



**UNIVERSITE DE BATNA 2**  
**MOSTEPHA BEN BOULAID**  
INSTITUT D'HYGIENE ET SECURITE



*Support de cours destiné aux Licences et Masters (HSST, QHSE, MRI, GEP)  
de la filière HSI*

Réalisé, dans le cadre du dossier Professorat, par

**DR. CHETTOUH SAMIA**

*Maître de conférences (Classe A)*

**OUTILS INFORMATIQUES APPLIQUES A LA  
MODELISATION DES RISQUES PROFESSIONNELS**

*Année Universitaire 2020-2021*

# Table de matières

<i>Préambule</i> .....	5
<i>Introduction générale</i> .....	7

## *Chapitre 1*

### *Généralités sur la simulation numérique des risques professionnels*

1. Simulation numérique des risques professionnels .....	10
1.1. Définition de la simulation numérique des risques professionnels.....	11
1.2. Principes de la simulation numérique des risques professionnels .....	11
1.3. Etapes de la simulation numérique des risques professionnels.....	13
1.4. Evolutions en matière de simulation numérique des risques professionnels.....	15
1.5. Intérêts et apports de la simulation numérique des risques professionnels.....	16
2. Quelques outils de simulation numérique des risques professionnels .....	19

## *Chapitre 2*

### *Outil de simulation numérique des risques professionnels*

1. Présentation générale du code « FLUENT».....	25
1.1. Domaines d'utilisation de logiciel.....	27

1.2. Structure de programme.....	30
1.2.1. Gambit : Pré-processuer de (CFD) .....	30
1.3. Principales étapes de résolution du FLUENT.....	34
2. Présentation générale du code «ALOHA».....	42
2.1. Généralités.....	42
2.2. Caractéristiques clés du programme.....	44
2.3. Modèles utilisés par ALOHA .....	46
2.4. Démarche d'utilisation du code ALOHA.....	47
2.5. Utilisation du code ALOHA à un cas d'incendie.....	56
2.6. Utilisation du code ALOHA à un cas de rejet de gaz léger.....	56
2.7. Principales limites du code ALOHA.....	56
3. Présentation générale du code «PHAST».....	57
3.1. Termes sources dans PHAST.....	58
3.2. Modèle UDM de dispersion de PHAST.....	58
3.3. Fonctionnalités clés du logiciel PHAST.....	58
3.4. Modélisation des incendies et radiations thermiques par le logiciel PHAST.....	59
3.5. Modélisation des effets toxiques.....	59
3.6. Résultats de la modélisation par PHAST.....	59
3.6.1. Définition des scénarios et simulation .....	59
3.6.2. Résultats et effets de radiation/de surpression/toxiques .....	60
3.6.3. Modèle personnalisé et liste des scénarios .....	63

**Chapitre 3*****Application des outils de modélisation numérique******à un cas réel***

1. Description de l'accident.....	63
2. Modélisation par le code FLUENT.....	66
2.1 Conditions aux limites.....	68
2.2. Résultats et discussions.....	68
2.2.1. Profil de température .....	71
2.2.2. Champs de vitesse et de réaction .....	73
2.2.3. Concentrations des espèces chimiques .....	76
3. Modélisation par le logiciel ALOHA.....	80
3.1. Conditions aux limites.....	81
3.2. Résultats et discussions.....	83
3.2.1. Modélisation du gaz évaporé avant l'accident .....	83
3.2.2. Modélisation après l'accident.....	85
4. Modélisation par le logiciel PHAST.....	90
4.1. Description de l'accident.....	90
4.1.1. Incendie après importante déflagration .....	91
4.1.2. Les données de l'accident.....	91
4.1.3. Modélisation de la dispersion .....	92
4.1.4. Modélisation des effets thermiques .....	93
4.1.5. Modélisation des effets de surpression .....	94
4.2. Résultats et discussion.....	92
5. Conclusion des études de cas.....	94

**Chapitre 4****Exercices d'application**

1. Exemples généraux et étapes à suivre .....	96
Exemple 1 : Scénario de déversement de gaz toxique .....	96
Exemple 2 : Scénario de déversement de liquide inflammable.....	96
Exercice 3 : Modélisation des effets du phénomène BLEVE par le code PHAST .....	97
2. Exemples pratiques .....	97
Exemple 1 : Scénario : Fuite de gaz toxique dans un laboratoire chimique .....	97
Exemple 2 : Scénario : Fuite de gaz toxique dans une usine chimique.....	98
3. Exemples des accidents réels.....	99
Exercice 1 : Une source de réservoir (scénarios multiples) .....	99
Exercice 2 : Une source de réservoir (feu de flaque et feu de nappe) .....	100
Exercice 3 : Source directe et carte MARPLOT.....	100
<b>Conclusion générale</b> .....	102
<b>Références bibliographiques</b> .....	104
<b>Annexes</b> .....	107

## *Préambule*

Expliquer des phénomènes, évaluer les conséquences des accidents ou anticiper des événements rares sont au cœur de l'expertise, en sûreté professionnelle comme en sûreté industrielle. La simulation numérique, représentation informatique de la réalité, participe à la maîtrise du risque.

La simulation de situations à risque ou d'accidents permet de prévoir les conséquences et d'anticiper. La simulation est partout. Elle aide à concevoir les sites industriels, à évaluer leur niveau de sûreté, à approfondir les connaissances sur les rejets dans l'environnement, à estimer les doses reçues et à développer les systèmes associés pour l'évaluation et l'optimisation du risque lié à une exposition aux rayonnements ionisants, quelle que soit la situation rencontrée (travailleurs, patients, accidents...).

Les outils numériques simplifient les tâches de gestion des risques et procurent toute l'information dont on a besoin pour réussir. Les outils d'analyse quantitative et de diagnostic nous amèneront à aborder le risque selon un point de vue différent et permettront aux gestionnaires de risques d'optimiser les mécanismes de transfert du risque tout en influant sur la stratégie de l'entreprise.

Dans ce contexte, on propose ce support de cours intitulé "Outils informatiques dédiés à l'évaluation des risques professionnels" destiné aux étudiants des licences et Masters de l'IHS de l'université de Batna 2 :

- Licence Hygiène, Santé et Sécurité au Travail (HSST) ;
- Master Management de la Qualité et de l'Hygiène Industrielle (MQHI) ;
- Master Génie de l'Environnement et Développement Durable.

Ce support de cours écrit porte sur la simulation numérique des risques professionnels et permettra aux étudiants de se familiariser avec le langage de simulation numérique au sens large, dans une première partie. Ils apprendront comment utiliser deux codes numériques, à savoir le code FLUENT, le code ALOHA et le code PHAST, en les appliquant à un cas d'étude réel. Les résultats des trois simulateurs seront ensuite discutés sous un angle de vue

de la sécurité industrielle afin d'évaluer les conséquences que peut avoir l'accident industriel, que ce soit sur l'opérateur ou sur l'environnement du travail. Ainsi, on pourra mettre en place une politique de maîtrise en adoptant les meilleurs moyens de prévention et de protection pour bien gérer une situation à risques.

## ***Introduction générale***

L'exploration et la compréhension des phénomènes complexes, qu'ils soient d'ordre physique, chimique, biologique, mécanique, optique, ou électronique, jouent un rôle central dans le domaine de la sûreté professionnelle et industrielle. Ces phénomènes, souvent associés à des risques potentiels, nécessitent une analyse approfondie et une évaluation précise des conséquences. L'ère numérique nous offre aujourd'hui un outil inestimable pour répondre à ces défis : la simulation numérique.

La simulation numérique, qui consiste en la modélisation informatique de la réalité, s'est avérée être une ressource essentielle pour la gestion des risques professionnels. Elle permet non seulement de prédire des scénarios dangereux, mais aussi de planifier des mesures préventives et de mieux comprendre les impacts potentiels sur l'environnement de travail.

Dans cette thématique, on propose ce support de cours dont l'intitulé : ***Outils informatiques appliqués à l'évaluation des risques professionnels***, ou commence en premier lieu par une présentation de la simulation numérique dans le domaine des risques professionnels puis on passe à la description des outils numériques choisis parmi les nombreux outils de simulation numérique existants, sélectionnés selon leurs catégories, pour faire leurs applications dans la suite de ce document.

Ce document didactique se compose de quatre chapitres soigneusement conçus pour offrir une compréhension complète de la simulation numérique dans le contexte des risques professionnels :

1. Nous débutons par une présentation des notions générales sur la simulation numérique des risques professionnels, posant ainsi les bases nécessaires à une compréhension approfondie du sujet.
2. Ensuite, nous plongeons dans une exploration détaillée de trois outils de simulation numérique incontournables : FLUENT, ALOHA, et PHAST. Ces outils sont utilisés pour simuler divers événements accidentels, notamment les fuites, les dispersions



accidentelles, les incendies, ainsi que les explosions sous toutes leurs formes (BLEVE, Boil-Over), parmi d'autres.

3. Une fois que les codes de calcul sont maîtrisés, nous les appliquons à deux études de cas concrets d'accidents industriels. L'objectif principal de ce chapitre est d'apprendre à analyser et discuter les résultats obtenus grâce à ces logiciels, ce qui constitue une compétence cruciale pour les professionnels de la sécurité industrielle.
4. Enfin, pour mettre en pratique les compétences acquises, nous proposons la modélisation de plusieurs scénarios d'accidents en utilisant le logiciel de simulation ALOHA, qui se distingue par sa disponibilité en téléchargement libre.

Ce document pédagogique se conclura par une synthèse générale qui récapitulera les principaux enseignements tirés de ce support de cours et mettra en lumière l'importance croissante de la simulation numérique dans la gestion des risques professionnels.

ce support de cours peut fournir aux étudiants une base solide pour explorer le domaine de la sécurité professionnelle et leurs dotera des compétences nécessaires pour anticiper, évaluer et atténuer les risques industriels.

# Chapitre I

## *Généralités sur la simulation numérique des risques professionnels*

Aujourd'hui, la simulation numérique est utilisée dans de nombreux domaines de recherche et développement : mécanique des fluides, science des matériaux, astrophysique, physique, nucléaire, aéronautique, climatologie, météorologie, physique théorique, biologie, chimie et environnement.

Dans le domaine de la sécurité industrielle, les outils de simulation des risques professionnels offrent aux travailleurs l'opportunité d'une mise en situation virtuelle de risques, avec recherche de solutions pour faire face aux menaces d'accidents : les techniques de modélisation des risques et de simulation permettent d'appréhender les problèmes de sécurité au travail et de les résoudre fictivement, de travailler en équipe et de communiquer efficacement pour apporter des réponses adéquates à toutes les situations critiques potentielles.

La simulation au travers de situations ciblées de risque est un moyen efficace de formation professionnelle : les plateformes de simulation sont des instruments d'apprentissage progressif et interactif et de développement rapide des compétences de gestion de risques, avec une vaste palette de différents médias numérisés performants qui s'appuient sur des logiciels et éventuellement des matériels connectés pour tester et simuler la sécurité au travail, et analyser les comportements individuels et collectifs en situation de crise.

L'utilisation d'outils numériques avancés pour la simulation des risques professionnels est relativement récente du fait de la grande complexité de ce type de problème. Plusieurs raisons expliquent les difficultés rencontrées. Pour commencer, il existe un très grand nombre de scénarios des risques possibles, étant donné la nature accidentelle du phénomène. Ensuite, notre compréhension des phénomènes physico-chimiques mises en jeu est encore incomplète et la puissance informatique disponible pour la simulation est limitée. Pourtant, une étude exhaustive des risques doit passer par la prise en compte de nombreux phénomènes physiques complexes plus ou moins imbriqués tels que l'aérodynamique autour des obstacles (cas des incendies de compartiments), l'étude des écoulements multiphasiques, du mélange et de la combustion turbulente, des transferts radiatifs et convectifs, des transferts de chaleur dans les solides, etc.

Dans ce support de cours on a présenté un ensemble de modèles adaptés à la modélisation numérique des risques professionnels et il s'est posé alors le problème de choisir quel modèle utiliser pour modéliser et classer au mieux un jeu de données spécifique. Le but était donc de trouver un logiciel parmi l'ensemble des logiciels disponibles dont on puisse estimer correctement les paramètres avec les observations disponibles et qui soit suffisamment flexible pour modéliser correctement les données.

Les outils numériques sur lesquels on s'est appuyé sont : le logiciel FLUENT Version 6.3 : code CFD (Computational Fluid Dynamics) qui utilise la méthode des volumes finis, le logiciel ALOHA (Aerial Locations of Hazardous Atmospheres) Version 5.4.7 : code intégral qui modélise la dispersion des polluants et le code PHAST appelé UDM (Unified Dispersion Model) qui a été développée par Cook et Woodward.

## **1. Simulation numérique des risques professionnels**

La simulation numérique est une approche qui permet au chercheur et à l'ingénieur d'analyser des phénomènes qui par leur complexité échappent au calcul « traditionnel ». Sans prétendre à une description exhaustive, on peut dire que les simulations numériques peuvent permettre de comprendre (recherche fondamentale ou appliquée), prédire (météorologie, climatologie, épidémiologie, ...) ou concevoir (automobile, aéronautique, génie civil,...) (Guide informatique, 2006).

## 1.1. Définition de la simulation numérique des risques professionnels

La simulation numérique (ou expérience numérique) permet de reproduire sur un ordinateur un phénomène physique complexe dont on souhaite étudier l'évolution (Figure I.1). Elle repose sur la programmation de modèles théoriques ou mathématiques (intégration des équations du mouvement, d'équations différentielles, ...etc.) qui sont adaptés aux moyens numériques (Chabassier, 2012). Ces simulations informatiques sont devenues incontournables pour la modélisation des systèmes naturels en physique, chimie et biologie, mais également des systèmes humains en économie et en science sociale pour lesquels les expériences sont difficiles, coûteuses voire impossibles (Varenne, 2007).

- **Modèle** = Comprendre / Modéliser des phénomènes pour traduire la réalité
- **Expérience** = Stimuler / Perturber pour en évaluer ses réponses
- **Simulation** = Expérimenter pour en évaluer les conséquences

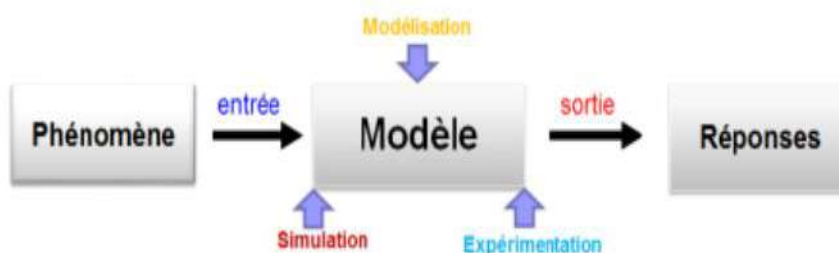


Figure I.1. Schéma de la simulation numérique

## 1.2. Principes de la simulation numérique des risques professionnels

Depuis une dizaine d'années, les performances des ordinateurs et l'évolution des logiciels permettent de simuler les systèmes physiques, chimiques et mécaniques au plus près du réel. La finesse des modèles permettent d'accroître la précision des résultats, avec des temps de calculs de plus en plus réduits. D'autre part, l'étude des problèmes couplés (thermo – mécanique, fluide - structure, mécanique,...) est devenue abordable grâce à des logiciels plus performants, plus conviviaux, mieux couplés et à des ordinateurs plus rapides (fréquence et mémoire élevées) (Foures, 2015).

La simulation numérique des risques professionnels repose sur plusieurs principes fondamentaux pour évaluer et gérer les dangers potentiels dans divers environnements de travail. Voici les principaux principes de la simulation numérique des risques professionnels:

- **Modélisation des phénomènes** : La simulation numérique commence par la modélisation des phénomènes liés aux risques professionnels, tels que les incendies, les explosions, la dispersion de substances dangereuses, les accidents industriels, etc. Les modèles mathématiques et physiques sont utilisés pour représenter ces phénomènes de manière réaliste.
- **Collecte de données** : Pour alimenter les modèles de simulation, il est essentiel de collecter des données pertinentes sur les installations, les processus, les matériaux, les conditions environnementales, les équipements de sécurité, etc. Ces données servent de base pour la modélisation et l'analyse.
- **Définition des scénarios** : Les scénarios de risques professionnels sont définis en fonction des situations potentielles susceptibles de se produire dans un environnement de travail donné. Ces scénarios comprennent des événements tels que les fuites de produits chimiques, les incendies, les explosions, les accidents de machines, etc.
- **Simulation numérique** : Une fois les modèles créés et les scénarios définis, la simulation numérique est effectuée en utilisant des logiciels spécialisés. Ces simulations calculent les conséquences possibles des scénarios de risques, y compris la dispersion de substances dangereuses, les températures, les pressions, les dégâts matériels, etc.
- **Évaluation des risques** : Les résultats de la simulation numérique sont utilisés pour évaluer les risques associés à chaque scénario. Cela inclut la quantification des probabilités d'occurrence, des conséquences potentielles, des impacts sur la santé et la sécurité des travailleurs, ainsi que des pertes économiques.
- **Identification des mesures de prévention et d'atténuation** : Sur la base des résultats de la simulation, des mesures de prévention et d'atténuation sont identifiées pour réduire les risques professionnels. Cela peut inclure la modification des procédures de travail, l'installation d'équipements de sécurité supplémentaires, la formation des travailleurs, etc.

- **Planification d'urgence** : La simulation numérique peut également contribuer à la planification d'urgence en identifiant les zones à risque, en déterminant les itinéraires d'évacuation, en calculant les délais d'intervention nécessaires et en fournissant des informations cruciales pour les équipes d'intervention d'urgence.
- **Suivi et amélioration continue** : Les résultats des simulations numériques doivent être régulièrement révisés et mis à jour à mesure que les conditions de travail évoluent. Cela permet d'assurer une gestion proactive et une amélioration continue de la sécurité et de la gestion des risques professionnels.

En respectant ces principes, la simulation numérique des risques professionnels constitue un outil puissant pour anticiper, évaluer et gérer les dangers potentiels sur le lieu de travail, contribuant ainsi à la sécurité des travailleurs, à la protection de l'environnement et à la pérennité des activités industrielles.

### 1.3. Etapes de la simulation numérique des risques professionnels

La simulation numérique des risques professionnels est un processus complexe qui vise à évaluer les risques liés à des installations industrielles, des procédés de fabrication ou des scénarios spécifiques en utilisant des outils informatiques et des modèles mathématiques. Voici les étapes générales de ce processus (Figure I.2):

- **Première étape : modéliser et discrétiser le volume contrôlé** : Quand on cherchera à modéliser le système qu'on veut analyser, on commencera par définir le type d'analyse (statique, dynamique, thermique, couplée, ...) qu'on va utiliser. Ensuite, on discrétisera le volume, chaque volume, dans le cas d'un assemblage en éléments simples. Cette première étape est le plus souvent réalisée automatiquement mais peut être adaptée. De sa qualité dépend la précision (fin signifie précis), le temps de calcul et la place mémoire (qui grossissent avec la finesse globale du modèle). A ce niveau on cherchera un bon compromis qualité / coût / délai.

- **Seconde étape : appliquer les forces extérieures** : Consiste à définir le chargement c'est à dire les appuis et les forces (les pressions, les températures, ...). C'est ici que le savoir-faire est le plus important car le passage de la réalité au modèle numérique se fait par des estimations (hypothèses du spécialiste). De cette étape dépend la pertinence des résultats.

- **Troisième étape : résoudre son problème** : La troisième étape est la résolution. Il ne s'agit, ici, que de définir les bonnes options du logiciel et lancer la résolution qui s'effectue automatiquement. C'est un problème complexe de mathématiques appliquées, principalement du calcul matriciel.

- **Quatrième étape : visualiser et exploiter les résultats** : C'est la dernière étape est le post-processeur. On y observe les résultats sous une grande variété de formes. La structure déformée est celle que tout le monde peut appréhender, mais on a besoin d'observer bien d'autres variables (contraintes, déformations, réactions des appuis, températures,...). Notre premier souci est de chercher les résultats qui nous indiqueront la pertinence de notre choix et, éventuellement, quoi modifier dans notre modèle pour relancer une nouvelle (meilleure) étude. Ensuite, on transmettra nos résultats sous une forme explicite (justification du modèle et résultats directement exploitables) à nos partenaires car les modèles sont à remettre en question à l'issue de chaque calcul. Elle est affaire de spécialiste.

### **Donc ici on parle de :**

#### **A. Modélisation Mathématique**

1. Formulation du modèle physique multidisciplinaire
2. Existence/unicité si c'est possible des solutions, problème bien pose
3. Propriétés qualitatives des solutions (régularité, homogénéité, stabilité)

#### **B. Modélisation Numérique**

1. Conception des modèles en s'appuyant sur les bases physiques
2. Fiabilité et convergence des modèles
3. Estimation d'erreurs des modèles et méthode numériques

#### **C. Modélisation Informatique**

1. Algorithme : rapidité, efficacité et convergence
2. Exécution : automatique ou intelligente
3. Efficacité : réduire les coûts de calcul aussi petit que possible
4. Rapidité : optimisation et parallélisme



Figure I.2. Etapes de la simulation numérique

#### 1.4. Les évolutions en matière de simulation numérique des risques professionnels

L'évolution rapide de la puissance des PC permet d'accéder aujourd'hui à tout industriel aux techniques de calculs par des différentes méthodes, ce qui n'était possible auparavant que sur de très grosses machines, donc réservé aux grands groupes industriels. Aujourd'hui, ces outils se « démocratisent » donc de plus en plus avec des degrés de précision tout à fait satisfaisants dans la plupart des cas.

Afin d'améliorer encore plus les performances des outils de simulation, beaucoup de possibilités de développement demeurent. Elles concernent principalement les points suivants :

- Au niveau des bases de données matériaux : intégration de nouvelles lois de comportement ;

- Accroissement de l'espace mémoire nécessaire au calcul et diminution des durées de calcul. La parade retenue jusqu'alors consistait à utiliser des lois de comportement simplifiées, elle n'est plus accessible. On demande toujours plus de précision dans les résultats et les comportements sont de plus en plus complexes à formaliser. En particulier, à



ce jour la modélisation des micro-défauts et porosités présents dans les matériaux (non-homogénéité) n'est pas encore prise en compte dans les logiciels commerciaux et les paramètres liés à l'endommagement sont inexistant. A ce niveau, des outils spécifiques sont développés dans les laboratoires de recherche, notamment à l'Université de Savoie. Les pistes recherchées reposent sur le développement des architectures parallèles comme le clustering sur Linux et l'arrivée des premiers codes développés en langage objet ;

- Faciliter la préparation et l'exploitation des résultats issus des logiciels de simulation numérique qui représente actuellement 80% du temps de l'expert ! (20% en préparation des données, 20% en chargement, 40% en récupération).

### **1.5. Intérêts et apports de la simulation numérique des risques professionnels**

La simulation numérique représente une avancée significative dans la gestion des risques professionnels en apportant des avantages inestimables. Elle permet d'effectuer des analyses détaillées et approfondies des situations à risque, en tenant compte de multiples variables, ce qui serait souvent impossible à réaliser uniquement par des moyens expérimentaux. En outre, la simulation numérique offre la flexibilité d'explorer différents scénarios de risques sans mettre en danger la vie des travailleurs ou l'intégrité de l'environnement. Les entreprises peuvent ainsi tester virtuellement diverses stratégies de prévention, évaluer leur efficacité et affiner leurs mesures de sécurité. Cela se traduit par une réduction significative des accidents et des incidents professionnels, ce qui non seulement préserve la santé et la sécurité des employés, mais contribue également à une amélioration globale de la performance des entreprises. Enfin, la simulation numérique permet une économie de temps et de ressources précieuses en éliminant le besoin de mener des expérimentations coûteuses et potentiellement risquées. En somme, elle joue un rôle essentiel dans la création de lieux de travail plus sécurisés, plus efficaces et plus durables, tout en optimisant la gestion des risques professionnels.

La simulation numérique des risques professionnels présente de nombreux avantages et apports précieux pour les entreprises et les experts en maîtrise des risques, elle est considérée comme un outil puissant pour anticiper, évaluer et prévenir les risques au sein des entreprises, contribuant ainsi à améliorer la sécurité des travailleurs, à réduire les coûts et à renforcer la conformité réglementaire. Elle est particulièrement utile dans des secteurs où les risques professionnels sont élevés, tels que l'industrie, la construction et la santé. Voici quelques-uns des principaux intérêts et apports de cette approche :

- **Prédiction des risques** : La simulation numérique permet de modéliser des scénarios de travail, des processus ou des situations potentiellement dangereuses. Cela permet d'anticiper les risques avant qu'ils ne se produisent réellement, ce qui permet aux entreprises de prendre des mesures préventives ;
- **Évaluation de l'impact** : Les simulations numériques peuvent aider à évaluer l'impact potentiel des risques professionnels sur la sécurité des travailleurs, la production, la qualité et les coûts. Cela permet de prioriser les actions correctives ;
- **Test de scénarios** : Les experts en maîtrise des risques peuvent utiliser des simulations pour tester différents scénarios et stratégies de prévention, ce qui leur permet de déterminer la meilleure approche pour minimiser les risques ;
- **Formation virtuelle** : Les simulations numériques peuvent être utilisées pour former les travailleurs à faire face à des situations dangereuses sans exposer quiconque à des risques réels. Cela permet d'améliorer la préparation et les compétences des employés en matière de sécurité ;
- **Réduction des coûts** : En identifiant et en traitant les risques potentiels avant qu'ils ne deviennent des problèmes réels, les entreprises peuvent économiser de l'argent en évitant des accidents coûteux, des perturbations de la production et des litiges ;
- **Amélioration de la sécurité** : La simulation numérique permet aux entreprises d'améliorer leur compréhension des risques professionnels et de mettre en place des mesures de prévention plus efficaces, ce qui contribue à créer un environnement de travail plus sûr ;
- **Conformité réglementaire** : Les simulations numériques peuvent aider les entreprises à se conformer aux réglementations en matière de sécurité au travail en identifiant et en atténuant les risques spécifiques auxquels elles sont confrontées ;
- **Réactivité aux changements** : La simulation numérique permet aux entreprises de réagir rapidement aux changements dans leur environnement de travail, tels que de nouvelles machines, de nouveaux processus ou de nouveaux produits chimiques, en évaluant rapidement les risques associés ;
- **Sensibilisation** : Les simulations peuvent être utilisées pour sensibiliser les employés aux risques professionnels de manière interactive, ce qui peut renforcer leur compréhension et leur engagement envers la sécurité ;
- **Analyse de données** : Les simulations numériques génèrent souvent une grande quantité de données, ce qui permet aux experts en maîtrise des risques de mener des

analyses approfondies pour mieux comprendre les facteurs contribuant aux risques et améliorer la prévention.

A ce niveau, il faut signaler qu'un résultat de simulation **sans estimation de l'erreur** ne sert à rien! Plusieurs sources d'erreur :

La modélisation passe par plusieurs étapes essentielles pour obtenir un résultat. Commencant par la détermination du phénomène à étudier, qui va être remplacé par un modèle physique, puis mathématique, ensuite numérique et enfin algorithmique et programme informatique. Durant ces étapes, plusieurs hypothèses et simplifications sont faites, ce qui va engendrer par la suite un décalage entre la réalité et les sorties obtenues, qui sont les résultats du modèle.

Cependant, le décalage qui provient du modèle mathématique, numérique et algorithmique est souvent bien maîtrisé et facile à déceler, à évaluer et à corriger. Par contre, les simplifications qui se font à niveau du phénomène technologique (ex. : simplification de la géométrie) et physiques (phénomènes négligés, simplification des lois et équations de transferts, descriptions empiriques) qui induisent souvent à des erreurs plus importantes, posent des problèmes d'identification et d'évaluation (Figure I.3).

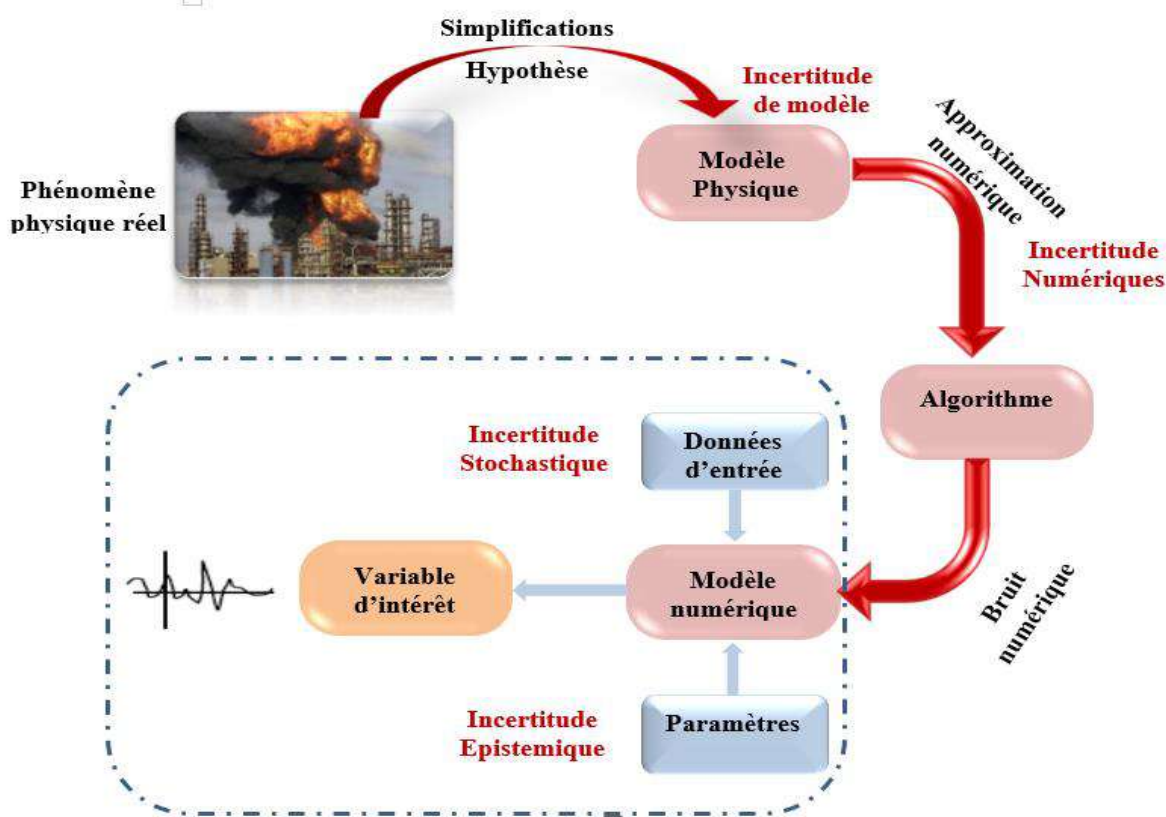


Figure I.3. Sources des incertitudes dans la simulation numérique.

## 2. Quelques outils de simulation numérique des risques

Il est important de choisir l'outil de simulation numérique qui convient le mieux à vos besoins spécifiques en matière de maîtrise des risques professionnels, en fonction de votre secteur d'activité, de la complexité de vos processus et des types de risques que vous souhaitez évaluer. Certains de ces outils sont plus adaptés à des applications spécifiques que d'autres, alors assurez-vous de faire des recherches approfondies pour trouver celui qui répond le mieux à vos besoins.

- **DASSAULT SYSTEMES DELMIA:** DELMIA propose des solutions de simulation pour divers secteurs industriels. Il permet de simuler des processus de fabrication, des opérations logistiques et d'autres scénarios pour évaluer les risques professionnels.
- **ANSYS :** ANSYS propose des logiciels de simulation pour l'analyse de la dynamique des fluides, la mécanique des structures, l'électromagnétisme, etc. Ces outils peuvent être utilisés pour évaluer les risques liés à la conception de produits et de processus industriels.
- **SIMUL8 :** SIMUL8 est un logiciel de simulation de processus qui peut être utilisé pour modéliser des opérations et des flux de travail. Il est utile pour évaluer les risques liés à la logistique, à la production et à d'autres activités.
- **ALOHA :** ALOHA permet de modéliser la dispersion des substances chimiques dangereuses en cas de fuite, d'incident industriel ou de catastrophe, notamment dans des installations chimiques, des pipelines, des entrepôts de produits chimiques, etc.
- **WITNESS:** WITNESS est un logiciel de simulation de processus qui permet de modéliser des systèmes complexes et d'analyser les performances opérationnelles. Il est adapté pour évaluer les risques professionnels dans l'industrie et la logistique.
- **ARENA:** ARENA est un autre logiciel de simulation de processus qui permet de modéliser et d'optimiser des opérations complexes. Il peut être utilisé pour évaluer les risques dans divers secteurs.
- **PHAST:** PHAST (Process Hazard Analysis Software Tool) est un logiciel spécialement conçu pour évaluer les risques liés aux produits chimiques et aux procédés industriels. Il est couramment utilisé dans l'industrie chimique.
- **MATLAB/Simulink :** MATLAB et Simulink sont des environnements de modélisation et de simulation très flexibles. Ils peuvent être utilisés pour simuler divers scénarios de risques professionnels en utilisant des modèles personnalisés.

