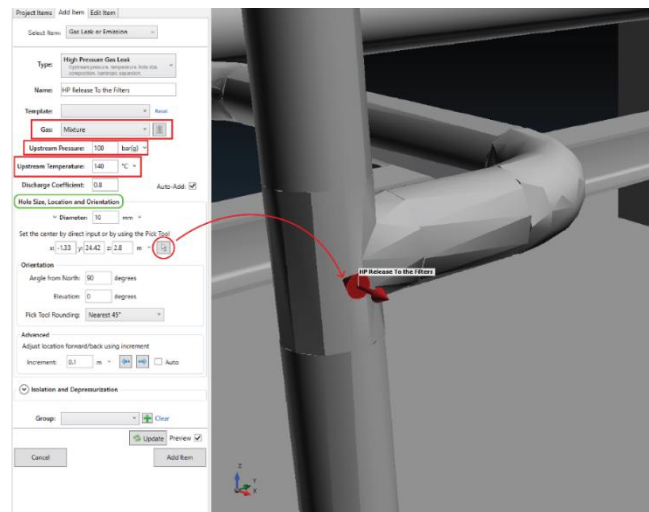


Figure II - 27: Ajout des informations nécessaires pour la fuite

II-7-5 La simulation

Dans cette étape, on procède à l'ajout d'une simulation d'incendie. Pour ce faire, on commence par sélectionner les paramètres de la ventilation et la fuite précédemment définie. Après avoir fixé ces conditions, on exécute la simulation. [22]

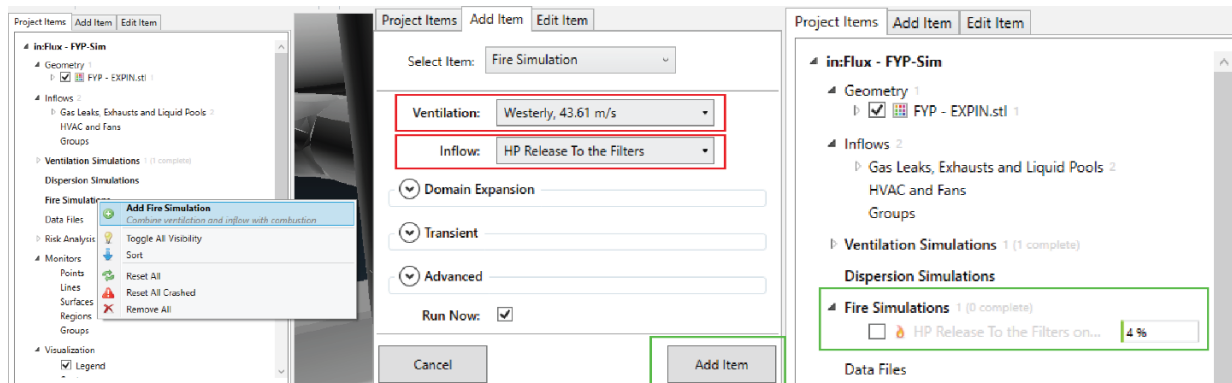


Figure II - 28: Les étapes essentielles de la simulation d'incendie

II-8 La visualisation des résultats

Il existe plusieurs façons de visualiser les résultats, y compris des plans en 2D et des maillages en 3D (figure II- 30, II- 33). Pour représenter les données, nous pouvons utiliser "Contours" pour la visualisation en 2D et "IsoSurfaces" pour la représentation en 3D. [22]

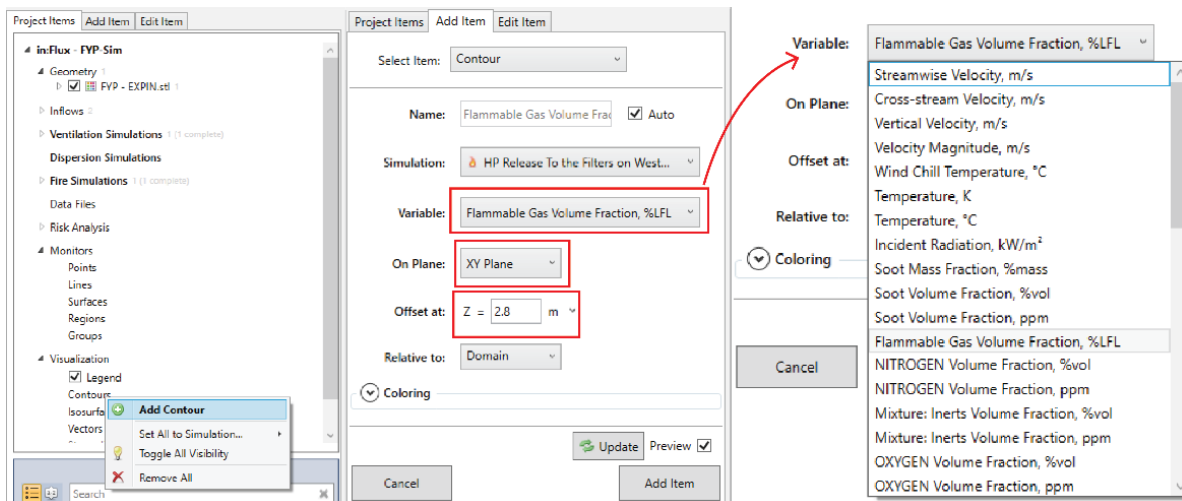


Figure II - 29: Etapes de l'ajout d'un 'contour' pour la visualisation en 2D

Lors de l'ajout d'un contour, nous avons la possibilité de sélectionner la variable que nous souhaitons parmi les différentes options disponibles. En outre, on peut choisir les axes sur lesquels afficher le résultat. Pour la hauteur, il faut spécifier l'altitude à laquelle on souhaite observer le contour. Dans notre cas spécifique, nous souhaitons l'observer à partir de la source, qui est située à une altitude de 2,8 mètres par rapport au sol. [22]

Pour intégrer la fonction "isosurface", nous devons l'ajouter à notre outil de visualisation et sélectionner la variable spécifique que nous souhaitons utiliser pour le rendu du maillage 3D.

