

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**

**MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE**

**UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA-BOUMERDES**



**Faculté des Sciences de l'Ingénieur**

**Mémoire de Magister**

Présenté par :

**ROUIBAH Abdelkader**

En vue de l'obtention du diplôme de **MAGISTER** en :

**Filière : Maintenance Industrielle**

**Option : Maintenance des Systèmes Mécaniques**

**TITRE DU MEMOIRE : Evaluation Dynamique des Risques Majeurs dans les Installations Pétrochimiques**

**Devant le jury composé de :**

Mr REFOUFI	Larbi	Professeur	UMBB	Président
Mr BOUSSAID	Mohamed	MC (A)	UMBB	Examineur
Mr BALISTROU	Mourad	MC (A)	UMBB	Examineur
Mr KARA	Radouane	MC (A)	UMMTO	Examineur
Mr BENZAOUZ	Djamel	MC (A)	UMBB	Rapporteur

---

# *SOMMAIRE*

---

# Sommaire

Remerciement.....	<b>i</b>
Résumé.....	<b>ii</b>
Nomenclature.....	<b>iv</b>
Liste des figures.....	<b>vi</b>
Liste des tableaux.....	<b>vii</b>
Liste des acronymes.....	<b>viii</b>
Introduction générale.....	1
Problématique.....	1
Objectifs.....	1
Organisation de rapport du mémoire.....	2
<b>Chapitre 1 : Approches et méthodes d'évaluation des risques</b>	
1.1. Introduction.....	4
1.2. Evaluation des risques dans le concept de la fiabilité prévisionnelle.....	4
1.2.1. Arbres de défaillances ou de Causes.....	4
1.2.2. Arbres d'évènements.....	5
1.2.3. Diagramme de fiabilité.....	5
1.2.4. La fonction de structure d'un système.....	6
1.2.5. Modèles Markoviens.....	6
1.2.6. Les réseaux de Pétri.....	7
1.2.7. Simulation de Monte Carlo.....	8
1.3. Evaluation des risques dans le concept de la fiabilité dynamique.....	8
1.3.1. Les études probabilistes de sureté EPS.....	9
1.3.2. Théorie de dynamique probabiliste TPD.....	14
1.3.3. Théorie de la dynamique probabiliste basée sur les stimuli SDTPD.....	15
1.3.4. Théorie de la dynamique des stimuli TSD.....	18
<b>Chapitre 2 : Evaluation dynamique des risques avec la méthode TSD</b>	
2.1. Introduction.....	19
2.2. Cadre mathématique de la TSD.....	19
2.2.1. Description du processus, de vecteur d'état et des vecteurs de stimuli.....	19
2.2.2. Description des événements stochastiques.....	21
2.2.3. Taux d'activation des stimuli pdf,f.....	21
2.2.4. Taux d'activation de délai pdf, h.....	22
2.3. Solution des équations de la TSD (fréquence d'excès du domaine de dommage).....	24
2.3.1. Contexte.....	24
2.3.2. Extension à la fiabilité dynamique 'TPD'.....	26
2.4. La méthodologie de la méthode TSD.....	27
2.4.1. Modélisation de la probabilité de l'évènement suivant, le long d'un chemin dynamique avec des événements stimuli.....	27
2.4.2. Fréquence d'excès de dommage.....	29
2.5. Intégration de chemins de la TSD. Recherche de domaine de dommage.....	29

---

2.5.1. Volume supplémentaire d'un chemin.....	29
2.5.2. Analyse des chemins.....	33
2.5.2.1. Stratégie de l'échantillonnage des chemins : Recherche du domaine de dommage.....	34
2.5.2.2. Algorithme de recherche adaptatif :.....	36
<b>Chapitre 3 : Analyse thermo-hydraulique : Cas de l'accident de Bhopal</b>	
3.1. Introduction.....	39
3.2. Description du réservoir de stockage de MIC.....	39
3.3. Description des réactions chimiques.....	40
3.3.1. Réactions exothermiques dans le réservoir E610.....	40
3.3.2. Modélisation des réactions Thermodynamiques et chimiques.....	41
3.3.2.1. Propriétés de la modélisation thermodynamique.....	41
3.3.2.1.1. Calcul de la pression.....	42
3.3.2.1.2. Calcul des quantités résiduelles.....	42
3.3.2.1.3. Calcul des quantités idéales.....	43
3.4. Modélisation des réactions chimiques.....	44
3.4.1. Vitesse de réaction.....	44
3.4.2. Taux de chaleur de réaction.....	45
3.5. Modélisation des équilibres entre phases de substances pures.....	45
3.6. Calcul de la Variation de Mole (en masse) (Block 1 de chapitre04).....	47
3.7. Calcul de l'évolution de la température (Block 2 de chapitre04).....	48
<b>Chapitre 4: Simulation et résultats</b>	
4.1. Introduction.....	50
4.2. Description de l'accident de Bhopal .....	50
4.3. Architecture générale du module d'évaluation dynamique TSD- analyse thermo hydraulique.....	51
4.3.1. Contexte et objectif.....	51
4.3.2 Mécanisme d'interconnexion Analyse Thermo Hydraulique –TSD.....	51
4.4. Partie dynamique : Analyse thermo-hydraulique.....	52
4.4.1. Description de la méthodologie.....	52
4.4.2. Hypothèses générales.....	53
4.4.3. Description des réactions chimiques dans le réservoir Bhopal E610.....	54
4.4.3.1. La variation de la masse dans le réservoir E610.....	54
4.4.3.2. Evolution de la température et de la pression dans le réservoir.....	55
4.5. Partie probabiliste : TSD.....	56
4.5.1. Description du système de protection:.....	56
4.5.2. Analyse du domaine de dommage.....	57
4.5.2.1 Description des séquences.....	57
4.5.2.2. Description des stimuli et des délais.....	58
4.5.3. Résultats numériques.....	60
4.6. Conclusion .....	62

5. Conclusions et perspectives.....	63
6. Références bibliographiques.....	64
Annexe 01.....	68
Annexe 02.....	69

# Remerciements

*Tout d'abord, je tiens à exprimer mes vifs remerciements et ma gratitude au Professeur BENAZZOUZ Djamel, mon promoteur, pour son enthousiasme, son implication et sa grande disponibilité lors de la réalisation de ce travail; il ma apporté une compréhension plus approfondie des divers aspects du sujet. Je lui présente les témoignages de ma sincère reconnaissance.*

*Je remercie fortement mon co-promoteur, BENIKHLEF Taha, doctorant à l'université M'Hamed Bougara de Boumerdès, pour son aide, son assistance et la documentation qu'il a mis à ma disposition et par sa disponibilité permanente qui m'a permis d'achever ce travail. Je lui présente également ma sincère reconnaissance.*

*Je remercie également le Professeur SERIDI Ahcène, Directeur de Laboratoire de Mécanique des Solides et Systèmes (LMSS), de m'avoir autorisé d'accéder au laboratoire à tout moment mais également pour la grande confiance qu'il m'a accordée.*

*Je tiens aussi à remercier tous les enseignants qui ont assuré notre formation au cours de l'année théorique.*

*Je remercie le Professeur REFOUFI Larbi qui m'a fait l'honneur de présider le jury de mon mémoire.*

*Mes remerciements sont aussi destinés aux membres de jury; Messieurs N.KARA, M.BOUSSAID et M.BALISTROU, qui ont accepté de juger mon travail.*

*Je tiens également à remercier tous mes collègues d'études en post graduation pour leurs soutiens et leur motivation.*

*Que tous mes amis sans exception, ils sont nombreux, je ne peux tous les citer mais je ne les oublie pas.*

*Enfin, que toutes les personnes ayant contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce travail, soient chaleureusement remerciées.*

**Abdelkader ROUIBAH**

## ملخص:

نعالج في هذه المذكرة تقييم الأخطار الصناعية القاسية في المنشآت البتروكيماوية. الدراسة تحتوي على أربعة أجزاء مهمة : يتناول الجزء الأول تحليل مختلف الطرق و المقاربات المستعملة في الموثوقية لتقييم الأخطار الصناعية, حيث نركز على أهمية كل طريقة و مقارنة مع تحديد سلبياتها و ايجابياتها.

خصص الجزء الثاني للتقييم الديناميكي للأخطار الصناعية بواسطة نظرية ديناميكية المحفزات ( TSD ) التي تستعمل نوع خاص من الطرق والتعاقبات لحل معادلات نظرية ديناميكا الاحتمالية المعتمدة على المحفزات (SDTPD) كما نعرض أيضا خوارزمية البحث التكيفية لفحص العينات بالشبكة لمسارات الضرر لمختلف التعاقبات و ايجابيتها بالنسبة لطريقة Monte Carlo.

أما الجزء الثالث فقد خصص للتحليل الترموهيدروليكي لخزان مادة MIC لمصنع Bhopal حيث نركز على التطور الديناميكي للمتغيرات الفيزيائية كالضغط, الحرارة و التركيزات المولية للخليط المتشكل داخل الخزان. يتناول الجزء الرابع محاكاة التطور الديناميكي لمختلف المتغيرات الفيزيائية للخليط الغازي المتشكل داخل الخزان و بأخذ مشهد حادث Bhopal و تطبيق خوارزمية البحث التكيفية استطعنا محاكاة الحوادث مع حساب التوتر الاحتمالي الزائد لميدان الضرر.

**كلمات المفتاح:** تقييم الأخطار الصناعية/ التطور الترموهيدروليكي للمتغيرات الفيزيائية / نظرية ديناميكية المحفزات TSD /خوارزمية البحث التكيفية.

## Résumé:

Nous traitons dans ce mémoire l'évaluation des risques industriels majeurs dans les installations pétrochimiques. Cette étude se compose de quatre parties importantes:

La première partie comporte l'analyse des différentes méthodes et approches utilisées dans la fiabilité pour évaluer les risques industriels, ainsi que l'importance de chaque approche et méthode avec leur avantages et inconvénients.