- **OpenFOAM** : OpenFOAM est un logiciel de simulation de dynamique des fluides open source, utilisé pour analyser les risques associés aux écoulements de fluides dans diverses applications industrielles.
- **HYSYS** : HYSYS est un logiciel de simulation de procédés utilisé dans l'industrie pétrolière et gazière pour évaluer les risques liés aux processus de raffinage et de production.
- **AnyLogic**: AnyLogic est un logiciel de simulation multi-agent qui peut être utilisé pour modéliser et simuler des systèmes complexes dans divers secteurs, y compris la logistique, la santé et la production.

# *C*hapitre *II*

## *Outil de simulation numérique des risques professionnels*

**A**ujourd'hui, la simulation numérique est utilisée dans de nombreux domaines de recherche et développement : mécanique des fluides, science des matériaux, astrophysique, physique, nucléaire, aéronautique, climatologie, météorologie, physique théorique, biologie, chimie et environnement. L'utilisation d'outils numériques avancés pour la simulation des risques professionnels est relativement récente du fait de la grande complexité de ce type de problèmes. Plusieurs raisons expliquent les difficultés rencontrées. Pour commencer, il existe un très grand nombre des risques professionnels possibles, étant donné la nature accidentelle du phénomène. Ensuite, notre compréhension des phénomènes physico-chimiques ou autres mises en jeu est encore incomplète et la puissance informatique disponible pour la simulation est limitée. Pourtant, une étude exhaustive des phénomènes issus des risques professionnels doit passer par la prise en compte de nombreux phénomènes physiques complexes plus ou moins imbriqués.

Le calcul de haute performance est devenu un outil incontournable si l'on souhaite étudier un phénomène physique, chimique, biologique ou même prévoir avec précision certaines propriétés mécaniques, optiques, électroniques des matériaux ou molécules. Dans le domaine la sécurité industrielle, il existe un grand nombre de logiciels dédiés à l'étude des différents phénomènes accidentels.

La composante humaine a aussi une importance. Un risque pourrait être que les utilisateurs, chercheurs ou ingénieurs, considèrent que les résultats de leurs simulations « sont » la réalité. Leur « savoir-faire » est donc aussi un aspect essentiel (Guide informatique, 2006).

La simulation des risques professionnels requiert de bons outils, et un utilisateur possédant une bonne compétence scientifique dans de nombreux domaines. La facilité croissante d'utilisation et les interfaces graphiques des outils de modélisation ne doivent pas faire oublier les besoins considérables de formation des utilisateurs. La personne qui mène une simulation doit posséder avant tout une excellente connaissance de la physique et de la chimie du système étudié (Riahi, 2004). De plus, elle doit maîtriser certains aspects numériques, car des choix doivent être faits quant aux méthodes de résolution des équations ou aux constantes numériques. Enfin, elle doit connaître parfaitement les limites de ses outils, et éventuellement l'effet « falaise » si les simulations sont réalisées à proximité de ces limites (Chevreau, 2008). En effet, dépasser la limite d'un outil peut avoir peu de conséquences ou des effets énormes selon la variable considérée. (Guillaume, 2006).

Les premiers documents relatifs à la validation des outils et spécialement les CFD sont principalement la norme ASTM E 1355 : *Standard Guide for Evaluating the Predictive Capability of Deterministic Fire Models* (Guillaume, 2006). Cette norme est un guide générique fournissant une méthodologie pour évaluer les possibilités prédictives d'un modèle du feu pour un usage spécifique. L'intention est de couvrir la gamme entière des modèles numériques déterministes pouvant être employés pour évaluer les effets des feux dans et sur des structures. La méthodologie est présentée en quatre secteurs d'évaluation :

- Définition du modèle et des scénarios pour lesquels l'évaluation doit être conduite ;
- Vérification de la convenance de la base théorique scientifique et des approximations inhérentes au modèle étudié ;
- Vérification de la robustesse mathématique et numérique du modèle ;
- Mesure de l'incertitude et de l'exactitude des résultats du modèle dans la prévision du cours des événements dans des scénarios semblables du feu.

Cette norme ne prétend pas répondre à toutes les situations liées à son utilisation. Il est de la responsabilité de l'utilisateur d'établir les pratiques appropriées et de déterminer l'applicabilité et les limitations de cette norme avant son utilisation. Elle n'est pas adaptée pour fournir des mesures quantitatives.

La norme ISO 16730 - Fire safety engineering - Assessment, verification and validation of calculation methods, a été développée au sein de l'ISO TC92 SC4 « Fire Safety Engineering ». Cette norme est en cours de parution, et détaille les différents aspects relatifs à la caractérisation d'un modèle. Elle permet en outre une appréciation quantitative des écarts entre modèles ou entre des modèles et des données expérimentales.

Les outils de simulation numérique pour la gestion des risques et des accidents industriels jouent un rôle crucial dans la prévention et la préparation aux situations d'urgence. Un exemple notable est l'utilisation de logiciels de modélisation de dispersion pour évaluer la propagation de produits chimiques dangereux en cas de fuite accidentelle dans une usine chimique. Ces simulations permettent d'identifier les zones potentiellement impactées, de quantifier les niveaux d'exposition et de planifier des mesures d'évacuation appropriées pour minimiser les risques pour les travailleurs et les populations environnantes.

Les outils de simulation de la sécurité des procédés, tels que PHA-Pro (Process Hazard Analysis), sont utilisés pour analyser en détail les procédés industriels et identifier les défaillances potentielles qui pourraient entraîner des accidents majeurs. Ils facilitent l'évaluation des conséquences des défaillances, des détonations aux émissions toxiques, et aident les entreprises à mettre en place des mesures de sécurité préventives pour éviter ces scénarios.

En outre, les simulateurs de formation à la gestion des catastrophes, tels que FLAMES (Fire, Logistics, and Multi-Element Simulation), permettent aux équipes d'intervention d'acquérir des compétences pratiques en répondant à des scénarios de catastrophes industrielles, comme des incendies majeurs ou des fuites de produits chimiques. Ces simulateurs favorisent l'apprentissage en situation réelle et la coordination entre les équipes d'urgence, ce qui renforce la préparation et la réactivité en cas d'accidents.

Le tableau ci-dessous présente un éventail de logiciels utilisés dans le domaine de la simulation numérique des risques et accidents industriels, couvrant une variété de domaines d'application et de caractéristiques clés pour répondre aux besoins spécifiques de chaque industrie.

<b>Logiciel</b>	<b>Domaines d'Application</b>	<b>Caractéristiques Clés</b>
PHAST (Process Hazard Analysis)	Évaluation des risques chimiques	Analyse de dispersion, évaluation des conséquences



<b>Logiciel</b>	<b>Domaines d'Application</b>	<b>Caractéristiques Clés</b>
ALOHA (Areal Locations of Hazardous Atmospheres)	Dispersion chimique et incendie	Modélisation de la dispersion, planification d'urgence
COMSOL Multiphysics	Simulations diverses	Modélisation multi-physique, personnalisable
FLAMES (Fire, Logistics, and Multi-Element Simulation)	Formation à la gestion des catastrophes	Simulations interactives, scénarios personnalisables
SAFER One	Analyse de sécurité au travail	Analyse des risques, modélisation des flux de travail
PHA-Pro (Process Hazard Analysis)	Analyse des procédés industriels	Évaluation des défaillances, gestion des risques
RAMSIS (Reliability, Availability, Maintainability, Safety)	Fiabilité et sécurité des systèmes	Analyse des systèmes complexes, gestion des risques
ANSYS Fluent	Simulation de fluides	Simulation de dispersion de gaz, écoulements fluides
HAZOP Manager	Analyse des opérations potentiellement dangereuses	Identification des défaillances de sécurité
Prometheus	Analyse des risques d'accidents majeurs	Évaluation des conséquences, modélisation des scénarios
BowTieXP	Gestion des risques et sécurité	Analyse de la sécurité en utilisant des diagrammes BowTie
Etap	Analyse des systèmes électriques	Évaluation de la sécurité électrique, gestion des risques
FDS (Fire Dynamics Simulator)	Simulation de feu	Modélisation des incendies, évaluation des risques
ExSIM	Formation à la gestion des urgences	Simulations interactives pour les premiers intervenants

Logiciel	Domaines d'Application	Caractéristiques Clés
OpenFOAM	Simulation CFD (Computational Fluid Dynamics)	Analyse des écoulements de fluides, dispersion gazeuse

En somme, ces outils de simulation numérique sont essentiels pour évaluer, prévenir et atténuer les risques liés aux accidents industriels, en améliorant la sécurité des travailleurs, en réduisant les impacts environnementaux et en renforçant la préparation face aux situations d'urgence.

### 1. Présentation générale du code « FLUENT »

FLUENT est un logiciel de simulation numérique largement reconnu et utilisé dans divers domaines de l'ingénierie, notamment en mécanique des fluides, en thermodynamique et en combustion. Développé par Ansys, FLUENT offre une gamme complète d'outils pour modéliser, analyser et résoudre des problèmes complexes liés aux écoulements de fluides, à la thermique, à la combustion et à d'autres phénomènes associés. Il repose sur la méthode des éléments finis, une approche numérique puissante qui permet de discrétiser des domaines complexes en maillages, puis de résoudre les équations de conservation de la masse, de la quantité de mouvement, de l'énergie, etc., pour obtenir des résultats précis.

FLUENT peut être utilisé pour simuler une vaste gamme de systèmes, allant des écoulements de liquides et de gaz dans des conduites industrielles aux échanges thermiques dans des composants de moteurs d'avion. Il est également particulièrement adapté à l'étude des phénomènes liés aux incendies et aux explosions, permettant d'analyser la propagation des flammes, la dispersion des gaz, la combustion, et d'autres aspects critiques de la sécurité industrielle. De plus, FLUENT offre des capacités avancées pour la modélisation multiphysique, permettant d'aborder des problèmes couplés impliquant simultanément la mécanique des fluides, la thermique, la réaction chimique et d'autres phénomènes complexes.

Les mailles supportées en 2D sont de types triangulaires ou quadrilatérales, elles sont tétraédriques, hexaédriques ou pyramidales en 3D, ou des mailles (hybrides) mélangées. Le code « FLUENT » est écrit en langage C et utilise pleinement la flexibilité et la puissance offertes par ce langage (allocation de l'espace mémoire dynamique). En outre, il utilise une architecture qui lui permet de s'exécuter en tant que plusieurs processus simultanés sur un

seul PC de travail ou sur des machines en parallèles, pour une exécution plus efficace (FLUENT 5 User's Guide, 2000).

Ce logiciel présente de nombreux avantages, notamment une interface utilisateur conviviale, une vaste bibliothèque de modèles physiques, une grande flexibilité dans la création de maillages, et la possibilité d'analyser des problèmes en régime permanent ou transitoire. Il est couramment utilisé dans l'industrie, la recherche académique et de nombreuses autres applications pour résoudre des défis complexes et obtenir des informations cruciales en matière de conception, de sécurité et de performance. FLUENT continue d'évoluer avec les avancées technologiques, restant ainsi à la pointe de la simulation numérique pour répondre aux besoins toujours croissants de l'ingénierie moderne.

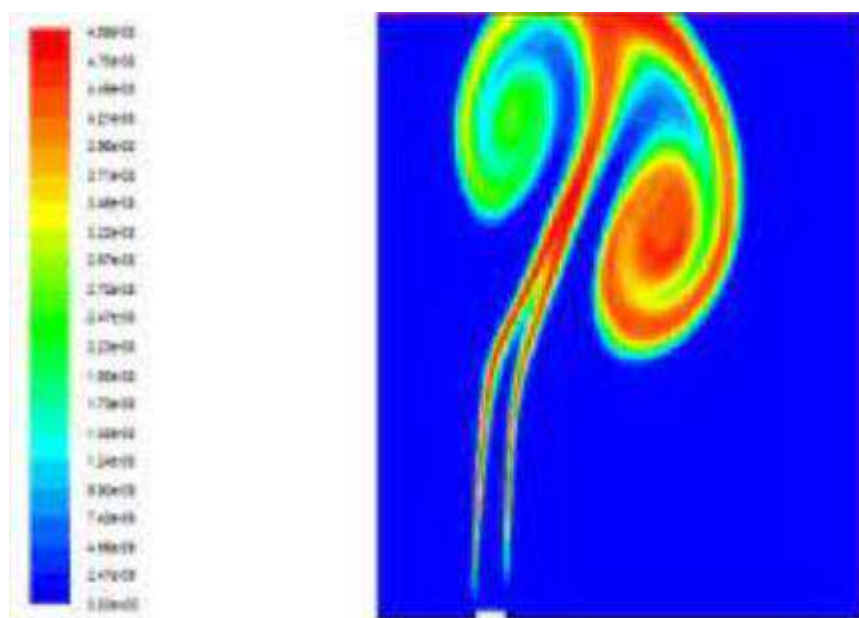


Figure II.1. Simulation numérique d'incendie par FLUENT

« FLUENT » facilite à l'utilisateur sa manipulation à travers la simplicité de son interface graphique. Le code n'est limité uniquement par ces propres fonctions, mais il offre à l'utilisateur la possibilité d'y injecter sa propre fonction et définir toutes particularités de son problème. L'utilisateur avancé peut adapter ou augmenter aux besoins l'interface en programmant en langage C ou C++ ces propres macros et fonctions de menu, afin d'automatiser certaines procédures (condition aux limite, périodique ou autres) par le moyens des UDF (User Defined Functions) sous forme de programme écrits en langage C,

qui va être compilé par le compilateur intégré du code «FLUENT », pour être exécuter après (FLUENT 5 User's Guide, 2000).

### 1.1. Les domaines d'utilisation du logiciel FLUENT

Le solveur FLUENT a la possibilité de modéliser les phénomènes suivants :

- Ecoulement dans des géométries 2D ou 3D en utilisant des maillages adaptatifs non structurés ;
- Ecoulement incompressible ou compressible, stationnaire ou instationnaire ;
- Ecoulement non visqueux, laminaire, et turbulent, newtonien ou non newtonien ;
- Transfert de chaleur par convection, naturelle ou forcée, transfert de chaleur couplé conduction/convection, transfert de chaleur par rayonnement ;
- Repère de références inertielles (stationnaire) ou non inertielles (en rotation) ;
- Multiples Repère de référence en mouvement, incluant des interfaces glissantes et des plans de mélange ;
- Mélange et réaction chimiques d'espèce, incluant des modèles de combustion et réaction de surface de dépôt ;
- Sources volumétriques arbitraires de chaleur, masse, quantité de mouvement, turbulence, et espèces chimiques ;
- Calculs lagrangiens de trajectoire pendant une phase dispersée de particules/gouttes/bulles, incluant le couplage avec la phase continue ;
- Ecoulement avec les matériaux poreux, écoulement biphasique, incluant la cavitation et écoulement à surface libre avec surfaces complexes (FLUENT 5 User's Guide, 2000).

Ces possibilités donnent l'avantage à FLUENT d'être employé pour une grande variété d'applications, incluant ce qui suit :

- Production d'électricité, huile/gaz et applications environnementales ;
- Applications d'espace et de turbomachine ;
- Applications d'automobile ;
- Applications d'échangeur de chaleur ;

- Applications de traitement des matériaux ;
- Conception architecturale et la recherche dans le domaine d'incendie (FLUENT 5 User's Guide, 2000).

Les principales caractéristiques des versions actuelles du code FLUENT sont résumées dans le tableau II.1 :

<b>Solveur Stokes</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Écoulements à faible nombre de Mach ;</li> <li>- Discrétisation par volumes finies ;</li> <li>- Précision du second ordre en temps et en espace ;</li> <li>- Méthode prédicteur/correcteur ;</li> <li>- Solveurs du type: Coupled-Implicit, Coupled-Explicit, ou Segregated-Implicite ;</li> <li>- Simulation aux grandes échelles LES, modèle de Smagorinsky ;</li> </ul>
<b>Modèle de combustion</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Flamme de diffusion ;</li> <li>- Concept de fraction de mélange ;</li> <li>- Combustion contrôlée par le mélange ;</li> <li>- Équation de réaction chimique globale unique ;</li> <li>- Chimie infiniment rapide ;</li> <li>- Consommation basée sur le gradient de fraction de mélange.</li> </ul>
<b>Modèle de rayonnement</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Équation de transfert radiatif ;</li> <li>- Rayonnement diffus ;</li> <li>- Gaz gris non dispersif ;</li> <li>- Résolution numérique par volumes finis ;</li> <li>- Utilisation d'une centaine d'angles discrets.</li> </ul>
<b>Conditions aux limites</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Transfert thermique 2D au niveau de chaque maille ;</li> <li>- Propriétés thermiques dépendant de la température ;</li> <li>- Transferts d'énergie basés sur des corrélations empiriques.</li> </ul>

Tableau II.1 : Caractéristiques principales du code FLUENT.

Bien que le logiciel FLUENT soit un outil puissant et polyvalent de simulation numérique largement utilisé dans de nombreuses applications d'ingénierie, il présente également certaines limites et défis que les utilisateurs doivent prendre en compte.

- Complexité de la modélisation : La modélisation précise des phénomènes complexes peut être exigeante en termes de temps et de ressources. La création de maillages de haute qualité pour représenter avec précision les géométries complexes peut être chronophage, et la définition de conditions aux limites précises nécessite souvent une connaissance approfondie du système étudié.
- Consommation de ressources informatiques : Les simulations numériques réalisées avec FLUENT peuvent être intensives en termes de puissance informatique. Les calculs nécessitant une résolution fine et des maillages détaillés peuvent nécessiter des clusters de calculs puissants pour des simulations en temps raisonnable.
- Sensibilité aux paramètres de modélisation : FLUENT comporte de nombreux paramètres et options de modélisation qui peuvent influencer les résultats. Les utilisateurs doivent être prudents lors de la sélection de ces paramètres et de leur ajustement, car des choix inappropriés peuvent entraîner des résultats non représentatifs.
- Validation et vérification : La validation des modèles FLUENT est cruciale pour garantir la précision des résultats. Il est essentiel de comparer les simulations avec des données expérimentales ou des résultats analytiques pour évaluer la fiabilité du modèle. Cependant, cette étape peut être complexe et nécessiter des ressources supplémentaires.
- Temps de calcul : Pour des simulations transitoires ou complexes, les temps de calcul peuvent être longs, ce qui peut limiter la capacité des utilisateurs à explorer rapidement de nombreuses configurations ou à effectuer des analyses paramétriques.
- Dépendance aux compétences de l'utilisateur : L'efficacité de FLUENT dépend en grande partie des compétences de l'utilisateur dans la définition des modèles, la création de maillages et l'interprétation des résultats. Une formation adéquate est essentielle pour tirer pleinement parti du logiciel.

- Licence et coût : FLUENT est un logiciel commercial et l'acquisition de licences peut représenter un investissement substantiel. Les coûts associés à l'achat, à la maintenance et à la mise à jour du logiciel doivent être pris en compte.
- Limites de modélisation : Bien que FLUENT soit capable de traiter de nombreuses situations complexes, il existe des limites inhérentes à la modélisation numérique. Certains phénomènes, tels que la turbulence extrême, les réactions chimiques très rapides ou les écoulements avec changements de phase complexes, peuvent nécessiter des modèles simplificateurs ou des approches numériques spécifiques.

## 1.2. Structure de programme

Le paquet FLUENT inclut les produits suivants (Figure II.2) (Birla, G. L. 2008) :

- **GAMBIT** : le pré- processeur pour modéliser la géométrie et réaliser le maillage ;
- **FLUENT** : le solveur ;
- **pre PDF** : le pré- processeur pour modéliser la combustion de PDF dans FLUENT ;
- **TGrid** : un pré-processeur additionnel qui peut produire des mailles de volume de frontière existante.

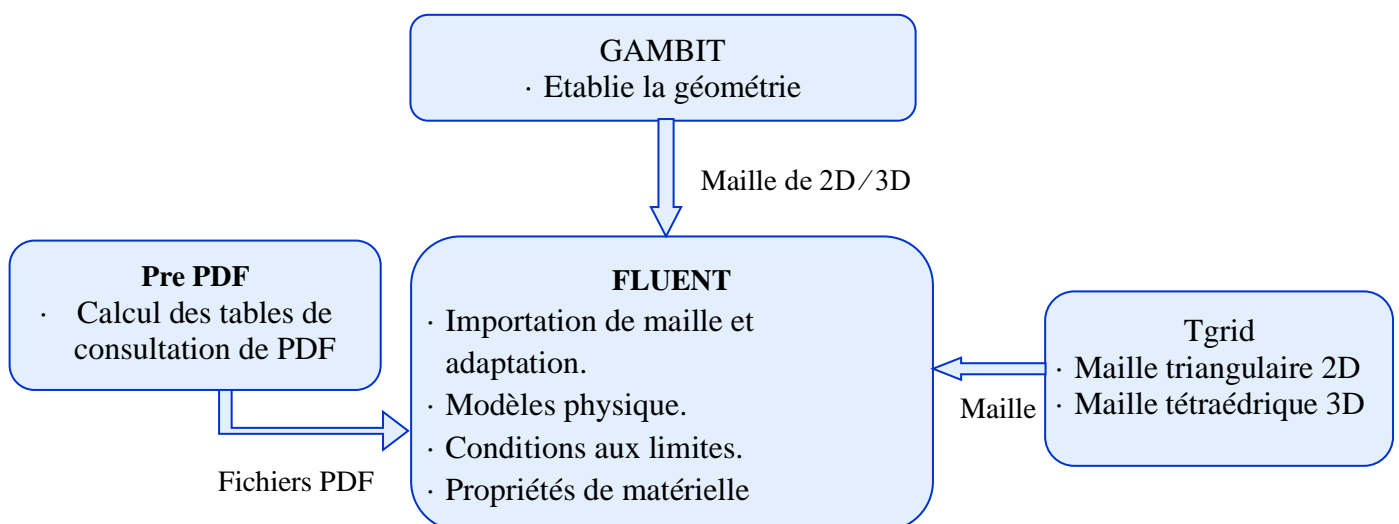


Figure.II.2 : Structure d'organisation de FLUENT (FLUENT 5 User's Guide, 2000).

### 1.2.1. Gambit : Pré- processeur de (CFD)

GAMBIT est le logiciel de génération de la géométrie et de maillage de Fluent. Le mailleur Gambit est conçu pour aider des analystes et des concepteurs à construire des modèles de maille pour CFD et d'autres applications scientifiques. La manipulation de Gambit sera principalement au moyen d'Interface Utilisateur - Graphique (Graphic User Interface 'GUI') (GAMBIT Command Reference Guide, 2000), (Touil & Benlazar, 2018).

#### A. La structure du GUI

La structure de GUI comporte plusieurs parties qui sont (figure 2) (Mohammed, 2017) :

- **La fenêtre de graphe** : C'est la région du GUI dans lequel le modèle est affiché ;
- **Principale Barre De Menu. (main menu bar)** : Elle contient quatre rubriques de menu. Chacune des rubriques est associée à son propre menu des commandes qui permettent d'effectuer de diverses opérations (GAMBIT Command Reference Guide, 2000) ;
- **Opération Toolpad** : Il se compose d'un champ des boutons de commande, dont chacun exécute une fonction spécifique associée au processus de créer et d'engrener un modèle (GAMBIT Command Reference Guide, 2000) ;
- **subpads** : Chaque subpad contient les boutons de commande qui effectuent des opérations liées au but global du subpad (GAMBIT Command Reference Guide, 2000) ;
- **Commandes Globales Toolpad** : Leur but est de permettre de commander les opérations de la fenêtre de graphique et celles du modèle (GAMBIT Command Reference Guide, 2000) ;
- **Fenêtre De Description** : Elle affiche les messages décrivant les divers composants de GUI, les champs, les fenêtres, et les boutons de commande (GAMBIT Command Reference Guide, 2000) ;



- **Fenêtre de transcription et de textes de commande** : Son but est de montrer une notation des commandes exécutées et des messages montrés par GAMBIT pendant la session courante de modélisation (GAMBIT Command Reference Guide, 2000) ;

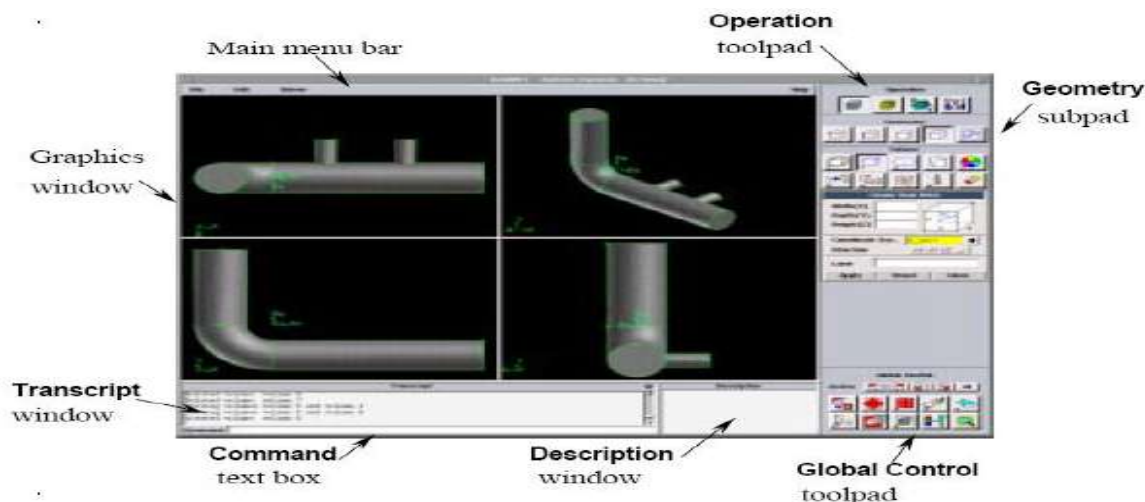


Figure II.3 : L'Interface Utilisateur – Graphique (GUI) (GAMBIT Command Reference Guide, 2000).

### B. Génération du maillage

La création du maillage passe par trois étapes essentielles sont :

- La saisie des dimensions nécessaires à la géométrie 2D (x, y) pour créer le volume de contrôle ;
  - a. Le maillage de base de la géométrie : on a deux types de maillage : le maillage des faces (figure II.4).
  - b. Le maillage des segments (figure II.5) .



Figure II.4 : Le maillage des faces (GAMBIT Command Reference Guide, 2000).



Figure II.5 : Le maillage des segments (GAMBIT Command Reference Guide, 2000).

Les résultats des opérations précédentes seront affichés dans l'interface de maillage (figure II.6) (GAMBIT Command Reference Guide, 2000) :

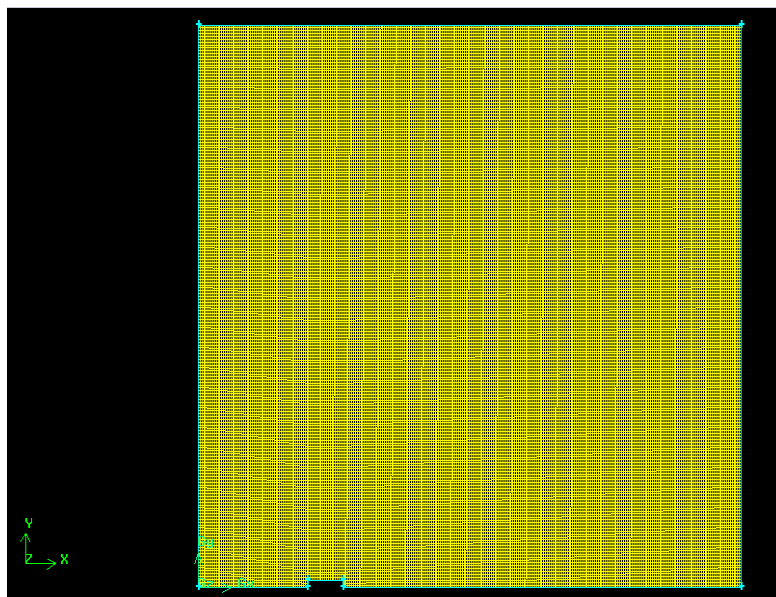


Figure II.6 : Le maillage de base (GAMBIT Command Reference Guide, 2000).

### 1.3. Les principales étapes de résolution du FLUENT

Pour résoudre un problème quelconque, FLUENT facilite la tâche à l'utilisateur à travers la succession d'étapes présentées par les interfaces du menu principale. La procédure de résolution est présentée ci-dessous (FLUENT 5 User's Guide, 2000).

1. Charger la géométrie par Fluent. File→Read→Case
2. Vérification du maillage. Grid→Check ;
3. Afficher le maillage. Display→Grid ;
4. Définir le Model de solution. Define→Solve ;
5. Définir le Model de Turbulence. Define→Models→Viscous ;
6. Définir la Matière. Define→Materials ;
7. Définir les conditions aux limites. Define→Boundary→Conditions ;
8. Choix du control de solution. Solve→Controls→Solution ;
9. Enregistrer les informations liées au problème. File→write→Case & dat ;

Le fichier Case (regroupe toutes informations liées à la géométrie).

Le fichier dat (contient tous les paramètres et données des calculs).

10. Initialiser le calcul. Solve→Initialize→Initialize ;
11. Vérifier les résidus des calculs. Solve→Monitors→Residual ;
12. Choisir du nombre des itérations et lancer les calculs. Solve→Iterate ;
13. Post traitement des résultats. (Display, Plot, Report...etc.).

**Remarque** : la même démarche pour le calcul de chaque configuration et les étapes précédentes seront répétées dans n'importe quel test provisoire ou calcul définitif (FLUENT 5 User's Guide, 2000).

#### A. Choix de la méthode de résolution

Le solutionneur permet d'indiquer les divers paramètres associés à la méthode de résolution pour les employer dans le calcul, tel que les dimensions du domaine, le type d'écoulement qu'il soit stable ou instable et la formulation de vitesse (figure II.7).

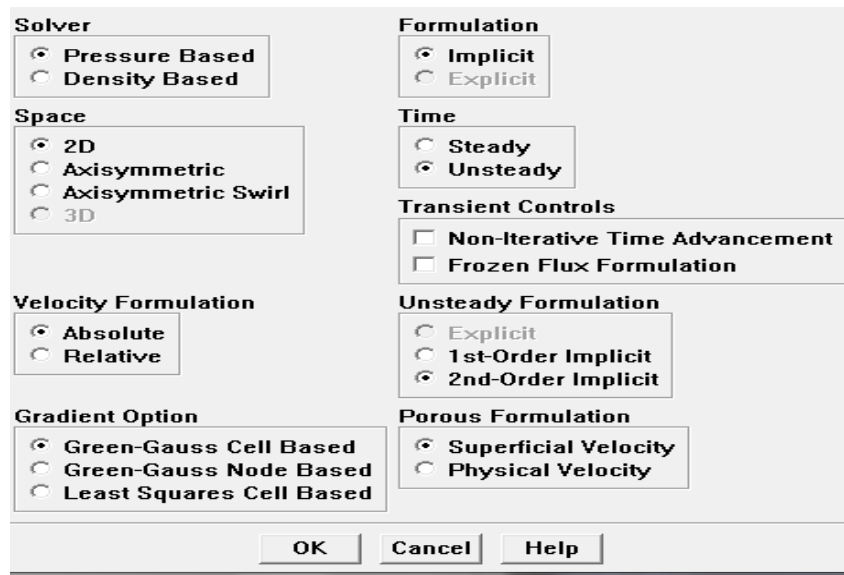


Figure II.7. Les différentes options du solveur (FLUENT 5 User's Guide, 2000).