II-9 Les résultats de la simulation

II-9-1 Les résultats 2D

Dans les résultats de la simulation, trois contours ont été ajoutés pour représenter la fraction de volume de gaz inflammable, la température et le rayonnement incident. Ces contours sont

essentiels pour évaluer l'impact des effets sur les travailleurs dans la zone opérationnelle, en fournissant des données cruciales sur les niveaux d'exposition. En outre, pour améliorer la visualisation et faciliter la représentation dans un scénario de réalité virtuelle, trois isosurfaces ont été incorporées. Ces isosurfaces permettent d'obtenir une perspective tridimensionnelle détaillée des résultats, y compris la longueur de la flamme, offrant ainsi une compréhension complète de la distribution spatiale des variables critiques étudiées. [22]

II-9-1-1 Fraction volumique des gaz inflammables

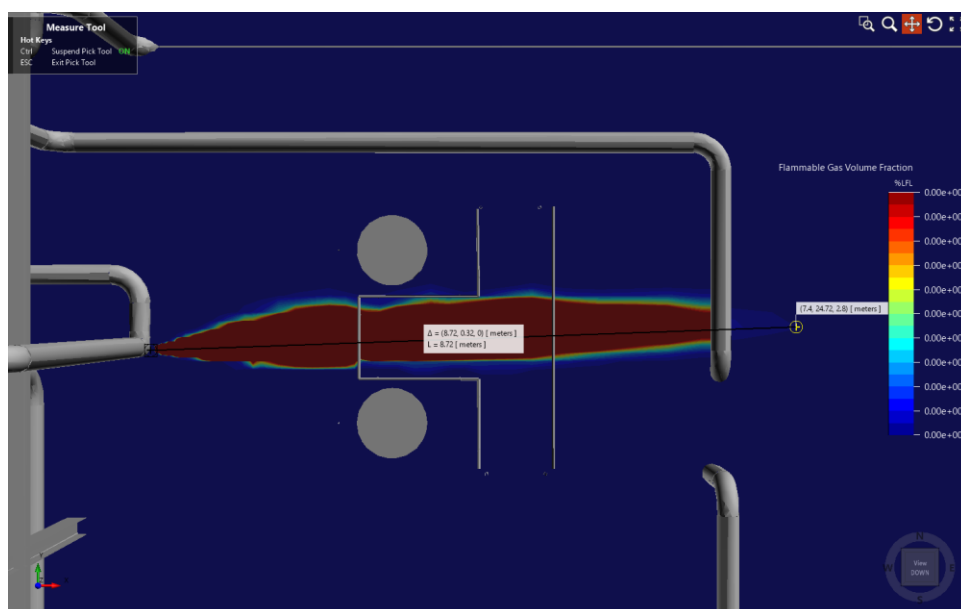


Figure II - 30: Fraction volumique des gaz inflammables à $z = 2,8$ m

Description de l'image

L'image montre une fuite de gaz inflammable se propageant à partir d'une section de tuyauterie, et la légende à droite de l'image indique la fraction volumique de gaz inflammable en pourcentage de la limite inférieure d'explosivité (%LIE). Les couleurs varient du bleu (0,00% LIE) au rouge (100% LIE), indiquant des concentrations croissantes de gaz inflammable.

Mesures de la fuite

La boîte de sélection montre une distance horizontale de 8,72 mètres pour la propagation de la fuite.

Interprétation des résultats

Le gaz inflammable se propage horizontalement sur une distance significative de 8,72 mètres. La coloration rouge indique que la concentration du gaz atteint 100% LIE à certains endroits, ce qui signifie que le gaz est présent à une concentration suffisante pour être très inflammable.

Distribution de la concentration

La concentration la plus élevée de gaz inflammable (indiquée en rouge) est proche de la source de la fuite et diminue progressivement à mesure que le gaz se disperse. La transition des couleurs vers le bleu montre une diminution de la concentration de gaz inflammable en s'éloignant de la source.

Zone de danger potentiel

La zone en rouge représente un risque élevé d'inflammabilité, qui peut causer un danger avec une haute gravité sur le travailleur dans cette zone, nécessitant des mesures de sécurité strictes pour éviter des sources d'ignition. La zone doit être surveillée et contrôlée pour minimiser les risques d'explosion.

II-9-1-2 Les Rayonnement de l'incident

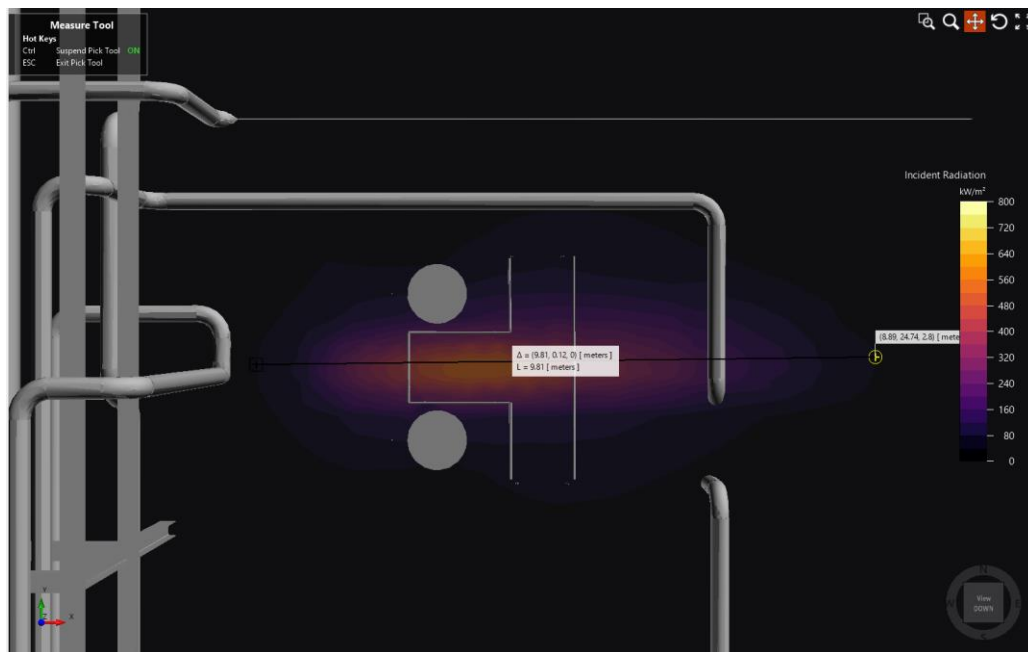


Figure II - 31: Les Rayonnement de l'incident à $z = 2,8\text{m}$

Le tracé de contour affiché illustre les rayonnements de l'incident à une hauteur de 2,8 mètres à partir d'une simulation d'incendie CFD.

Valeurs du rayonnement incident

L'échelle de couleurs à droite indique l'intensité du rayonnement incident en kilowatts par mètre carré (kW/m^2), et les niveaux de rayonnement vont de 0 kW/m^2 (noir) à 800 kW/m^2 (jaune vif).

Les valeurs maximales de rayonnement sont concentrées près du centre du graphique et diminuent radialement vers l'extérieur.

Mesure de la distance

L'outil de mesure de la distance indique une portée d'environ 9,81 mètres le long de la ligne, ce qui démontre l'échelle et l'étendue du champ de rayonnement.