La deuxième partie est consacrée à la théorie de dynamique des stimuli TSD qui utilise un type spécifique de chemins et séquences pour résoudre les équations de la théorie de dynamique probabiliste basée sur les stimuli SDTPD. Comme on présente aussi l'algorithme de recherche adaptatif pour l'échantillonnage par maillage des chemins de dommage dans les séquences, et nous précisons son avantage par rapport à la méthode de Monte Carlo.

La troisième partie est réservée pour l'analyse thermo hydraulique du réservoir E610 de l'usine de Bhopal, dans laquelle on étudie l'évolution des différentes variables physiques dans le temps telles que la pression, la température et les concentrations molaires du mélange formé dans le réservoir de stockage de MIC.

La quatrième partie est consacrée à la simulation de la dynamique multi-variable des réactions exothermiques de mélange gazeux, on prend le scénario de l'accident de Bhopal et par l'application de l'algorithme de recherche adaptatif, on a pu simuler les séquences accidentelles avec le calcul des fréquences d'excès du domaine de dommage.

**Mots clés:** Evaluation des risques industriels majeurs / Evolution thermo hydraulique des variables physiques /Théorie de dynamique des stimuli TSD /Algorithme de recherche adaptatif.

## Summary:

We treat in this thesis the evaluation of the major industrial risks in petrochemical industries. This study is composed of four interesting parts:

The first part presents the different methods and approaches used in the risk assessment of the industrial facilities, and also the importance of each approach and methods, their advantages and disadvantages.

The second part is devoted to the theory of stimulated dynamics TSD, which uses approach of a specific type of paths and sequences to solve the equations of the Stimulus-Driven Theory of Probabilistic Dynamics SDTPD. By the application of the adaptive search algorithm (sampling by grid), we can better analyze the sequences of the TSD against uniform sampling to Monte Carlo.

The third part is reserved to present the analysis thermo hydraulic and kinetic reaction of the confined tank used to simulate the Bhopal accident, in which we study the evolution of different physical variables over time such as pressure, temperature and molar concentrations of the mixture formed in the MIC storage tank.

The fourth part is devoted to the simulation of multi-variable dynamics of exothermic reactions of mixture, we adapt the nuclear experience to Bhopal accident scenario, by applying the adaptive search algorithm, we can simulate the accident sequences with the calculation of excess frequencies of damage domain.

**Key Words:** Assessment of the major industrial risks / Thermo-hydraulic evolution of the physical variables / Theory of stimulated dynamics TSD / Adaptive search algorithm.



## Nomenclature

$X$ :	Vecteur processus
$i_1, i_2$	Etats (Configurations du système)
$\mathbb{R}^N$	Espace des états
$\pi_j(t)$	Probabilité à l'état $j$ et au temps $t$
$p_{j \rightarrow k}(t)$	Probabilité par unité de temps de la transition $j \rightarrow k$
$\varphi_j(t)$	Densité de probabilité d'entrée dans l'état $j$
$\lambda_j(s)$	Taux de transition
$\delta(t)$	Delta Dirac
$q_{jk} dt$	Probabilité à l'état $k$ et au temps $\tau$ pour que l'évènement $jk$ prend place exactement à l'instant $t$ .
$n$	le nombre d'évènements expérimentés
$\varphi_{j_1}^1(0)$	La fréquence de l'évènement initiateur
$Q_J^{seq}(t, \tau_n)$	Chemin <b>Q</b> -Kernel
$j$	Séquence
$(j, \tau)$ :	Chemin
$I_G = +$	Activation de stimulus
$I_G = -$	Désactivation de stimulus
$I$	Etiquette des configurations d'états lorsqu'on considère tous les stimuli ensemble
$\frac{\lambda^F(t, x)}{\mu^F(t, x)}$	Taux de transition
$q_{j \rightarrow j_n}^{seq}(t, \tau)$	Probabilité par unité de temps de transition entre les dynamiques $j$ et $j_n$
$Q_{i,j}^{I?J}(t, \tau_n) dt$	La probabilité de la transition $(j, J) \rightarrow (i, I)$ , à l'intervalle de temps $dt$ autour de $t$ et après l'entrée dans un sous-état dynamique $j$ au temps $\tau$ .
$\pi(J_n, \frac{\tau_n}{\tau_{n-1}}, \bar{\tau}_{n-1})$	Vecteur de probabilité de stimulus au temps $\bar{\tau}_n$ conditionné à être $\pi^{J_{n-1}}(\bar{\tau}_{n-1})$ au temps $\bar{\tau}_{n-1}$
$ST_n$ :	Matrice de stimulus associée à l'état (+ activé, - désactivé) de chaque stimulus
$ \Omega_n^+ $ :	Matrice de l'état du stimulus
$G_n$ :	Stimulus de la nième transition dynamique
$\varphi_j^{damage}(t)$	Fréquence d'excès de dommage d'un chemin
Q-kernel	Fréquence d'excès du domaine dommage
$M_I$	Cardinal de coordonnées de chemin
$t_{ini}$	Temps d'occurrence de l'évènement initiateur
$t_{AD}$	Durée d'accident
$\Delta V$	Volume supplémentaire
$P_{sat}(T)$	Pression de saturation
$P$	Pression du gaz
$T$	Température
$R$	Constante universelle des gaz parfaits
$M$	Masse molaire du mélange

## Nomenclature

---

$\dot{Q}(t)$	Puissance calorifique échangée avec l'extérieur
$\sum_j (\dot{m}h_{in})_j$	Puissance calorifique des gaz entrants
MC	Capacité calorifique incluse dans le volume
$K_{th}$	Ordre de réaction chimique
$S_{k,dir}$	Espèce chimique
$x_{j,k}^{in}$ et $x_{j,k}^{out}$	Coefficients stœchiométriques
$N_j$	Nombre de moles de l'espèce j
$\tau_{startk}$	Temps du début de la réaction k
$\Delta_k$	Durée de la réaction
A	Energie libre
a	Paramètre d'attraction dans l'équation d'état cubiques
b	Co-volume de paramètres dans l'équation d'état cubiques
$C_p$	Capacité thermique isobare
$C_v$	Capacité thermique isochore
G	Energie libre totale de Gibbs
H	Enthalpie
$\Delta h$	Enthalpie de réaction
$K_k^{rev}$	Constante cinétique de la réaction inverse k
$K_k^{dir}$	Constante cinétique de la réaction directe k
$K_k^{eq}$	Constante d'équilibre cinétique de réaction k
$\dot{Q}$	Taux de la chaleur
S	Entropie
U	Intérieur de l'énergie
V	Volume total
v	Volume spécifique
$\omega$	Facteur acentriques Pitzer
$\kappa_T$	Compressibilité isotherme
$\alpha_p$	Coefficient isobare de dilatation thermique

### Les indices

C	Propriété critique
F	Point de saturation à l'état liquide
G	Point de saturation à l'état gazeux
K	Composante k
M	Quantité molaire
Ref	Propriété à l'état de référence
Sat	La saturation

### Exposants

id	Quantité idéale
r	Quantité résiduelle

---

**Liste des figures**

Fig.1.1: Arbre d'événement d'un accident de perte de réfrigérant et arbre « réduit ».....	11
Fig1.2: Arbre de défaillance d'un accident de perte de réfrigérant .....	12
Fig1.3: Les accidents graves d'un R.E.P.....	12
Fig1.4 : Schématisation des principales étapes de l'EPS2.....	14
Fig.1.5: Description d'une séquence accidentelle.....	15
Fig.1.6: Les deux phases d'occurrence de l'événement.....	16
Fig.1.7: Les deux phases d'occurrence de l'événement, décrites par un stimulus.....	16
Fig.1.8: Activation sans désactivation.....	17
Fig.1.9: Activation avec le déclenchement du stimulus de désactivation mais il y'a occurrence de l'événement.....	17
Fig.1.10: Activation avec le déclenchement du stimulus de désactivation et sans occurrence de l'événement.....	18
Fig.2.1 : Occurrence de deux phases de l'évènement induit par F.....	21
Fig.2.2 : Domaines d'échantillonnage (ombrés) correspondent à : a. Séquence de 2D[2 1], b. Séquence de 3D[3 2 1].....	31
Fig.2.3: Les points d'échantillonnage situés dans les limites intérieures du domaine correspondant à: a. La séquence 2D [2 1], b. La séquence 3D [3 2 1].....	32
Fig2.4: Les points d'échantillonnage situés dans les limites extérieures du domaine correspondant à: a) La séquence 2D [2 1], b) La séquence 3D [3 2 1].....	32
Fig.2.5 : Séquence du Benchmark [1 2 4] analysée avec deux stratégies d'échantillonnage différentes.....	35
Fig.2.6 : Voisins de chemin de dommage donné.....	37
Fig.2.7 : Etapes de l'algorithme de recherche adaptatif dans la séquence [1 2 4].....	38
Fig.3.1 : Réservoir de stockage de MIC.....	40
Fig.3.2 : Schéma général du calcul VLE.....	47
Fig.4.1 : Architecture de l'analyse thermo hydraulique –TSD.....	52
Fig.4.2 : Diagramme de l'analyse thermo-hydraulique.....	53
Fig.4.3 : Variation de masse de Méthylamine et du dioxyde de carbone.....	55
Fig.4.4 : Variation de masse de vapeur et de Méthyl-isocyanate.....	55
Fig.4.5 : évolution de la température dans le réservoir.....	56
Fig.4.6 : évolution de la pression dans le réservoir.....	56

## Liste des tableaux

Tableau 2.1: Facteur de réduction du volume supplémentaire pour des points situés dans les limites intérieures du domaine (pour les domaines d'échantillonnage 2D et 3D).