Par les méthodes numériques utilisées par le solveur de FLUENT et qui permettent de résoudre les équations différentielles régissant la conservation de masse, mouvement, d'énergie et autres, on a :

- Méthode isolée (segregated) ;
- Méthode couplée (coupled).
- **La méthode isolée**

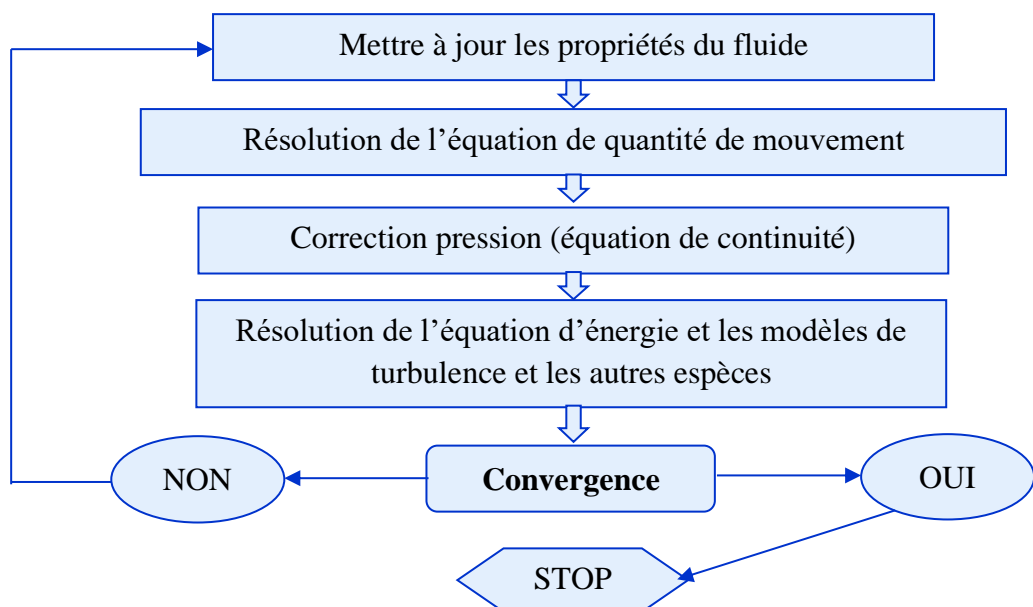


Figure II.8. Le principe de résolution de la méthode isolée.

Le solveur isolé est l'algorithme de résolution utilisé par les premières versions FLUENT 4. Les équations régissant sont non linéaires, couplées et exigent plusieurs itérations de la boucle de résolution avant qu'une solution convergée soit obtenue (figure II.8) d'où la nécessité de les résoudre d'une manière séquentielle (C'est à dire, isolé les uns des autres) (FLUENT 5 User's Guide, 2000).

- **La méthode couplée (coupled)**

Le solveur couplé résout les équations régissant de la continuité, mouvement, et (le cas échéant) l'énergie et des espèces simultanément (C'est à d, ensemble couplé). Plusieurs itérations de la boucle de résolution doivent être effectuées avant qu'une solution convergée soit obtenue. Chaque itération comprend les étapes illustrées sur la figure II.9 (FLUENT 5 User's Guide, 2000).

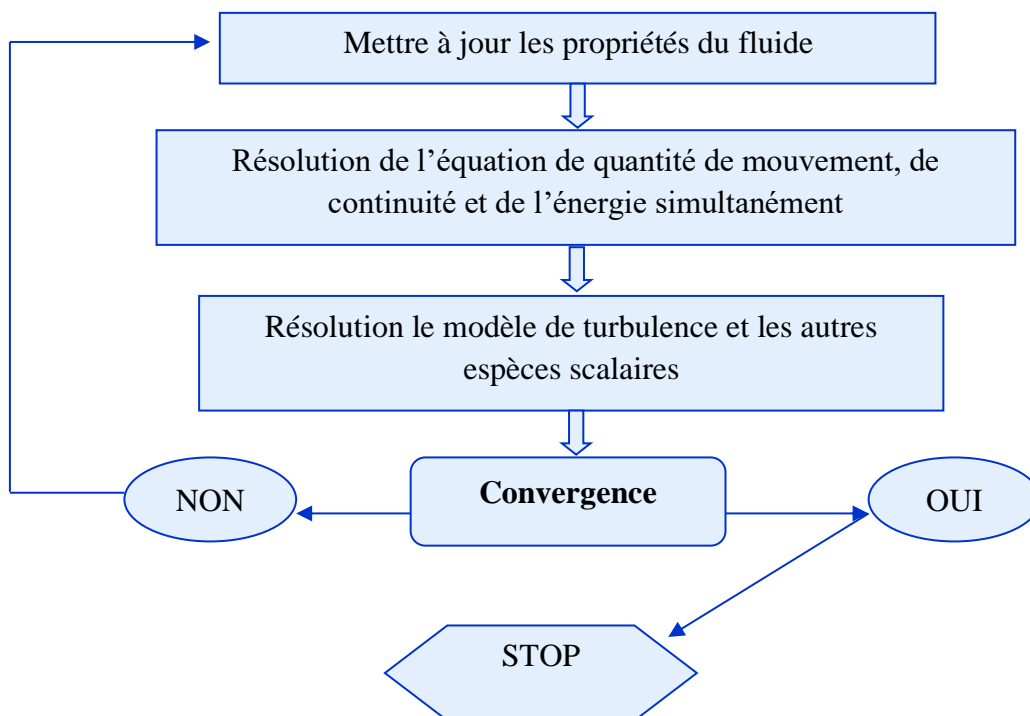


Figure II.9. Le principe de résolution de la méthode couplée.

- **La discrétisation des équations**

Dans les méthodes de résolution isolée et couplée, les équations discrètes et non linéaires sont linéarisées pour produire un système d'équations, pour les variables dépendantes en chaque cellule de la grille, par l'un des schémas, explicite ou implicite (Da Silva, 2007), (Quarteroni et al. 2008).

Le système linéaire résultant est alors résolu pour rapporter une solution mise à jour de champ d'écoulement.

- **Schéma implicite** : Pour une variable indiquée, la valeur inconnue en chaque cellule est calculée en utilisant une relation qui inclut des valeurs connues et inconnues des cellules voisines. Par conséquent chaque variable inconnue apparaît dans plus d'une équation dans le système, et ces équations doivent être résolues simultanément pour donner les valeurs inconnues ;
- **Schéma explicite** : Pour une variable indiquée, la valeur inconnue en chaque cellule est calculée en utilisant une relation qui inclut seulement des valeurs connues. Par conséquent chaque variable inconnue apparaît dans une seule équation dans le système. Dans chaque cellule, ces équations peuvent être résolues séquentiellement, pour donner les valeurs voulues. Dans la méthode de résolution isolée, chaque équation régissant discrète est linéarisée implicitement. Mais la méthode couplée, nous donne le choix d'utiliser une linéarisation implicite ou explicite.

### **B. Paramètres caractérisant le problème étudié**

Pour bien présenter le problème, quelques caractéristiques exprimant ses phénomènes sont à définir, telles que :

- l'équation d'énergie qui permet de prendre en considération les effets et le transfert thermiques (figure II.10) (FLUENT 5 User's Guide, 2000).

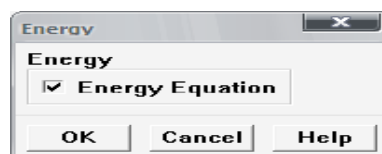


Figure II.10 : Interface d'équation d'énergie.

- La nature de l'écoulement : non visqueux, laminaire ou turbulent (figure II.11).

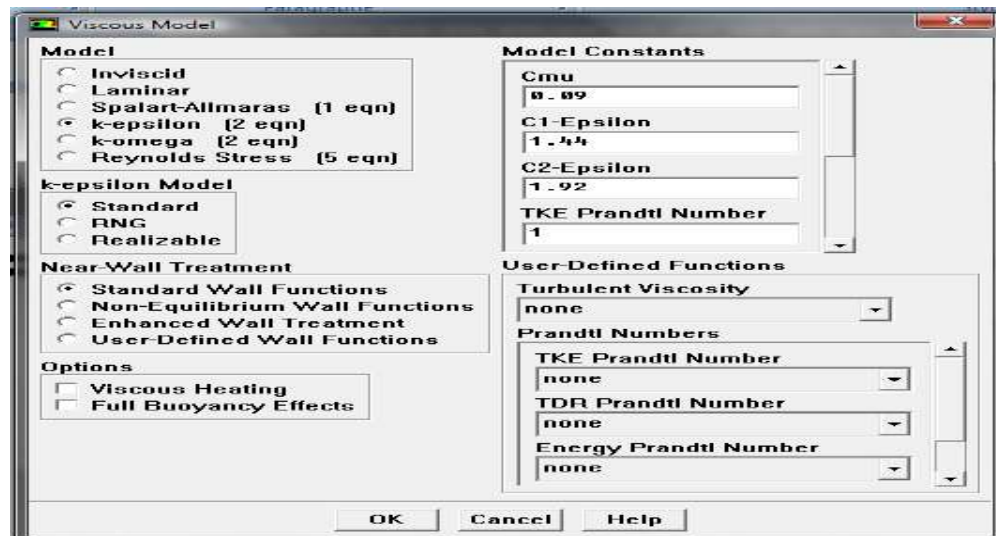


Figure II.11. Paramètres caractérisant la nature de l'écoulement.

### - Modèle des espèces

FLUENT permet de placer des paramètres liés au calcul de la combustion, le mélange et le transport de l'espèce chimique en résolvant des équations de conservation décrivant la convection, la diffusion, et les sources de réaction pour chaque espèce. (Figure II.12) (FLUENT 5 User's Guide, 2000).

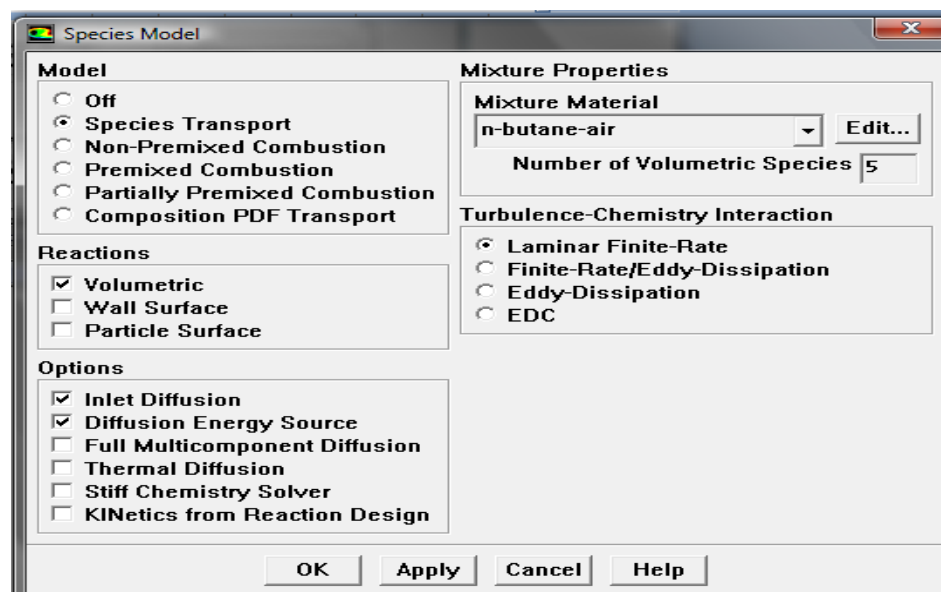


Figure II.12. Modèle des espèces.

- Les caractéristiques du milieu étudié (fluide) qui peuvent être téléchargés à partir de la base de données globale du FLUENT ou être saisies par l'utilisateur (figure II.13).

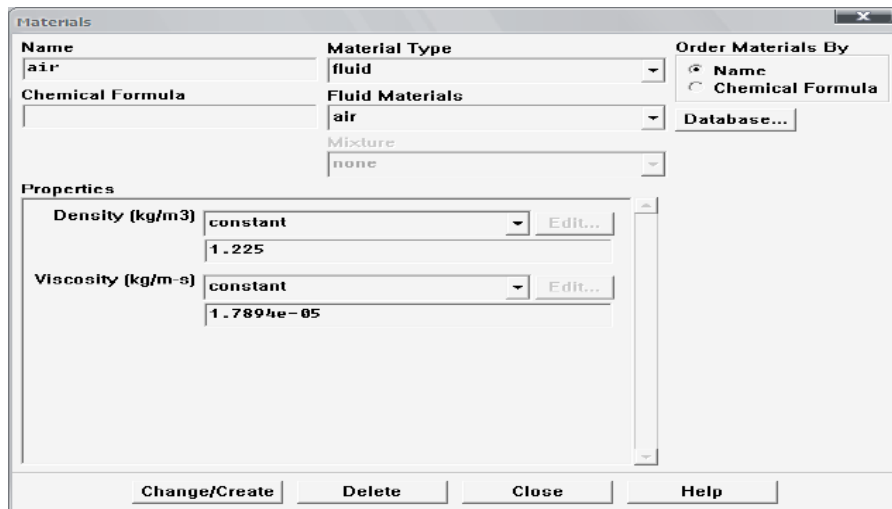


Figure II.13. Caractéristiques du milieu d'étude.

### C. Les conditions initiales et aux limites

Dans cette étape, on doit définir les conditions initiales ainsi que les conditions aux limites de la configuration étudiée (figure II.14-15).

On peut utiliser l'option «compute from » pour déterminer soit les valeurs initiales d'une zone particulière, ou les valeurs moyennes calculées dans le domaine entier.

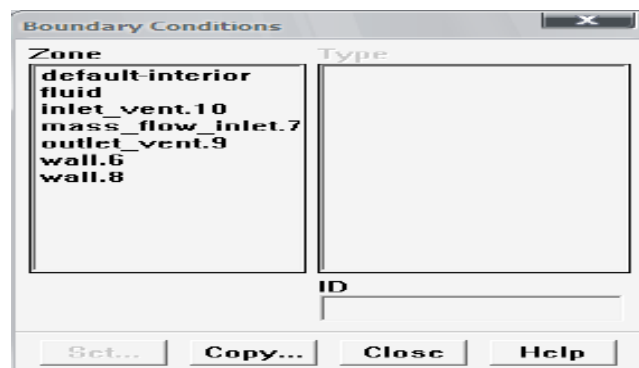


Figure II.14. Les conditions aux limites du domaine.

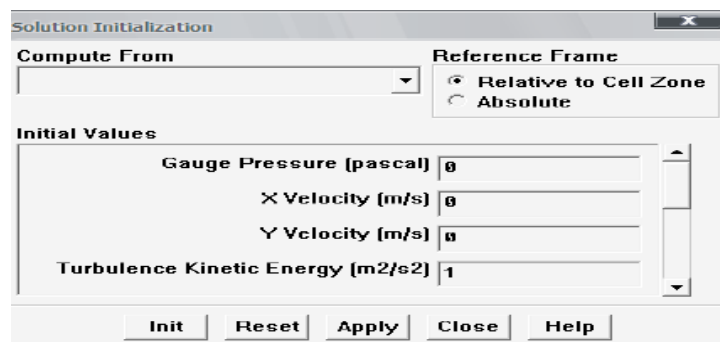


Figure II.15. Les conditions initiales du problème.



Toutes les données saisies peuvent être enregistrées dans des fichiers dont l'extension est «. cas » (figure II.16).

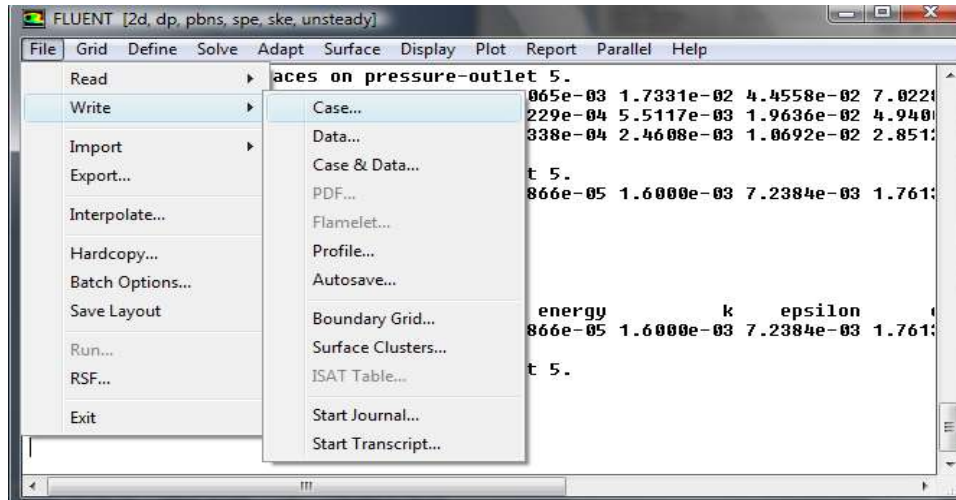


Figure II.16. Enregistrement des données saisies.

#### D. Les résultats de simulation

En introduisant le nombre d'itération et suivant une procédure de convergence bien établie, on obtient les résultats de simulation du problème, présentés en termes de champs de vitesse, pression, température, etc. (Figure II.17).

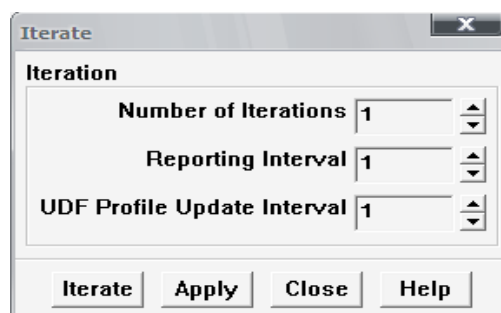


Figure II.17. Le nombre d'itérations de simulation.

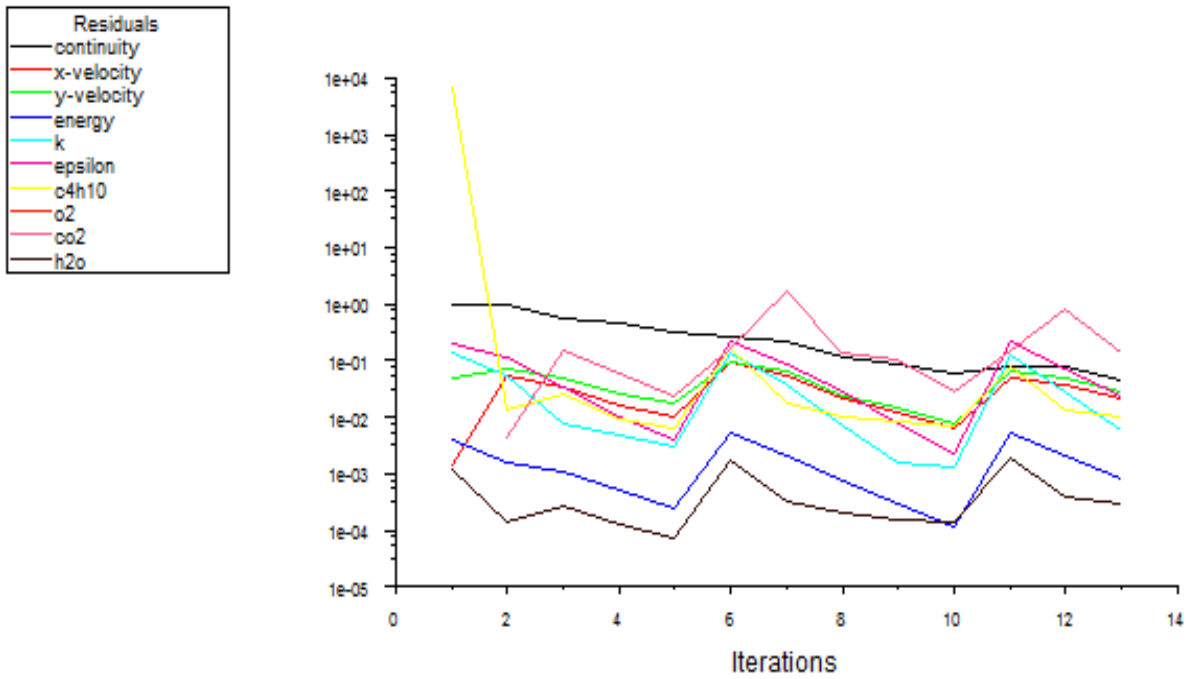


Figure II.18. Le résiduel des itérations.

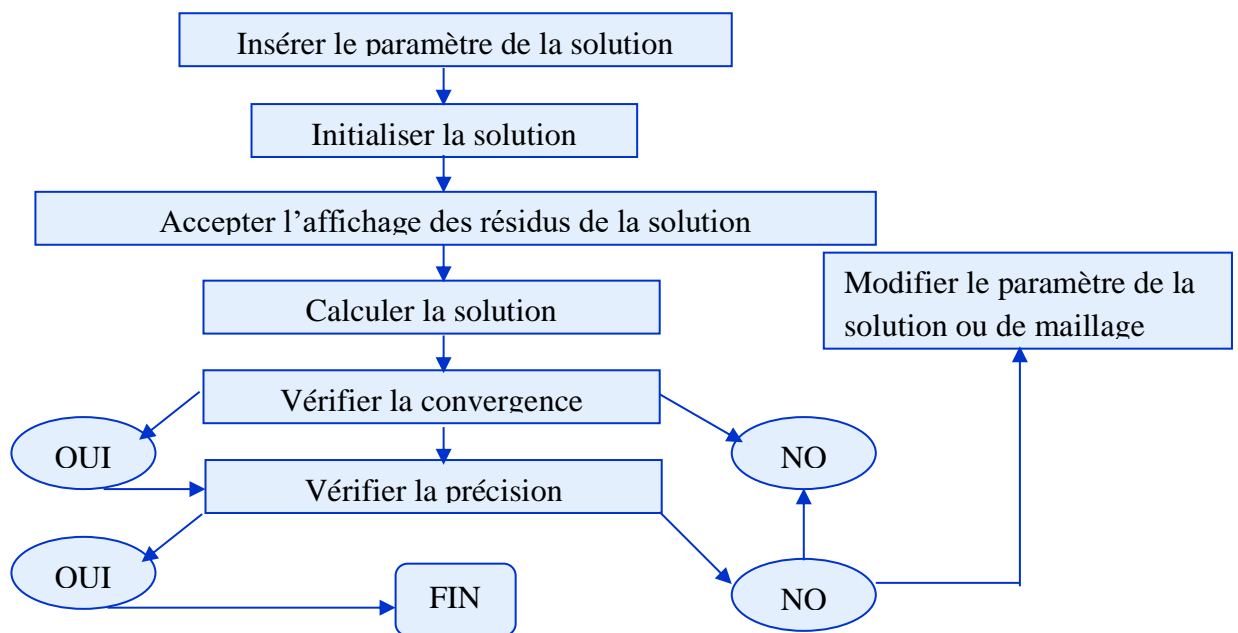


Figure II.19. La procédure de convergence du programme FLUENT.

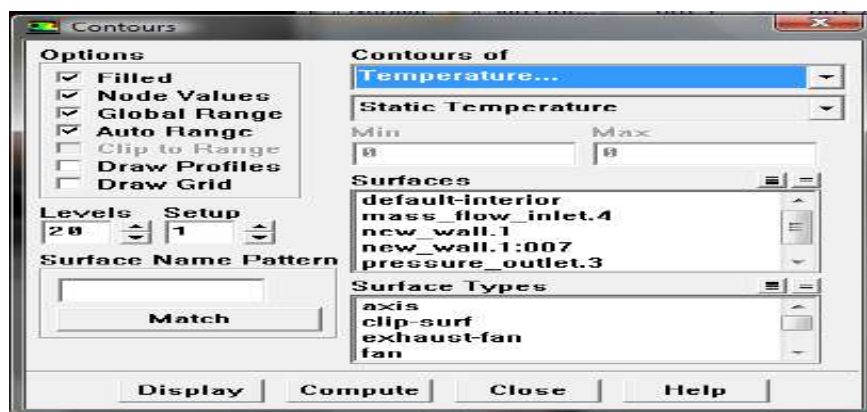


Figure II.20. Les résultats de simulation.

Ces résultats seront enregistrés dans des fichiers data figure II.21

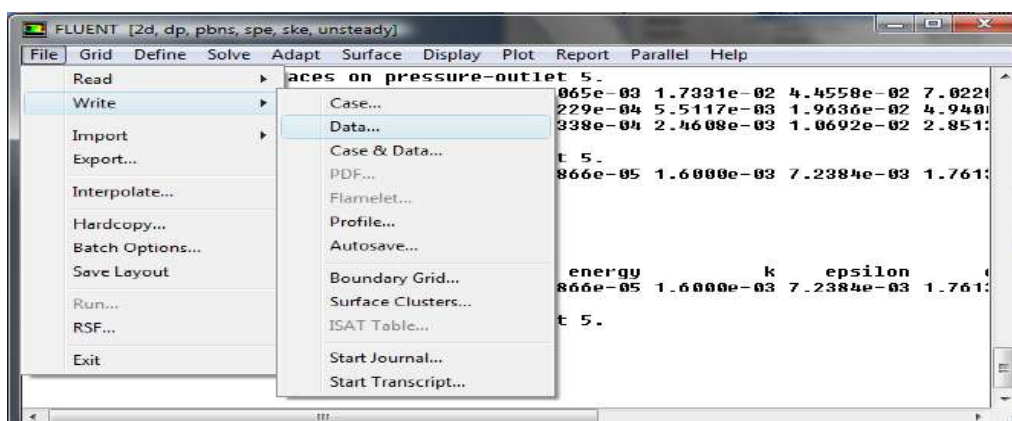


Figure II.21. Enregistrement des résultats de simulation.

## 2. Présentation générale du code «ALOHA»

### 2.1. Généralités

Il existe de nombreux logiciels qui permettent de modéliser la dispersion dans l'atmosphère de divers produits chimiques et d'estimer leurs concentrations à différentes distances de la source de rejet. Certains d'entre eux s'adressent plus particulièrement aux situations d'urgence. Nous avons choisi d'utiliser parmi ceux-ci le modèle ALOHA en raison de sa facilité d'utilisation, de la possibilité de contrôler plusieurs variables et de la possibilité de l'obtenir gratuitement auprès d'EPA (ALOHA® USER'S MANUAL, 2007), (INSPQ, 2021).

CAMEO – ALOHA (Aerial Locations of Hazardous Atmospheres) est un logiciel de modélisation qui estime des zones de menace liées aux dégagements chimiques dangereux, y compris des nuages de gaz toxique, des Incendies, et des explosions. Une zone de menace est un secteur où un risque (tel que la Toxicité, l'inflammabilité, le rayonnement thermique,

ou la surpression préjudiciable) a dépassé un niveau personnalisé par l'utilisateur du souci (LOC). Il a été développé conjointement par les 2 entités américaines suivantes : l'"Environmental Protection Agency's Office of Emergency Prevention, Preparedness and Response" (EPA) et le "National Oceanic and Atmospheric Administration's Office of Response and Restoration" (NOAA) (NOAA, 2006).

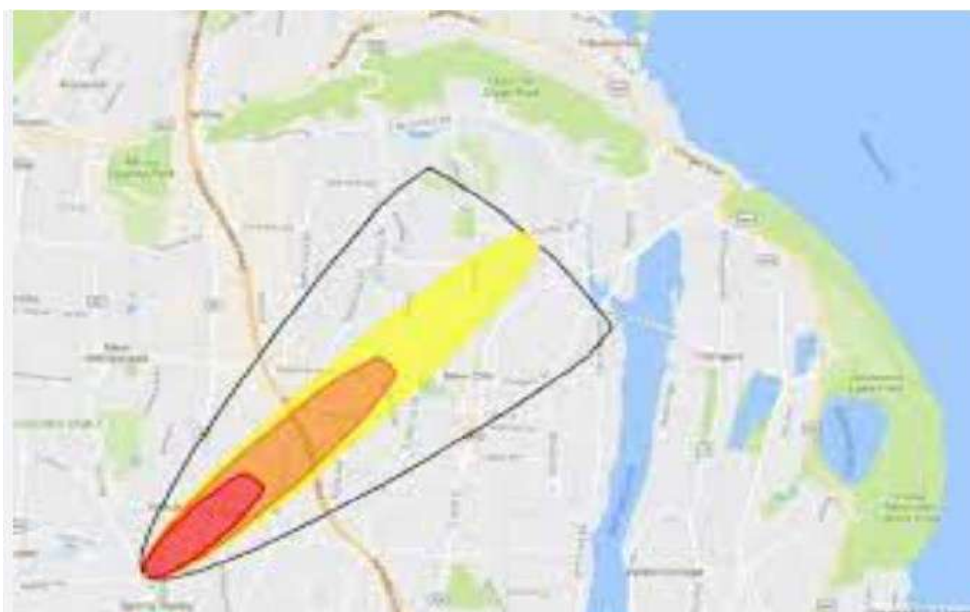


Figure II.22. Une simulation d'une fuite par le logiciel ALOHA, zones affichés sur une carte MARPLOT.

Les zones rouge, l'orange, et jaune indiquent les zones spécifiques et le niveau des atteintes de chacune (Figure II.22).

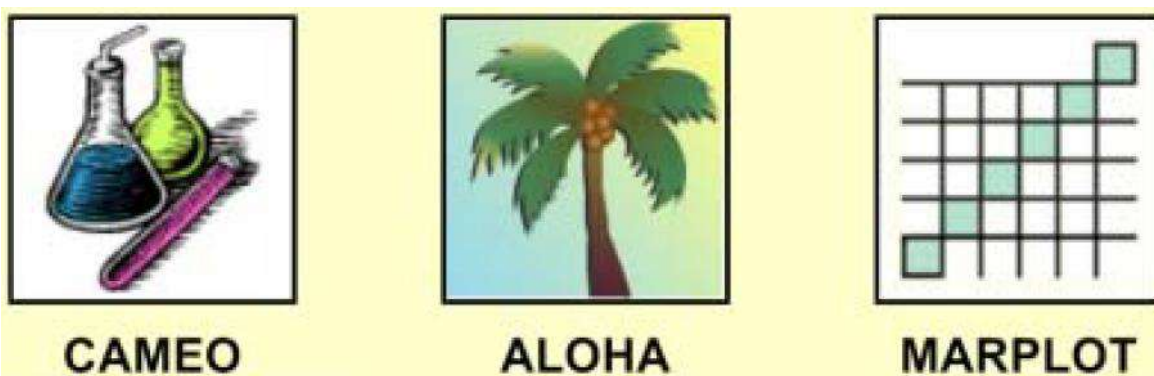
Le logiciel se compose de :

- Module **CAMEO** (Computer-Aided Management of Emergency Operations) est un système d'information développé par l'Agence de protection de l'environnement des États-Unis (Environmental Protection Agency, EPA) en collaboration avec le Centre de réponse aux urgences chimiques (Chemical Emergency Response Center, CERC). Le système CAMEO est conçu pour aider les intervenants en cas d'urgence à gérer et à répondre aux incidents impliquant des produits chimiques dangereux. CAMEO Chemicals est une base de données qui contient des informations détaillées sur des milliers de produits chimiques, y compris leurs propriétés physiques, chimiques, toxicologiques et environnementales. Cette base de données est un outil essentiel pour évaluer les risques associés aux produits chimiques en cas d'incident.

- Module **ALOHA** ("Areal Locations of Hazardous Atmospheres") qui est un programme informatique permettant d'évaluer, dans des situations d'urgence, la dispersion atmosphérique, de composés rejetés dans des conditions accidentelles. Il prend en compte les propriétés toxicologiques et physiques des polluants, et les caractéristiques du site telles que les conditions atmosphériques et les conditions de rejets. Ce module comprend une bibliothèque de 700 substances chimiques<sup>1</sup> et permet un affichage graphique des résultats (Des risques accidentels-INNERIS, 2006).

- Module **MARPLOT** est un composant du système CAMEO (Computer-Aided Management of Emergency Operations) développé par l'Agence de protection de l'environnement des États-Unis (Environmental Protection Agency, EPA). MARPLOT est un logiciel de cartographie et de visualisation qui est utilisé pour créer des cartes interactives et géoréférencées des incidents chimiques, des installations industrielles, des sources de produits chimiques et d'autres informations pertinentes en cas d'urgence chimique ou environnementale. MARPLOT permet aux utilisateurs de créer des cartes géoréférencées en important des données spatiales, telles que des images satellite, des cartes topographiques et des données cartographiques existantes. Les utilisateurs peuvent également dessiner et annoter des cartes pour représenter des informations spécifiques à un incident ou à une situation d'urgence.

Ce logiciel fonctionne sur des ordinateurs équipés du système Microsoft Windows ou Apple Macintosh (NOAA, 2006).