Effets sur le personnel et l'équipement

D'après les observations faites dans la zone de travail, l'échelle de couleurs indique une intensité comprise entre 480 et 560 kW/m^2 . Cette intensité est extrêmement élevée et présente des risques

graves, notamment la carbonisation complète du personnel et la fusion totale des équipements et des éléments structurels dans cette zone. Pour les autres zones d'intensité variable, le tableau suivant résume les effets attendus :

Table 1: Les dommages dus aux intensités de rayonnement incidentes

Rayonnement de l'incident (Kw/m ²)	Dommages aux équipements	Dommages aux personnes
37.5	Endommagement complet de l'équipement	100 % de décès en 1 min. 1 % de décès en 10 sec.
25.0	Intensité minimale de rayonnement pour l'inflammation du bois et la déformation de l'équipement en acier dans des conditions normales.	Gravement blessés dans les 10 secondes, tous morts dans la minute qui suit.
12.5	Intensité minimale de rayonnement pour la fusion des plastiques dans des conditions normales.	Blessés mineurs dans les 10s, 1% morts dans les 1min.
4.0	Verre brisé après une longue période d'irradiation	Douleur après irradiation pendant plus de 20 ans, mais pas de lésions
1.6	Aucun dommage	Aucun dommage

II-9-1-3 La Température

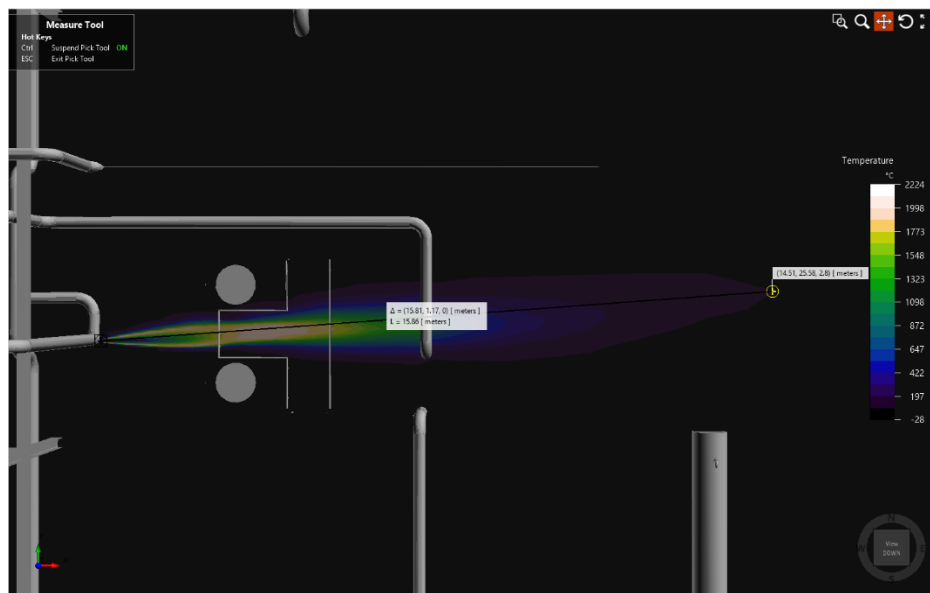


Figure II - 32: La Température à $z = 2,8\text{m}$

Visualisation de la Flamme :

La simulation montre une flamme s'étendant horizontalement depuis une source située à gauche de l'image, et les couleurs représentent différentes plages de températures, comme indiqué par la barre de couleurs sur le côté droit de l'image.

Échelle de Température

La température varie de -28°C (noir) à 2224°C (blanc), et les zones les plus chaudes sont représentées par des couleurs allant du jaune au blanc et dans la zone de travail ce qui signifie la haute gravité de dommage dans cette zone, tandis que les zones plus froides vont du bleu foncé au noir.

Distribution de la Température

La zone proche de la source de la flamme (à gauche) est la plus chaude, avec des températures atteignant jusqu'à environ 2224°C .

À mesure que la flamme s'éloigne de la source, la température diminue progressivement. Les températures plus basses (bleu foncé et violet) sont visibles plus loin de la source, indiquant une dissipation de chaleur dans l'environnement.

Mesures Spécifiques

Un marqueur indique une distance de 15,86 mètres à partir de la source de la flamme.

Analyse de la Flamme

- La flamme semble s'étendre horizontalement dans un conduit ou un environnement contrôlé.
- Les températures les plus élevées sont proches de la source, ce qui est typique pour une combustion intense.
- La diminution de la température à mesure que la flamme s'éloigne de la source indique une dissipation thermique et un mélange avec l'air ambiant ou d'autres gaz.

II-9-2 Les résultats 3D

Fraction volumique des gaz inflammables

La simulation CFD permet de visualiser la fraction volumique d'une fuite de gaz inflammable. La région orange indique la concentration du gaz, montrant qu'il se répand principalement à l'horizontale le long d'une section spécifique des tuyaux. L'accumulation de gaz semble importante au niveau du milieu des filtres, ce qui met en évidence les zones potentielles d'inflammabilité. Cette analyse est cruciale pour la planification de la sécurité, car elle identifie les zones à haut risque où les concentrations de gaz pourraient poser des risques d'explosion ou d'incendie, nécessitant une ventilation améliorée et des mesures de surveillance.

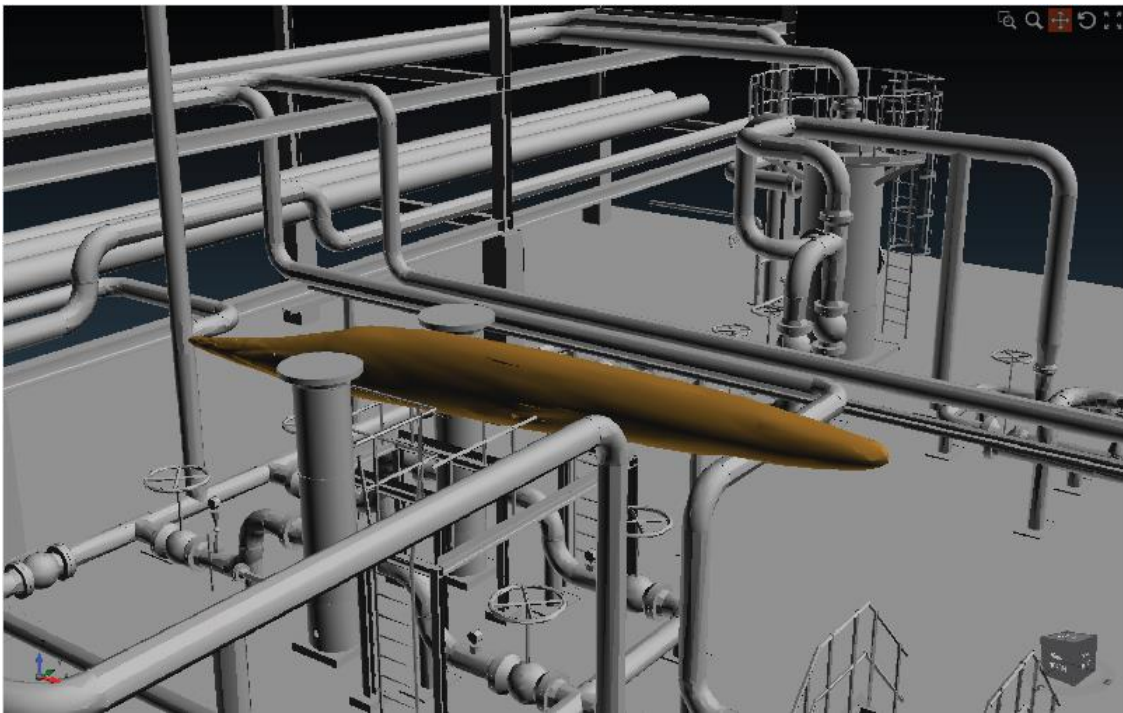


Figure II - 33: Fraction volumique des gaz inflammables (3D)

Les Rayonnement de l'incident

L'image représente la simulation CFD en 3D d'un rayonnement incident dans la zone de travail. La région bleue illustre la distribution spatiale et l'intensité du transfert de chaleur par rayonnement, qui provient de la source de fuite. Cette visualisation permet d'identifier les zones exposées à des niveaux élevés de rayonnement thermique, ce qui peut s'avérer essentiel pour évaluer les contraintes thermiques sur les matériaux, la surchauffe potentielle des équipements et la sécurité du personnel. Il est essentiel de comprendre ces modèles de rayonnement pour concevoir des systèmes de gestion thermique efficaces et des mesures de protection visant à atténuer l'impact des zones à fort rayonnement.