Tableau 2.2: Facteur de réduction du volume supplémentaire pour des points situés dans les limites extérieures du domaine (pour les domaines d'échantillonnage 2D et 3D).

Tableau 4.1: Événements dynamiques.

Tableau 4.2: Les résultats de domaine dommages, avec l'activation de la piste de réaction exothermique de relance des dommages

Tableau 4.3: Les résultats de domaine dommages, avec l'activation du disque de sécurité de rupture de relance des dommages

## Liste des acronymes

ADAG : Arbre de Déroulement des Accidents Graves  
COMB : Combustion  
CSN : Consejo de Seguridad Nuclear  
DEL : Déluge  
ECCS : Système de refroidissement d'urgence du cœur  
EDI : Etats dégradés de l'installation  
EPS(PSA) : Etudes probabilistes de sûreté ou Probabilistic Safety Analysis  
FPA : Familles de progression des accidents  
MC : Monte Carlo  
MMA : Monométhylamine  
MIC : Isocyanate de méthyle  
PVH : Process Valve Vent Header  
REA : Réaction  
REP : Réacteur à eau pressurisée  
RK4 : Runge-Kutta d'ordre 4  
RVVH: Relief Valve Vent Header  
SDTPD : Stimulus -Driven Theory of Probabilistic Dynamics ou Théorie de la Dynamique Probabiliste basée sur les Stimuli  
TPD : Theory of probabilistic dynamics ou Théorie de Dynamique Probabiliste  
TSD : Theory of stimulated dynamics TSD ou Théorie de la dynamique des stimuli  
VGS: Vent Gas Scrubber  
VLE: "Vapeur – Liquide" Equilibre  
FT : Arbre de défaillances  
ET : Arbres d'événements

---

## *INTRODUCTION GENERALE*

---

## 1.Problématique

Depuis la catastrophe du Bhopal en 1984, beaucoup d'attentions ont été accordées dans le domaine de l'ingénierie des installations chimiques et pétrochimiques, bien que beaucoup de travail lié à la l'ingénierie de protection a été initialement réalisé dans les installations nucléaires suite aux accidents de Tchernobyl en 1986 et TMI en 1979. L'Analyse des risques dans les installations nucléaires et chimiques /pétrochimiques devient ainsi la clé des activités d'ingénierie, et qui a but d'optimiser les niveaux de protection afin de limiter les risques sociaux et individuels liés aux installations à risque technologique majeur.

Le travail présenté dans ce mémoire a pour objectif d'évaluer les risques technologiques majeurs dans les installations pétrochimiques dans le contexte de la fiabilité dynamique, le calcul des fréquences d'excès est un outil indispensable pour valider le choix des couches de protection lors de l'engineering, les valeurs des fréquences d'excès doivent répondre aux exigences imposées par la réglementation, normes et standards.

## 2.Objectifs

Ce travail a pour objectif, l'établissement d'une plateforme de simulation commune entre l'analyse dynamique des risques initialement développée dans la communauté scientifique de l'énergie nucléaire et l'analyse dynamique des risques capable de modéliser et d'évaluer des transitoires dynamiques similaires qui peuvent affecter le processus d'une installation chimique ou pétrochimique. Cette étude est caractérisée par deux principaux aspects, et qui constituent l'analyse dynamique des risques dans son contexte général :

- L'analyse déterministe du scénario d'explosion suite à des réactions exothermiques sévères à l'intérieur d'un réservoir de stockage de Méthyle-Isocyanate, où les changements de paramètres procédé (température, pression variation de masse ) sont évalués en utilisant une modélisation commune et des outils d'analyse similaires à ceux testés dans les accidents des confinements nucléaires. Dans son ensemble cette nouvelle approche d'analyse des risques a été transférée et adaptée, pour le cas simplifié des réactions exothermiques entre le Methyl-Isocyanate et l'eau à l'intérieur du réservoir de stockage 610 de l'usine de Bhopal.
- L'analyse probabiliste, qui vise à évaluer les conséquences des transitoires de réaction en impliquant les événements et stimuli des différentes couches de protection disponibles sur le réservoir de stockage du MIC. L'évaluation dynamique est basée sur la recherche des domaines de dommages avec une optimisation adéquate afin de minimiser le cout de

calcul. L'identification du domaine des dommages permet de calculer les fréquences d'excès, ces derniers sont considérés comme un paramètre et un indicateur important dans l'évaluation dynamique des risques.

Pour calculer les fréquences d'excès dans un contexte de la fiabilité dynamique, le temps d'occurrence d'un phénomène physique qui change la dynamique de l'évolution (événements dynamiques) ou le temps qui conditionne ce changement (activation de stimulus) sont essentiels. Le temps qui caractérise un événement peut être à la fois déterministe ou stochastique. Malheureusement, ces approches classiques deviennent inapplicables lorsqu'il s'agit de systèmes dynamiques et complexes ; l'approche PSA par exemple ne prend pas en considération la dépendance chronologique entre les différents événements, elle est limitée dans son application à modéliser la configuration du changement de la dynamique. Parmi les méthodes modernes d'évaluation des risques, on peut rencontrer la "Theory of Probabilistic Dynamics (TPD)" qui est une extension du PSA vers le Process semi-Markov. La TPD prend en compte la dynamique de l'évolution et la chronologie d'interaction entre les événements. Aucune des deux méthodes (TPD et PSA) ne s'intéressent aux conditions physiques de l'occurrence et de transition des événements par une parfaite analyse du temps de stimulus et du délai.

La "Theory of Stimulated Dynamics (TSD)" est considérée comme une extension de PSA vers le Process Non-Markov dans le cas où les taux de transition dépendent des variables process. La TSD s'occupe des variations aléatoires des variables process, elle fait introduire le concept de l'activation de stimulus et de délai jusqu'à l'occurrence d'un nouveau événement, la TSD permet de mieux modéliser la concurrence entre les stimuli.

La méthode TSD serait le seul moyen pour l'évaluation dynamique des risques liés à l'évolution du process dans les installations pétrochimique. Il n'existe pas, à notre connaissance, d'outils performants permettant la simulation de l'évolution discrète ou continue des paramètres process en prenant en compte les aspects stochastiques et déterministes. Dans ce contexte, nous avons exploité les performances de la TSD qui a été initialement appliquée dans l'industrie nucléaire pour l'adapter à un cas de l'industrie pétrochimique.

### **3.Organisation de rapport du mémoire**

Notre travail est présenté dans un document comprenant 4 chapitres.

Nous présentons dans le premier chapitre une synthèse des différentes méthodes et approches d'évaluation des risques, nous insistons sur l'importance de chaque méthode et approche, leurs avantages et inconvénients.



Dans le deuxième chapitre nous décrivons avec détail la théorie de la dynamique des stimuli TSD, nous présentons son avantage par rapport aux approches et méthodes classiques, nous justifions ainsi notre choix. Nous présentons aussi l'algorithme de recherche adaptatif pour l'échantillonnage des trajectoires de dommages dans les séquences, nous précisons son avantage par rapport à la méthode de Monte Carlo.

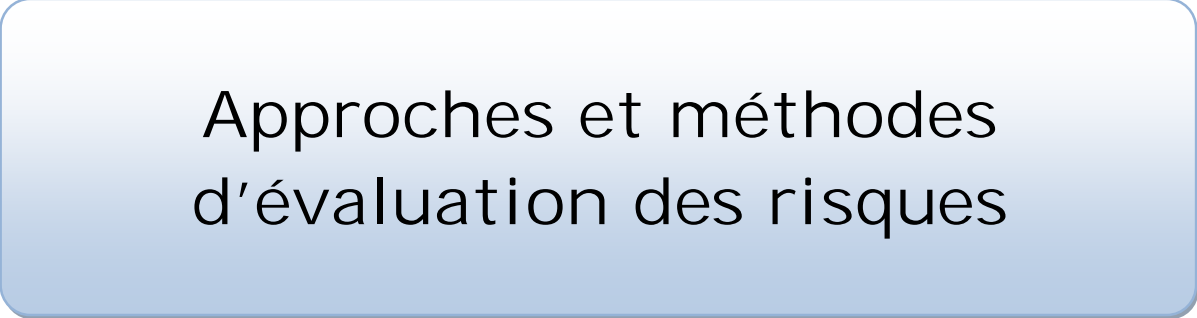
Le troisième chapitre est consacré à l'analyse déterministe des risques en proposant l'accident de BHOPAL comme meilleur exemple très proche des accidents vécus dans l'industrie nucléaire. Nous utilisons les performances de l'analyse thermo-hydraulique pour étudier le scénario des réactions exothermiques cinétique réactionnelle

Le quatrième Chapitre est consacré à la simulation de l'évolution dynamique des réactions exothermiques de mélange (MIC, H<sub>2</sub>O vapeur, MMA, CO<sub>2</sub>). Par application de l'analyse thermo-hydraulique et la TSD, nous verrons:

1. L'analyse thermo-hydraulique (Partie dynamique) qui fait appel au calcul de toutes les propriétés thermodynamiques à travers le calcul de la somme de la contribution des propriétés idéales de gaz, et la correction résiduelle du comportement non idéal. En outre, toutes les propriétés thermodynamiques peuvent être tirées de la connaissance des équations d'état, qui relient des variables d'état du système. L'utilisation des équations d'états cubiques s'est répandue en raison de leurs caractéristiques mathématiques, leur simplicité. Plusieurs équations d'état cubiques comme Van der Waals, Redlich-Kwong, Redlich-Kwong-Soave et Peng-Robinson sont fréquemment utilisés pour le calcul des équilibres des phases.

2. La TSD (Partie probabilistique): Simuler les différents chemins qui appartiennent à des différentes séquences, nous présentons dans cette partie les différents stimuli des différents événements, nous montrons aussi la performance de la TSD pour déterminer le domaine de dommage dans un espace de transitoires lors de l'évolution dynamique des paramètres process donnée par l'analyse thermo-hydraulique.