## 2.2. Caractéristiques clés du programme

- Génère une variété de scénarios de sortie spécifique, y compris la zone menacée de la menace à des endroits précis, source et force graphiques.

- Calcul des taux de libération pour les produits chimiques échapper, des flaques d'eau (sur les terres et l'eau), et de gazoducs et de prédire comment ce taux de change avec le temps (Figure II.23).

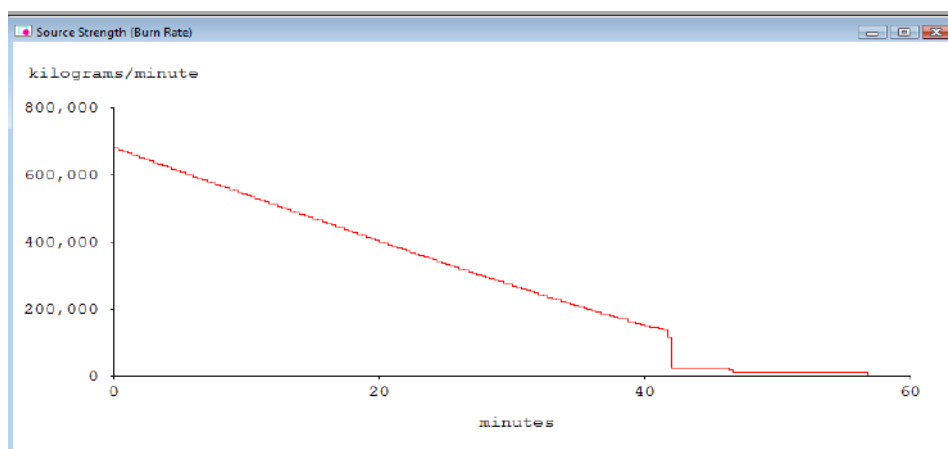


Figure II.23. Taux de décroissance du polluant brule par rapport au temps.

- Libération de nombreux modèles de scénarios : des nuages de gaz toxiques, BLEVE (Boiling Liquid Expanding explosions de vapeur), jet d'incendies, les explosions de nuages de vapeur, et de mettre en commun les incendies (Figure II.24).

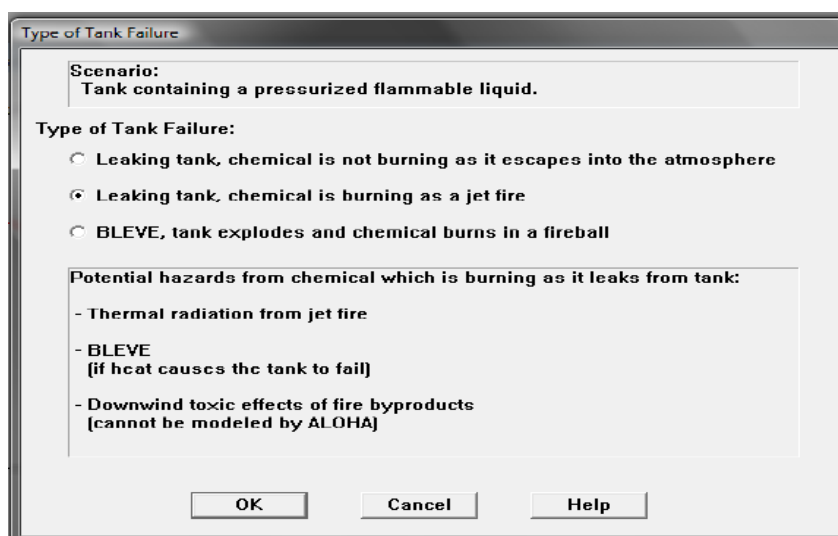


Figure II.24. Les différents scenarios modélisés par ALOHA.

- Évalue les différents types de risques (selon le scénario de dégagement) : toxicité, inflammabilité, le rayonnement thermique, et la surpression (Figure II.25).

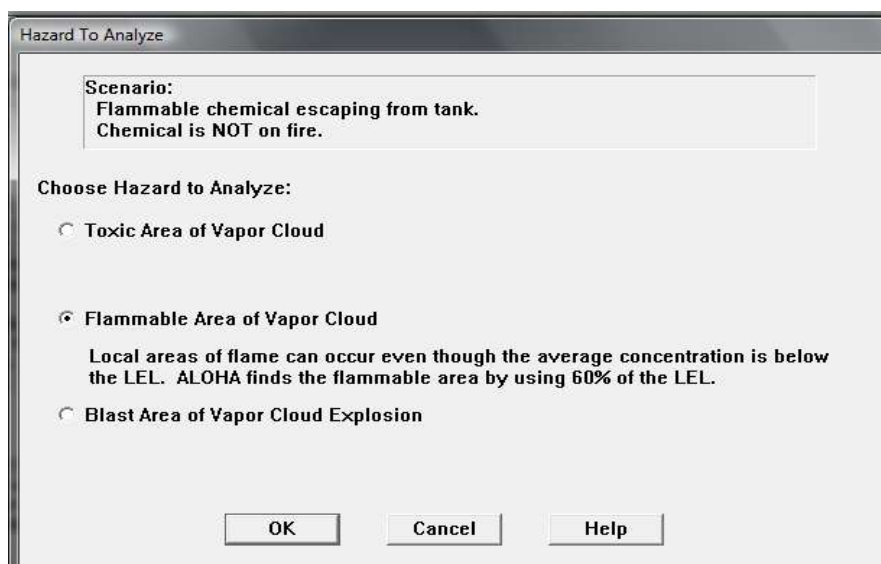


Figure II.25. Les différents types de risques évalués par ALOHA.

- Affiche menace sur les zones MARPLOT cartes (et sur ArcView et ArcMap avec l'Arc d'outils extensions).

- Fonctionne de façon transparente avec les programmes complémentaires et CAMEO MARPLOT, mais il peut aussi être utilisé comme un programme autonome.

À l'aide de ce logiciel de dispersion et du scénario normalisé d'accident nous avons déterminé les zones d'impact pour différentes quantités relâchées. Afin de déterminer les zones d'impact, on se doit d'utiliser les valeurs de références toxicologiques pour chacune des matières dangereuses toxiques. Les valeurs de références toxicologiques privilégiées pour la réalisation des scénarios normalisés d'accident sont les valeurs ERPG (*Emergency response planning guideline*). Pour chacune des substances étudiées nous avons modélisé des relâchements impliquant les quantités suivantes : 10, 50, 100, 200, 500, 1 000, 5 000, 10 000, 20 000, 50 000, 100 000 kg sur une période de 10 minutes. Le logiciel évalue également l'évolution des concentrations d'une substance à l'intérieur des résidences. Il permet donc de déterminer de façon générale le facteur de protection d'une résidence lors d'une recommandation de confinement (Lefebvre et al. 2004).

### 2.3. Modèles utilisés par ALOHA

ALOHA utilise, suivant le type de polluant, deux modèles de dispersion atmosphérique :

- Un modèle gaussien pour les gaz neutres au niveau de la suspension dans l'atmosphère ;

- Un modèle de gaz lourd, basé sur le modèle DEGADIS 2.1 qui a été simplifié par souci de rapidité de calcul.

Ils supposent un terrain plat, sans réaction chimique, avec un terme source d'émission stationnaire. Leur avantage principal est le temps rapide de calcul.

***Le module a été conçu afin :***

- Qu'il puisse être installé sur des ordinateurs portables ;
- Qu'il respecte des critères de convivialité et d'ergonomie indispensables aux situations d'urgence ;
- Que l'interface minimise les erreurs de l'utilisateur en vérifiant la cohérence physique des données d'entrée (OEM, 2007).

***Ce que fait ALOHA :***

ALOHA permet la modélisation d'émissions à partir :

- De flaques en ébullition ou non ;
- De réservoirs sous pression de gaz ou de liquide, de réservoirs liquides non pressurisés, de réservoirs contenant des gaz liquéfiés, de conduite de gaz sous pression.

ALOHA modélise la dispersion atmosphérique de gaz neutre, par un module basé sur l'approche gaussienne, et de gaz plus lourd que l'air au moyen d'un module de gaz dense. Il propose à l'utilisateur le choix entre les deux modules, et de définir lui-même le module. Plus précisément les critères du logiciel sont la masse molaire du produit, la taille du rejet et la température du nuage (Bureau d'Etudes Industrielles, 2021).

## **2.4. Démarche d'utilisations du code ALOHA**

ALOHA est conçu pour donner des résultats assez rapidement pour être utiles aux intervenants au cours d'une intervention en cas d'urgence chimique. Les utilisateurs d'ALOHA peuvent aider à évaluer rapidement l'ampleur d'un incident chimique - est que, si la publication de voyage 10, 100 ou 1000 mètres.

Pour obtenir les informations sur les dangers dont on a besoin rapidement, ALOHA permet:

- De réduire les erreurs de saisie de données en vérifiant les valeurs d'entrée et on alerte si la valeur est peu probable ou pas physiquement possible. ALOHA offre également des valeurs par défaut lorsque cela est possible ;



- ALOHA a sa propre bibliothèque chimique avec des propriétés physiques pour environ 1000 produits chimiques dangereux afin de ne pas avoir à entrer ces données. Utilise des calculs qui sont un compromis entre précision et vitesse.

En outre l'intervention d'urgence, ALOHA a la capacité de modélisation les risques et peut également être utilisé pour la planification, de formation et les objectifs académiques (NOAA, 2006).

Pour modéliser les risques avec ALOHA, on doit entrer le scénario de l'information (voir ci-dessous). L'interface d'ALOHA est facile à utiliser par l'intermédiaire du processus de saisie des données en utilisant une série de boîtes de dialogue. Aide détaillée est fournie avec chaque boîte de dialogue.

Il est essentiel de noter que l'utilisation d'ALOHA nécessite une compréhension approfondie des produits chimiques impliqués, des conditions météorologiques locales et des meilleures pratiques en matière de gestion des urgences chimiques. De plus, il est recommandé de suivre les formations appropriées pour utiliser ALOHA de manière efficace et précise dans le contexte des situations d'urgence chimique.

Les étapes à suivre pour utiliser le codes ALOHA sont les suivantes :

### ***Étape 1 : Configuration Initiale***

***Installation*** : Commencez par installer le logiciel ALOHA sur votre ordinateur si ce n'est pas déjà fait. Assurez-vous d'utiliser la version appropriée du logiciel. La version la plus récente du code ALOHA est ALOHA 5.4.7.

***Configuration du Site***: Entrez les informations concernant le site industriel ou l'emplacement de l'accident, y compris la latitude, la longitude et l'altitude. Ces données permettent à ALOHA de prendre en compte les conditions locales (Figure II.27) .

The figure consists of two screenshots of a software interface for site configuration.

The top screenshot, titled "Location Information", shows a list of cities in a scrollable box. The cities listed are: AUSTIN, MINNESOTA; AUSTIN, TEXAS; BAKERSFIELD, CALIFORNIA; BALTIMORE, MARYLAND; BARNWELL, SOUTH CAROLINA; BARSTOW, CALIFORNIA; BATAVIA, ILLINOIS; BATAVIA, NEW YORK; BATNA, ALGERIA; BATON ROUGE, LOUISIANA; BEAUMONT, TEXAS; BEAVERTON, OREGON; BELLEVILLE, ILLINOIS; BENSON, NORTH CAROLINA; and BERKELEY, CALIFORNIA. The city "BERKELEY, CALIFORNIA" is highlighted in blue. To the right of the list are buttons for "Select", "Cancel", "Add", "Modify", "Delete", and "Help".

The bottom screenshot, titled "Location Input", shows a form for entering location details. It includes the following fields and options:

- Enter full location name:** A text input field labeled "Location is".
- Is location in a U.S. state or territory ?** Radio buttons for "In U.S." (selected) and "Not in U.S.".
- Select state or territory:** A dropdown menu with "ALABAMA" selected. Other options include ALASKA, ARIZONA, ARKANSAS, CALIFORNIA, COLORADO, CONNECTICUT, DELAWARE, and DIST OF COLUMBIA.
- Enter approximate elevation:** A text input field labeled "Elevation is" with radio buttons for "ft" (selected) and "m".
- Enter approximate location:** Fields for "Latitude" and "Longitude", each with "deg." and "min." sub-fields. Radio buttons for "N" (selected) and "S" are next to the latitude field, and "E" and "W" (selected) are next to the longitude field.

At the bottom of the "Location Input" dialog are buttons for "OK", "Cancel", and "Help".

Figure II.27. Configuration du Site pour le code ALOHA.

### Étape 2 : Paramétrage des Scénarios

**Sélection de la Substance Chimique:** Choisissez la substance chimique qui sera impliquée dans l'accident. Vous pouvez sélectionner parmi une liste de produits chimiques prédéfinis ou saisir les données spécifiques de la substance (Figure II.28).

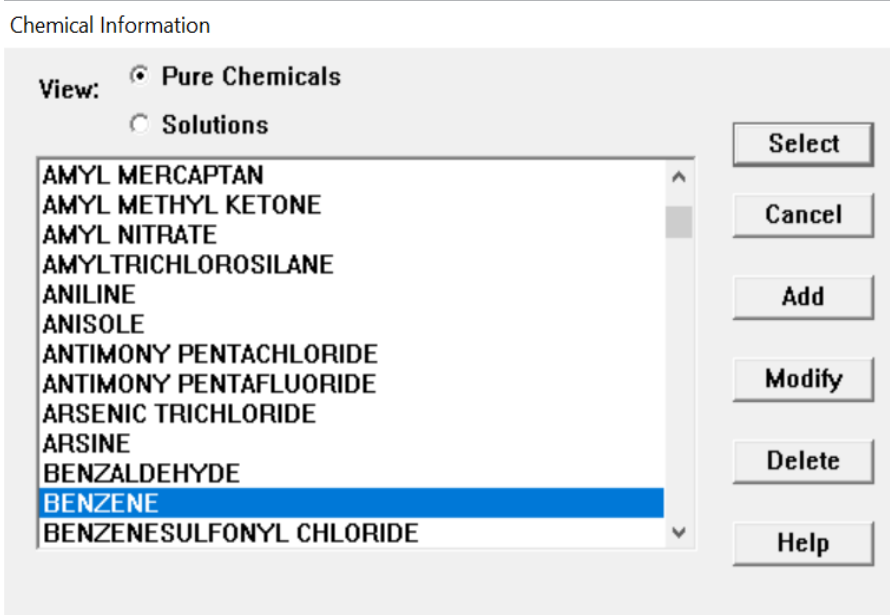


Figure II.28. Sélection de la substance chimique pour le code ALOHA.

**Conditions Météorologiques:** Sélectionnez les conditions météorologiques pour le scénario, y compris la vitesse et la direction du vent, la température, l'humidité, etc. Ces données influenceront la dispersion du gaz (Figure II.29).

Atmospheric Options

Wind Speed is :   knots  mph  meters/sec

Wind is from :  Enter degrees true or text (e.g. ESE)

Measurement Height above ground is:

OR  enter value :   feet  meters

---

Ground Roughness is :

Open Country  Urban or Forest OR  Input Roughness (Z<sub>0</sub>) :

Open Water

---

Select Cloud Cover :

OR  enter value :  (0 - 10)

complete cover      partly cloudy      clear

Atmospheric Options 2

Air Temperature is :  Degrees  F  C

Stability Class is :   A  B  C  D  E  F

Inversion Height Options are :

No Inversion  Inversion Present, Height is :   feet  meters

---

Select Humidity :

OR  enter value :  % (0 - 100)

wet      medium      dry

Figure II.29. Sélection des conditions météorologiques

**Description de l'Accident:** Spécifiez les conditions de l'accident, notamment la quantité de substance libérée, la durée de la fuite, la hauteur de libération, et d'autres paramètres liés à l'événement (Figure II.30).

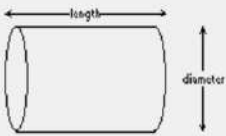
Tank Size and Orientation

Select tank type and orientation:

Horizontal cylinder  Vertical cylinder  Sphere

---

Enter two of three values:


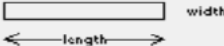

 diameter   
 length   
 volume

feet  meters  
 gallons  cu feet

OK Cancel Help

Area and Type of Leak

Select the shape that best represents the shape of the opening through which the pollutant is exiting

Circular opening  Rectangular opening

---

inches  
 feet  
 centimeters  
 meters

Opening diameter:

---

Is leak through a hole or short pipe/valve?

Hole  Short pipe/valve

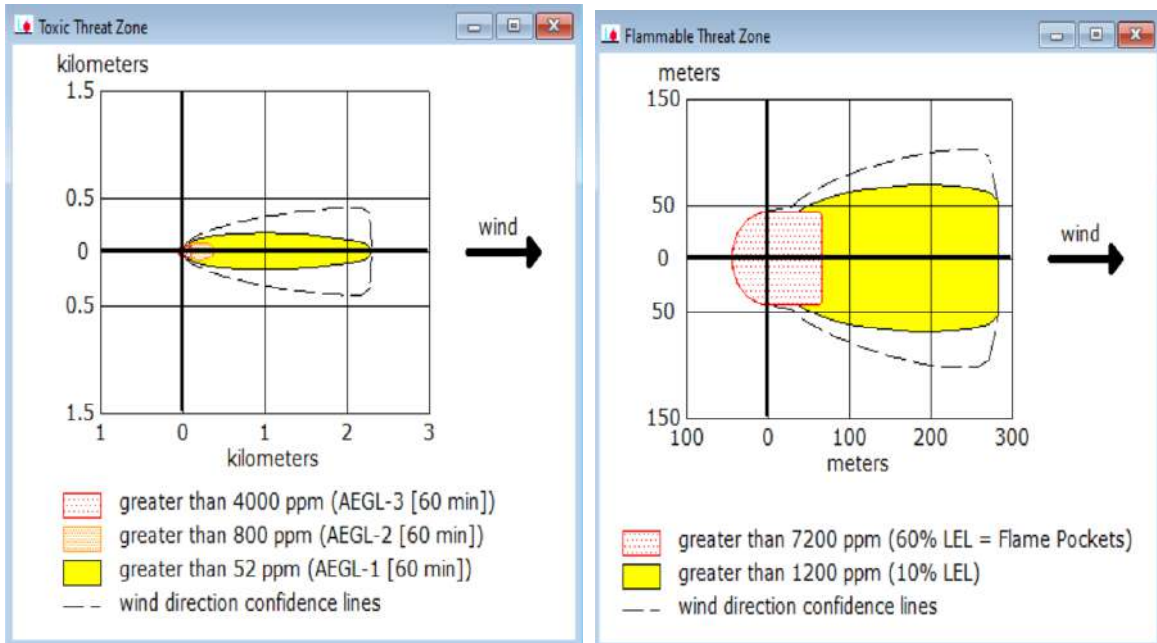
OK Cancel Help

Figure II.30. Spécification des conditions de l'accident

**Caractéristiques du Lieu:** Précisez les caractéristiques du lieu, telles que la topographie et la présence d'obstacles, qui peuvent affecter la dispersion des contaminants.

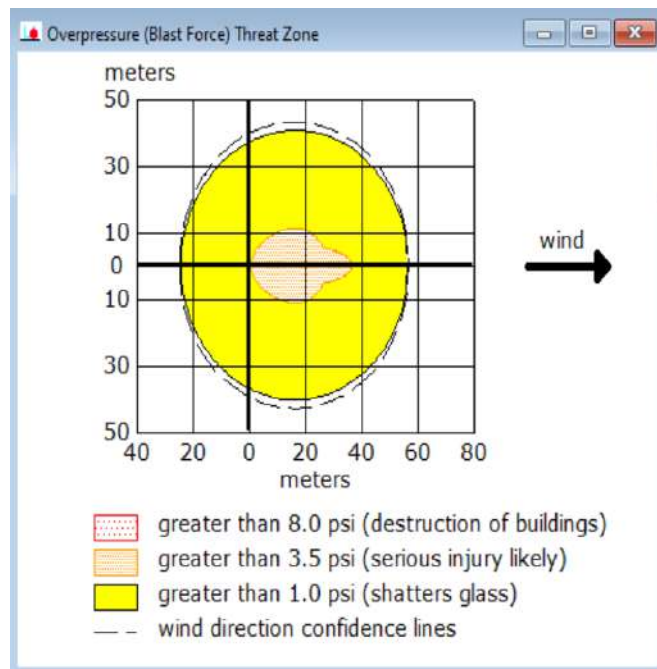
### Étape 3 : Lancement de la Simulation

**Exécution de la Simulation:** Une fois que tous les paramètres sont définis, lancez la simulation. ALOHA utilisera les données fournies pour calculer la dispersion de la substance chimique dans l'atmosphère.

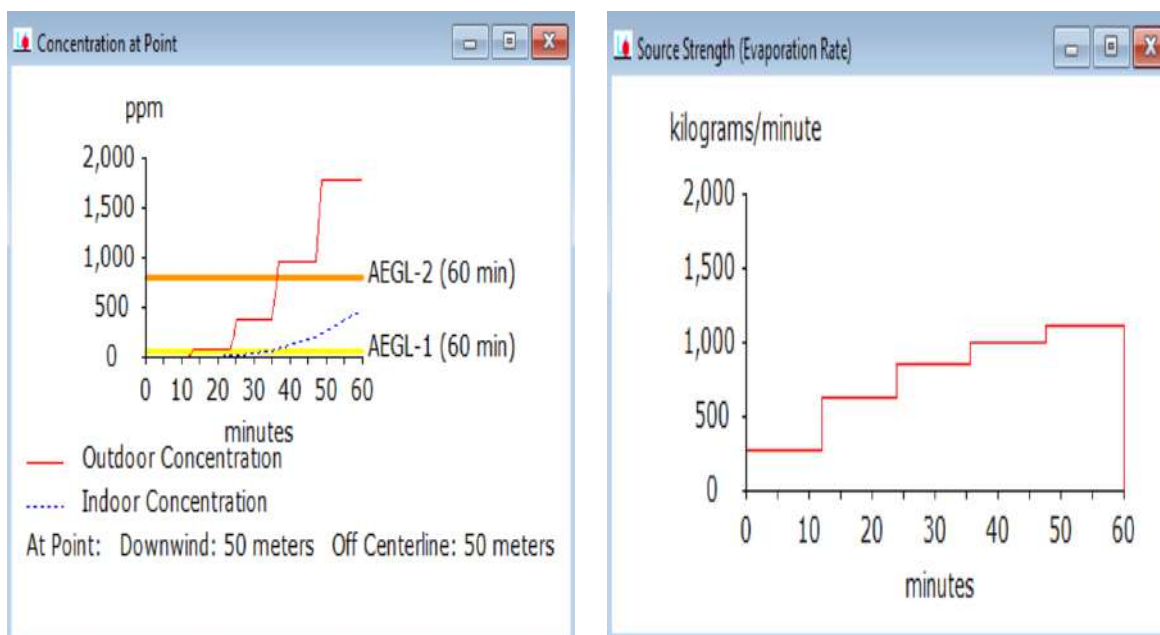


A. Zone de menace toxique

B. Zone d'inflammabilité



C. Zone de surpression



D. Concentration du produit a un point précis E. Temps de consommation du produit

Figure II.31. les sorties du code ALOHA

**Analyse des Résultats en Temps Réel:** Pendant la simulation, ALOHA affiche les données en temps réel, y compris les courbes d'isoplèthes (lignes de niveaux de concentration) et les zones potentiellement affectées par le nuage toxique ou inflammable.

#### **Étape 4 : Analyse des Résultats**

**Interprétation des Données de Sortie:** Après la simulation, analysez les données de sortie générées par ALOHA. Les courbes d'isoplèthes montrent la concentration de la substance chimique à différents endroits par rapport au site de l'accident.

**Identification des Zones à Risque:** Identifiez les zones où la concentration dépasse les seuils de sécurité et où des mesures d'urgence peuvent être nécessaires.

**Évaluation des Risques:** Utilisez les résultats pour évaluer les risques potentiels pour la santé humaine, l'environnement et les infrastructures.

Compte à la démarche d'utilisation des résultats du code ALOHA et tirer d'une manière efficace le contexte des situations d'urgence est la suivante :

- **Collecte des données :** Rassemblez toutes les informations nécessaires sur l'incident, notamment le type de produit chimique impliqué, la quantité, les conditions météorologiques actuelles, la topographie locale et les données sur les vents.

- **Lancement du logiciel ALOHA** : Ouvrez le logiciel ALOHA sur votre ordinateur. Assurez-vous d'avoir la version la plus récente du logiciel.
- **Configuration de l'incident** : Dans ALOHA, commencez par configurer les paramètres de l'incident en entrant les détails tels que le type de produit chimique, la quantité, l'emplacement de la source, les conditions météorologiques et d'autres informations pertinentes. Vous pouvez également charger des fichiers de données météorologiques réelles si disponibles.
- **Modélisation de la dispersion** : ALOHA utilise des modèles mathématiques pour simuler la dispersion atmosphérique du produit chimique en cas d'émission. Vous pouvez lancer la modélisation pour estimer comment le produit chimique se propagerait dans l'atmosphère en fonction des conditions spécifiées.
- **Analyse des résultats** : Examinez les résultats de la modélisation de la dispersion fournis par ALOHA. Cela peut inclure des cartes indiquant les zones potentiellement impactées, les concentrations de produits chimiques à différentes distances de la source et les prévisions sur la durée de l'incident.
- **Évaluation des risques pour la santé et l'environnement** : Utilisez les données de concentration générées par ALOHA pour évaluer les risques potentiels pour la santé humaine et l'environnement. Comparez les concentrations estimées avec les seuils de danger pour le produit chimique spécifique.
- **Planification d'intervention d'urgence** : En fonction des résultats, développez des plans d'intervention d'urgence, y compris des mesures telles que l'évacuation, le confinement, la notification du public et la mobilisation des ressources.
- **Communication des résultats** : Partagez les informations générées par ALOHA avec les parties prenantes concernées, y compris les services d'intervention d'urgence, les responsables de l'entreprise, les autorités locales et le public, le cas échéant.
- **Suivi et mises à jour** : Surveillez l'évolution de la situation et mettez à jour les paramètres d'ALOHA si nécessaire en fonction des nouvelles données disponibles.
- **Documentation** : Tenez des dossiers complets de l'utilisation d'ALOHA, des données d'entrée, des résultats et des décisions prises pendant la gestion de l'incident.



## 2.5. Utilisation d'ALOHA a un cas d'incendie

Le calcul de la dispersion atmosphérique de fumées d'incendie ou de vapeurs chaudes n'est pas réalisable par la seule utilisation d'ALOHA. En effet un module de calcul de sur-hauteur de panache ou d'élévation de gaz chaud fait défaut au logiciel (Evans, 1994).

## 2.6. Utilisation d'ALOHA a un cas rejet de gaz léger

La dispersion atmosphérique d'un gaz léger a été testée au moyen d'un rejet gazeux d'hydrogène, dont les caractéristiques du terme source sont données dans le tableau ci-dessous. ALOHA détermine des concentrations au sol de 2000 ppm à des distances supérieures à 400 m. Ce résultat irréaliste a été obtenu par le logiciel qui a choisi d'utiliser le module passif, soit l'approche gaussienne simple sans tenir compte de l'élévation de gaz du fait de sa faible densité (Evans, 1994).

Dans ce support de cours, on a opté pour la modélisation d'un accident qui a eu lieu au terminal de Skikda, Algérie en octobre 2005, afin d'évaluer les effets qu'il a généré sur l'environnement du côté de l'effet thermique ainsi que la dispersion atmosphérique du polluant dans l'atmosphère et son impact sur l'homme. On a également fait une comparaison entre les logiciels utilisés.

## 2.7. Les principales limitations du code ALOHA

- La topographie et la présence d'obstacles ne sont pas prises en compte ;
- La dispersion de particules n'est pas modélisée ;
- L'élévation des gaz chaud ou légers n'est pas prise en compte ;
- Certains des phénomènes qui se situent au niveau du point de rejet ou dans le champ proche ne sont pas pris en compte, tels les phénomènes de jets, par conséquent ALOHA n'affiche pas de résultats à des distances inférieures à 100 m ;
- Les rejets à partir de conduite liquide ne sont pas modélisés ;
- Les aérosols (ex. : lors de rejets d'ammoniac,...) ne sont pas modélisés par ALOHA, qui suppose leur évaporation immédiate aux abords de la fuite ;
- ALOHA ne calcule pas la réactivité chimique, il avertit cependant l'utilisateur et décrit le type de réactions et les produits attendus ;

- ALOHA peut calculer le terme source et la dispersion à partir de composés purs ou de solutions liquides mais ne modélise pas les mélanges gazeux ;

La réactivité chimique au sein d'un panache de fumées n'est pas modélisée (Bureau d'Etudes Industrielles, 2021).

### 3. Présentation du code « PHAST »

PHAST développé par DNV est un logiciel spécialisé dans l'analyse des risques liés aux accidents majeurs dans les industries chimiques et pétrolières. Il est utilisé pour évaluer et atténuer les risques associés aux processus industriels, en veillant à la sécurité des installations, à la protection de l'environnement et à la sécurité des travailleurs.

PHAST (Process Hazard Analysis Software Tool) a été développé et mis à jour par DNV pour évaluer les conséquences des fuites de gaz, des incendies, des explosions, de la toxicité et des autres dangers technologiques reliés à diverses industries

PHAST simule l'évolution d'un rejet accidentel d'un produit toxique et/ou inflammable (Figure II.32), depuis la fuite initiale jusqu'à la dispersion atmosphérique en champ lointain, incluant la modélisation de l'épandage et de l'évaporation de flaque. PHAST est capable de modéliser les scénarios de rejets à partir des divers termes sources (fuite sur la paroi d'un réservoir, rupture d'une canalisation, ...) qui sont ensuite combinés avec le modèle de dispersion de PHAST de type intégral, appelé Unified Dispersion Model (UDM), pour obtenir par exemple : les distances de sécurité correspondant aux seuils toxiques et l'empreinte du nuage au Sol à un instant donné.

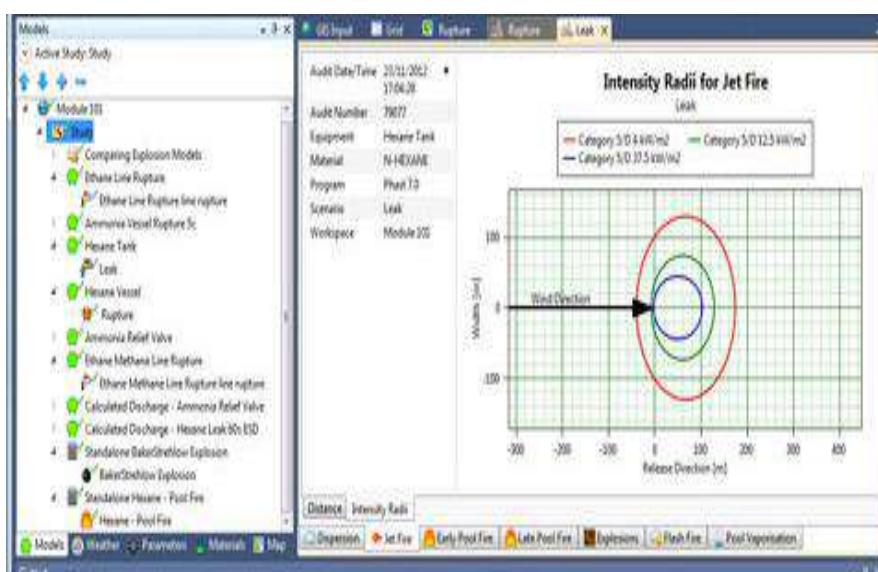


Figure II.32. Résultats d'une simulation par le code PHAST du code ALOHA

### 3.1. Termes sources dans PHAST

Le logiciel, commercialisé par DNV Software, est largement utilisé dans l'industrie pour l'estimation des conséquences d'accidents. Il permet de modéliser différents types de termes sources, ainsi que la dispersion du nuage. Il existe plusieurs modèles dans PHAST pour calculer les divers termes sources. Le calcul du terme source est composé de deux parties : la première partie du calcul est spécifique pour chaque terme source, elle définit les conditions de rejet jusqu'à l'orifice (pour « Leak ») ou jusqu'à la brèche sur la canalisation (pour « Short pipe » et « Long pipeline »). La deuxième partie du calcul est effectuée avec le modèle d'ATEX (ATmospheric EXpansion model) qui détermine les conditions finales de rejet après l'expansion jusqu'à la pression atmosphérique.

On présente les principaux modèles de terme source de PHAST pour le mode d'émission continue. « Leak », « Line rupture », « Disc rupture ».