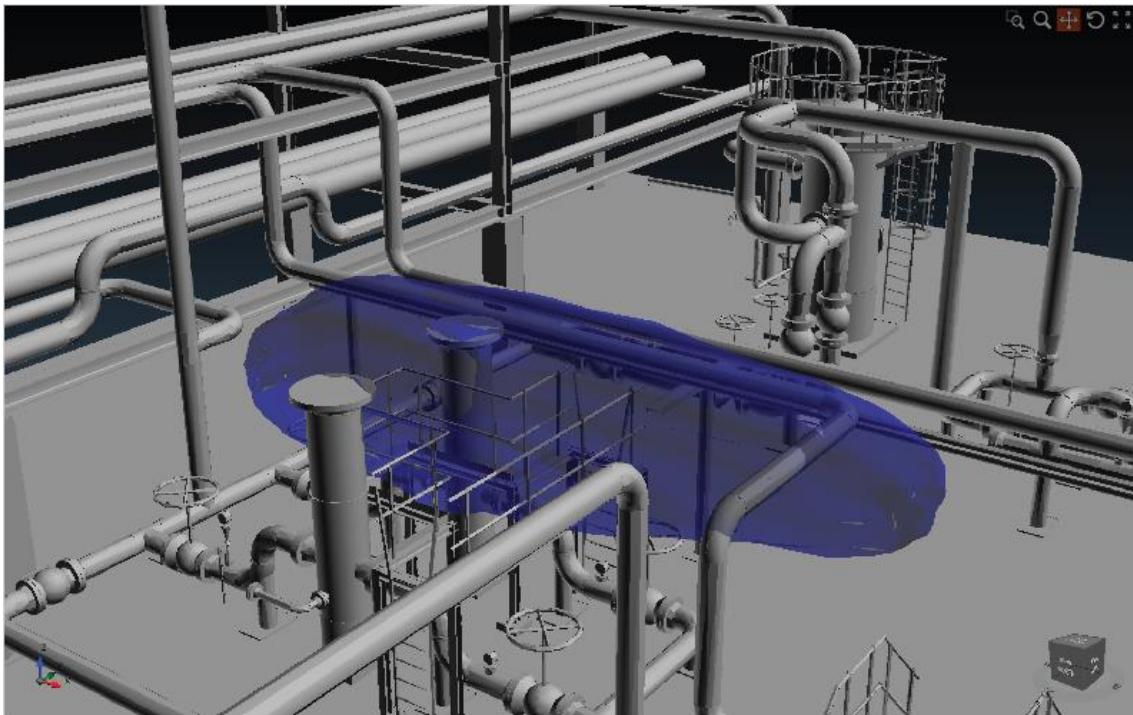


Figure II - 34: Rayonnement de l'incident (3D)

La Température

L'image montre la simulation CFD en 3D des résultats de température dans la zone de travail. La région rouge révèle la distribution l'intensité des températures provenant de la source de la fuite. Cette visualisation permet d'identifier les zones exposées à des températures élevées, essentielles pour évaluer les contraintes thermiques sur les matériaux, la surchauffe potentielle des équipements et la sécurité du personnel. Comprendre ces modèles de température est crucial pour concevoir des systèmes de gestion thermique efficaces et des mesures de protection visant à atténuer l'impact des zones à haute température.

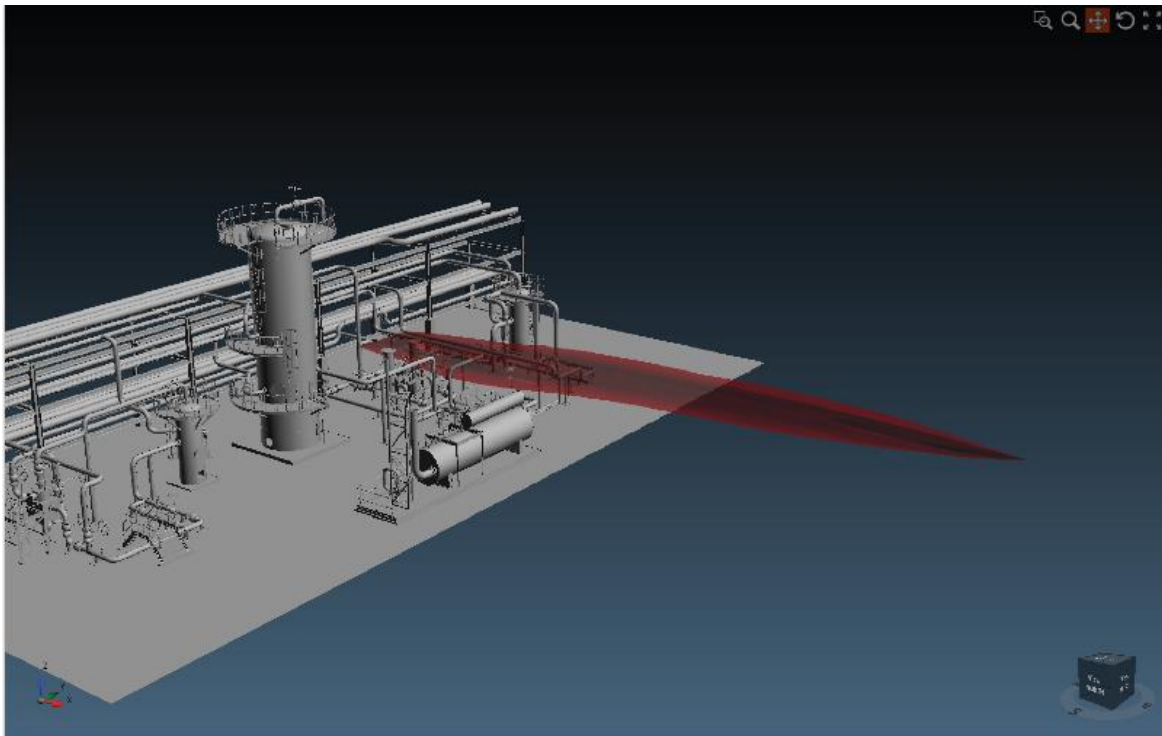


Figure II - 35: La Température (3D)