Approches et méthodes  
d'évaluation des risques



## 1.1.Introduction

Les approches et les méthodes d'évaluation des risques industriels dans les concepts de la fiabilité prévisionnelle et la fiabilité dynamique ont pour objectif d'identifier les scénarios accidentels susceptibles d'être induits dans les industries, et d'en estimer la fréquence d'occurrence et les conséquences potentielles.

## 1.2. Evaluation des risques dans le concept de la fiabilité prévisionnelle.

La fiabilité prévisionnelle utilise deux types de méthodes :

**Premier type :** Il regroupe les approches combinatoires qui sont utilisées pour identifier et évaluer les combinaisons de défaillances de composants d'un système. Dans ce groupe se classent les arbres de défaillances, les arbres d'événements, les diagrammes de fiabilité et la fonction de structure [1].

**Deuxième type :** Il repose sur une représentation d'état du système, dont les transitions correspondent à une défaillance ou à une réparation d'un composant. Sous certaines conditions, ces modèles sont Markoviens (ou semi Markoviens) et permettent d'accéder à la probabilité de séjour dans chacun des états. La probabilité d'être dans un quelconque des états de fonctionnement est la disponibilité du système. Pour évaluer la fiabilité, il convient de modifier le modèle en rendant les états de panne absorbants (pas de réparations).

### 1.2.1. Arbres de défaillances ou de causes

L'analyse par arbre de défaillances ou de causes est une méthode de type déductif.

Les arbres de défaillance modélisent l'ensemble des combinaisons d'évènements, qui conduisent à un évènement redouté. Ces objectifs sont résumés en quatre points :

- ✓ La recherche des événements élémentaires, ou leurs combinaisons conduisant à un évènement redouté.
- ✓ La représentation graphique des liaisons entre les événements. Remarquons qu'il existe une représentation de la logique de défaillance du système pour chaque évènement redouté. Ce qui implique qu'il y aura autant d'arbres de défaillances à construire que des évènements redoutés retenus.
- ✓ Analyse qualitative : cette analyse permet de déterminer les faiblesses du système. Elle est faite dans le but de proposer des modifications afin d'améliorer la fiabilité du système. La recherche des éléments les plus critiques est faite en déterminant les chemins qui conduisent à un évènement redouté. Ces chemins critiques représentent des scénarios qui sont analysés en fonction des différentes modifications qu'il est possible d'apporter au

système. L'analyse des scénarios qui conduisent à un évènement redouté est faite à partir des arbres de défaillances, il est alors possible de disposer des "barrières de sécurité" pour éviter les incidents.

- ✓ Enfin, il est possible d'évaluer la probabilité d'apparition de l'évènement redouté en connaissant la probabilité des événements élémentaires. C'est l'analyse quantitative qui permet de déterminer d'une manière quantitative les caractéristiques de fiabilité du système étudié. L'objectif est en particulier de définir la probabilité d'occurrence des divers événements analysés. Les calculs reposent sur : les équations logiques tirées de la structure de l'arbre de défaillance et des probabilités d'occurrence des événements élémentaires.

Les portes logiques permettent de représenter la combinaison logique des événements intermédiaires qui sont à l'origine de l'évènement décomposé.

### 1.2.2. Arbres d'évènements

L'arbre d'évènements est une technique d'analyse inductive qui est basée sur une logique binaire. Cette technique permet de décrire, de façon graphique, comment un événement initial se propage à travers un système, en évaluant systématiquement tous les chemins fortuits et de succès qui peuvent résulter. L'analyse débute avec un événement initial et elle continue avec l'étude de ses conséquences possibles qui sont déterminées par l'action de succès ou de défaillance des dispositifs prévus pour empêcher la propagation. L'évènement initial est une défaillance qui affecte une ou plusieurs des fonctions essentielles de l'installation et qui requiert l'intervention des systèmes de sécurité ou barrières pour la contrôler. L'évènement initial peut être interne, par exemple la défaillance d'un composant du système ; ou externe, comme l'action humaine. Ces dernières peuvent être naturelles ou anthropogéniques, comme la chute d'un avion sur une installation [2].

### 1.2.3. Diagramme de fiabilité

C'est la plus ancienne méthode utilisée pour le calcul de la fiabilité des systèmes non réparables. Bien qu'elle puisse aussi s'appliquer aux systèmes réparables, son usage y reste limité. Le diagramme de fiabilité est une représentation graphique du système. C'est une modélisation naturelle car proche du schéma fonctionnel de celui-ci.

Pour comprendre la terminologie et la représentation, on peut voir le système comme un circuit électrique ou hydraulique.

Un diagramme de fiabilité est un graphe orienté sans boucle, comprenant une entrée et une sortie. Dans les cas les plus simples les nœuds du graphe (repérés par des rectangles appelés blocs) représentent des composants et un nœud est "passant" si le composant correspondant est en marche. Le système fonctionne si et seulement s'il existe un chemin dans le graphe entre l'entrée et la sortie. Dans les cas les plus complexes certains nœuds (représentés par des cercles) peuvent avoir des étiquettes (systèmes  $k$  sur  $n$ , redondance passive) et le diagramme peut comporter en plus des signes ayant une signification particulière (redondance passive). La perte d'un composant dans un circuit électrique en série empêche le passage du courant. Par analogie, la défaillance d'un composant interrompt le chemin de succès [3].

#### 1.2.4: La fonction de structure d'un système

L'étude d'un système par la fonction de structure permet de décrire de manière analytique comment l'état d'un système dépend de l'état de ses éléments. Les hypothèses sont les suivantes:

1. Le système est à l'état binaire: il fonctionne ou ne fonctionne pas (en panne),
2. Les composants du système: ils sont aussi à état binaire et l'état du système ne dépend que de l'état des composants.

Kaufmann, Gronchko et Cruon [1], ont défini une fonction à valeurs dans le sous ensemble des entiers  $\{0,1\}$  muni des opérations d'addition, soustraction et multiplication sur les entiers et montré qu'elle peut se mettre sous une forme réduite à partir de laquelle on obtient la fiabilité du système.

On peut conclure que les méthodes combinatoires ne permettent que d'identifier et d'évaluer les combinaisons d'événements qui conduisent à l'occurrence d'un événement redouté susceptible d'apparaître dans le système étudié. Ces combinaisons ou coupes, à la différence des séquences accidentelles, ne prennent pas en compte l'ordre d'apparition des événements qui la constituent. En fait, ces méthodes combinatoires ne s'intéressent pas aux instants d'occurrence des événements mais simplement au fait qu'elles ont eu lieu. Pour pallier à ces carences, comme nous le verrons, différentes approches ont été proposées dans la littérature et ont donné, lors de différentes applications, des résultats intéressants [4], [5], [6], [7].

#### 1.2.5. Modèles Markoviens

Les modèles Markoviens représentent une classe de processus stochastique. Un processus stochastique décrit l'évolution d'un système par les probabilités qu'il se trouve à un instant donné dans un quelconque de ses états (ou sous ensemble d'états) possibles. Un processus markovien est un processus stochastique dont l'état futur ne dépend pas de la trajectoire passée.

Il est homogène lorsque les taux de transition entre états ne dépendent pas du temps.

Lorsque le processus est défini de manière continue dans le temps on le représente par un graphe d'état dit de Markov. Lorsque le processus n'est décrit qu'à certains instants discrets, on parle de chaîne de Markov. Par abus de langage, ce dernier terme est parfois utilisé pour les modèles à temps continu. Ce sont ces derniers qui sont utilisés pour évaluer de façon quantitative la Sdf des systèmes, notamment lorsque les taux de transition sont constants, c'est-à-dire que les instants de défaillance et de réparation des composants sont distribués selon des lois exponentielles [3].

On suppose que le passage d'un état du système à l'autre survient aléatoirement par la défaillance d'un composant ou par la réparation d'un autre élément. Connaissant l'état initial du système, on peut en déduire soit la probabilité d'être dans un état donné après une durée déterminée, soit la probabilité moyenne d'être dans un état donné tout au long de sa durée de vie utile.

### 1.2.6. Les réseaux de Pétri

Les réseaux de Pétri sont également des modèles état-transition mais plus riches que les automates d'états car ils peuvent modéliser une classe de langage plus grande [8]. Leur intérêt est qu'ils permettent d'exprimer de manière aisée les mécanismes de parallélisme, de synchronisation, de partage ou d'assemblage de ressources, grâce au concept de marquage.

L'intérêt est de pouvoir modéliser le comportement du système sans connaître a priori l'ensemble de ses états.

Ils peuvent être utilisés à la fois [9] pour des analyses de type qualitatif (vérification de propriétés) ou pour des analyses de type quantitatif, comme l'évaluation de performances fonctionnelles ou de Sdf.

Les réseaux de Pétri sont utilisés pour modéliser des systèmes évoluant dans le temps. Ces évolutions sont mises en évidence grâce aux marques. L'ensemble de marques forme le marquage. Le marquage définit à un instant donné l'état du système. L'ensemble de transitions représente quant à lui l'ensemble des événements dont les occurrences provoquent des modifications sur l'état du système. Chaque marquage peut être représenté par un vecteur et le réseau peut être modélisé comme un ensemble d'équations algébriques L'état du système est alors décrit par son graphe de marquage.

Il existe plusieurs classes de réseaux de Pétri. Les réseaux de Pétri stochastiques associent à chaque transition un taux de franchissement aléatoire. Si tous les taux sont constants (distribution exponentielle de la durée de franchissement) alors le graphe de marquage est

homogène à un graphe de Markov.

Très souvent cette hypothèse ne peut être satisfaite en raison de la complexité des phénomènes à modéliser. On utilise alors les modèles de type état transition (graphe d'état ou RdP) comme supports de simulation par des méthodes de Monte Carlo.