### 3.2. Modèle UDM de dispersion de PHAST

Le modèle de dispersion de Phast appelé UDM (Unified Dispersion Model). La version originale de l'UDM a été développée par Cook et Woodward au début des années 1990. Dans cette version, les différentes phases de dispersion sont simulées avec des sous-modèles qu'il faut assembler de façon astucieuse pour modéliser un scénario donné. Pour éliminer les discontinuités entre les résultats des sous-modèles, une nouvelle version d'UDM a été mise au point dans laquelle il est possible de calculer un profil uniforme de concentration intégrant les différentes phases de la dispersion.

D'autre part, ce nouveau modèle prend en compte les phénomènes d'évaporation, de formation de flaque, d'élévation du nuage et de dispersion variable au cours du temps.

UDM est capable de traiter un grand nombre de produits, qu'ils soient toxiques et/ou inflammables, légers, lourds ou neutres. Il traite les rejets liquides, gazeux ou diphasiques. Pour les rejets diphasiques, il modélise la formation et l'évaporation de flaque.

### 3.3. Fonctionnalités clés du logiciel PHAST:

- *Modélisation des scénarios d'accidents* : PHAST permet de modéliser et d'analyser différents types d'accidents potentiels, tels que les fuites de produits chimiques, les incendies, les explosions, etc.

- **Évaluation des conséquences** : Il peut évaluer les conséquences potentielles des accidents, y compris les dommages matériels, les impacts environnementaux et les risques pour la santé humaine.
- **Identification des mesures d'atténuation** : PHAST aide à identifier les mesures d'atténuation et les barrières de sécurité pour réduire les risques.
- **Analyse de la probabilité** : Le logiciel prend en compte la probabilité d'occurrence des scénarios d'accidents en utilisant des données et des modèles spécifiques à l'industrie.

### 3.4. Modélisation des feux et des radiations thermiques

PHAST peut modéliser les phénomènes suivants :

- Feu chalumeau (jet fire)
- Feu de nappe
- Feu de flash
- Boule de feu (BLEVE)
- Modélisation des Explosions

Trois modèles pour prédire les effets d'explosion VCE (Vapour Cloud Explosion)

- TNT equivalent
- Multi-Energy
- Baker-Strehlow

### 3.5. Modélisation des effets toxiques

PHAST aussi modélise les effets toxiques :

- Distance à la concentration toxique
- Distance à la Dose toxique

### 3.6. Résultats de modélisation par PHAST

Généralement les résultats sont présentés sous forme Graphique et numérique (rapport).

Certains résultats peuvent être présentés sur fond cartographique (zones d'effet)

### 3.6.1. Définition des scénarios et simulation

Pour introduire un modèle il faut suivre les étapes suivants :

- Introduire un modèle général
- Différents types de scénarios (rupture catastrophique, fuite, rupture ligne,...)
- Caractéristiques des modèles généraux
- Données importantes (Onglets)
- Influence des données – paramètres de procédé
- Introduire un modèle général dans l'onglet 'Model'

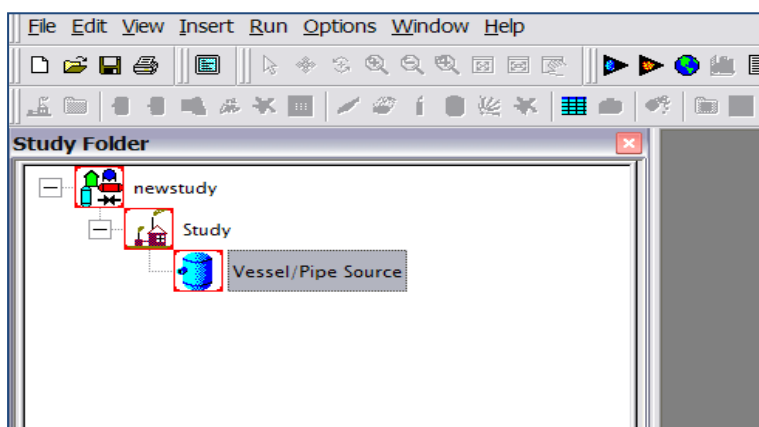


Figure II.33. Définition des scénarios

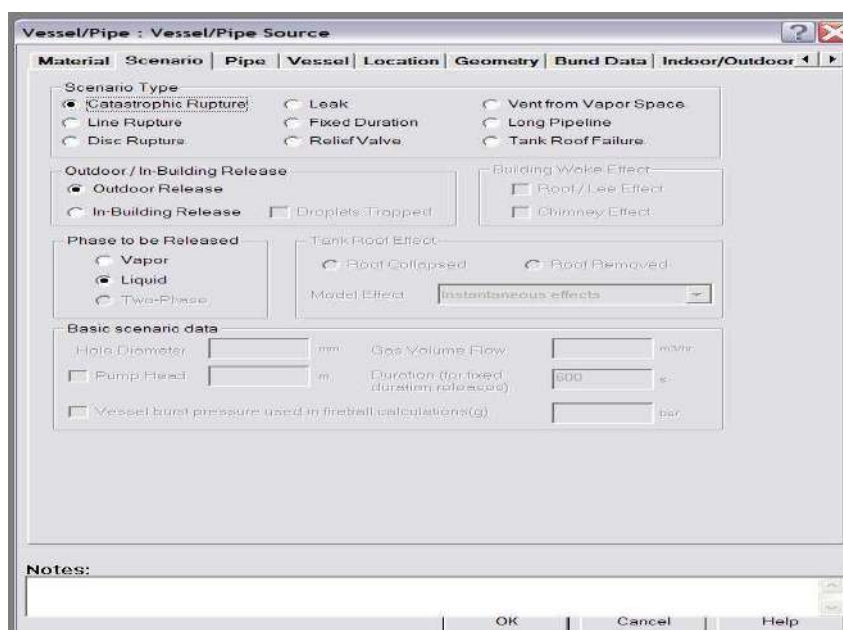


Figure II.34. Définition des sources

- Introduire un modèle général dans l'onglet 'Model'
- Différents types de scénarios (rupture catastrophique, fuite, rupture ligne,...)
- Caractéristiques des modèles généraux
- Données importantes (Onglets)

Dans cette étape il est indispensable d'introduire les données suivantes :

- Produit
- Quantité
- Paramètres de procédé
- Température
- Pression
- Position
- Hauteur
- Géométrie
- Direction de rejet
- Rétention

Figure II.35. Définition des produits

### 3.6.2. Résultats et effets de radiation/de surpression/toxiques

Les résultats sont présentées sous forme deux types :

- **Rapports** contient les données suivantes :
  - Résumé
  - Décharge
  - Dispersion
  - Effets de radiation
  - Effets de surpression
  - Effets toxiques
- **Graphiques** contient les graphes suivants :
  - Concentrations
  - Effets de radiation
  - Effets de surpression
  - Effets toxiques
  - Effets sur carte

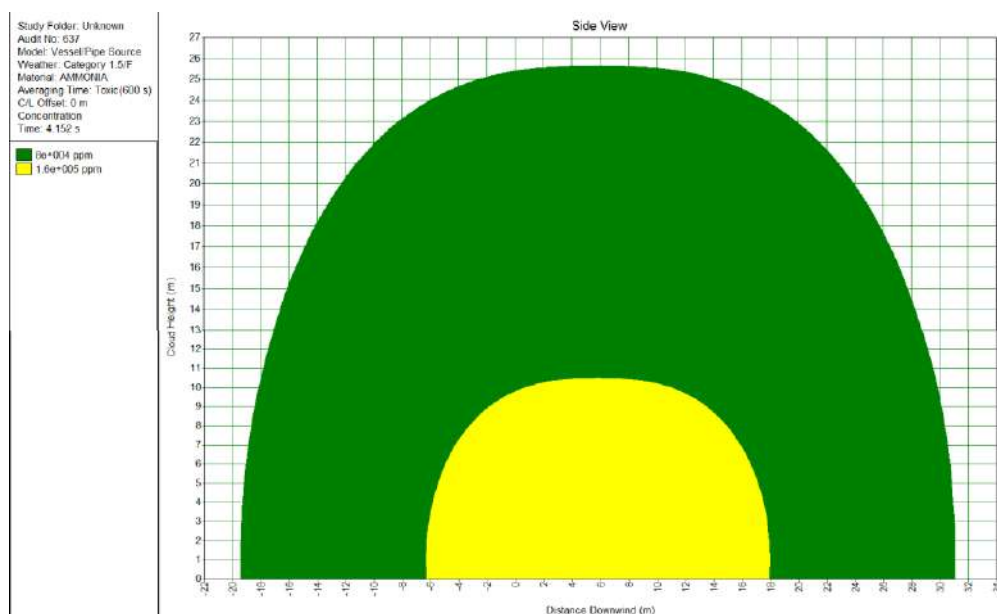


Figure II.36. Résultats du logiciel PHAST

### 3.6.3. Modèle personnalisé et liste des scénarios

- Introduire un modèle personnalisé
- Caractéristiques des modèles personnalisés
- Introduire une liste des scénarios
  - Introduire un modèle personnalisé (User Defined Source) dans l'onglet 'Model'
  - Caractéristiques des modèles personnalisés

On doit introduire les données suivantes :

- Débit
- Durée
- Vitesse
- Température

		1
Release Phase		2-Phase
Release Rate	kg/s	1E4
Discharge Velocity	m/s	224.2
Final Temperature	degC	-33.4
Duration of Discharge	s	0.001
Liquid Fraction	fraction	0.8342
Droplet Diameter	um	89.34
Pool Radii	m	
Pre-Dilution Air Rates	kg/s	
Pre-Dilution Air Masses	kg	0
Diluted Phase		LiqFrac 0.834
Diluted Temperature	degC	-33.43

Figure II.37. Définition d'un scénario personnalisé



- Introduire une liste des scénarios

Et maintenant on peut introduire les listes des scénarios s'il y a plus d'un scenario soit à partir de : Source de base ou bien données variables.

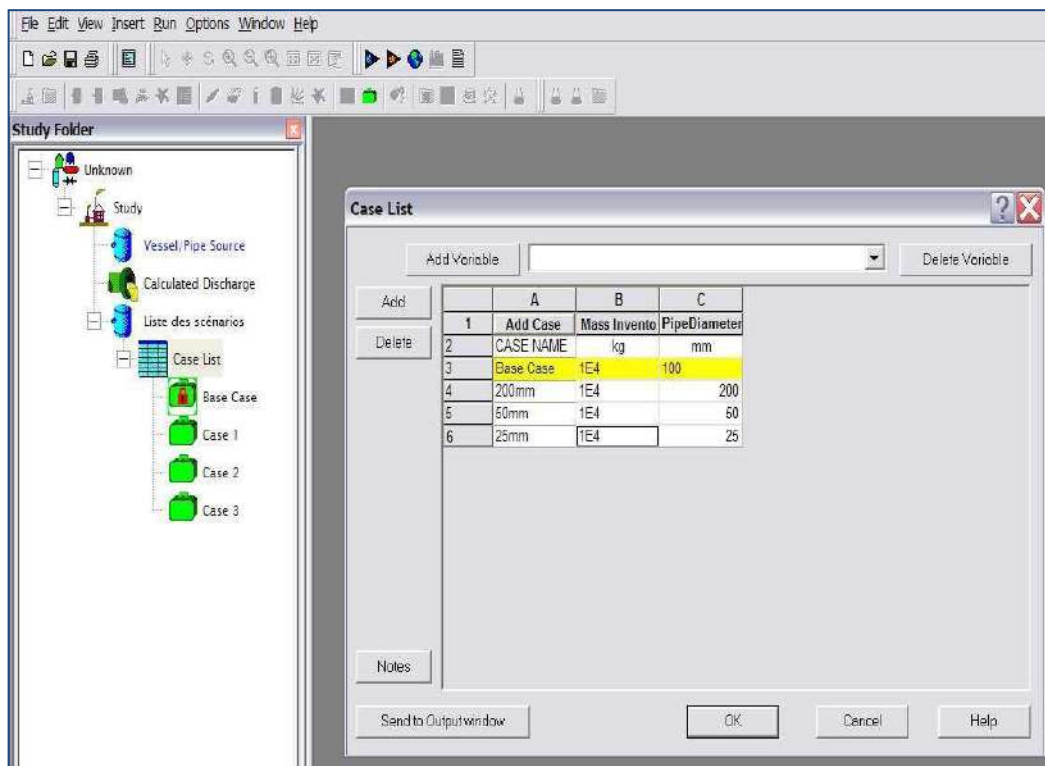


Figure II.38. Définition des données variables

#### 4. Conclusion

Globalement, les codes constituent des outils attrayants pour la simulation des risques professionnels car ils sont faciles à mettre en œuvre. Il nécessite en effet une puissance informatique relativement modeste, grâce à l'emploi d'un maillage cartésien permettant l'utilisation d'un solveur rapide.

Les concepteurs de ces codes ont cherché à mettre à la disposition des utilisateurs des outils numériques à la fois robustes et rapides. C'est la raison pour laquelle les modèles employés sont généralement simples et peu coûteux. Cette démarche pour la simulation numérique correspond au niveau de précision actuellement attendu par les utilisateurs pour traiter des problèmes d'ingénierie de la sécurité industrielle.

On a choisi trois outils destinés principalement à l'évaluation des effets des risques professionnels : la dispersion atmosphérique et l'effet thermique qui sont les principaux effets générés par les incendies, explosions et ainsi on pourra par le code FLUENT

déterminer l'effet thermique au cœur du feu et son entourage sa vitesse de réaction et bien d'autres facteur. Alors qu'avec l'utilisation du logiciel ALOHA on peut cerner les zones touchées par la pollution due à l'incendie, les zones de pression due aux ondes de choc ainsi que le dimensionnement de la boule du feu en donnant la quantité exacte du fuel consommé. En combinant les résultats des deux logiciels, on peut avoir une image approximative de la situation lors du phénomène étudié.

## Chapitre 3

# *Application des outils de modélisation numérique à un cas réel*

L'incident industriel est un sujet très préoccupant et d'actualité permanente. Il est souvent question de sinistres graves faisant parfois des victimes et causant d'importants dégâts matériels. Toutes les parties prenantes doivent être conscientes de la gravité du problème et ainsi la sécurité est devenue une des préoccupations majeures du milieu industriel. Aussi bien pour la pérennité de l'entreprise que pour son image. Il est donc nécessaire pour une entreprise d'être capable d'anticiper et de prévoir les sinistres auxquels elle est susceptible de faire face. C'est pourquoi un grand nombre d'entreprises utilise des outils de prédiction dont font partie les logiciels de simulation tels qu'EffectGIS®, Aloha®, Phast®, Fluent et bien d'autres encore.

Dans le cadre de ce document pédagogique, on a opté pour la modélisation d'un accident qui a eu lieu au terminal de Skikda, Algérie en octobre 2005, afin d'évaluer les effets qu'il a générés sur l'homme, le matériel ainsi que son impact sur l'environnement. On a également fait une comparaison entre les logiciels utilisés.

### **1. Description de l'accident**

Le 4 octobre 2005, à 10 h 00 du matin, un incendie s'est déclaré sur le bac de pétrole brut S106 au terminal de stockage de Skikda (Figure 33) et celui-ci s'est étendu plus tard au bac S105 voisin. Le "Boilover" qui s'est produit aurait éjecté la totalité du contenu du bac. Une boule de feu de centaines de mètres d'hauteur aurait été aperçue qui aurait tué tout le personnel présent à proximité.



Figure III.1. Photo réelle de la boule du feu résultant du Boilover lors de

La cuve S106 était en cours de remplissage depuis 21 h 40 la veille au soir et le niveau était de 10,72m (pour un maximum de 13m), ce qui correspond à un taux de remplissage d'environ 82.46% par rapport au volume total de 50 000 m<sup>3</sup> de la cuve. La spécification de TVR maximale est de 0.75 kg/cm<sup>2</sup> pour un bac à toit flottant. La TVR correspondant aux conditions atmosphériques du 11 octobre et celle du 13 octobre (soit 7 et 9 jours après l'arrêt) étaient respectivement de 0,91 et 0,94 kg/cm<sup>2</sup> et l'estimation du contenu en GPL était de 3 % (mol) à 0.75 kg/cm<sup>2</sup> et 5 % mol à 0.95 kg/cm<sup>2</sup>. Pour un bac, cela équivaut à une masse de 75 tonnes évaporées, le volume occupé par ce gaz à une concentration de 100% est alors de 60 000 m<sup>3</sup>. L'étude qui a été réalisée par le groupe d'experts "Richard Whitehead DNV et al." a montré que parmi les polluants émis lors de cet incendie, figurent principalement les NO<sub>x</sub> et des COV. Les logiciels proposés ; FLUENT (code CFD), ALOHA, et PHAST (modèles gaussiens) permet de suivre le profil de concentration des polluant, l'évolution de la température et la vitesse par rapport au temps ainsi que le calcul des taux de libération pour les produits chimiques échappés vers l'atmosphère.



Figure III.2. Conséquences des effets de l'incendie (DNV CONSULTING, 2005).

## 2. Modélisation par le code FLUENT

Étant donné la nature des écoulements mis en jeu, les simulations sont réalisées en supposant que le problème est instationnaires bidimensionnel. Les temps de calcul s'en trouvent considérablement réduits. Il est alors possible de comparer des simulations correspondant à différentes tailles de mailles. Le maillage est quadratique généré par le préprocesseur Gambit avec le logiciel « FLUENT » qui résout les équations de Navier Stokes par la méthode des volumes finis. L'objectif de ce travail est surtout de tester la capacité du code à reproduire les observations expérimentales (l'accident qui a eu le 4 octobre 2005 a la raffinerie de Skikda), mais il faut signaler que cette modélisation concerne le phénomène du Boilover qui avait lieu exactement le 5 octobre 2005 et qui a duré 58 s (temps de formation de la boule du feu).

### 2.1. Conditions aux limites

Les simulations numériques ont été effectuées dans un domaine correspondant au volume de contrôle allant de la position  $x=0$  m jusqu'à la position  $x=1000$  m. La source de pollution thermique (foyer de l'incendie) est graduellement limitée entre deux points inclus entre les positions 0 et 1000m. Le volume de contrôle représentant le domaine de notre étude est schématisé dans la figure 35. La simulation numérique de cette configuration utilise le maillage  $1000\text{m}\times 1000\text{m}$  uniforme présenté sur la figure 5. Le domaine s'étend sur 1000 m selon  $x$ , 1000 m selon  $y$ . La taille des mailles est de 1m selon  $x$  et  $y$ .

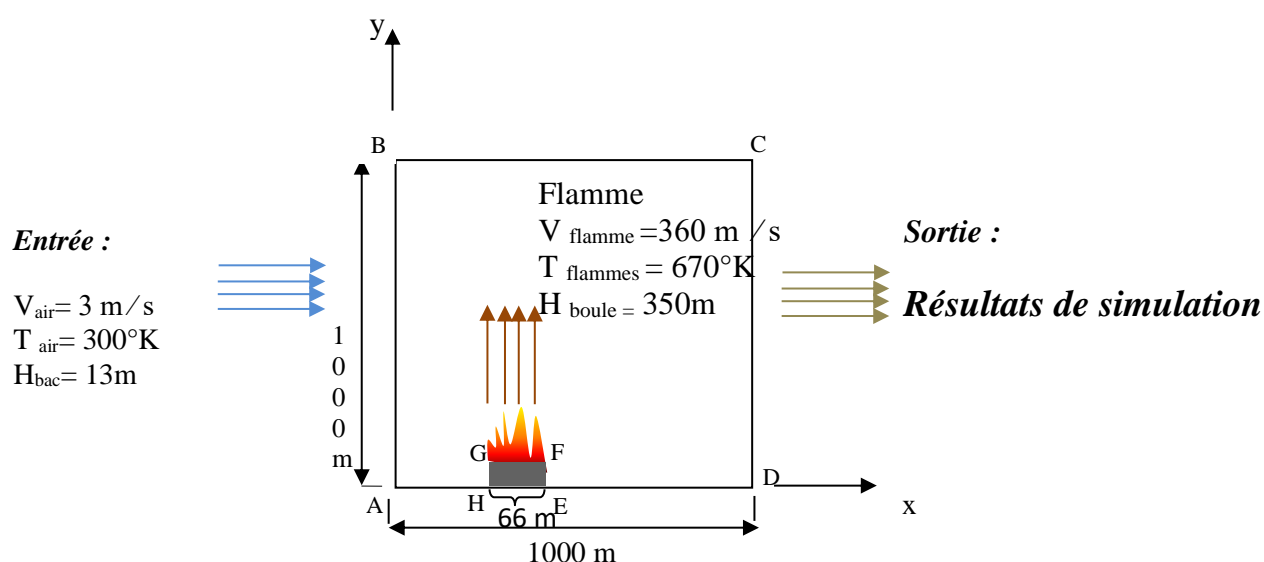


Figure III.3. Représentation schématique du domaine de l'étude.

En plus d'un maillage adéquat, les conditions aux limites sont très importantes pour obtenir une solution précise avec une convergence rapide. Ce paragraphe présente de façon succincte les conditions aux limites disponibles. Afin de définir un problème avec une solution unique, on doit fournir des informations sur les variables aux frontières du domaine. Spécifier les flux de masse, quantité de mouvement, énergie, ... etc. Définir les conditions aux limites implique :

- Identifier la position des frontières (e.g. entrées, parois, symétrie) ;
- Donner les informations sur ces frontières.

Les données dépendent du type de conditions aux limites et des modèles employé. On doit connaître l'information nécessaire aux frontières et positionner ces frontières où l'information est connue ou peut être correctement approchée. Les mauvaises conditions aux limites ont toujours un impact sur les résultats.

Les types de conditions aux limites disponibles sur le code de calculs Fluent sont comme suit :

- Types de conditions limites pour les surfaces externes : External Faces
  - General : Pressure inlet, Pressure outlet ;
  - Incompressible : Velocity inlet, Outflow ;
  - Écoulement compressible : Mass flow inlet, Pressure far-field ;
  - Spécial : Inlet vent, outlet vent, intake fan, exhaust fan ;
  - Other : Wall, Symmetry, Periodic, Axis.
- Types de conditions limites pour les cellules : Cell Boundaries.
  - Fluide et Solide.

Le logiciel « Fluent » offre la possibilité de changer le type de conditions aux limites et de régler les données suivant nos besoins (e.g. définir par des UDFs).

Les conditions limites de notre problème sont définies sur le code Fluent comme suit :

**Condition d'entrée [AB]** : On choisit le type vitesse à l'entrée : Vitesse Inlet,

- Magnitude, Normale à la frontière ;
- Les composants ;
- Magnitude et Direction.

Le profil de vitesse est uniforme par défaut. Pour les écoulements incompressibles, la pression statique s'ajuste afin de correspondre à celle de la vitesse demandée, les propriétés globales (stagnation) varient aussi et la conservation de la masse doit être vérifiée si plusieurs entrées sont utilisées. Donc, à l'entrée, on a défini une vitesse moyenne 3 m/s avec l'addition d'une perturbation de façon aléatoire.

**Condition de sortie [CD]** : De type Pression à la sortie : Pressure Outlet.

Ce type de condition est spécifiée par un niveau statique de pression, elle est interprétée comme étant la pression statique de l'environnement extérieur. Elle est utilisable avec les écoulements compressible ou incompressible. La pression est ignorée si l'écoulement est localement supersonique, peut être utilisé comme frontière libre dans un écoulement externe ou non confiné.

**Condition de paroi [DE, EF, GH, HA]** : On a choisi le type : Wall pour les parois.

Dans ce type de condition, différents paramètres peuvent être spécifiés nous citons :

- Limite (fluide/solide).

Avec les écoulements visqueux, conditions de non glissement à la paroi (enforced at walls) :

- Vitesse tangentielle de fluide égale à la vitesse de la paroi ;
- Composante normale de vitesse = 0 ;
- Le cisaillement peut être spécifié ;
- Conditions thermiques (Plusieurs possibilités), le matériau du mur et son épaisseur peuvent être définis pour des calculs de transferts ;
- La rugosité du mur peut être définie pour les écoulements turbulents ;
- Une vitesse de translation ou de rotation peut être affectée au mur.

Pour les parois de notre géométrie, nous les avons considérées adiabatiques à température constante (sans aucun transfert thermique).

**Condition du jet [FG]** : On choisit le type vitesse à l'entrée : Velocity Inlet, (Mass flow inlet).

A ce niveau, la vitesse du jet peut être définie comme étant celle de détonation (explosion), donc on a défini une vitesse moyenne approximative égale à 671,4 m/s avec l'addition d'une perturbation de façon aléatoire.

**Condition de l'atmosphère ouverte [BC]** : De type : Pressure Outlet.

## 2.2. Résultats et discussions

Étant donné la nature des écoulements mis en jeu, les simulations sont réalisées en supposant que le problème est bidimensionnel. Les temps de calcul s'en trouvent considérablement réduits. Il est alors possible de comparer des simulations correspondant à différentes tailles de mailles. Les maillages utilisés sont uniformes avec des mailles pratiquement carrées. D'après la configuration du problème. L'objectif de ce travail est surtout de tester la capacité des codes à reproduire les observations expérimentales.

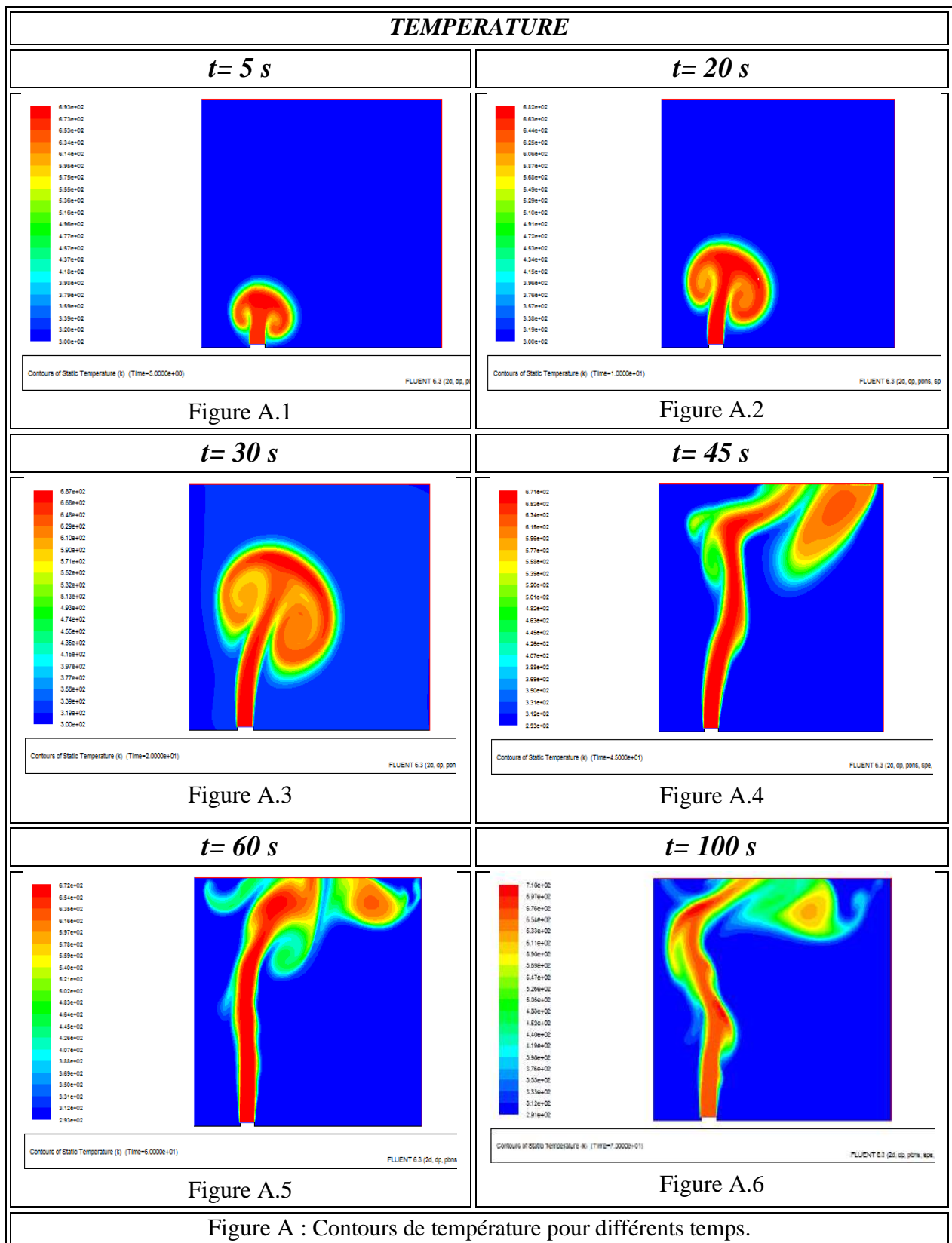
Les résultats des simulations correspondent aux valeurs moyennes sur une période d'environ 100 secondes (durée exacte de formation de la boule de feu est 58 s). Ces simulations numériques ont été effectuées avec de nombreuses simplifications qui les éloignent certes de la réalité physique d'un incendie, mais cela procède d'un double souci de généralité et de cohérence. On a donc choisi la modélisation la plus « neutre » possible. La forme et la nature de la source peuvent influencer sur les phénomènes turbulents ; on a donc choisi une simple source volumique de chaleur de forme géométrique simple. Les transferts thermiques, radiatifs notamment, dépendent fortement du combustible ; ils ont été ignorés.

### 2.2.1. Profil de température

Pour améliorer les résultats obtenus par simulation numérique avec le code FLUENT, on a opté de faire une animation en séquence vidéo du comportement thermique de l'incendie puis choisir quelques illustrations à des instants différents qui permettront de voir au plus près ce qui s'est passé dans un cas réel.

Les figures A.1, A.2..., A.6, montrent la variation bidimensionnelle de température en fonction du temps au niveau de l'accident du Skikda 2005. Par ailleurs, ces résultats numériques sont faites avec un maillage fin met en évidence un gradient de température présentant de fortes variations lorsque l'on s'éloigne du foyer d'incendie. Ces variations semblent correspondre aux zones de flamme que l'on peut situer à l'aide des dégradations des couleurs.





On y remarque la stratification de la température typique du feu avec source localisée (bac). On peut remarquer d'après l'allure du champ de température que la flamme est faiblement perturbée par l'air, puisque l'allure de la courbe est très légèrement penchée vers la droite.

L'épaisseur de la couche chaude en rouge et orange basée sur le profil de température a légèrement émincée avec le temps pour former une boule de feu ; c'est le moment de la formation du Boilover ( $t = 50$  à  $60$  s). Cette couche se décolore du rouge vif  $T \geq 690^\circ\text{K}$  du  $t = 5$  s jusqu'à  $t = 50$  s au couleur orangée après les 60s, c'est à dire après la formation de la boule du feu ou le phénomène du Boilover s'est achevé et l'incendie persiste au niveau du bac jusqu'à la consommation totale du combustible ; cette étape ne peut pas être observer dans ces simulations puisque le code FLUENT considère que la source du Butane est permanente d'où la flamme ne va pas s'éteindre. Ce qui présente un inconvénient dans le cas de l'utilisation de ce code.

Les différentes zones qu'on peut observer sont principalement :

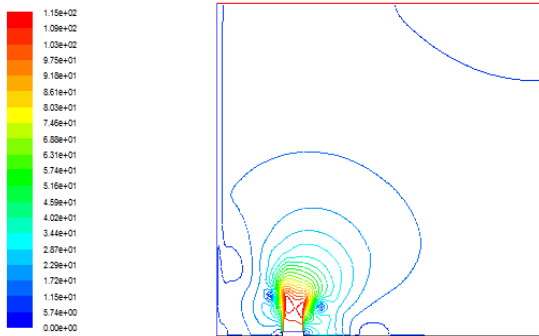
- Une zone chaude (rouge-orangée) correspondant à la base du feu avec une température entre  $690^\circ\text{K}$  et  $560^\circ\text{K}$ . C'est dans cette zone qu'a eu lieu la combustion du Butane, dont les réactions en phase gazeuse sont très exothermiques. L'écoulement réactif reste ici peu affecté par les effets aérothermiques de l'air environnant ;
- Une zone intermédiaire (jaune-vert), de plus faibles températures car plus éloignée de la surface de combustion du Butane avec des variations de températures entre  $550^\circ\text{K}$  et  $460^\circ\text{K}$ . Cette zone est un peu plus affectée par les effets aérothermiques de l'air environnant ;
- Une zone (bleu clair) de mélange avec l'air ambiant qui correspond au panache du feu. La température chute ici rapidement pour atteindre les  $450^\circ\text{K}$  à  $370^\circ\text{K}$  et l'image laisse apparaître des structures tourbillonnaires caractéristiques d'un écoulement turbulent.