CHAPITRE III

Développement 3D et intégration de la réalité virtuelle

III-1 La réalité virtuelle

Ces dernières années, la réalité virtuelle (RV) s'est imposée comme une technologie transformatrice, remodelant la façon dont nous interagissons avec les environnements numériques. Grâce à ses capacités d'immersion, la RV offre aux utilisateurs une expérience inégalée, les transportant dans des mondes simulés où ils peuvent explorer, créer et interagir d'une manière inimaginable auparavant. Ce chapitre se penche sur le concept de réalité virtuelle, ses applications dans différents domaines et son potentiel à redéfinir les expériences humaines. [23]

III-1-1 Définition

La réalité virtuelle est une simulation informatique d'un environnement avec lequel une personne peut interagir de manière apparemment réelle ou physique à l'aide d'un équipement électronique spécial, tel qu'un casque doté d'un écran ou des gants équipés de capteurs. L'objectif de la RV est de créer une expérience sensorielle qui reproduit le monde réel ou transporte les utilisateurs dans des royaumes fantastiques, ce qui permet de suspendre l'incrédulité et de s'immerger totalement dans l'environnement virtuel. [23]

III-1-2 Composants clés de la réalité virtuelle

Matériel : Le matériel de RV comprend généralement un affichage monté sur la tête (HMD), des capteurs de mouvement et des dispositifs d'entrée tels que des contrôleurs ou des gants. Ces dispositifs fonctionnent en tandem pour suivre les mouvements de l'utilisateur et fournir un retour visuel, auditif et parfois haptique pour améliorer l'immersivité.



Figure III - 1: Le Matériel utilisé dans les simulations de RV

Logiciel : Les logiciels de RV comprennent le contenu numérique et les applications conçues pour fonctionner sur les plateformes de RV, comme par exemple Unity, Unreal Engine... Ils s'agissent notamment des jeux immersifs, des simulations éducatives, de visites virtuelles, de programmes de formation et autres, tous conçus pour exploiter les capacités immersives de la technologie de la RV.

Interactivité : L'une des caractéristiques de la RV est sa nature interactive, qui permet aux utilisateurs de manipuler des objets, de naviguer dans des environnements et d'interagir avec des éléments virtuels en temps réel. Cette interactivité renforce le sentiment de présence et d'action dans l'espace virtuel, rendant les expériences plus convaincantes et plus immersives.

III-1-3 Applications de la réalité virtuelle

- **Jeux et divertissements :** L'industrie du jeu a été à l'avant garde de l'adoption de la RV, tirant parti de la technologie pour créer des expériences de jeu immersives qui brouillent les frontières entre la réalité et l'imaginaire. Les jeux VR permettent aux joueurs d'entrer dans la peau de leurs personnages préférés, d'explorer des mondes fantastiques et de s'engager dans des aventures pleines d'adrénaline. [24]
- **Éducation et formation :** La RV offre un immense potentiel dans le domaine de l'éducation et de la formation, en proposant des simulations réalistes et des expériences pratiques qui améliorent les résultats de l'apprentissage. Des classes virtuelles et des reconstitutions historiques aux simulations médicales et à la formation professionnelle, la RV permet un apprentissage immersif et expérimental dans diverses disciplines. [24]
- **Soins de santé et thérapie :** Dans le domaine des soins de santé, la RV est utilisée pour la formation médicale, les simulations chirurgicales, la gestion de la douleur, la thérapie d'exposition et la rééducation. En immergeant les patients dans des environnements virtuels, les professionnels de la santé peuvent proposer des interventions personnalisées et des expériences thérapeutiques qui complètent les traitements traditionnels. [24]
- **Architecture et conception :** La RV a révolutionné les secteurs de l'architecture et de la conception en permettant aux architectes, aux ingénieurs et aux concepteurs de visualiser leurs créations et d'interagir avec elles dans des environnements immersifs en 3D. Cela

facilite la compréhension de l'espace, la collaboration en matière de conception et l'engagement du client tout au long du processus de planification et de construction. [24]

III-1-4 Défis et orientations futures

Bien que la RV ait fait des progrès considérables ces dernières années, plusieurs défis subsistent, notamment le coût élevé du matériel, les limitations technologiques et les préoccupations concernant le mal des transports et la fatigue de l'utilisateur. Toutefois, les progrès constants de la technologie de la RV, tels que l'amélioration des résolutions d'affichage, les méthodes d'interaction plus naturelles et le développement de solutions de RV sans fil, permettent de relever bon nombre de ces défis et d'élargir les possibilités d'expériences immersives. [25]

III-2 La philosophie du scénario étudié dans la RV

Notre simulation de VR est conçue pour immerger les utilisateurs dans un environnement à fort enjeu, reproduisant la tâche critique d'effectuer un travail à chaud dans une unité de gaz combustible. L'application vise à éduquer les utilisateurs sur l'importance de suivre les protocoles de sécurité essentiels en les guidant à travers chaque étape nécessaire pour assurer un environnement de travail sécurisé. Au fur et à mesure que les utilisateurs naviguent dans ce scénario virtuel, ils doivent se conformer avec diligence aux instructions détaillées afin d'éviter la reconstitution d'un scénario d'accident antérieur. Cette expérience interactive souligne non seulement l'importance des mesures de sécurité complètes, mais améliore également la préparation et la compétence des utilisateurs dans la gestion de tâches dangereuses. En simulant des situations réelles, notre application VR prépare les utilisateurs à gérer efficacement les dangers potentiels, favorisant ainsi une culture de la sécurité et de la vigilance dans les environnements de travail à haut risque.

III-3 Matériels et les logiciels

III-3-1 Matériels

La configuration du PC :

- Model: Laptop Acer Nitro AN517-52
- Processeur: Intel® Core™ i5- 10300H CPU @ 2.50GHz 2.50 GHz
- RAM: 8.00 GB
- Type de système: 64- bit Operating system, x64-based processor
- Carte Graphique: NVIDIA GeForce RTX 3060 Laptop GPU

La configuration du RV :

- Headset: Oculus Meta Quest 2

III-3-2 Logiciels

III-3-2-1 Le logiciel de conception 3D Blender 4.0

Blender 4.0 est une suite de création 3D puissante et open-source (gratuit). Elle comprend un large éventail d'outils de modélisation, de texturation, de rendu, d'animation, etc. Il est largement utilisé dans des secteurs tels que l'animation, les effets visuels, les jeux et l'architecture pour la création de contenu 3D.