### **1.2.7. Simulation de Monte Carlo (MC)**

La simulation de MC est un outil numérique basé sur le tirage au sort de nombres aléatoires. La quantité que l'on désire estimer correspond à l'espérance mathématique d'une variable aléatoire, évoluant selon un processus stochastique. L'estimation est obtenue en moyennant les résultats collectés lors d'un grand nombre d'histoires simulées du système. Afin de voir apparaître un événement redouté (rare en général) un nombre suffisant de fois, on doit faire un grand nombre de simulations, ce qui implique des temps de calcul important [10], [11] et [12]. De nombreuses techniques d'accélération de la simulation permettent de réduire ces temps. Elles sont basées soit sur une diminution de la complexité du modèle, soit sur la réduction du nombre de scénarios à simuler, en favorisant l'apparition des événements rares. Toutefois, ces méthodes ne sont pas toujours faciles à mettre en œuvre, car elles impliquent des hypothèses assez fortes et/ou ne fournissent pas forcément des estimateurs de qualité [11].

La simulation de MC se prête particulièrement bien aux études de fiabilité dynamique étant donné le caractère stochastique naturel du problème étudié. Selon [13], [14], [15] et [16], cet outil de résolution s'avère peu sensible aux dimensions du problème, ce qui est un avantage précieux.

On peut effectuer une simulation de MC à partir d'un grand nombre de modèles comportementaux (automates d'états, réseaux de Pétri, arbres de défaillance...) pour la résolution d'un problème de fiabilité prévisionnelle.

### **1.3. Evaluation des risques dans le concept de la fiabilité dynamique.**

Les approches et les méthodes de la fiabilité dynamique se basent sur des analyses probabilistes de sûreté, dont le but d'étudier de manière intégrée le comportement des systèmes homme-machine-logiciel affectés par une évolution dynamique sous-jacente.

L'interaction entre le comportement du matériel considéré et son environnement, est décrit par un ensemble de variables continues, appelées variables physiques. Les taux de transition instantanée entre les différents états du matériel dépendent alors de ces variables physiques et inversement, l'évolution au cours du temps des variables physiques est décrite par un système d'équations différentielles dont les coefficients dépendent de l'état du matériel.

C'est ce qu'on appelle un modèle de fiabilité dynamique [17].

### 1.3.1. Les études probabilistes de sûreté (EPS)

L'EPS est une technique relativement récente, qui permet d'évaluer le risque d'installations complexes, à partir du comportement individuel de chacune des composantes.

Les EPS sont pratiquées non seulement dans le secteur nucléaire mais aussi dans le domaine du transport, de l'informatique ainsi que dans l'industrie des procédés.

Dans l'industrie nucléaire, et notamment au sein des réacteurs à eau sous pression, les études EPS ont mis en évidence l'importance qu'il fallait accorder aux états d'arrêt qui ont été pris en compte de façon systématique, tant pour les analyses de risque que pour le dimensionnement des systèmes de protection et de sauvegarde.

Au départ d'une analyse EPS, il y a un scénario avec son événement "initiateur" suivi d'une succession d'étapes, dont certaines sont des "défaillances" de composantes de l'installation importantes du point de vue de la sûreté, pouvant contribuer à la gravité d'un accident. La probabilité pour que l'accident ait lieu dans le scénario envisagé (par exemple une fusion du cœur d'un REP avec relâchement des produits de fission) n'est autre alors, que le produit des probabilités des défaillances (individuelles) des macro-composantes de l'installation menant à la réalisation de l'accident.

Les éléments clés de l'analyse EPS sont:

- la détermination des probabilités de défaillances des macro-composantes de l'installation.
- l'identification de tous les scénarios possibles pour un ensemble d'événements initiateurs.

L'ensemble des scénarios envisagés pour un événement initiateur donné est habituellement désigné sous le nom d'arbre d'événement. La figure (1.1) donne un exemple d'arbre d'événement. L'événement initiateur y est la rupture d'une tuyauterie du système de refroidissement primaire d'un REP et les macro-composantes sont : l'alimentation électrique des équipements, le système de refroidissement d'urgence du cœur ("ECCS"), le rabattement des produits de fission et le bâtiment réacteur.

Il y a seize scénarios possibles chacun ayant sa probabilité d'occurrence, fonction des probabilités de défaillance des macro-composantes. Certains scénarios conduisent à la fusion du cœur du réacteur. Par ailleurs, certains scénarios sont sans objet car il est certain, par exemple, qu'en cas d'indisponibilité de l'alimentation électrique, ni le refroidissement d'urgence (ECCS) ni le rabattement des produits de fission ne peuvent opérer. Quand on retire de l'arbre



d'événement initial tous les scénarios sans objet, on obtient l'arbre d'événement réduit (voir partie inférieure de la figure 1.1).

Pour déterminer la probabilité de défaillance d'une macro-composante de l'installation (et donc, un élément éventuel de la probabilité de fusion du cœur), il faut analyser la logique de fonctionnement de cette macro-composante. La logique fait habituellement intervenir des organes intermédiaires, susceptibles eux-mêmes de défaillir au cours du temps avec une certaine probabilité (par unité de temps). La logique de fonctionnement d'une macro-composante de l'installation menant à la défaillance de celle-ci est habituellement désignée sous le nom d'arbre de défaillance.

La figure (1.2) fournit un exemple de ce que pourrait être l'arbre de défaillance de l'installation électrique dont il est question à la figure (1.1). L'arbre de défaillance consiste en un assemblage d'opérations logiques de type "et" ("AND") ou "ou" ("OR") auxquelles il convient d'appliquer les règles de l'algèbre de Boole pour obtenir le résultat désiré, c'est-à-dire la probabilité de l'événement sommet (ici, la perte de l'alimentation électrique des organes de sûreté) en fonction des probabilités des événements individuels qui peuvent contribuer à la réalisation de cet événement sommet.

Si, dans l'exemple de la figure (1.2), on appelle  $S$  "l'événement sommet" et  $B_1$ ,  $B_2$  et  $B_3$  les "événements de base", alors la probabilité de l'événement sommet  $P(S)$  s'écrit :

$$P(S) = P(B_1) P(B_2) + P(B_3)$$

On comprend aisément que la réalisation d'une étude EPS exige une connaissance approfondie de l'installation étudiée et du rôle de chaque organe qui la compose dans le fonctionnement de celle-ci. Pour qu'une étude EPS soit significative, il faut envisager tous les scénarios possibles pour tous les événements initiateurs potentiels (internes ou externes), pouvant mener à l'accident en question, y compris les défaillances humaines. Il en résulte une très grande complexité algorithmique et un usage hyper-intensif du calcul sur ordinateur.

L'étude EPS décrite ci-dessus est dite étude EPS de niveau 1. Le résultat fournit, pour l'installation étudiée, une valeur moyenne de la probabilité de fusion du cœur par unité de temps. Dans l'état présent de la technologie et compte tenu des hypothèses de calcul (incluant par exemple, la fiabilité humaine et des modes communs de défaillance), la valeur moyenne de cette quantité pour les réacteurs à eau légère est de  $5 \times 10^{-5}$  par an par réacteur. Cette valeur moyenne tient compte du fait que certains événements initiateurs (extrêmement rares) auront des conséquences très graves pouvant aller jusqu'à la destruction complète du cœur tandis que d'autres, moins rares, auront des conséquences nettement moins sévères.

L'étude EPS de premier niveau est indispensable pour déterminer le "risque" d'accident de

réacteur. Elle est toutefois insuffisante, car l'évaluation du risque tient compte non seulement de la probabilité de l'événement mais aussi de ses conséquences.