### 2.2.2. Champs de vitesse et de réaction

Parmi les résultats obtenus dans cette étude, on présente ci-dessous les profils radiaux de vitesse et de réaction à la sortie du bac. Les figure B.1, B.2, ..., B.6 montre les profils de vitesse axiale de simulation au moyen du code « FLUENT » pour les temps  $t = 5$  s, 20 s, 30 s, 45 s, 60 s, 70s et de même pour les simulations qui concernent la vitesse de réaction.

VITESSE

$t = 5 \text{ s}$

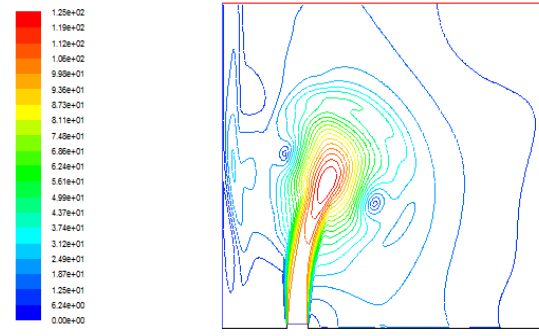


Contours of Velocity Magnitude (m/s) (Time=5.0000e+00)

FLUENT 6.3 (2d, dp, pns, s

Figure B.1

$t = 20 \text{ s}$

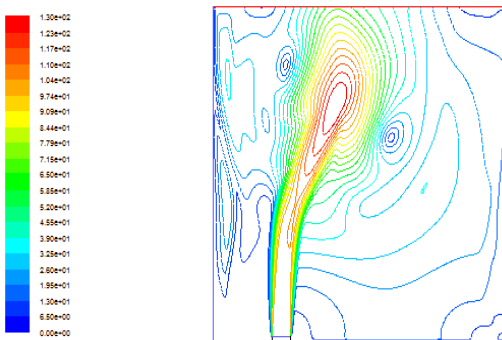


Contours of Velocity Magnitude (m/s) (Time=2.0000e+01)

FLUENT 6.3 (2d, dp, pns, spe, st

Figure B.2

$t = 30 \text{ s}$

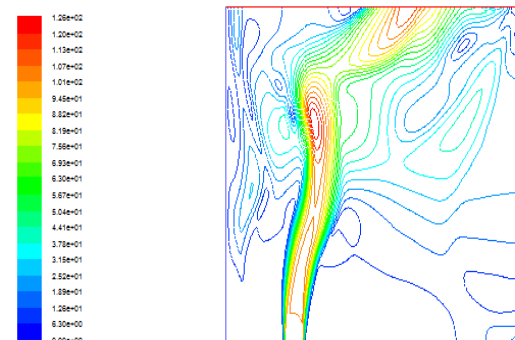


Contours of Velocity Magnitude (m/s) (Time=3.0000e+01)

FLUENT 6.3 (2d, dp, pns, spe, st

Figure B.3

$t = 45 \text{ s}$

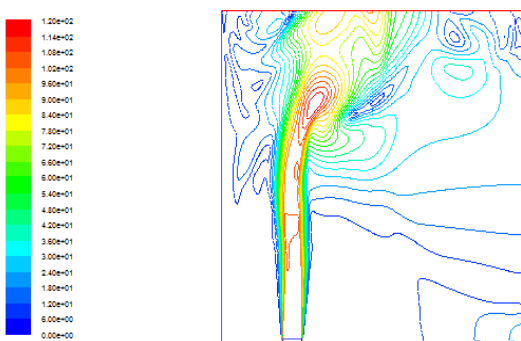


Contours of Velocity Magnitude (m/s) (Time=4.5000e+01)

Jan 12, 2009  
FLUENT 6.3 (2d, dp, pns, spe, s64, un9

Figure B.4

$t = 60 \text{ s}$

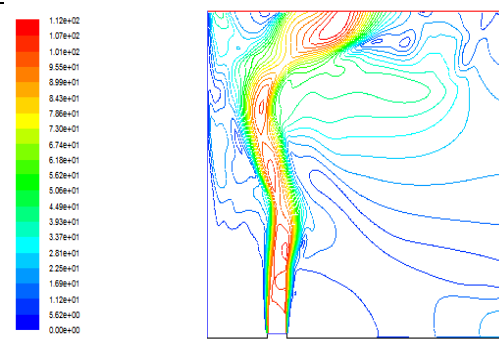


Contours of Velocity Magnitude (m/s) (Time=6.0000e+01)

FLUENT 6.3 (2d, dp, pns, s

Figure B.5

$t = 100 \text{ s}$

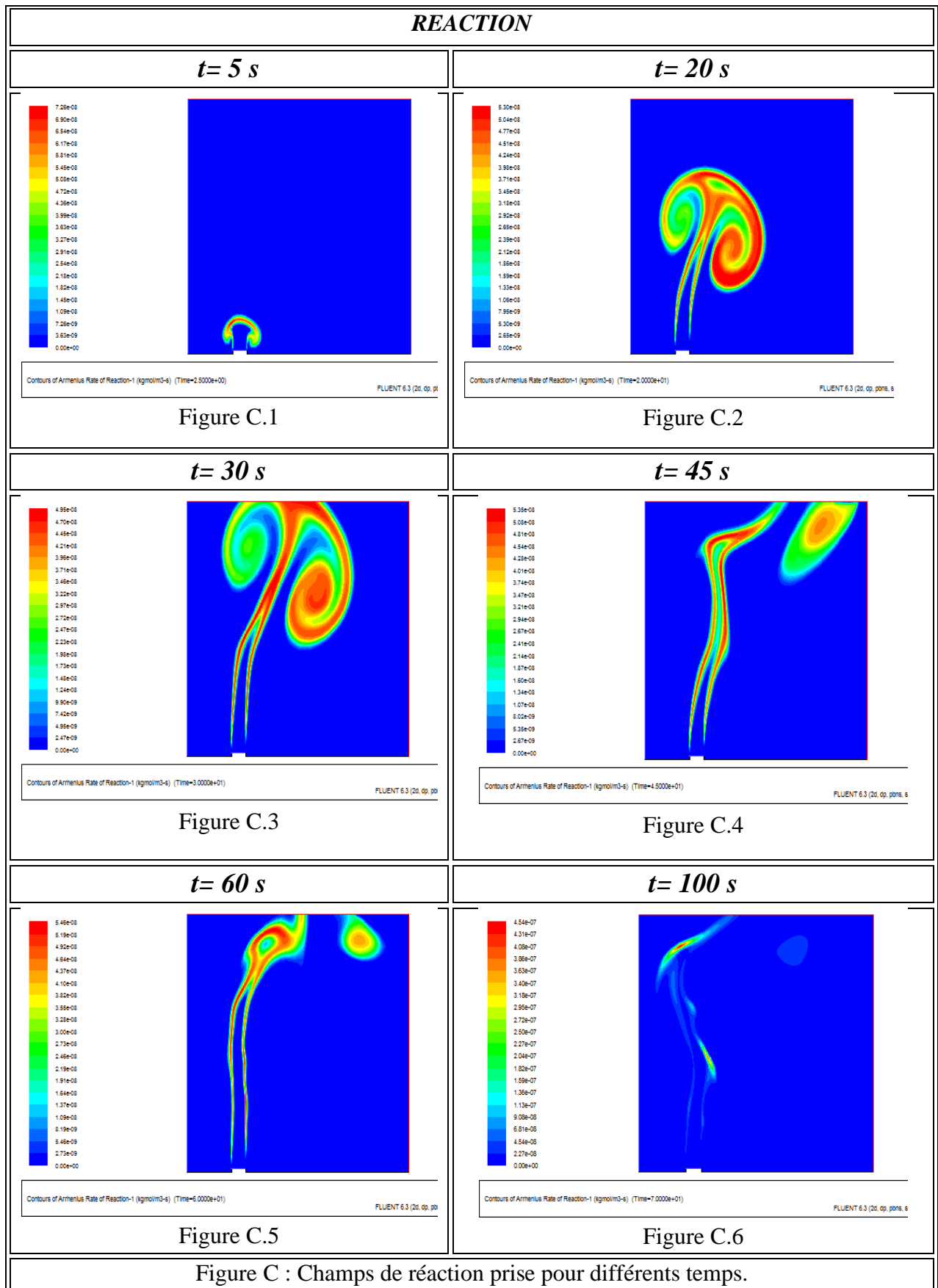


Contours of Velocity Magnitude (m/s) (Time=7.0000e+01)

Jan 18, 2009  
FLUENT 6.3 (2d, dp, pns, spe, s64, un9

Figure B.6

Figure B : Quelques images des contours de vitesse prise de l'animation (à des instants différents).



Les résultats de la simulation présentés sur les figures B.1, B.2,..., B.6 et les figures C.1, C.2,..., C.6 montrent quantitativement les profils radiaux de vitesse moyenne et les champs de réactions à différentes hauteurs et à différents temps. Les figures B.1, B.2,..., B.6 montrent tout d'abord que l'allure des profils semble correctement estimée. En particulier, les figures B.1, B.2, C.1, C.2 et C.3 montrent que, près de la sortie du bac, la simulation reproduit bien l'existence d'une couronne de gaz en réaction exothermique s'élevant très rapidement vers l'atmosphère.

Les ordres de grandeur de la vitesse axiale sont globalement en bon accord avec les mesures. On peut souligner toutefois que la vitesse ascensionnelle est légèrement sous-estimée lorsque l'on s'éloigne du foyer de l'incendie (Figure B.5 et B.6).

L'allure du profil de la vitesse entre  $t=5s$  et  $t=20s$  (Figure B.1 et B.2) est très peu influencée par le vent, puisque la vitesse de la flamme  $V \approx 360$  m/s est fortement dominante à ce niveau, mais avec l'évolution de l'incendie et l'éloignement du foyer de l'incendie, la vitesse des réactions et l'énergie dégagée diminue avec le temps, les flammes prennent de l'altitude ainsi que les forces de gravité diminuent et l'atmosphère sera influencé par les vents dominants et cela va influencer l'allure de la flamme d'où on observe son penchement vers la droite (Figure B.4, B.5 et B.6).

En ce qui concerne les figures C.1, C.2,..., C.6, on remarque que le taux de réaction augmente sur les extrémités de la flamme où il y a un mélange équilibré entre combustible et comburant ce qui favorise la combustion qui est une réaction exothermique, ce phénomène atteint son top à  $t=30s$ , après il y a une dégradation de la vitesse de la réaction jusqu'à la consommation totale du combustible et ainsi l'étouffement du feu.

### 2.2.3. Concentrations des espèces chimiques

L'ensemble des simulations présentées dans les figures (D, E, F..., L) comprennent aussi l'estimation de la concentration et les fractions de concentration de la plus part des polluants présents lors de l'incendie ( $CO_2$ ,  $SO$ ,  $SO_2$ ,  $SO_3$ ,  $SH$ ,  $NO$ ,  $HCN$ ,  $NH_3$ ) à pression atmosphérique et à une température ambiante située entre 25 et 30 °C et à une vitesse de vent quasiment nulle au niveau du sol.

**ESPECES CHIMIQUES (POLLUANTS)**

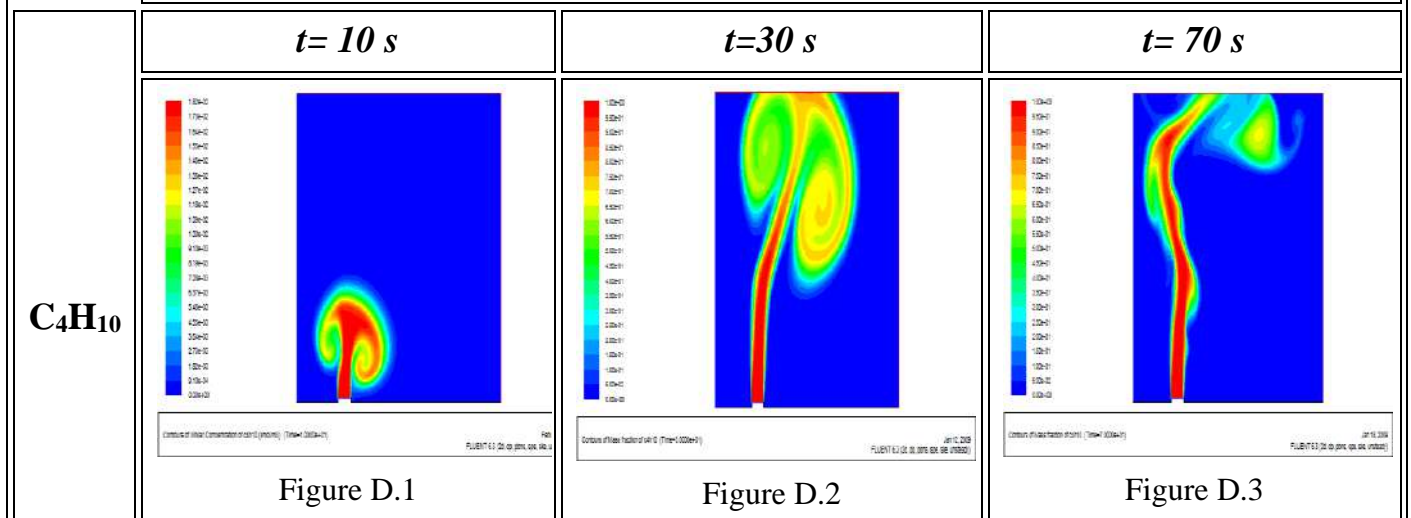


Figure D : Evolution de la concentration du C<sub>4</sub>H<sub>10</sub> dans le temps.

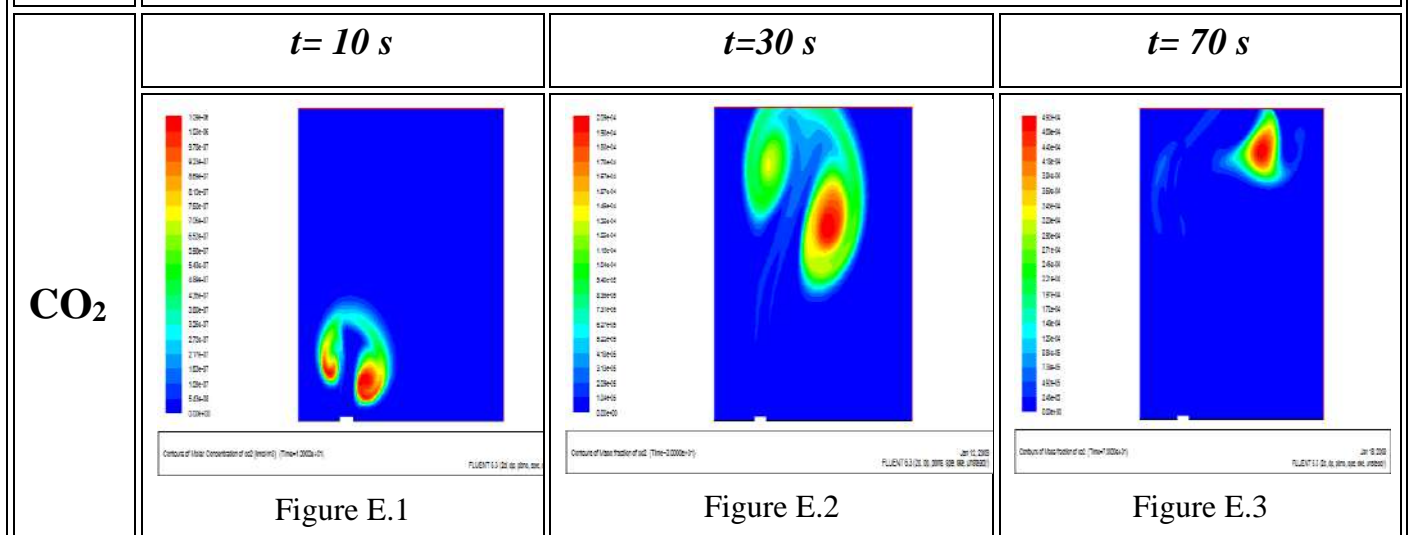


Figure E : Evolution de la concentration du CO<sub>2</sub> dans le temps.

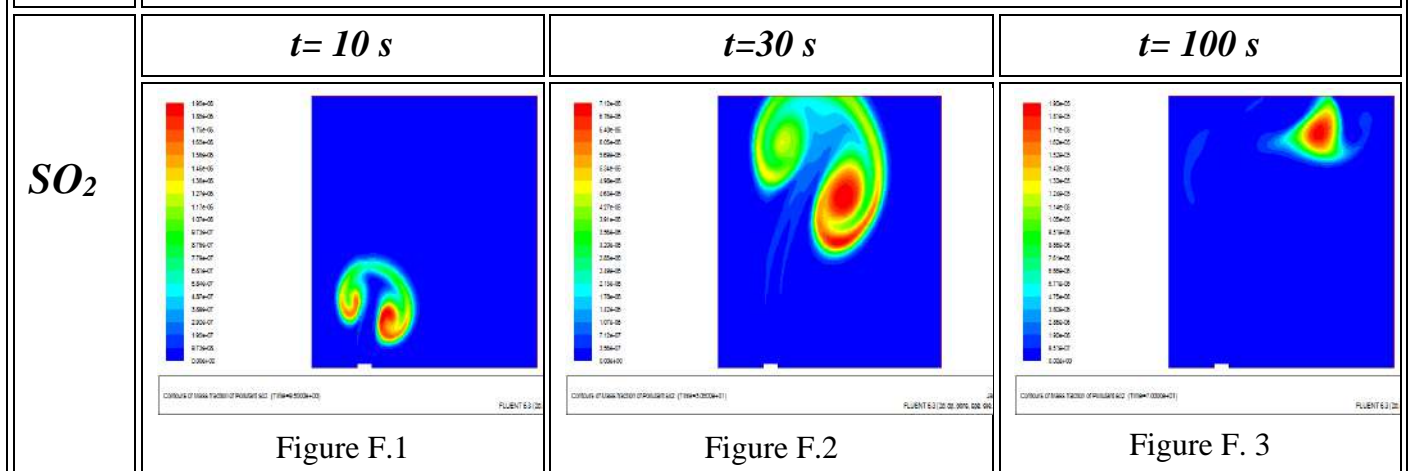
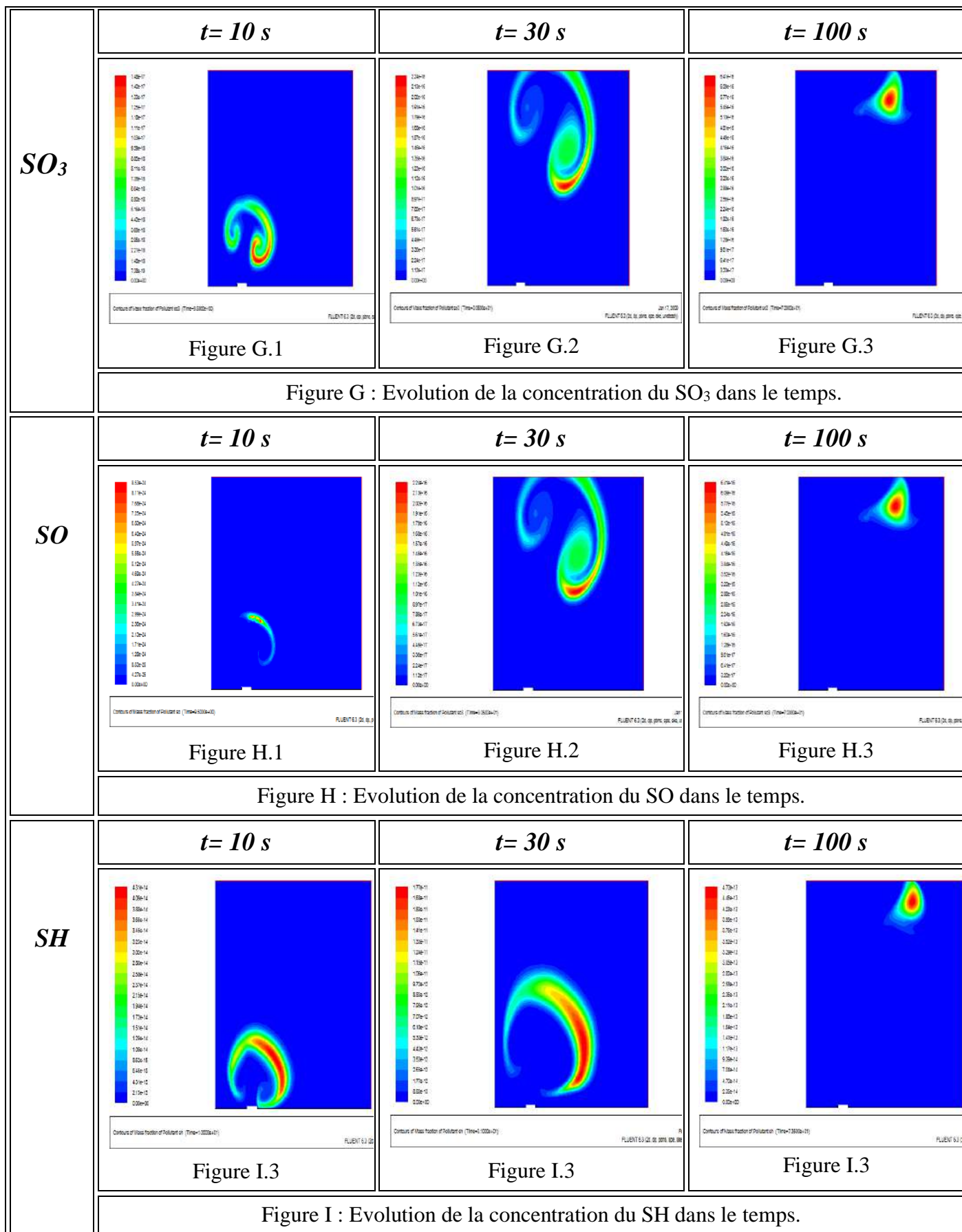
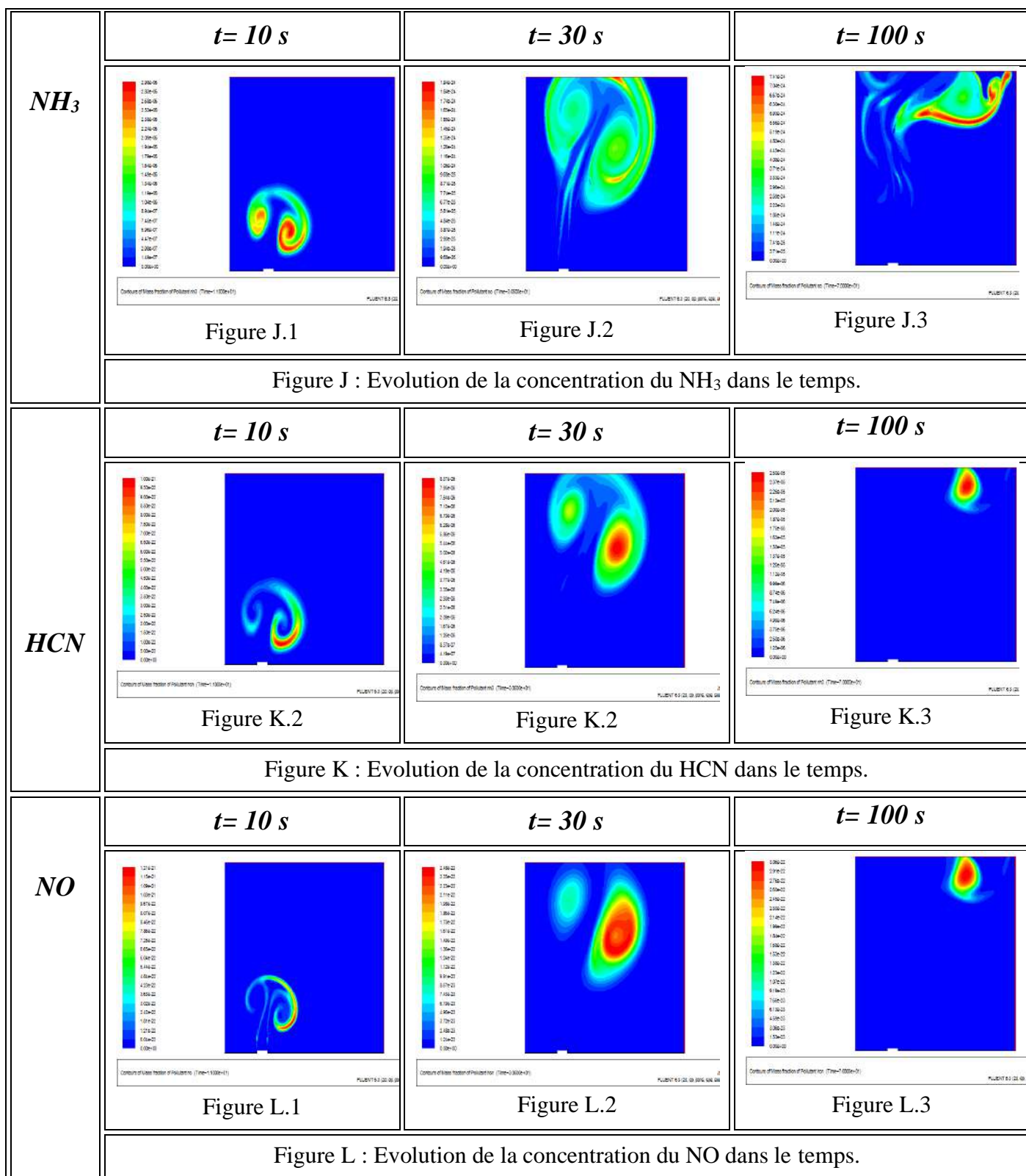


Figure F : Evolution de la concentration du SO<sub>2</sub> dans le temps.

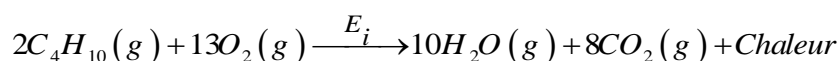




Pour la plupart des incendies, les gaz issus de la combustion sont : CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, CO et le fuel non brûlé qui est dans notre cas le C<sub>4</sub>H<sub>10</sub> dans le cas où la combustion n'est pas complète.



La réaction globale de combustion dans ce cas est :



- Les figures D.1, D.2, ..., D.6 présentent les concentrations du butane dans l'atmosphère, l'ordre maximal de concentration est de  $1.82 \times 10^{-2}$  kmol/m<sup>3</sup>, sachant que sa concentration naturelle dans l'atmosphère est presque nulle, cette évolution est due uniquement au transport du fuel non brûlé.

- Concernant les profils du CO<sub>2</sub> (Figures E), qui est un produit essentiel de la combustion, on peut remarquer que les concentrations les plus élevées se situent au niveau de la couronne où il y a une grande vitesse de réaction d'où un grand dégagement du CO<sub>2</sub> (Figure E.1 et E.2).

- Pour les composés SO<sub>x</sub>, en se référant aux figures G, H, I, et le taux de concentration de chaque élément ; SO, SO<sub>2</sub>, SO<sub>3</sub>, on peut déduire que l'élément SO<sub>2</sub> est le composé soufré le plus dégagé par l'incendie, cette déduction est basée sur sa fraction de concentration qui a pu atteindre  $1,95 \times 10^{-6}$ , alors que les autres composés soufrés n'ont pas dépassés :

$$SO = 8,53 \times 10^{-24}$$

$$SO_3 = 1,48 \times 10^{-17}$$

$$SH = 4,31 \times 10^{-14}$$

- Les figures L.1, L.2, L.3 représentent l'évolution des profils de concentration de NO en fonction du temps, combustion dégage presque exclusivement du NO, seule une faible part (< 10 %) s'oxyde à l'intérieur du foyer du feu pour former du NO<sub>2</sub>. Le reste du NO ne s'oxyde que dans l'atmosphère, pour former du NO<sub>x</sub>, ce qui entraîne la formation d'acide nitrique.

### 3. Modélisation par le logiciel ALOHA

La libération accidentelle de gaz toxique constitue un des scénarios d'accident les plus répandus. Des quantités significatives de produits rejetées peuvent entraîner la formation de nuages dangereux pour les personnes et pour l'environnement. La propagation de ces nuages dans l'atmosphère est un phénomène extrêmement complexe régi par de nombreuses variables. L'étude de la dispersion atmosphérique des nuages de gaz, afin de modéliser les conséquences et donc d'estimer les périmètres de sécurité, fait appel à des logiciels de simulation.

Pour compléter notre analyse de ce cas d'étude (accident du terminal de Skikda, 4 octobre 2005), Il existe de nombreux logiciels qui permettent de modéliser la dispersion dans l'atmosphère de divers produits chimiques et d'estimer leurs concentrations à différentes

distances de la source de rejet. Certains d'entre eux s'adressent plus particulièrement aux situations d'urgence. Nous avons choisi d'utiliser parmi ceux-ci le modèle ALOHA en raison de sa facilité d'utilisation, de la possibilité de contrôler plusieurs variables et de la possibilité de l'obtenir gratuitement auprès d'EPA.

Le logiciel ALOHA (**A**real **L**ocations of **H**azardous **A**tmospheres) est un modèle de type intégral qui permet de résoudre les équations pour un grand nombre de produits chimiques. Sa base de données sur les substances chimiques contient des renseignements sur les propriétés chimiques d'environ 1000 produits parmi les plus susceptibles d'être impliqués dans des accidents chimiques.

### 3.1. Conditions aux limites

Après avoir déterminé la localisation et le temps, on passe à la nature chimique du produit rejeté et l'état météorologique au jour de l'accident. Le scénario normalisé d'accident implique une perte totale de fuel (Butane  $C_4H_{10}$ ), sous des conditions de vitesse de vent de 3m/s, et une stabilité atmosphérique de classe C, la modélisation en milieu rurale (*open country*). On assume également que la température extérieure est de 27°C avec un taux d'humidité de 75%. Le scénario évalué tient compte uniquement des mesures de mitigation passives, les autres mesures d'atténuation du risque ou de prévention étant ignorées à cette étape.

Le logiciel ALOHA tient compte aussi des inégalités ou de la rugosité du sol. On considère généralement que plus la rugosité du sol est élevée (présence d'arbres, de maisons, d'industries, etc.) plus il y aura de turbulence et plus rapidement les gaz seront dilués dans l'air. Les concentrations dans l'air à diverses distances du déversement devraient être plus faibles. On retrouve deux classes de rugosité standardisées dans le logiciel. La première, nommée « Urban or Forest » tient compte de la présence de bâtiments ou de forêts qui correspond à une rugosité de 100 et l'autre nommée « Open country » correspond à une rugosité de 3 et représente la rugosité d'un sol plus dénudé observé généralement en zone rurale.

Ces résultats sont principalement des représentations bidimensionnelles, prises suivant les deux axes principaux (un plan YZ passant en  $X = 1000$  m et un autre XZ passant en  $Y = 1000$ m).

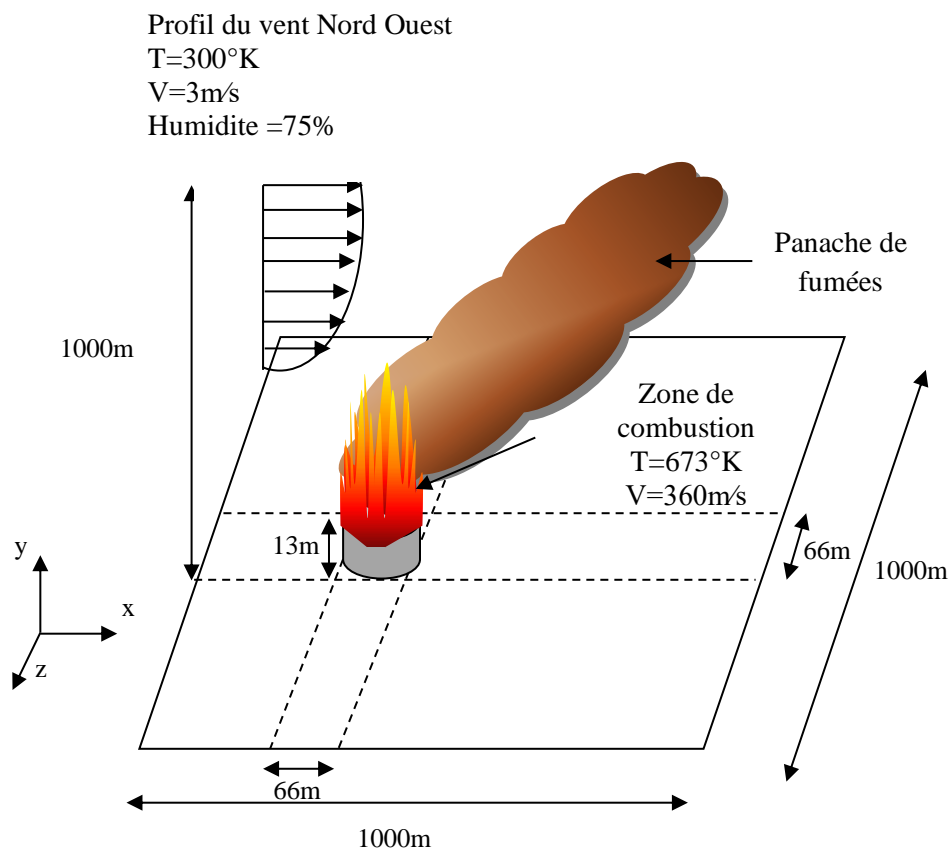


Figure III.4. Représentation schématique du problème, du domaine de calcul et du système des coordonnées utilisées dans la simulation.