Les caractéristiques de Blender comprennent un pipeline 3D entièrement intégré, la prise en charge de divers formats de fichiers, des capacités d'exporte avancées, des simulations physiques, des outils de sculpture et une interface de script robuste pour l'automatisation et la personnalisation. L'un de ses principaux avantages est sa communauté active et le fait qu'il soit gratuit, ce qui le rend accessible aux artistes et aux amateurs du monde entier. [26]

III-3-2-2 L'utilisation de Blender dans la simulation de RV

Pour améliorer le réalisme et la fonctionnalité de notre simulation VR, nous avons choisi de passer des modèles CAD à Blender pour l'optimisation de la géométrie 3D. Reconnaisant les défis inhérents à l'utilisation directe des modèles CAD pour le développement de la RV, Blender offre une plateforme parfaite pour affiner les complexités géométriques et les préparer à une intégration transparente dans l'environnement virtuel. Grâce aux outils de ce logiciel, nous optimiserons les modèles existants tout en introduisant des éléments supplémentaires pour enrichir le réalisme de la simulation. Il s'agit notamment d'élaborer et de texturer les composants pour qu'ils reflètent fidèlement leurs équivalents dans le monde réel, ce qui renforce l'immersion et améliore l'expérience de l'utilisateur. En tirant parti de la polyvalence de Blender, nous visons à élever la qualité et la fidélité de notre simulation VR, en veillant à ce qu'elle soit conforme à notre vision d'environnements virtuels immersifs et attrayants.

La géométrie exportée d'AutoCAD Plant 3D présentait des problèmes de compatibilité pour créer une expérience de réalité virtuelle transparente. Pour surmonter cet obstacle, nous avons affiné et optimisé avec précision la géométrie, en garantissant l'uniformité et en améliorant sa compatibilité avec les environnements immersifs de réalité virtuelle. La transformation qui en résulte offre aux utilisateurs une expérience visuelle et interactive améliorée, ce qui accroît la qualité et la convivialité de l'application de réalité virtuelle.

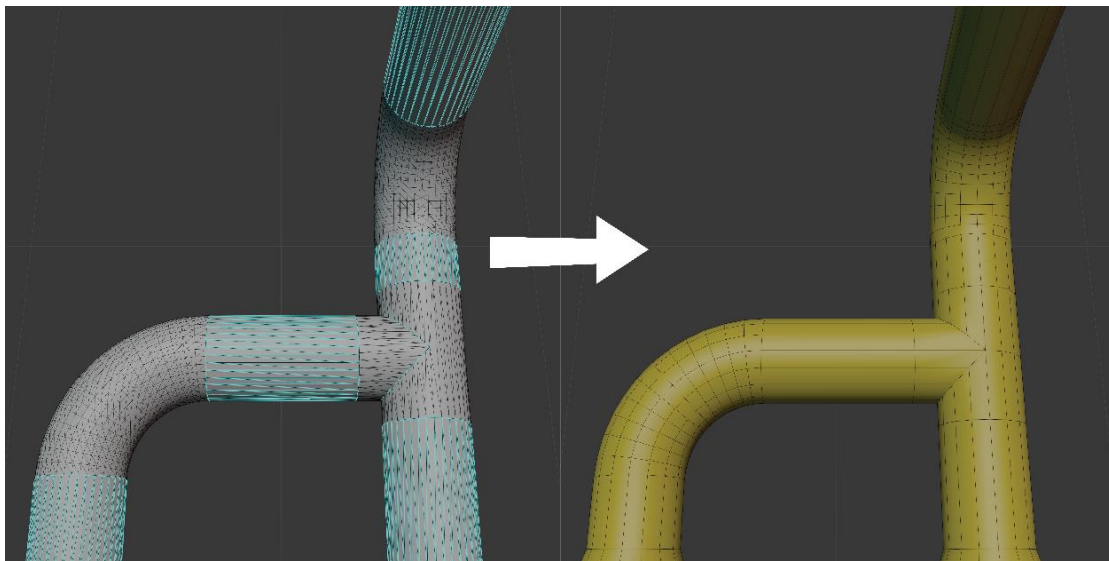


Figure III - 2: La transition entre une géométrie CAD vers une géométrie optimisée

Nous avons également pris des mesures pour améliorer l'attrait visuel global, en révisant l'esthétique générale pour obtenir une expérience plus réaliste et plus immersive dans la réalité virtuelle. En peaufinant les visuels et en ajoutant des touches réalistes, nous avons considérablement amélioré la qualité de l'expérience VR, garantissant que les utilisateurs sont immergés dans un environnement virtuel captivant et authentique.

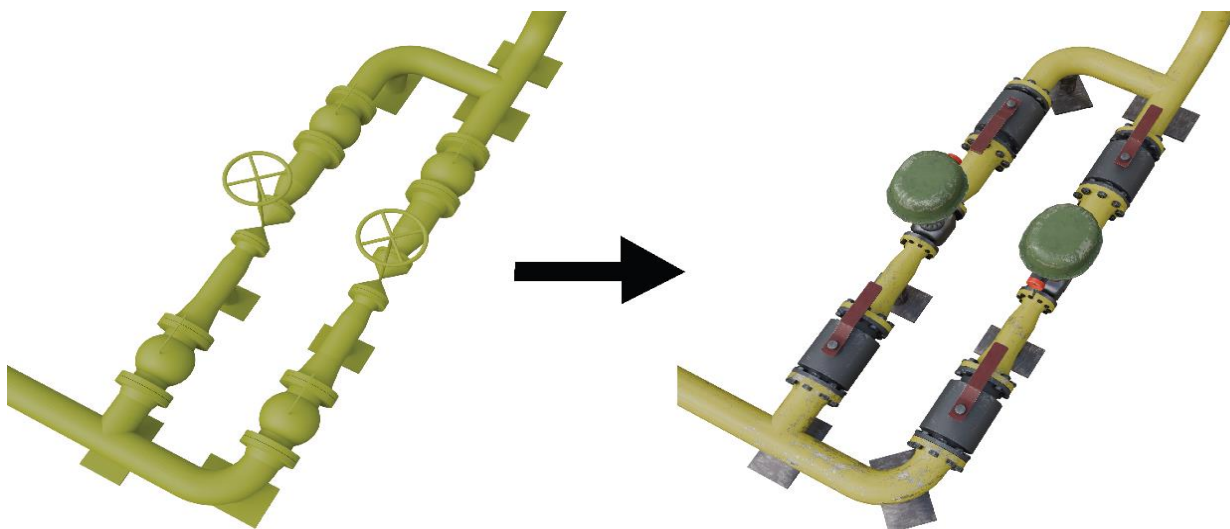


Figure III - 3: Le traitement de la géométrie CAD dans Blender

III-3-2-3 Le Logiciel de développement de RV Unity

Unity est un moteur de jeu multiplateforme populaire développé par Unity Technologies. Il est utilisé pour créer des jeux et des simulations en 2D, 3D, réalité virtuelle et réalité augmentée. Unity fournit un ensemble riche d'outils et de fonctionnalités pour le développement de jeux, notamment un puissant moteur de rendu, un moteur physique, un système audio, des outils d'animation et une interface conviviale pour la conception et la réalisation de jeux.

L'une des principales caractéristiques d'Unity est sa flexibilité, qui permet aux développeurs de créer des jeux pour un large éventail de plateformes, y compris les ordinateurs de bureau, les téléphones portables, les consoles et le web. En outre, Unity prend en charge un grand nombre de langages de programmation, notamment C#, JavaScript et Boo, ce qui le rend accessible aux développeurs ayant des connaissances différentes en matière de programmation.