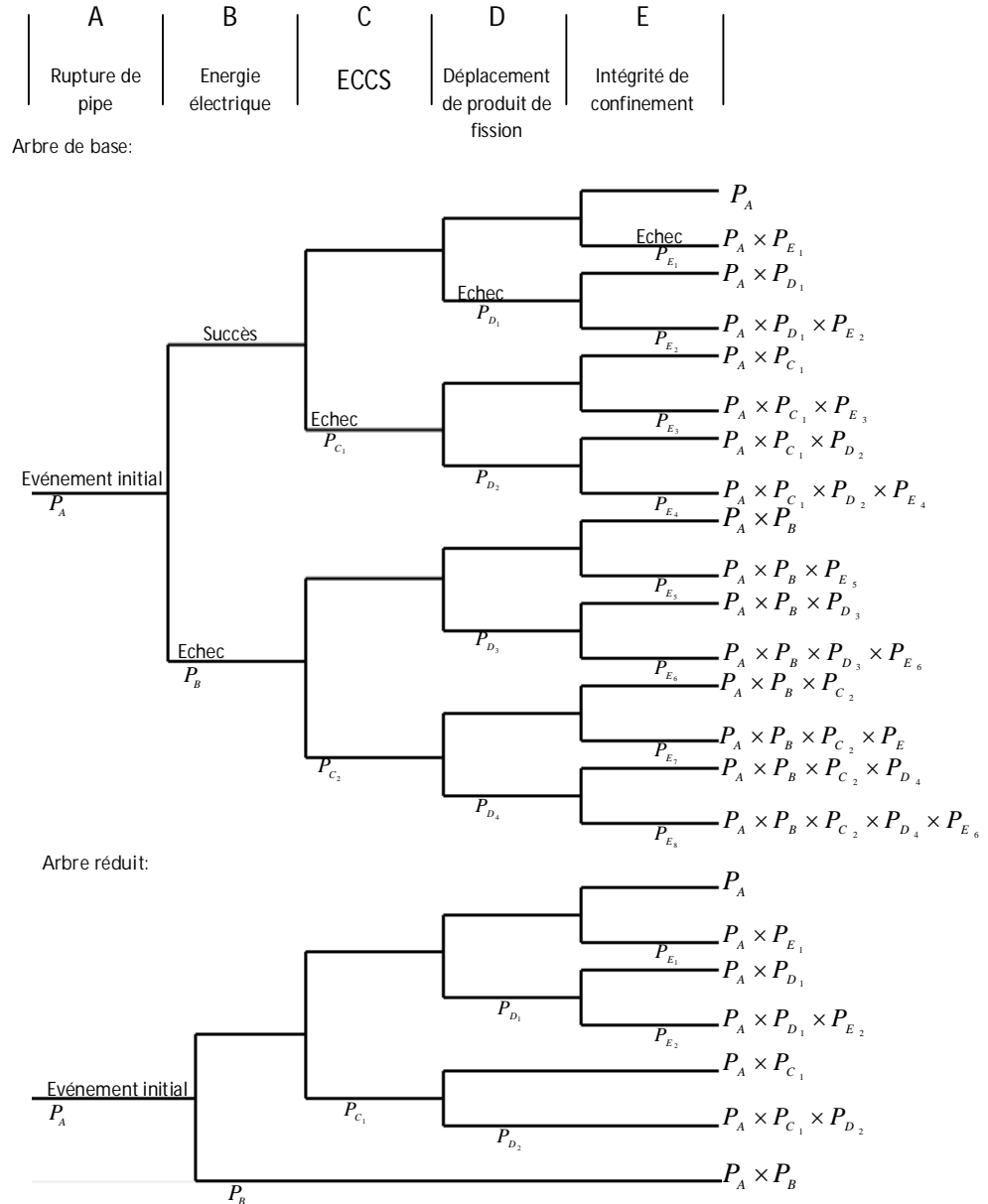


Fig.1.1 : Arbre d'événement d'un accident de perte de réfrigérant et arbre« réduit » voir [18]

L'arbre de défaillance de l'accident de perte de réfrigérant représenté dans la figure (1.2) permet de déterminer la probabilité de perte d'alimentation électrique des systèmes de sûreté actifs de gauche à droite, les événements de base sont notés B1, B2 et B3 [18]).

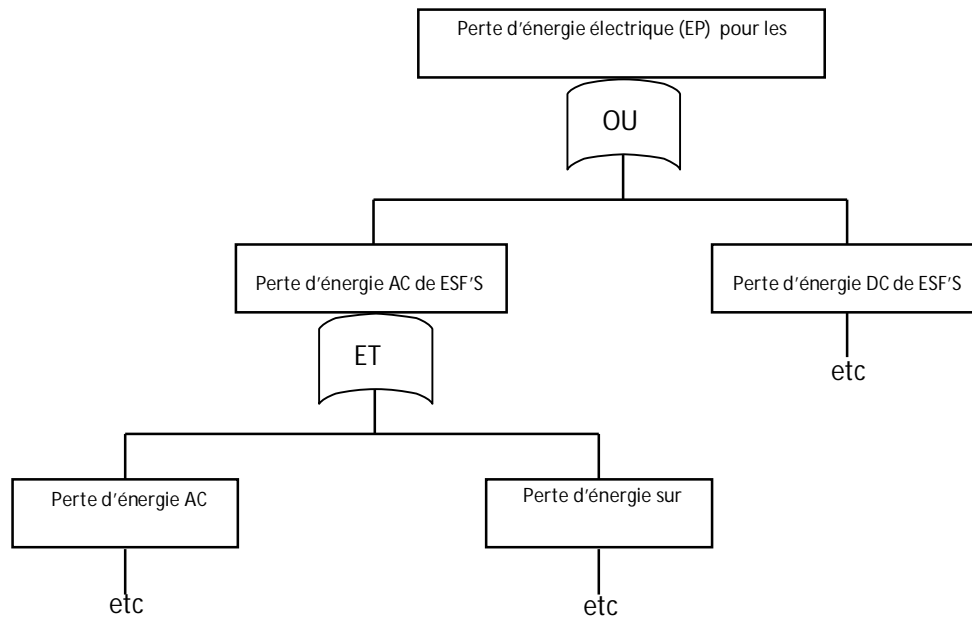


Fig.1.2:Arbre de défaillance d'un accident de perte de réfrigérant

La deuxième est l'étude EPS de niveau 2 [19], menée pour les REP de 900 MWe. Elle constitue un prolongement de l'EPS de niveau 1. Alors que celle-ci vise à évaluer la fréquence des accidents qui conduisent à la fusion du cœur, l'EPS2 a pour objectif d'évaluer la fréquence et le niveau des rejets dans l'environnement résultant de ces accidents(figure1.3).

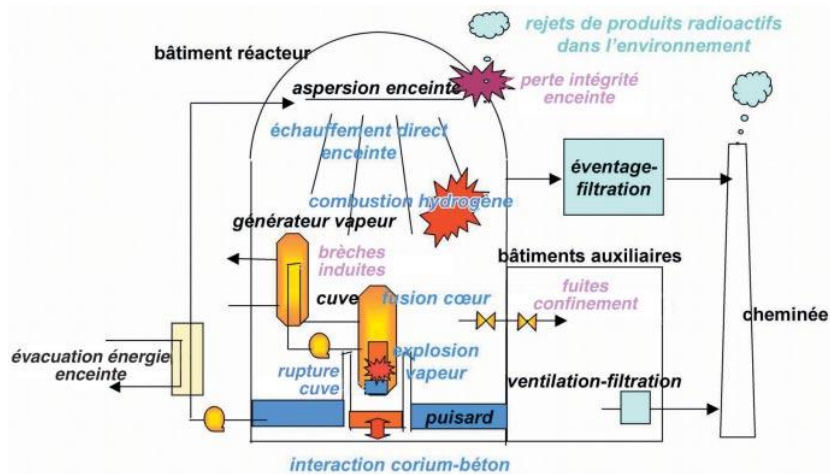


Fig. 1.3: Les accidents graves d'un R.E.P.

L'étude est fondée sur quatre étapes principales :

- **Regroupement des séquences de l'EPS1 en états dégradés de l'installation :**

Pour développer l'interface entre les études EPS1 et EPS2, une liste de variables d'interface a été établie, destinée à assurer le transfert vers l'EPS2 de toutes les informations permettant de caractériser la progression de l'accident au-delà du dénoyage du cœur. À toute séquence de l'EPS1 est ainsi associé un jeu de valeurs des variables d'interface. Les séquences ayant un même jeu de valeurs de ces variables sont ensuite regroupées en "états dégradés de l'installation" (EDI), constituant les données d'entrée de l'EPS2.

- **Élaboration d'un arbre de déroulement des accidents graves**

L'EPS2 est fondée sur l'élaboration d'un arbre d'événements, appelé "arbre de déroulement des accidents graves" (ADAG). Cet arbre est constitué d'une succession ordonnée d'événements qui sont relatifs au fonctionnement des systèmes, aux actions humaines ou aux phénomènes physiques ayant une influence sur le déroulement de l'accident. À chaque événement de l'ADAG sont associés des branches et un modèle de quantification dont le rôle est de fournir la probabilité conditionnelle des différentes branches, ainsi que la valeur de certaines variables, qui peut évoluer au cours de la progression dans l'arbre. La quantification probabiliste de l'ADAG est effectuée pour chaque EDI. Chacune des successions des branches empruntées lors du parcours de l'arbre constitue une séquence accidentelle de niveau 2.

- **Regroupement des séquences EPS2 en familles de progression des accidents**

À l'issue de la quantification probabiliste de l'ADAG, un regroupement des séquences accidentelles de niveau 2 en familles de progression des accidents (FPA) est effectué en fonction de variables dont la valeur a une influence significative sur les rejets radioactifs dans l'environnement.

- **Évaluation des rejets**

La dernière étape de l'étude consiste en l'évaluation des rejets radioactifs atmosphériques dans l'environnement, correspondant à chaque FPA.

Un logiciel de quantification probabiliste, le logiciel KANT, a été développé spécifiquement dans le cadre du projet EPS2. Ce logiciel permet notamment de représenter et de quantifier l'arbre de déroulement des accidents graves, de représenter et de regrouper les familles de progression des accidents, d'évaluer le niveau des rejets correspondant à chaque FPA, d'évaluer les incertitudes sur les résultats, ainsi que d'exploiter ces résultats [18].

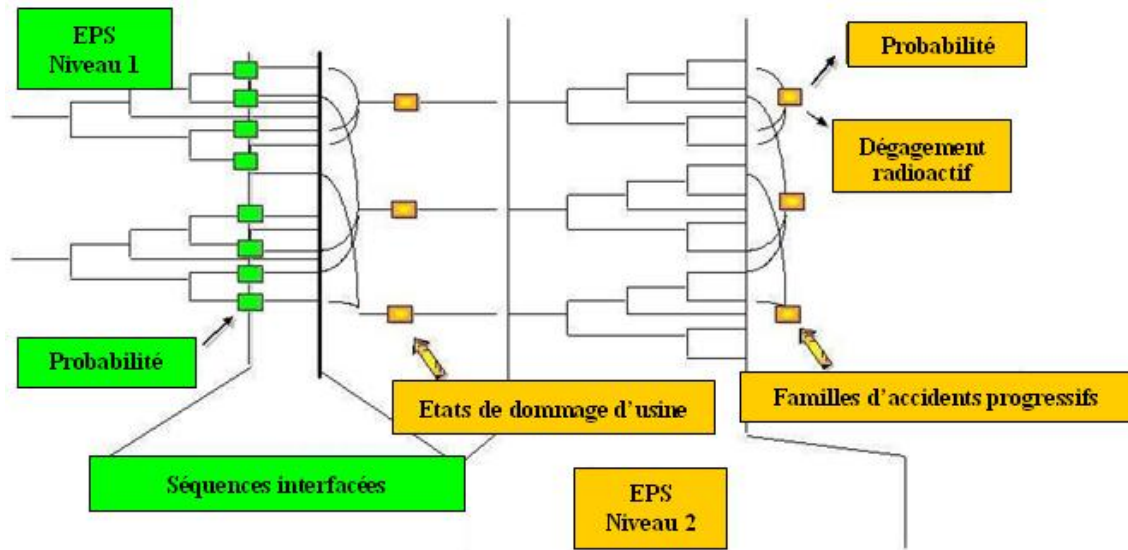


Fig. 1.4: Schématisation des principales étapes de l'EPS2.