La simulation faite par le code ALOHA doit commencer par la détermination exacte de l'endroit du rejet, soit en le choisissant à partir de la liste fournie par le code lui-même ou en donnant ses coordonnées (latitude et longitude et altitude), dans notre cas, le terminal de Skikda se situe à une hauteur de 00m de la mer et a  $36^{\circ}$  et  $56'$  au nord et  $6^{\circ}$  et  $57'$  à l'est.

La stabilité atmosphérique joue aussi un rôle très important sur la dispersion d'un produit chimique. La classe A indique que l'atmosphère est très instable, tandis que la classe F, au contraire, est associée à une très grande stabilité et souvent à une inversion de la température (la température augmente avec l'altitude au lieu de diminuer) qu'on observe souvent la nuit. La classe C (moyenne stabilité atmosphérique et faibles vents) fait en sorte de diminuer un peu le pouvoir de dispersion de l'atmosphère, ce qui a pour effet de générer des concentrations de produits chimiques moyennement élevées au niveau du sol et des zones d'impact plus grandes. L'étape qui suit est la détermination du type de la source du rejet, à ce niveau on trouve quatre possibilités :

- Direct : directe ;
- Puddle ;
- Tank : réservoir ;
- Gas pipeline : gaz du pipe-line

Dans notre cas on a choisi réservoir, après cette sélection, on doit fournir les caractéristiques du réservoir (un réservoir cylindrique de 66m de diamètre et 13 m de hauteur), on doit aussi déterminer la nature du fuel retenu ; gaz liquide ou mélange, ainsi que sa température, et le volume qu'il occupe lors de l'accident, dans notre cas il présentât 70% du réservoir.

Dans l'étape suivante, on doit déterminer le scénario de l'accident : un jet des substances non brules, brules ou un phénomène de BLEVE.

### 3.2. Résultats et discussions

Les résultats obtenus donnent une idée de l'étendue potentielle des impacts et ne doivent être utilisés qu'à titre indicatif dans un contexte de situation d'urgence.

Évidemment, ces résultats ne s'appliquent qu'à la situation théorique définie par les paramètres que nous avons choisis. Les résultats des diverses modélisations à partir du scénario de l'accident qu'on a décrit plus haut sont présentés ci-dessous :

- Les zones d'impact calculées en fonction des valeurs de référence toxicologiques (TEEL1, TEEL2 et TEEL 3) ;
- Le déplacement du nuage toxique en fonction du temps.

Pour illustrer ces résultats, on a utilisé comme exemple divers relâchements impliquant du Butane.

#### 3.2.1. Modélisation du gaz évaporé avant l'accident

Le témoignage du gardien DSP du terminal a formellement identifié le bac S106 comme étant la source du nuage de gaz, étant donné qu'il a vu, après l'ignition, un retour de flamme vers le haut du bac. Le bac était en cours de remplissage et plein à environ 70%. Le remplissage avait commencé la veille à 21h40 et s'effectuait à un débit de 2400 m<sup>3</sup>/hr.

Les bacs à toit flottant ne sont pas conçus pour contenir autant de gaz et après que le gaz se soit évaporé, les conditions étaient telles qu'un nuage s'est accumulé côté sud-est du bac, au niveau de la route. Des estimations indiquent qu'un débit de gaz entre 1 et 4kg/s s'évapore lors du

remplissage. Ce matin-là, le gardien a affirmé qu'il n'y avait quasiment pas de vent. Des calculs de dispersion du gaz ont été effectués en utilisant le logiciel ALOHA et il apparaît clairement qu'avec des conditions de vent très faible, le gaz ne se serait pas dispersé et se serait accumulé au niveau du sol.

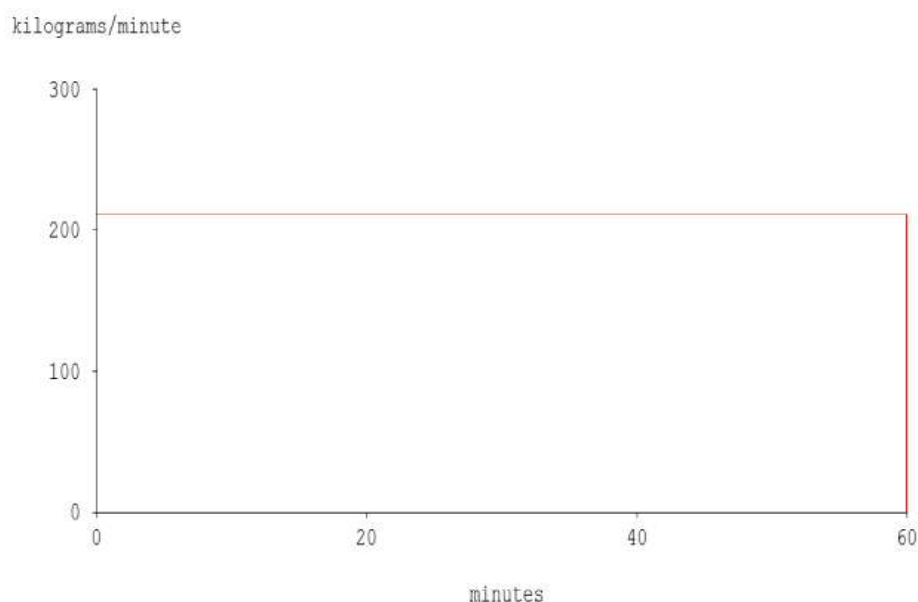


Figure III.5. Le débit de la source du rejet dû à la fuite pendant une durée ne dépassant pas 60 minutes.

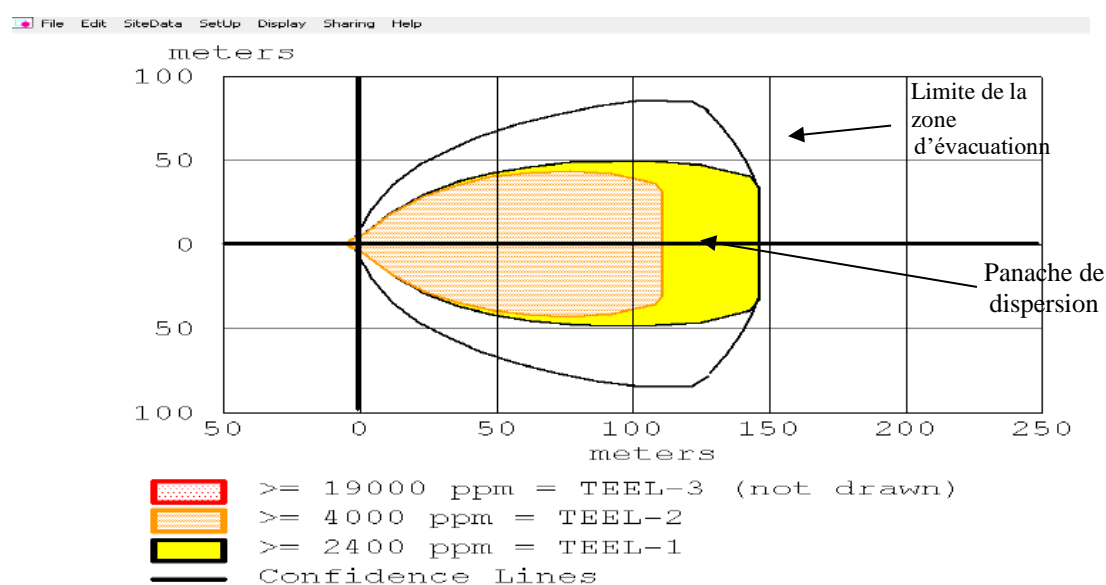


Figure III.6. Concentration du polluant en ppm dans les régions touchées

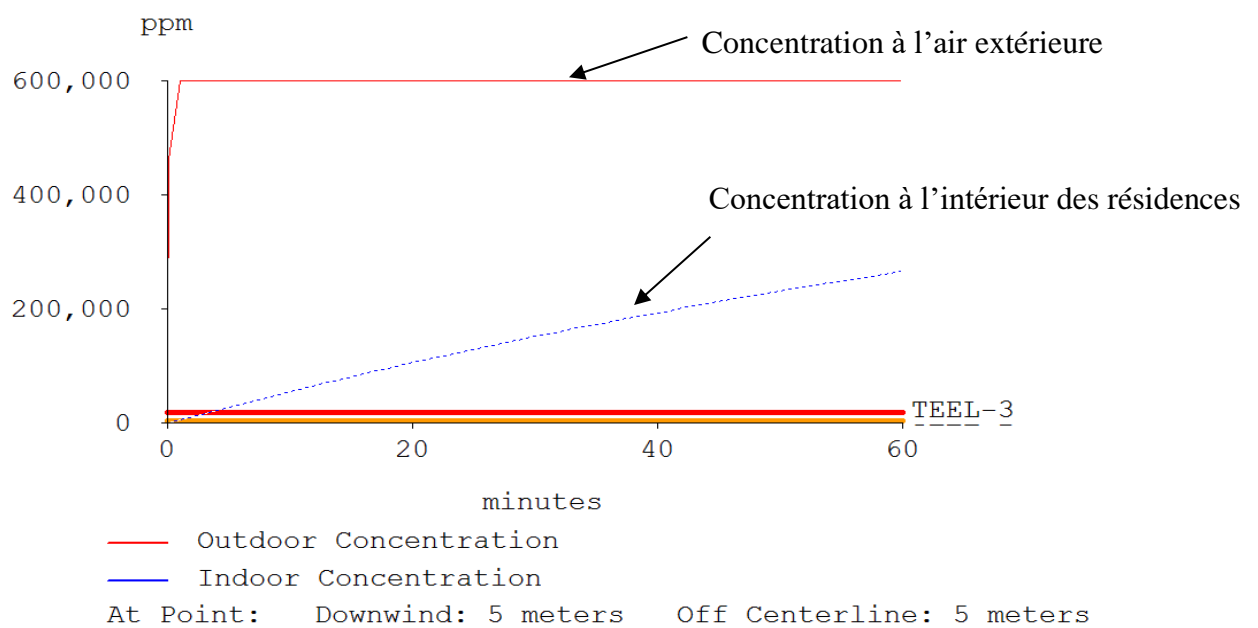


Figure III.7. Concentration du polluant au point (5m, 5m).

Dans la Figure III.6, ALOHA simule les trois zones menacées par la dispersion du gaz. ALOHA estime que la zone en orange qui occupe environ 110m en aval, les valeurs de cette menace et les distances sont affichée sur la Figure III.7.

### 3.2.2. Modélisation après l'accident

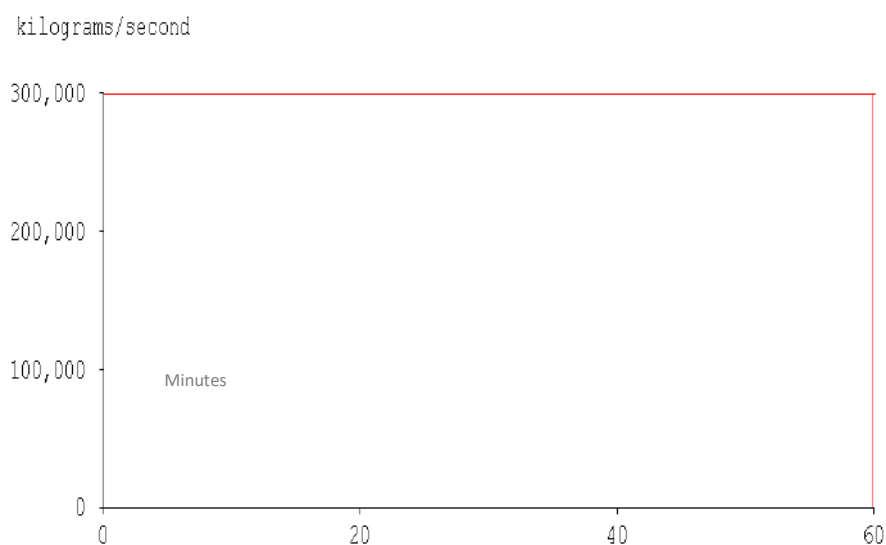


Figure III.8. Débit de la source du rejet lors de l'accident

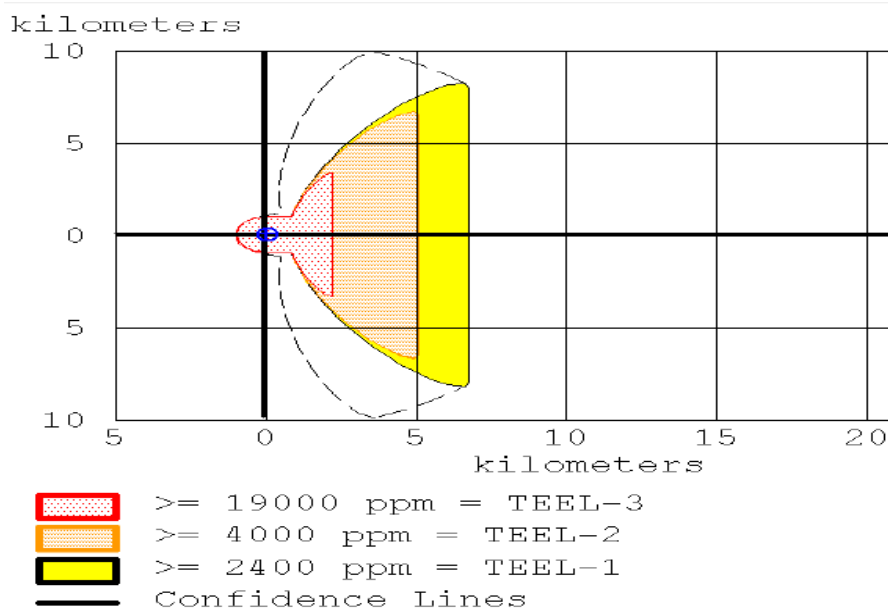


Figure III.9. Concentration du polluant en ppm dans les régions touchées.

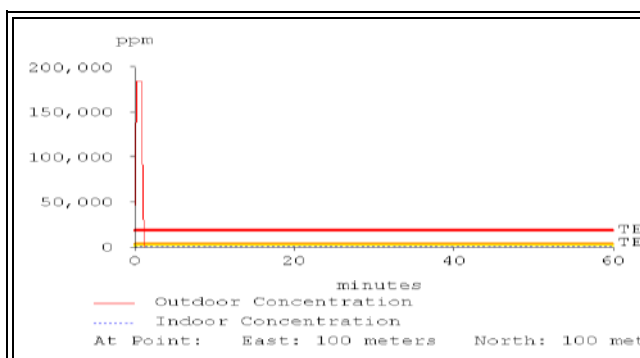


Figure III.10. Concentration du polluant au point (100m, 100m)

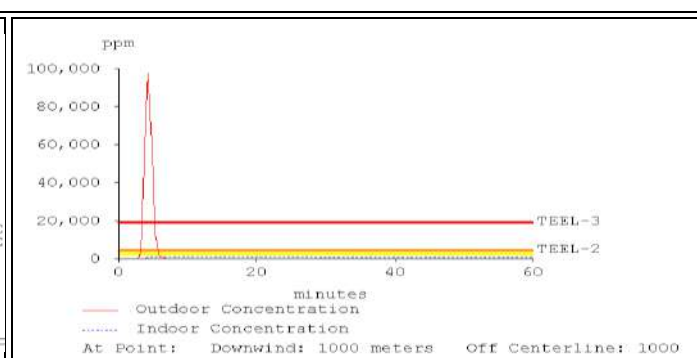


Figure III.11. Concentration du polluant au point (1000m, 1000m)

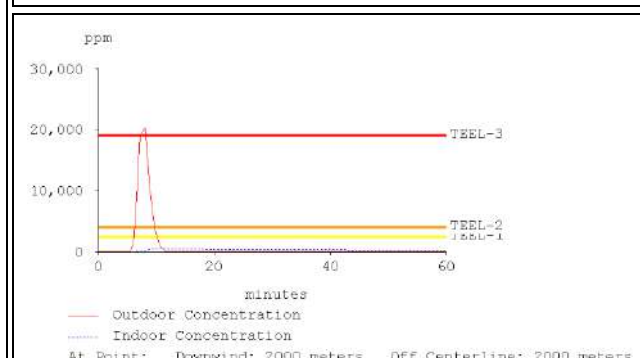


Figure III.12. Concentration du polluant au point (2000m, 2000m)

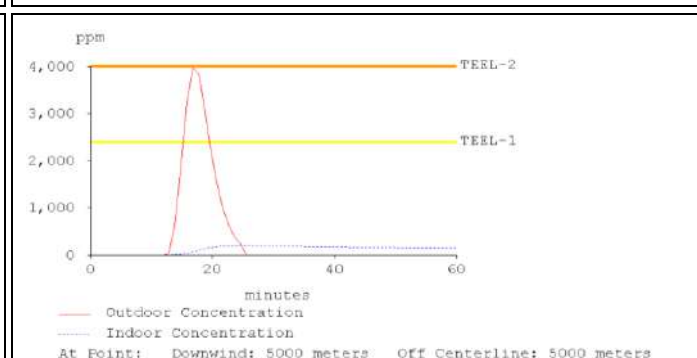


Figure III.13. Concentration du polluant au point (5000m, 5000m)

Tableau 2 : Modélisation de la dispersion des polluants

Le tableau 2 présente les zones menacées par la pollution due au butane qui peut atteindre une concentration maximale de 19000ppm sur une distance de 2000 m de la source, puis diminuer à 4000 ppm sur une distance de 5000 m pour atteindre les 2400ppm sur les deux kilomètres qui suivent.

Les figures III.8-13 illustrent le déplacement du nuage suite à un relâchement accidentel. Il présente les concentrations estimées de Butane (en ppm) dans l'air extérieur en fonction du temps (de 1 à 60 minutes). Pour cet exemple, le déversement se fait de façon continue pendant une période non déterminée par ALOHA (puisque'elle dépasse les 60 minutes) avec un débit de 300000 kg par minute.

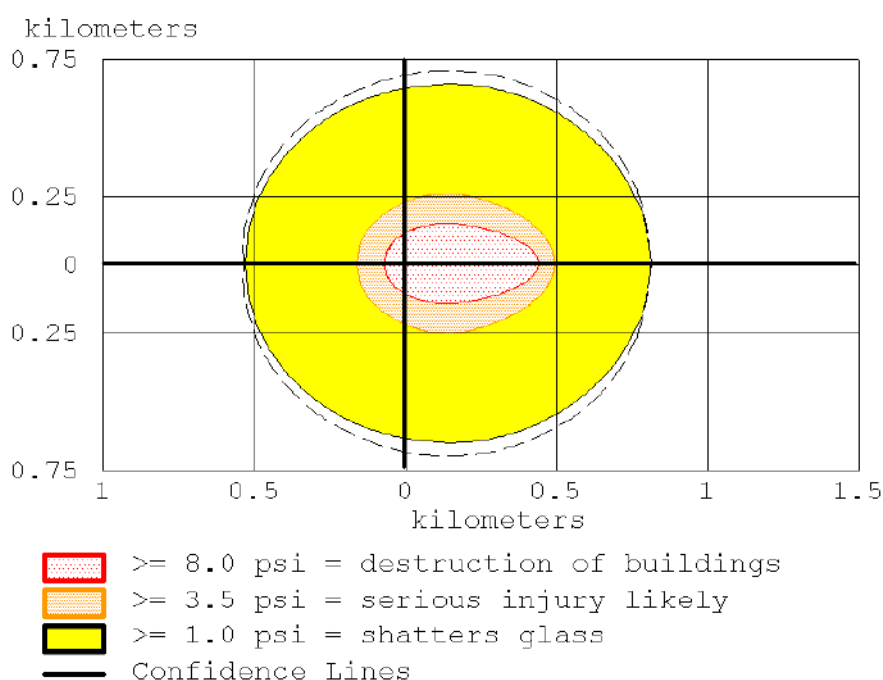


Figure III.14. Les zones menacées par les surpressions

On peut voir qu'après la 5<sup>ème</sup> minute, que le butane peut être détecté à une distance de 1000 mètres du point de relâchement, le nuage s'étend jusqu'à une distance de 2000 après 10 minutes, avec un taux de 20000 ppm, pour atteindre une concentration de 4000ppm a une distance de 5000m et cela après 20 minutes.



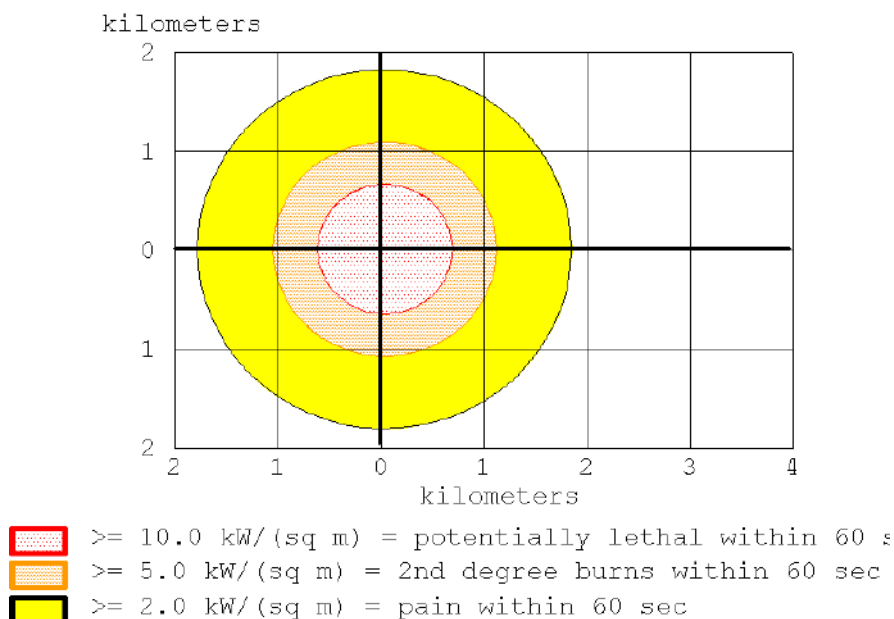


Figure III.15. Les zones menacées par les effets thermiques

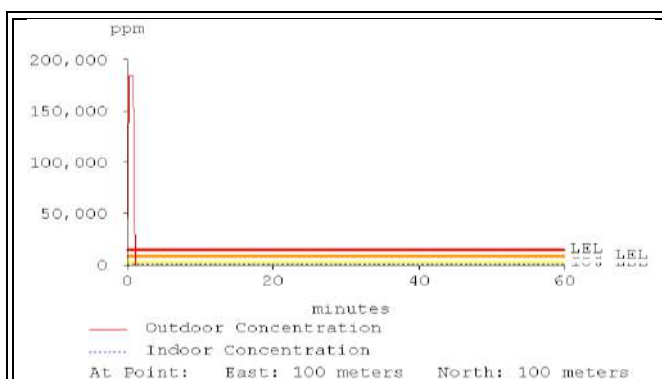


Figure III.16. Concentration des effets thermiques au point (100m, 100m)

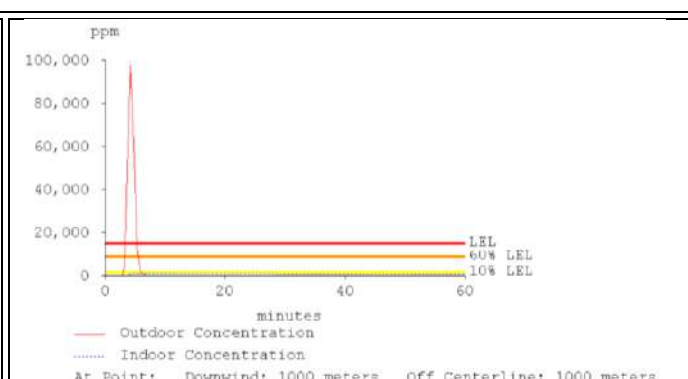


Figure III.17. Concentration des effets thermiques au point (1000m, 1000m)

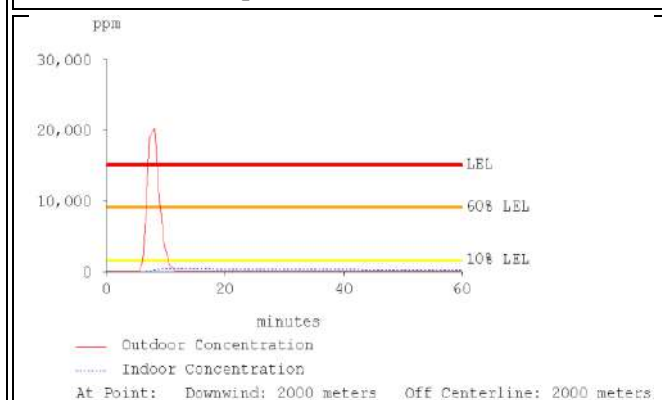


Figure III.18. Concentration des effets thermiques au point (2000m, 2000m)

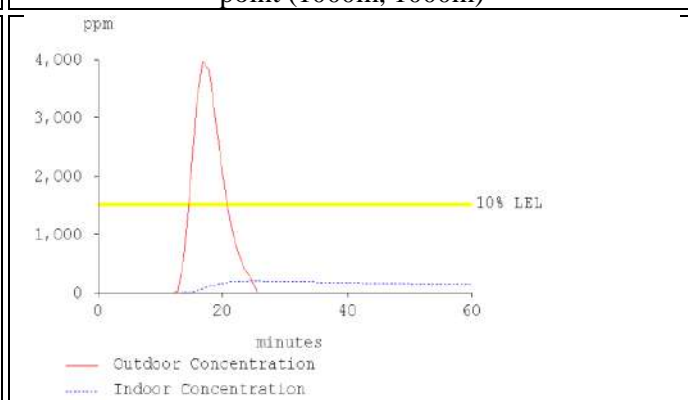


Figure III.19. Concentration des effets thermiques au point (5000m, 5000m)

Tableau 3. Modélisation des effets thermiques

Le tableau 3 modélise les menaces thermiques sur les régions avoisinantes, la figure 46 illustre les différentes régions à des différents niveaux de surpression due à l'onde de pression du

phénomène de Boilover, cette surpression a atteint 8psi sur un périmètre de 200 m (zone rouge) ce qui a provoqué la destruction des constructions de cette zone. Une zone orange où la surpression atteint 3.5 psi, cette zone est caractérisée par des atteintes sérieuses au niveau des biens. Alors que la zone jaune avait un taux de surpression égale à 1psi et à ce niveau les atteintes se limitent aux destructions des verres.

Le tableau suivant nous permet de faire une comparaison entre les résultats des simulations de la dispersion du polluant et les effets thermiques :

Scenario	Dispersion des polluants	Radiation thermiques
Menace modélisée	Toxicité	Effets thermique
Zone menacée de couleur rouge	2500m	500 m
Zone menacée de couleur orange	5000 m	1100 m
Zone menacée de couleur jaune	6800 m	1800 m

Tableau 4. Comparaison entre les résultats de la modélisation thermique et la dispersion des polluants.

ALOHA estime que la zone toxique en rouge présente le niveau de risque le plus élevé, elle s'étend principalement dans la direction de vent d'environ 2500 m, alors que la zone représentant les effets radiatifs se prolonge d'environ 500 mètres dans toutes les directions (diamètre de la boule de feu qui est à son top après 60 secondes) et un peu plus loin en aval. Cela nous permet de conclure que le vent joue un rôle dans les deux scénarios. La menace toxique se limite principalement à la région en aval de la sortie, et même si la menace rayonnement thermique se produit dans toutes les directions, il est trop décalé en aval du jet.

ALOHA, ne tient pas compte de certains facteurs qui agissent sur la dispersion dans l'air comme la dispersion verticale du produit ou son élimination naturelle suite aux réactions chimiques complexes qui peuvent avoir lieu dans l'atmosphère. Pour cela, on propose d'utiliser un autre simulateur qui est le code « PHAST ».

## 4. Modélisation par le logiciel PHAST

La modélisation des effets d'un phénomène accidentel comprend trois composantes, à savoir les modélisations du « terme source », de la « propagation » de cette source dans l'environnement et l'effet sur les « cibles » (Pagnon, 2012).

La dispersion atmosphérique d'un produit rejeté accidentellement dépend essentiellement (Couillet, 2002) :

- Des caractéristiques de la source d'émission (énergie cinétique, direction du rejet, densité du produit rejeté, durée de la fuite, conditions de la fuite...).
- Des conditions météorologiques comme la vitesse du vent, la stabilité de l'atmosphère, l'hygrométrie, la température ambiante.
- Des conditions de relief et de la présence d'obstacles.

Le logiciel, commercialisé par DNV Software, est largement utilisé dans l'industrie pour l'estimation des conséquences d'accidents. Il permet de modéliser différents types de termes sources, ainsi que la dispersion du nuage.

Le modèle unifié de dispersion (UDM) qui est utilisé dans le logiciel PHAST permet de simuler la dispersion d'une fuite pressurisée en phase liquide et/ou gazeuse, au niveau du sol ou en hauteur. En effet, il est composé des modules liés suivants (Pandya, 2009) :

- Dispersion d'un jet turbulent.
- Évaporation et déposition au sol des gouttelettes.
- Formation et vaporisation de nappes de liquide.
- Dispersion de gaz lourds (p. ex., dispersion d'une fuite de GNL).
- Dispersion passive

### 4.1. Description d'un accident

A la suite d'un "incident technique", une éruption incontrôlée avec feu est survenue le vendredi 15 septembre 2006 à 15h50 mn, dans la région de Gassi-Touil sur le puits NEZLA 19, en cours de forage, indique un communiqué de l'entreprise Sonatrach. "L'incident a fait malheureusement des victimes parmi l'équipe de forage".

#### 4.1.1. Incendie après importante déflagration

L'incendie survenu dans la plate-forme du forage gazier Nezla 159 de Gassi Touil a tué deux personnes sur le coup et a fait six blessés. Dans cette zone de production située à 130 km de Hassi Messaoud se déroulaient des travaux de forage en partenariat entre Sonatrach et la compagnie pétrolière espagnole Repsol quand le feu s'est déclaré suite à une importante déflagration. L'explosion a provoqué une éruption du puits dégageant une flamme de 50 à 60 m de hauteur, selon la Protection civile de Ouargla. La première intervention effectuée par les services de sécurité de Sonatrach aurait permis de dégager les baraques d'habitation proches du lieu de l'incident ainsi que les citernes de carburant afin d'éviter la propagation du feu. Le périmètre de sécurité du puits est de 1600 m à la ronde.

#### 4.1.2. Les données d'accident

La modélisation des effets du scénario étudié avec le logiciel PHAST nécessite en données d'entrée différents éléments concernant l'accident dont : caractéristiques de la source d'émission, des conditions météorologiques, des conditions de relief et de la présence d'obstacles.

##### 4.1.2.1. Caractéristiques du terme source

Le logiciel PHAST peut modéliser différents types du terme source, et dans notre cas on a utilisé le type « rupture catastrophique » caractérisé par les paramètres présentés dans le tableau suivant :

Paramètre	Valeurs
Quantité rejetée	30 m <sup>3</sup>
Phase rejetée (gazeuse ou liquide)	Gaz
Température	35° C
Pression	200 bars
Composition du produit	Méthane
Diamètre de la brèche	50 cm

Tableau 5 : caractéristiques du terme source

#### 4.1.2.2. Conditions météorologiques

Ces simulations se font sous des conditions de vitesse de vent de 3 m/s et une stabilité atmosphérique de classe C, la température extérieure été 35°C.