Unity a gagné en popularité auprès des développeurs indépendants, des petits studios et des grandes entreprises de développement de jeux en raison de sa facilité d'utilisation, de ses puissantes fonctionnalités et de sa prise en charge solide de diverses plateformes. Il est largement utilisé dans l'industrie du jeu et au-delà, pour des applications telles que les visualisations architecturales, les expériences interactives et les simulations. [27]

III-3-2-4 L'utilisation d'Unity dans le projet

Nous utilisons Unity comme plateforme pour transformer de manière transparente l'environnement de l'unité de gaz combustible, initialement conçu dans Blender, en une expérience VR immersive. Dans Unity, nous transformons cet environnement en un espace dynamique où les utilisateurs peuvent interagir avec divers éléments, simulant des scénarios réels pertinents pour la formation à la sécurité. Grâce aux outils de développement robustes d'Unity, nous concevons et développons méticuleusement des scénarios conçus pour imiter des situations réelles, ce qui renforce l'engagement et facilite l'apprentissage par l'expérience. Grâce à cette approche innovante, nous permettons aux stagiaires d'acquérir des compétences essentielles en matière de sécurité dans un environnement virtuel hautement immersif et interactif, garantissant ainsi des expériences de formation efficaces et mémorables.

III-4 Les avantages de l'expérience RV dans la formation de sécurité

III-4-1 Amélioration de l'engagement et de la rétention

L'un des avantages les plus significatifs de la formation à la sécurité par la RV est sa capacité à améliorer l'engagement et la rétention. Contrairement aux méthodes de formation conventionnelles, la RV plonge les participants dans des scénarios réalistes où ils peuvent s'engager activement dans les protocoles et procédures de sécurité. Cette expérience immersive capte l'attention des stagiaires et les nouveaux employés, ce qui leur permet de rester concentrés et motivés tout au long de la session de formation. Des études ont montré que la formation par RV peut conduire à des taux de rétention de l'information plus élevés que les méthodes traditionnelles, car les participants sont plus susceptibles de se souvenir d'expériences que de matériels d'apprentissage passifs. [27]

III-4-2 Simulations réalistes

La technologie de la RV permet de créer des simulations très réalistes d'environnements et de scénarios dangereux, offrant aux stagiaires une expérience sûre mais authentique des dangers potentiels sur le lieu de travail. Qu'il s'agisse de naviguer sur un chantier de construction, d'utiliser des machines lourdes ou de réagir à un déversement de produits chimiques, les simulations de RV peuvent reproduire un large éventail de dangers sur le lieu de travail avec une fidélité sans précédent. En exposant les stagiaires à ces scénarios réalistes, la formation à la sécurité par la RV les aide à développer les compétences et les instincts nécessaires pour réagir de manière appropriée dans des situations de forte pression, réduisant ainsi le risque d'accidents et de blessures sur le lieu de travail. [27]

III-4-3 Des solutions de formation rentables

Si l'investissement initial dans la technologie de la RV peut sembler décourageant, en particulier pour les petites entreprises, les économies à long terme associées à la formation à la RV en matière de sécurité peuvent être significatives. Contrairement aux méthodes de formation traditionnelles qui nécessitent des ressources physiques telles que des salles de classe, de l'équipement et le temps de l'instructeur, la formation à la RV peut être dispensée à distance et adaptée pour accueillir

simultanément un grand nombre de stagiaires. Cette évolutivité permet non seulement de réduire les coûts de formation par participant, mais aussi de minimiser les perturbations opérationnelles généralement associées aux programmes de formation traditionnels. En outre, les simulations de RV peuvent être réutilisées et modifiées selon les besoins, ce qui permet aux entreprises d'adapter leurs programmes de formation à l'évolution des normes et des réglementations en matière de sécurité sans encourir de dépenses supplémentaires. [27]

III-4-4 Environnement sécurisé et contrôlé

L'une des principales préoccupations liées aux méthodes traditionnelles de formation à la sécurité est le risque inhérent associé à la pratique dans des environnements dangereux. La formation à la sécurité par la RV répond à ce problème en fournissant un environnement d'apprentissage sûr et contrôlé où les stagiaires peuvent faire des erreurs sans craindre les conséquences du monde réel. Qu'il s'agisse de pratiquer des procédures d'urgence ou de dépanner des équipements défectueux, les stagiaires peuvent expérimenter et apprendre de leurs erreurs dans un environnement virtuel sans risque. Cette approche pratique permet non seulement de renforcer la confiance et la compétence, mais aussi d'inculquer une culture de la sécurité aux employés, ce qui se traduit par une diminution des accidents et des incidents sur le lieu de travail. [27]

III-4-5 Accessibilité et flexibilité

Un autre avantage clé de la formation à la sécurité par la RV est son accessibilité et sa flexibilité. Contrairement aux sessions de formation en personne, qui peuvent exiger des employés qu'ils se rendent dans un lieu central ou qu'ils respectent un horaire fixe, la formation par RV est accessible depuis pratiquement n'importe quel endroit disposant d'une connexion internet. Cette accessibilité élimine les obstacles logistiques et permet aux entreprises d'offrir des expériences de formation cohérentes et normalisées aux employés de différents lieux et équipes. En outre, les modules de formation à la RV peuvent être personnalisés pour répondre aux besoins spécifiques et aux niveaux de compétence des différents segments de la main-d'œuvre, ce qui garantit que chaque employé reçoit une instruction pertinente et ciblée. [27]

III-4-6 Amélioration du moral et de la satisfaction des employés

Investir dans la sécurité des employés n'est pas seulement une obligation légale et éthique, c'est aussi une décision stratégique qui peut avoir un impact positif sur le moral et la satisfaction des employés. En démontrant leur engagement à fournir une formation complète à la sécurité par le biais de technologies innovantes telles que la RV, les employeurs signalent à leur personnel que leur bien-être est une priorité absolue. Cela favorise à son tour un sentiment de confiance et de loyauté parmi les employés, ce qui conduit à une plus grande satisfaction au travail et à des taux de rétention plus élevés. En outre, les employés qui ont confiance en leur capacité à effectuer leur travail en toute sécurité sont plus susceptibles d'être engagés et productifs, ce qui contribue en fin de compte au succès global de l'organisation. [27]

III-5 La vision de ce projet

III-5-1 Aperçu du prototype

Le prototype de programme de formation à la sécurité par la VR sert d'itération initiale en raison des contraintes de temps et de ressources financières. Malgré ces limites, il résume les principes fondamentaux de la sécurité dans un environnement de travail. Le prototype offre aux utilisateurs des expériences immersives qui simulent des scénarios du monde réel, leur permettant de s'engager et d'intérioriser les protocoles de sécurité d'une manière dynamique et interactive.

III-5-2 Expansion future

Avec le temps, Le prototype fera l'objet d'une vaste expansion afin d'englober une gamme complète de modules de sécurité. Ces modules seront structurés en chapitres distincts, chacun se concentrant sur des aspects spécifiques de la sécurité sur le lieu de travail, tels que le travail en espace confiné, le travail en hauteur, la manipulation de matières dangereuses, etc. En outre, une formation virtuelle à l'inspection des équipements sera intégrée à la plateforme afin d'améliorer les compétences des utilisateurs en matière d'entretien des équipements et de contrôles de sécurité.