On appelle étude EPS de niveau 3, l'étude de l'impact des rejets à l'extérieur de l'installation : la contamination de l'environnement (en  $Bq/m^2$ ).

les doses aux populations situées dans les zones proches du lieu de l'accident (en  $Sv/hab.$ ).

Pour mener à bien l'étape de niveau 3, il convient de compléter les calculs effectués au niveau 1 et 2, fournissant la fraction du contenu du cœur rejetée à l'extérieur de la centrale, par une simulation du transport des radio-isotopes dans l'atmosphère. Ceci se fait à l'aide d'un modèle qui tient compte des conditions climatiques aux alentours de la centrale, dans un rayon de quelques dizaines de kilomètres (au plus).

Ces conditions climatiques incluent les précipitations, la vitesse et l'orientation du vent, etc...., de manière à obtenir des valeurs moyennes des conséquences potentielles.

### 1.3.2. Théorie de dynamique probabiliste TPD.

La théorie de dynamique probabiliste TPD, ou « Théorie des arbres d'évènements continus » traite les processus dynamiques à transitions stochastiques [13].

L'interrelation existant entre les variables physiques et les changements d'états du système, au cours d'un fonctionnement transitoire peut être représentée par le schéma de la figure 1.5.

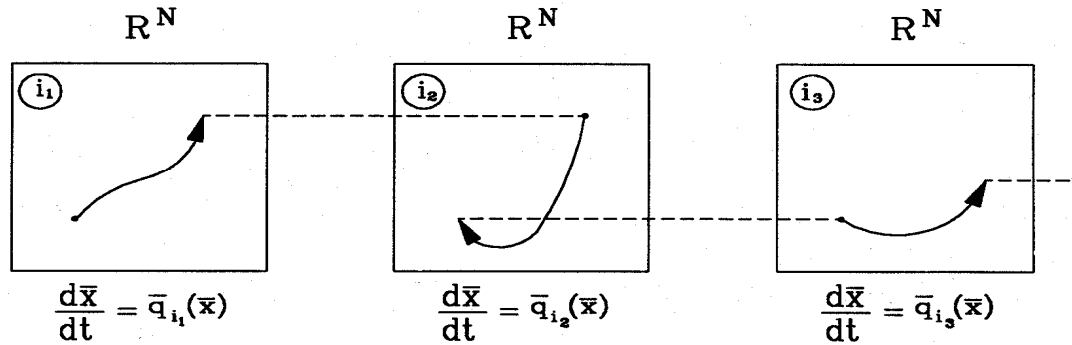


Fig. 1.5 : Description d'une séquence accidentelle.

La figure 1.5 montre l'évolution suivie par le système après la réalisation de l'évènement lui faisant quitter son état stationnaire pour rentrer dans l'état  $i_1$ . Dans celui-ci, les variables physiques, représentées par le vecteur  $X$ , obéissent aux lois déterministes de la dynamique correspondante, donnée par  $\frac{dx}{dt} = q_i(X)$ . Au bout d'un certain intervalle de temps, le système subit une transition entre les états  $i_1, i_2$ , soit parce qu'un seuil associé à une action de contrôle a été atteint, soit parce qu'une transition en opération s'est produite.

Les variables continues décrivant le comportement de l'installation suivent alors de nouvelles lois dynamiques, correspondant au nouvel état  $i_2$  (schéma central), et ce de manière déterministe jusqu'au prochain changement d'état, où la situation précédente se répète (schéma de droite).

Cette description permet de comprendre l'appellation de dynamique probabiliste donnée initialement à la fiabilité dynamique: le système évolue le long de sections déterministes de trajectoires dans l'espace  $\mathbb{R}^N$ .

### 1.3.3. Théorie de la dynamique probabiliste basée sur les stimuli SDTPD:

La SDTPD [20], est une méthode qui se base sur les concepts de fiabilité dynamique et par conséquent, elle décrit les évolutions du système comme une succession d'entrées dans des différentes dynamiques (comme le montre la figure 1.5). Chaque dynamique correspond à un état global spécifique du système et l'évolution de ce système est régie, dans chaque dynamique, par un ensemble spécifique d'équations. Les transitions dynamiques sont dues à un changement d'état du système, comme par exemple, la défaillance d'un composant, le démarrage d'un système de sécurité, une action humaine ... .

Chaque transition entre deux dynamiques représente la survenance d'un événement. Dans le cadre de la SDTPD, chaque occurrence de l'événement est divisée en deux phases différentes : La première correspond au temps nécessaire pour remplir toutes les conditions requises pour l'occurrence de l'événement et la seconde correspond au temps écoulé entre le moment où les conditions sont réunies et le moment de l'accident d'événement réel (voir figure 1.6).

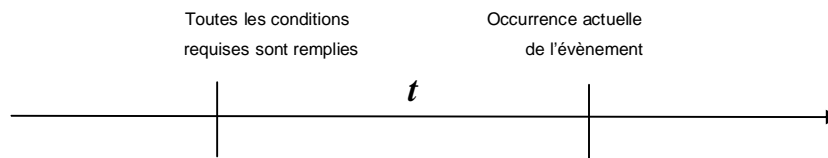


Fig. 1.6 : Les deux phases d'occurrence de l'événement.

Un stimulus est associé à chaque événement. La première phase correspond à l'activation de stimulus, puis un délai, associé à ce stimulus, commence à s'écouler. Une fois que le délai s'écoule, l'événement se produit (voir figure 1.7).

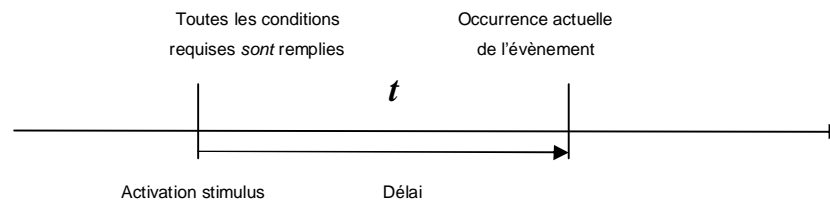


Fig. 1.7 : Les deux phases d'occurrence de l'événement, décrites par un stimulus

Avant l'occurrence de l'événement, le stimulus doit être activé, aucune occurrence de l'événement est possible avant l'activation de son stimulus. Mais le délai associé peut être long ou court, ou même égal à zéro. Il peut être déterministe ou aléatoire.

Ce délai peut représenter l'inertie d'un système mécanique, l'incertitude associée à un seuil, le temps nécessaire pour effectuer un diagnostic en cas d'une action humaine ....

Pendant le délai qui s'écoule, le système continue à évoluer et à changer. Ces changements pourraient rendre le système dans un état où l'occurrence de l'événement n'est plus possible. Par exemple, dans le cas d'une combustion d'hydrogène, le stimulus est activé quand le mélange de gaz devient inflammable et le délai correspond au temps avant une apparition d'allumage. Mais, avant cette apparition, un système qui réduit la concentration en hydrogène (comme les recombineurs) peut commencer. Par conséquent, le mélange de gaz n'est plus inflammable et aucune combustion n'est possible. Dans un tel cas, où l'événement n'est plus possible, le stimulus doit être désactivé. En effet, un stimulus peut être considéré comme un drapeau, qui informe, si

un événement est possible ou non.

Ce processus de désactivation est également composé de deux phases: l'activation "de la désactivation du stimulus " (lorsque les conditions requises pour la désactivation sont remplies) et le délai de désactivation s'écoule (avant la désactivation réelle).

En résumé, un stimulus double doit être associé à chaque événement: la première partie est consacrée à l'activation (appelée le stimulus d'activation)et la seconde est consacrée à la désactivation (appelée le stimulus de désactivation). Afin d'éviter toute confusion et employer une formulation symétrique, ce que nous avons appelé « l'activation d'un stimulus » seront marqués comme « déclenchement d'un stimulus d'activation » et la première phase du processus de désactivation sera marquée « déclenchement d'un stimulus de désactivation ».

Après le déclenchement de l'activation ou la désactivation d'un stimulus, l'activation ou la désactivation d'un délai commence à s'écouler.

Bien sûr, aucun déclenchement d'un stimulus de désactivation n'est possible avant le déclenchement du stimulus d'activation associée au même événement. L'écoulement d'une activation ou une désactivation de délai ne peut commencer avant le déclenchement de l'activation ou la désactivation du stimulus correspondant.

Sur la base de ces descriptions, trois cas sont possibles:

Dans le premier cas, il n'y a pas de désactivation, L'événement se produit (voir figure 1.8).

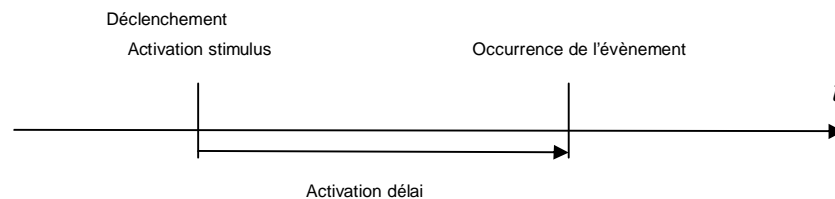


Fig. 1.8 : Activation sans désactivation.

Dans le second cas, le stimulus de désactivation est déclenché, mais le délai d'activation est écoulé avant l'écoulement du délai de désactivation (voir figure 1.9). On a aussi une occurrence d'événement.