Le logiciel PHAST tient compte aussi des inégalités ou de la rugosité du sol, dans ce cas, on considère généralement que la rugosité du sol est plus faibles, plus dénudé puisque c'est une zone rurale.

### 4.2. Résultats et discussion

PHAST calcule automatiquement les différentes étapes (formation éventuelle d'une flaque, dispersion des vapeurs, ...) propres au déroulement d'un accident type. PHAST utilise les propriétés thermodynamiques issues de la banque de données DIPPR (Design Institute for Physical Properties) des produits et il détermine lui-même, en fonction des conditions de pression et de température, les caractéristiques de l'écoulement du fluide ; que ce soit un débit liquide, gazeux ou biphasique.

#### 4.2.1. Modélisation de la dispersion

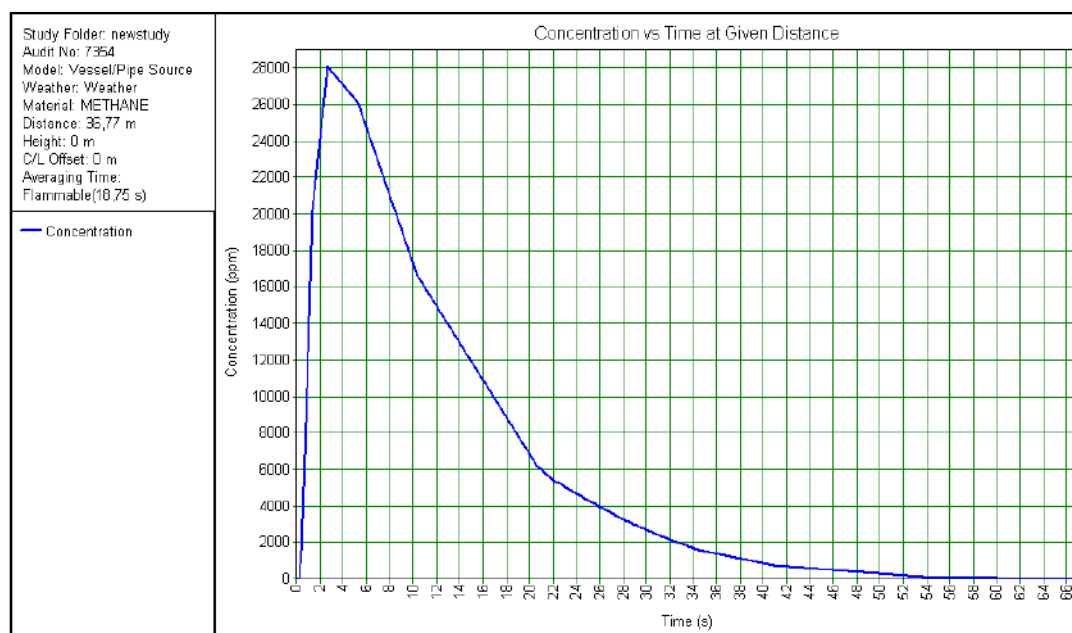


Figure III.20. Concentration du polluant en ppm par rapport au temps

Ce résultat (Figure III.20) est obtenu à une distance de 37 m à la source d'accident. On constate la rapidité d'augmentation de concentration de polluant à cette distance de source 28000 ppm pendant deux secondes.

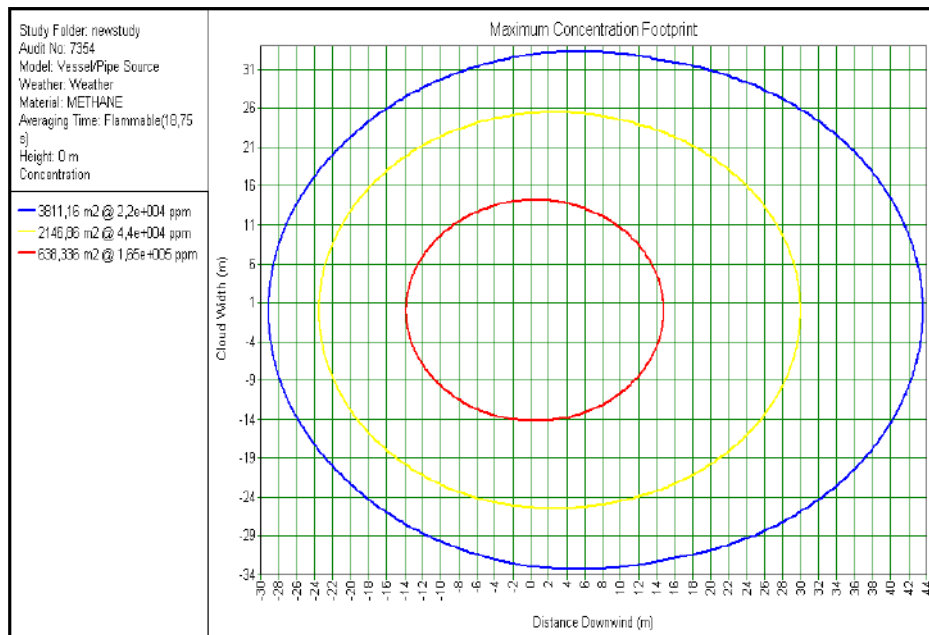


Figure III.21. La concentration du polluant en ppm par rapport à la distance

Le résultat dans la figure III.21. montre les zones touchées par le polluant pendant un temps de 18.75 seconds.

#### 4.2.2. Modélisation des effets thermiques

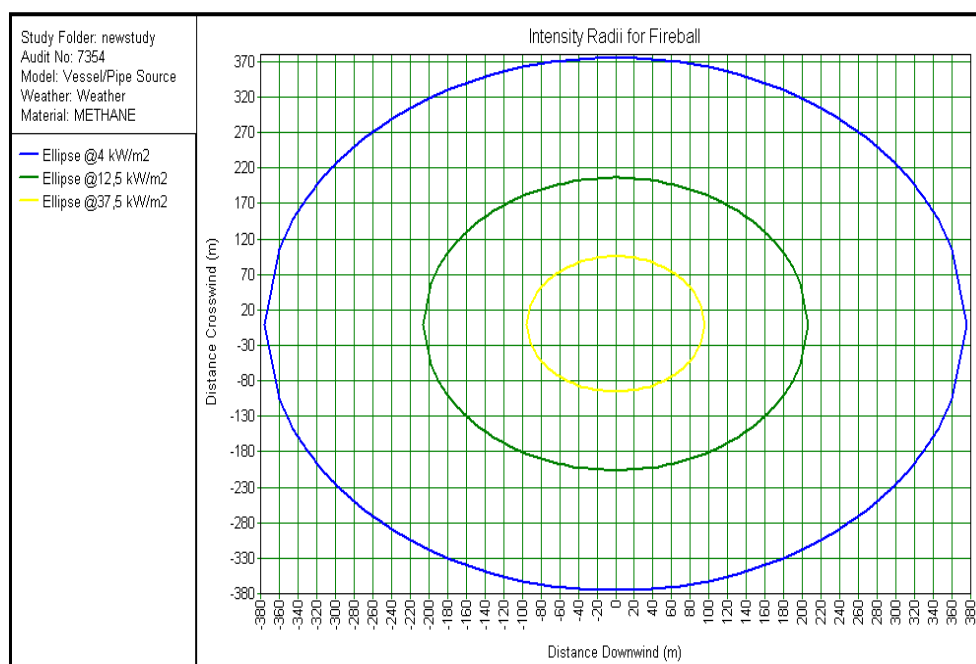


Figure III.22. Les zones touchées par les radiations thermiques

D'après le résultat de la figure 45, on remarque que les radiations thermiques atteignent à une distance de 380 m à la source, alors la distance de sécurité commence à partir cette valeur.

### 4.2.3. Modélisation des effets de surpression

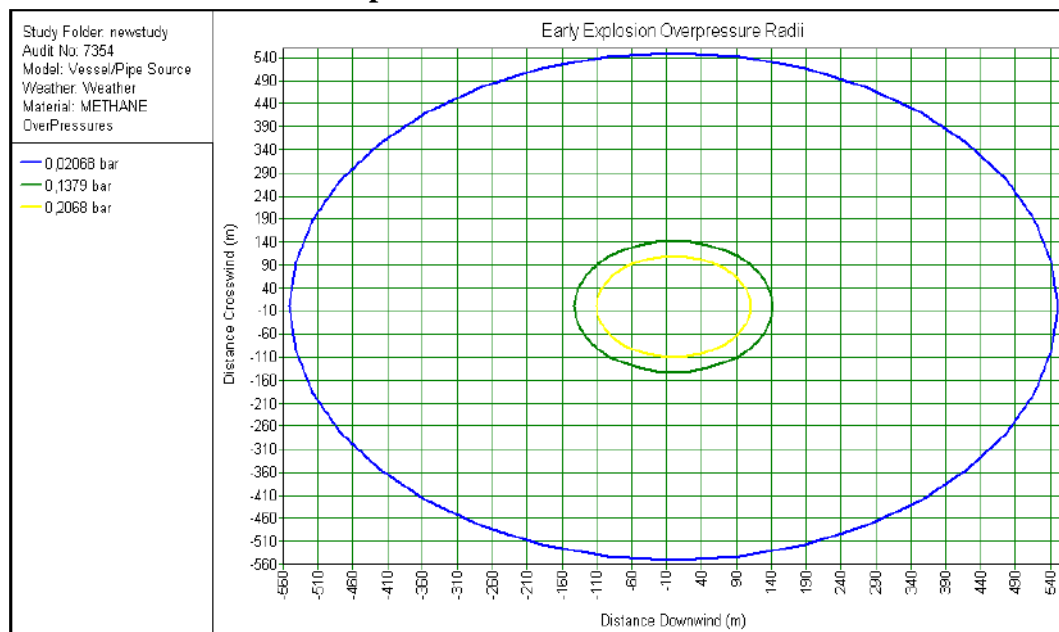


Figure III.23. Les zones touchées par les ondes de pression

La figure III.23 montre que les effets de surpression peuvent toucher la zone dont la distance de 540 m à la source, c.-à-d. la distance de sécurité est de 540 m à la source.

## 5. Conclusion de l'étude de cas

Dans le domaine l'incendie, il existe un grand nombre de logiciels dédiés à l'étude des différents phénomènes d'incendie, en commençant par son ignition (flamme) jusqu'à l'évacuation et la prédiction des pertes probables. Les outils numériques utilisés dans le cadre du présent travail ont été présenté dans le chapitre II.

Pour le code PHAST, en cas d'accident majeur, puisque la partie le plus onéreuse est placée juste au-dessus de centre de puits et le reste est placé à 10 Mètre de centre de puits, ce que signifie que la perte économique peut atteindre à 25 millions USD, n'oublier pas la présence permanente des operateurs

Globalement, ces codes constituent des outils attrayants pour la simulation des incendies car ils sont faciles à mettre en œuvre. Il nécessite en effet une puissance informatique relativement modeste, grâce à l'emploi d'un maillage cartésien permettant l'utilisation d'un solveur rapide.

Les concepteurs de ces codes ont cherché à mettre à la disposition des utilisateurs des outils numériques à la fois robustes et rapides. C'est la raison pour laquelle les modèles employés sont généralement simples et peu coûteux. Cette démarche pour la simulation numérique correspond au niveau de précision actuellement attendu par les utilisateurs pour traiter des

problèmes d'ingénierie de la sécurité contre l'incendie.

Notre choix était principalement basé sur les phénomènes modélisables par ces deux outils ; la dispersion atmosphérique et l'apport de chaleur qui sont les principaux effets générés par les incendies et ainsi on pourra par le code FLUENT déterminer l'effet thermique au cœur du feu et son entourage sa vitesse de réaction et bien d'autres facteurs.

Alors qu'avec l'utilisation du logiciel ALOHA on peut cerner les zones touchées par la pollution due à l'incendie, les zones de pression due aux ondes de choc ainsi que le dimensionnement de la boule de feu en donnant la quantité exacte du fuel consommé.

En combinant les résultats des trois logiciels, on peut avoir une image approximative de la situation lors du phénomène étudié.



# Chapitre 4

## Exercices d'application

### 1. Exemples généraux et étapes à suivre

#### Exemple 1 : Scénario de déversement de gaz toxique

Imaginez qu'il y ait une fuite de gaz toxique, comme du chlore, dans une usine chimique. Vous devez utiliser ALOHA pour modéliser la dispersion de ce gaz et déterminer les zones potentiellement touchées.

1. Spécifiez les caractéristiques de la fuite, telles que la quantité de gaz, la hauteur de la libération, et la durée de la fuite.
2. Indiquez les conditions météorologiques actuelles, y compris la direction et la vitesse du vent, la température, et l'humidité.
3. Utilisez ALOHA pour effectuer la modélisation et déterminez les zones potentiellement affectées par le gaz toxique.
4. Identifiez les zones où des mesures d'urgence telles que l'évacuation pourraient être nécessaires.

#### Exemple 2 : Scénario de déversement de liquide inflammable

Supposons qu'il y ait un déversement de liquide inflammable, comme de l'essence, sur une autoroute après un accident de camion-citerne. Vous devez utiliser ALOHA pour évaluer les risques pour la sécurité publique.

1. Spécifiez la quantité de liquide inflammable déversé, la vitesse du vent, la température ambiante, et la distance par rapport à la route.

2. Utilisez ALOHA pour modéliser la dispersion du gaz inflammable et déterminez les distances à partir du point de déversement où il pourrait y avoir un risque d'explosion ou d'incendie.

3. Évaluez les mesures d'urgence nécessaires pour protéger la sécurité du public et des premiers intervenants.

### **Exercice 3 : Modélisation des effets du phénomène BLEVE par le code PHAST**

Les conditions atmosphériques retenues pour les modélisations des scénarios ayant lieu sur une raffinerie sont les suivantes :

Condition	5D
Stabilité	Classe d (neutre)
Vitesse de vent	5m/s
Température extérieur	20 C
Température du sol	20 C
Flux solaire	0,5 kW/m <sup>2</sup>
Humidité relative	70 %
Paramètre de rugosité	0.17

La classe de stabilité « D », représentative des conditions qualifiées de « Neutre » rencontrées plutôt de jour. Ces conditions ne sont compatibles qu'avec des vents de vitesse supérieure ou égale à 5 m/s.

Substance stockée : Butane.

Veillez réaliser une modélisation des effets du phénomène BLEVE par le code PHAST ?

## **2. Exemples pratiques**

### **Exemple 1 : Scénario : Fuite de gaz toxique dans un laboratoire chimique**

Imaginez qu'il y ait une fuite de gaz toxique, tel que du gaz chlore, dans un laboratoire chimique universitaire. Vous êtes chargé d'utiliser ALOHA pour modéliser la dispersion du gaz toxique et évaluer les risques pour les personnes dans le laboratoire. Voici les étapes de l'exercice :

1. Spécifications de la fuite :

- Quantité de gaz chlore libéré : 10 kg
- Hauteur de la libération : 1 mètre au-dessus du sol

- Durée de la fuite : 10 minutes
2. Conditions météorologiques :
    - Direction du vent : Ouest
    - Vitesse du vent : 5 m/s
    - Température : 20°C
    - Humidité relative : 50%
  3. Utilisez ALOHA pour modéliser la dispersion du gaz chlore et déterminez les zones potentiellement affectées à l'intérieur du laboratoire.
  4. Identifiez les zones où des mesures de sécurité doivent être prises, telles que l'évacuation de certaines parties du laboratoire.
  5. Estimez le temps nécessaire pour que la concentration de gaz toxique redevienne sûre dans les zones affectées.

Cet exercice vous permettra de vous familiariser avec l'utilisation d'ALOHA pour évaluer la dispersion de gaz toxiques dans un environnement intérieur. Assurez-vous de consulter la documentation d'ALOHA pour obtenir des instructions détaillées sur la manière d'entrer les données et d'interpréter les résultats.

Ces exemples vous permettent de pratiquer l'utilisation d'ALOHA pour évaluer la dispersion de substances dangereuses dans l'atmosphère. Assurez-vous d'utiliser les données d'entrée appropriées et de consulter la documentation d'ALOHA pour vous guider dans la modélisation.

### **Exemple 2 : Scénario : Fuite de gaz toxique dans une usine chimique**

Imaginons qu'une usine chimique ait connu une fuite de gaz toxique, comme du dioxyde de soufre (SO<sub>2</sub>), due à une défaillance d'équipement. Vous êtes chargé d'utiliser ALOHA pour modéliser la dispersion du gaz toxique et évaluer les risques pour les travailleurs et les communautés environnantes. Voici l'exercice :

1. Spécifications de la fuite :
  - Quantité de SO<sub>2</sub> libérée : 1000 kg
  - Hauteur de la libération : 5 mètres au-dessus du sol
  - Durée de la fuite : 30 minutes

## 2. Conditions météorologiques :

- Direction du vent : Nord
- Vitesse du vent : 3 m/s
- Température : 25°C
- Humidité relative : 60%

3. Utilisez ALOHA pour modéliser la dispersion du SO<sub>2</sub> et déterminez les zones potentiellement affectées à l'intérieur de l'usine et dans les communautés avoisinantes.

4. Identifiez les zones où des mesures d'urgence doivent être prises, telles que l'évacuation des travailleurs et des résidents, ou la mise en place de zones de refuge.

5. Évaluez le temps nécessaire pour que la concentration de SO<sub>2</sub> redevienne à un niveau sûr dans les zones affectées.

6. Proposez des mesures de prévention des accidents et des améliorations pour éviter de futurs incidents de ce type.

Cet exercice simule une situation d'urgence réelle et vous permettra de pratiquer l'utilisation d'ALOHA pour évaluer la dispersion de gaz toxiques et prendre des décisions en matière de sécurité. Veillez à bien consulter la documentation d'ALOHA pour obtenir des instructions détaillées sur la manière d'entrer les données et d'interpréter les résultats.

## 3. Exemples des accidents réels

### **Exercice 1 : Une source de réservoir (scénarios multiples)**

Le 25 juin 2016, à 12 h 30, un train déraile dans une section hautement industrialisée de Columbia, en Caroline du Sud. Parmi les wagons déraillés se trouve un wagon-citerne de propane dans un wagon de classe 112J400 du ministère des Transports des États-Unis (DOT). (DOT), classe 112J400W, d'une capacité nominale de 33 800 gallons. La citerne mesure environ 70 pieds de long et la citerne semble être intacte. Le propane a été liquéfié sous pression.

Au moment de l'accident, la température de l'air est de 70°F, le vent souffle de 360° à 10 miles par heure. (Mesuré à une hauteur de 10 mètres par le National Weather Service). Le ciel est complètement couvert et l'humidité relative est de 67%. Il n'y a pas d'inversion de basse altitude. La citerne doit être retirée des rails et la cargaison doit être déchargée. La citerne a

déjà été La citerne a déjà été soumise à des contraintes importantes pendant le naufrage et il est concevable qu'elle se brise pendant cet effort.

Les scénarios de défaillance possibles sont les suivants :

- Une défaillance catastrophique soudaine conduisant à une explosion de vapeur en expansion de liquide en ébullition (BLEVE) ;
- Une fuite menant à un incendie instantané ou à une explosion de nuage de vapeur ; ou
- Une brèche conduisant à un feu de jet provenant du réservoir.

### **Exercice 2 : Une source de réservoir (feu de flaque et feu de nappe)**

Dans un petit parc industriel situé à l'extérieur de Bâton Rouge, en Louisiane, un réservoir vertical de 500 gallons, de 4 pieds de diamètre, contient du benzène liquide. Le 20 août 2006, à 22 h 30, heure locale, un agent de sécurité découvre que du liquide s'échappe du réservoir par un trou circulaire de 6 pouces situé à 10 pouces au-dessus du fond du réservoir. Il constate également que le liquide s'écoule sur une zone pavée du parc industriel. Le garde pense que le réservoir vient d'être rempli dans la soirée. La température sur place est de 80°F, avec un vent de sud-ouest de 7 miles par heure (mesuré à 10 mètres de hauteur par une tour météorologique fixe sur le site). Le ciel est couvert à plus de la moitié par des nuages et l'humidité est d'environ 75 %. Un orage s'approche par le sud-ouest. Il n'y a pas d'inversion à basse altitude. Il y a très peu de bâtiments dans le parc industriel et un grand champ herbeux est situé au nord-est du parc industriel. Le comité local de planification des urgences a demandé que les intervenants sur place utilisent les concentrations ERPG-2.

Pour définir les seuils de toxicité dans leur analyse des risques liés au benzène.

Dans cet exemple de scénario, vous allez déterminer :

- La distance jusqu'au niveau ERPG-2 si la flaque s'évapore et forme un nuage de vapeur toxique ;
- La menace de rayonnement thermique si la flaque est enflammée par un coup de foudre et forme un feu de nappe.

### **Exercice 3 : Source directe et carte MARPLOT**

Le 4 juin 2006, à 15 heures, un train circulant sur la Southern Railway près de Manassas, en Virginie, entre en collision avec un camion bloqué sur Lee Highway. Un camion en panne au niveau de Lee Highway. Trois bouteilles de chlore de 150 livres qui se trouvaient dans la plate-

forme du camion sont endommagées pendant la collision et libèrent simultanément leur contenu. Au moment de la libération, les vents soufflent de l'est à environ 6 miles par heure, mesuré à une hauteur de 3 mètres. Un tiers du ciel est couvert de nuages, l'humidité est d'environ 80% et la température de l'air est de 72° F. Il n'y a pas d'inversion à basse altitude. Le terrain entre le lieu de l'accident et l'intersection de Gallerher Road et de Lee Highway est plat et ne présente aucun obstacle. Deux ouvriers réparant des trous à cette intersection sont asphyxiés par les fumées et sont traités dans un hôpital local pour inhalation de chlore gazeux.

- A quelle concentration approximative de chlore les ouvriers ont-ils pu être exposés ?
- Les ouvriers ont-ils été exposés ?
- Vous allez d'abord évaluer ce scénario en utilisant ALOHA pour obtenir une estimation de la force de la source et un tracé de la zone de menace, puis en affichant les zones de menace sur une carte MARPLOT afin d'obtenir une estimation de la concentration à l'endroit où les ouvriers ont été blessés.

## ***Conclusion générale***

Dans le domaine complexe des risques professionnels, la disponibilité d'une gamme diversifiée de logiciels dédiés à l'étude et à la gestion des divers phénomènes associés aux risques est un atout inestimable. Dans le cadre de cette formation, nous avons entrepris la présentation détaillée de trois outils numériques essentiels : le code FLUENT, le code ALOHA et le code PHAST. Cette présentation a permis de mettre en lumière leurs caractéristiques distinctives, leurs avantages et leurs limites, ainsi que les domaines spécifiques où ils excellent.

Ces trois logiciels ont démontré leur capacité à être des ressources précieuses dans le domaine de la simulation des risques professionnels, en particulier pour les incendies, les explosions et la dispersion atmosphérique des polluants. Notre choix s'est naturellement orienté vers FLUENT, ALOHA et PHAST en raison de leurs atouts notables. Ils sont reconnus pour leur facilité de mise en œuvre, ce qui les rend accessibles à un large public d'utilisateurs, qu'ils soient ingénieurs, experts en sécurité ou responsables opérationnels. De plus, ils ne requièrent pas une puissance informatique excessive grâce à l'utilisation de maillages cartésiens et de modèles simplifiés, ce qui est particulièrement pertinent dans le contexte actuel où la rapidité des résultats est souvent cruciale.

Une caractéristique importante de ces logiciels est leur volonté de proposer des modèles simples et économiques, adaptés aux besoins actuels des professionnels de la sécurité industrielle. Cette approche s'aligne parfaitement avec les exigences de précision couramment attendues pour résoudre efficacement les problèmes d'ingénierie liés à la sécurité contre les risques professionnels.

En mettant en avant les phénomènes modélisables par FLUENT, tels que l'effet thermique au cœur des incendies, la vitesse de réaction et d'autres facteurs cruciaux, ainsi que la capacité d'ALOHA à cartographier les zones touchées par la pollution, les zones de pression dues aux ondes de choc et le dimensionnement de la boule de feu, nous avons souligné comment ces logiciels peuvent être utilisés de manière complémentaire pour obtenir une vision globale des

risques.

Enfin, notre proposition d'une utilisation combinée de plusieurs logiciels vise à exploiter pleinement les compétences spécifiques de chaque outil. Cela permet d'accroître la précision et la profondeur des analyses de risques, renforçant ainsi la sécurité des travailleurs et la protection de l'environnement dans des environnements professionnels soumis à des risques variés.

En somme, ces trois logiciels, FLUENT, ALOHA et PHAST, démontrent l'importance croissante de la simulation numérique dans la gestion des risques professionnels. Ils offrent aux professionnels une panoplie d'outils robustes et efficaces pour évaluer, atténuer et prévenir les dangers potentiels. En continuant d'explorer et de combiner ces outils de manière judicieuse, nous contribuons à forger des environnements de travail plus sûrs, plus durables et plus performants, garantissant ainsi la protection des travailleurs et de l'environnement tout en maintenant la viabilité de nos activités industrielles modernes.



## *Références bibliographiques*

- « Addendum to the FLUENT 5 User's Guide », Fluent, Incorporated, Lebanon, November 2000.
- « ALOHA ® Areal Locations of Hazardous Atmospheres » User's Manual U.S. Environmental Protection Agency, National Oceanic And Atmospheric Administration, 2006. (NOAA, 2006)
- « ALOHA® USER'S MANUAL », U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, Office of Emergency Management, Washington, D.C, 2007. (OEM, 2007)
- « Calcul scientifique et simulation numérique », guide informatique, lettre d'avril 2006.
- « GAMBIT Command Reference Guide », Fluent, Incorporated, Lebanon, aout 2000.
- ALOHA : <http://response.restoration.noaa.gov/aloha>
- AUDISTIX, page web consultée le 09 avril 2021 : <https://www.auditrix.com/risques-industriels/outils-de-modelisation/>
- Birla, G. L. (2008). *Études de l'écoulement aérodynamique sur une aile flexible en utilisant les codes FLUENT et XFOIL* (Doctoral dissertation, École de technologie supérieure).
- Bureau d'Etudes Industrielles "Energies renouvelables et Environnement" Infrastructure routière et enjeux environnementaux. Page web visitée le 09 Avril 2021 : <http://hmf.enseeiht.fr/travaux/CD1011/bei/beiere/groupe5/node/98>
- Chabassier, J. (2012). *Modélisation et simulation numérique d'un piano par modèles physiques* (Doctoral dissertation, Ecole Polytechnique X).

- Chevreau, F. R. (2008). *Maîtrise des risques industriels et culture de sécurité : le cas de la chimie pharmaceutique* (Doctoral dissertation, École Nationale Supérieure des Mines de Paris).
- Da Silva, E. G. (2007). *Méthodes et analyse numériques*.
- Des Risques Accidentels. (2006). *Examen de l'utilisation du logiciel ALOHA-CAMEO en situation d'urgence*. Direction des Risques Accidentels INERIS, rapport N 46053
- Evans, M. (1994). *Quality Assurance of ALOHA. Draft Report, Office of Ocean and Resources Conservation and Assessment of the National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)*, Seattle.
- Foures, D. (2015). *Validation de modèles de simulation* (Doctoral dissertation, Université de Toulouse, Université Toulouse III-Paul Sabatier).
- Guillaume, E. (2006). *Les outils de l'ingénierie de la sécurité incendie*. Laboratoire National de Métrologie et D'essais.
- INSPQ, Centre d'expertise et de référence en santé publique. Page web visitée le 09 Avril 2021 : <https://www.inspq.qc.ca/pdf/publications/276-GTU-SanteEnvironnementale/276-GTU-A6ModelesDispersion.pdf>
- Mohammed, H. (2017). *Initiation à la simulation numérique des écoulements de fluides (CFD) Introduction à l'ANSYS ICEM CFD et ANSYS CFX*.
- NOAA. (1998). *Guide for the Verification and Validation of CFD simulations*. American Institute of Aeronautics and Astronautics.
- Quarteroni, A., Sacco, R., & Saleri, F. (2008). *Méthodes Numériques: Algorithmes, analyse et applications*. Springer Science & Business Media.
- Riahi, M. (2004). *Contribution à l'élaboration d'une méthodologie de spécification, de vérification et de génération semi-automatique d'interfaces homme-machine : application à l'outil Ergo-Concept or*, (Doctoral dissertation, Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis).
- TOUIL, A., & BENLAZAR, F. (2018). *Simulation numérique d'un écoulement autour d'une aube de la turbine à gaz* (Doctoral dissertation).
- Varenne, F. (2007). *Du modèle à la simulation informatique*. Vrin.

- Pagnon, S. (2012). *Stratégies de modélisation des conséquences d'une dispersion atmosphérique de gaz toxique ou inflammable en situation d'urgence au regard de l'incertitude sur les données d'entrée* (Doctoral dissertation, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne).
- Couillet, J. C. (2002). *Méthodes pour l'évaluation et la prévention des risques accidentels (DRA-006).  $\Omega$ -12, Dispersion atmosphérique* (Mécanismes et outils de calcul).
- Pandya, N. (2009). *Analyse de sensibilité paramétrique d'un outil de modélisation des conséquences de scénarios d'accidents. Application à la dispersion atmosphérique de rejets avec le logiciel PHAST* (Doctoral dissertation).

## *Fiche technique de l'unité de formation*

### UEF 3.2.1 : Outils informatiques appliqués à la modélisation des risques professionnels, Licence Hygiène, Sécurité et Santé au Travail

Page | 46

Semestre : 6  
 Unité d'enseignement : UEF 3.2.1  
 Matière : Outils informatiques appliqués à la modélisation des risques professionnels  
 VOLUME HORAIRE SEMESTRIEL : 67h30, Cours : 3H00, TD : 1h30  
 Crédits : 6  
 Coefficient : 3

#### Objectifs de l'enseignement:

Cette matière consiste faire comprendre la nécessité de la modélisation et simulation des systèmes et à améliorer les connaissances de l'étudiant sur les principes fondamentaux de ce domaine. De plus, il sera initié à maîtriser une techniques de simulation numérique des systèmes qui permet l'évaluation de son comportement.

#### Connaissances préalables recommandées :

- Notions générales sur la thermodynamique des fluides ;
- Notions générales d'informatique ;
- Notions de base sur les phénomènes a modélisés (fuite, incendie, explosion, etc.).

#### Contenu de la matière

- |  |                     |
|--|---------------------|
| <b>Chapitre 1.</b>   | <b>(5 semaines)</b> |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>- Initiation à la modélisation et simulation des systèmes ;</li> <li>- Typologie de la modélisation des systèmes ;</li> </ul> |                     |
| <b>Chapitre 2.</b>   | <b>(5 semaines)</b> |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>- La modélisation numérique des systèmes ;</li> <li>- Outils de la simulation numérique ;</li> </ul>                          |                     |
| <b>Chapitre 3.</b>   | <b>(5 semaines)</b> |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>- Des études de cas</li> </ul>  |                     |

#### Mode d'évaluation :

Contrôle continu : 40 % ; Examen final : 60 %.

#### Références bibliographiques:

2. Michelot, N., Carrega, P., & Rouil, L. (2015). Panorama de la modélisation de la dispersion atmosphérique Atmospheric dispersion models : An overview. Pollution atmosphérique, 92.
3. « Panorama de la modélisation de la dispersion atmosphérique », fiche établie avec le concours de l'INERIS, décembre 2006.
4. Truchot, B. ( ). Phénomènes dangereux et modélisation des effets. INERIS.

Intitulé de la Licence académique: Hygiène, Sécurité et Santé au Travail  
 Année : 2020-2021

# **OUTILS INFORMATIQUES APPLIQUES A LA MODELISATION DES RISQUES PROFESSIONNELS**

Ce Support de cours met en évidence l'importance de la simulation numérique dans la gestion des risques professionnels complexes, en utilisant des outils informatiques pour modéliser et anticiper les scénarios dangereux. Il se compose de quatre chapitres, qui couvrent les bases de la simulation numérique, l'utilisation de trois outils spécifiques (FLUENT, ALOHA et PHAST), des études de cas d'accidents industriels, et la modélisation de scénarios avec ALOHA. L'objectif est de fournir aux étudiants une solide base de compétences pour la sécurité professionnelle et la gestion des risques industriels.