III-5-3 Une plateforme unifiée avec des capacités de personnalisation

L'une des principales caractéristiques de la plateforme élargie de formation à la sécurité par la RV sera son architecture unifiée, qui regroupera tous les modules en un seul système cohérent. Cette plateforme unifiée permettra une navigation transparente entre les différents chapitres et modules, offrant aux utilisateurs une expérience d'apprentissage rationalisée. En outre, les serveurs de la plateforme seront conçus pour faciliter la personnalisation pour chaque client ou entreprise, en veillant à ce que le contenu de la formation s'aligne étroitement sur leurs exigences et protocoles de sécurité spécifiques.

III-5-4 Des solutions sur mesure pour les clients

Reconnaissant la diversité des besoins et des nuances des différentes industries, la plateforme de formation à la sécurité de la RV offrira des solutions sur mesure pour chaque client ou entreprise. Grâce à une collaboration et une consultation étroite, le contenu de la formation, les simulations et les environnements virtuels seront personnalisés pour répondre aux défis uniques en matière de sécurité et aux exigences réglementaires auxquelles sont confrontés les clients individuels. Cette approche personnalisée garantit une pertinence et une efficacité maximales du programme de formation dans des contextes réels

CONCLUSION GENERALE

En conclusion, ce projet témoigne de l'importance primordiale de la sécurité dans l'industrie pétrolière et gazière. En donnant la priorité aux initiatives de formation continue et en adoptant l'intégration de technologies avancées telles que les simulations de dynamique des fluides numérique (CFD) et les modules de formation interactifs de réalité virtuelle (VR), des progrès significatifs peuvent être réalisés pour améliorer les protocoles de sécurité et atténuer les risques dans des environnements gravement dangereux.

Dans ce projet, un programme de formation à la sécurité en réalité virtuelle (RV) a été développé pour une unité de gaz de combustion, conformément aux normes de sécurité ISO 45001. Après une analyse des systèmes de sécurité de l'unité et d'un scénario de feu de jet très probable, un modèle CAD 3D a été créé pour effectuer une simulation CFD. Ces données sur le comportement du feu et les blessures potentielles des travailleurs ont servi de base à la formation à la RV, garantissant que les travailleurs sont efficacement formés aux procédures préalables au travail. Ce prototype est développé dans le cadre initiative représente non seulement une avancée tangible en matière d'innovation dans le domaine de la sécurité, mais il jette également les bases d'initiatives futures visant à mettre en œuvre ces approches novatrices dans diverses unités et sur divers sites au sein de l'industrie. En s'engageant résolument à faire progresser les méthodes de formation et à exploiter la puissance des nouvelles technologies, il est possible de cultiver une culture de l'excellence en matière de sécurité, garantissant le bien-être des travailleurs et l'intégrité des opérations dans le secteur du pétrole et du gaz pour les années à venir

REFERENCES BIBLIOGRAPHIAUE

- [01]: Lecointre, H. (2002). Manuel de formation : Volume 2 Process, MODULE PRO/SYS 45, Fuel Gas (Gaz de Combustion).
- [02]: Sonatrach. (2002). Emergency Shutdown: Fuel Gas Unit, HSE Plan, Organisation Ourhoud
- [03]: Organisation Ourhoud-Sonatrach. (2013). MANUEL HSE, ORH-MF-X-75000.
- [04]: AFNOR. (2011). NF EN 60079-20-1:2011: Explosive atmospheres - Part 20-1: Material characteristics for gas and vapour classification.
- [05]: AFNOR. (2011). NF EN 1127-1:2011: Explosive atmospheres - Explosion prevention and protection - Part 1: Basic concepts and methodology.
- [06]: National Fire Protection Association (NFPA). (2019). NFPA 72: National Fire Alarm and Signaling Code. Quincy, MA: NFPA.
- [07]: American Petroleum Institute. (2018). API RP 14C: Recommended practice for analysis, design, installation, and testing of safety systems for offshore production facilities. Washington, DC.
- [08]: Occupational Safety and Health Administration (OSHA). Oil and Gas Extraction Safety and Health Topics. Site: <https://www.osha.gov/SLTC/oilgaswelldrilling/index.html>
- [09]: FM Global. (2019). Fire Detection Technologies: A Technical Overview. FM Global. Site : <https://www.fmglobal.com/research-and-resources/research-technical-reports/fire-detection-technologies-a-technical-overview>
- [10]: EPA. (2016). Gas Detection Technology Overview. United States Environmental Protection Agency. Site: <https://www.epa.gov/ceppo/gas-detection-technology-overview>
- [11]: Quentic. (2023). Maintenance safety with lockout-tagout. Site: <https://www.quentic.com/articles/lockout-tagout-procedure/>
- [12]: International Association of Oil & Gas Producers. (2018). IOGP Life-Saving Rules (Report No. 459).
- [13]: International Association of Oil & Gas Producers. (2018). Fabrication site construction safety recommended practice (Report No. 577).

- [14]: Autodesk. (2024). AutoCAD Plant 3D toolset. Autodesk.
<https://www.autodesk.com/products/autocad/included-toolsets/autocad-plant-3d>
- [15]: Baron, H. (2015). The oil and gas engineering guide (2nd ed.). Editions Technip.
- [16]: Bausbacher, E., & Hunt, R. W. (1990). Process Plant Layout and Piping Design.
- [17]: Adel, A. (2023). AutoCAD Plant 3D tutorial. Engineer ABDELHALEEM ADEL. YouTube.
<https://www.youtube.com/aadel87>
- [18]: CFD Online. An Introduction to Computational Fluid Dynamics. Site: https://www.cfd-online.com/Wiki/Introduction_to_CFD
- [19]: Insight Numerics. About. Site: <https://insightnumerics.com/>
- [20]: Insight Numerics. Influx Capabilities. Site: <https://insightnumerics.com/influx-capabilities/>
- [21]: WeatherSpark. Average Weather in Hassi Messaoud, Algeria, 2024. Site:
<https://weatherspark.com/y/53024/Average-Weather-in-Hassi-Messaoud-Algeria-Year-Round>
- [22]: Risk-Based Gas Mapping with in:Flux. (2022). YouTube. <https://youtu.be/9ZvYL-BdMMw?si=42iCdG1ZuX9Se1qs>
- [23]: Masters, O. C. (2024). Exploring the Digital Cosmos: Navigating the Frontiers of Virtual Reality.
- [24]: Sherman, W. R., & Craig, A. B. (2018). Understanding Virtual Reality: Interface, Application, and Design (2nd ed.). Morgan Kaufmann.
- [25]: Oculus. (2024). Explore Virtual Reality. Site: <https://www.oculus.com/>
- [26]: Blender Foundation. (2024). About Blender. Site: <https://www.blender.org/about/>
- [27]: Unity Technologies. (2024). About Unity. Site: <https://unity.com/about/>