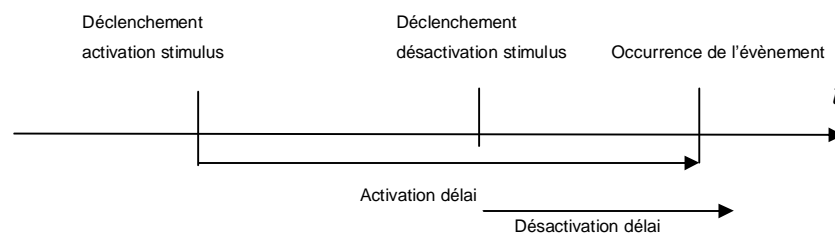


Fig. 1.9: Activation avec le déclenchement du stimulus de désactivation mais il y'a occurrence de l'événement.



Dans le troisième cas, le stimulus de désactivation est déclenché et le délai de désactivation est écoulé avant l'écoulement du délai d'activation (voir le schéma 1.10). L'événement est empêché et ne se produit pas.

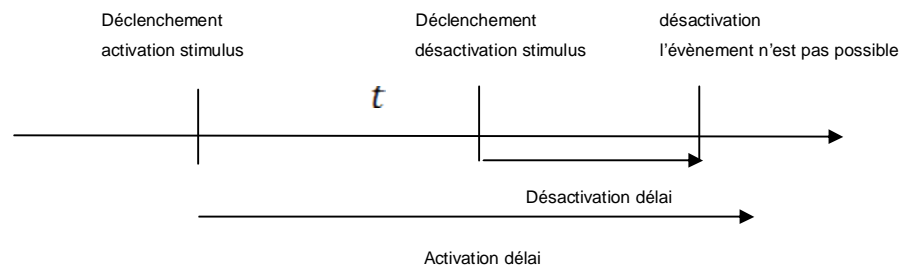


Fig. 1.10: Activation avec le déclenchement du stimulus de désactivation

et sans occurrence de l'événement.

Selon l'événement modélisé, Les délais peuvent être nuls et la désactivation peut être impossible. Mais la modélisation d'un événement doit contenir au moins un stimulus d'activation.

#### 1.3.4. Théorie de la dynamique des stimuli TSD.

La méthode TSD est une variante de la méthode générale SDTPD, elle utilise un type spécifique de chemins et de séquences pour la résolution du SDTPD (les détails des deux méthodes seront présentés dans le chapitre 2).

*Evaluation dynamique des  
risques avec la méthode TSD*

## 2.1. Introduction

Les techniques de la fiabilité dynamique basée sur la théorie de la dynamique probabiliste basée sur les stimuli (SDTPD) [21], [22] donnent quelques indications sur le potentiel de la SDTPD et permettent de répondre à plusieurs questions difficiles ou non résolus par les méthodes statiques tels que les EPS lié à l'application des techniques FT / HE / APET.

La théorie de la dynamique probabiliste TPD [23] a porté des solutions aux équations de la SDTPD, par ces notions de stimulus et délai mais malheureusement ces notions sont toujours insuffisantes car elles ne considèrent pas l'activation et la désactivation des stimuli, C'est pourquoi la théorie de la dynamique des stimuli TSD vient comme une solution efficace par son formalisme mathématique, et ses notions d'activation et désactivation des stimuli et délais et aussi le type spécifique de chemins et séquences utilisé pour résoudre d'une manière efficace les problèmes posés par la méthode SDTPD.

## 2.2. Cadre mathématique de la TSD

Pour calculer la fréquence d'excès de domaine de dommage dans un contexte de fiabilité dynamique, on compte à la fois l'évolution dynamique des événements (événements dynamiques) ou juste les changements de conditionnement (événements d'activation des stimuli).

Les événements dynamiques sont associés à la survenue de phénomènes physiques, qui sont induits soit par l'intervention des systèmes de sauvegarde ou par l'événement déclencheur.

L'application de la TSD nécessite la connaissance des temps d'activation des stimuli pour les événements dynamiques, afin de calculer la densité de fréquence de ce chemin particulier transitoire, ainsi que pour déterminer si le chemin induit est un chemin de dommage ou non.

### 2.2.1. Description du processus, de vecteur d'état et des vecteurs de stimuli

Les références [24], [25] et [26] fournissent un compte rendu général de la méthode SDTDP et la spécification de l'exercice d'illustration de Benchmark, et ils sont brièvement résumés afin de comprendre les particularités du TSD.

#### Description Etat

Dans la technique des études probabilistes de Sûreté EPS, La progression des accidents est caractérisée par l'état des différents systèmes de protections (en service, utilisable en mode veille ou échoué) ou intervention de l'opérateur, ou par la survenance ou non d'un phénomène stochastique donnée («vecteur d'état  $j$ »). Ces actions de protection sont naturellement liées aux

variables dynamiques («vecteur Processus 'x'»).

A chaque changement j(événement dynamique), le système évolue pour entrer dans une nouvelle configuration, et cette évolution déterministe est décrite par l'équation suivante :

$$x(t) = g_j(t; \bar{u}) \quad (2.1)$$

où :

$\bar{u}$  : est le vecteur processus au moment d'entrer à la dynamique j.

On note l'évolution globale, par la notation allant de  $J_0$  à J, qui est appelée aussi «un chemin de transition».

On note aussi que les vecteurs j et x, évoluent avec le temps, (le premier uniquement après chaque événement dynamique, et le deuxième évolue par morceaux).

La méthode SDTPD comprend une extension additionnelle de l'espace d'état : des états d'activation de stimulus sont considérés par une étiquette de stimulus indiquant l'état d'activation ( $I_G = +$ ) ou la désactivation ( $I_G = -$ ) de stimulus G. La notation I est réservée à l'étiquette des configurations d'état lorsqu'on considère tous les stimuli ensemble.

Un stimulus est soit un ordre d'action (dans beaucoup de cas, il est donné par un dispositif électronique ou correspondant à un opérateur de diagnostic), ou la réalisation des conditions déclenchant un phénomène stochastique. Alors, il peut prendre plusieurs formes différentes, tels que le passage par un point seuil ou l'entrée dans une région de l'espace des variables processus. Généralement le terme 'stimulus' couvre n'importe quelle situation qui cause potentiellement, après un délai donné, un événement qui se produit et par la suite un branchement qui peut avoir lieu. par conséquent, si  $G_n$  désigne le stimulus qui conduit à la transition  $j_n \rightarrow j_{n+1}$ , il devrait être dans l'état d'activation pour que la transition aura lieu.

La méthode SDTPD modélise l'activation / désactivation des stimuli comme des événements avec activation / désactivation des taux de transition  $\lambda^F(t,x)/\mu^F(t,x)$  pour le stimulus F. L'état total du système en cours d'une transition est donc définie par le couple  $(j_n, I)$  qui représente à la fois la dynamique actuelle dans laquelle le système évolue, et pour les états actuels des activations différentes.

Dans la TSD, une classification importante est faite et qui conduit à la sélection de stimuli :

**Les Stimuli de dommages** : Sont les stimuli qui entrent dans l'arbre logique qui établit des conditions logiques pour la survenance de la condition de dommage, et qui sont en cours d'examen. Pour chaque condition de dommage, il est nécessaire faire une analyse différente. Cet arbre logique joue le même rôle que l'arbre d'événements, et il est désigné ici comme l'arbre des dommages.

**Les stimuli d'en-têtes :** Sont les stimuli qui activent les en-têtes des séquences. Ils peuvent être externes, et dans ce cas ils représentant les événements de connexion entre les parties du système à la suite de l'activation d'en-tête (conditions aux limites), ou interne, et dans ce cas ils se réfèrent aux événements survenus en interne.

**Les stimuli auxiliaires :** Sont les stimuli sélectionnés pour discriminer certaines conditions pour plus de commodité de modélisation.

### 2.2.2. Description des événements stochastiques

La figure 2.1 montre la modélisation des événements stochastiques de la méthode SDTPD :

- La fonction  $f_i^F(t; \bar{u})$  : est la densité de probabilité du temps d'activation de F dans l'état i.
- $h_{ij}^F(t; \bar{u})$  : est la Probabilité par unité de temps du délai avant la réalisation effective de la transition induite par F et faisant passer le système de i à j.
- $h_i^F(t; \bar{u}) = \sum_{j \neq i} h_{ij}^F(t; \bar{u})$  : est la densité de probabilité du délai avant de quitter i suite à un événement induit par F.
- $dt_F \int_0^{t_F} f_i^F(\tau; \bar{u}) \cdot h_{ij}^F(t_F - \tau; \bar{g}_i(\tau, \bar{u})) d\tau$  : est la Probabilité pour que le temps total pris par la transition hors de i induite par F soit dans  $[t_F, t_F + dt_F]$ , si l'état final est j.

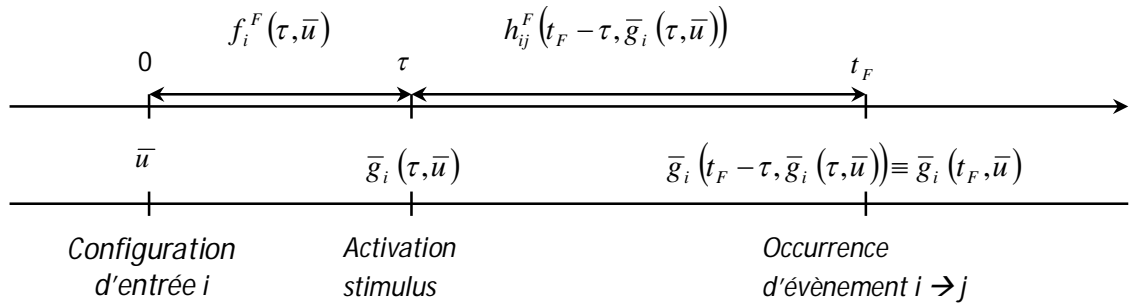


Figure. 2.1 : Occurrence de deux phases de l'évènement induit par F.

### 2.2.3. Taux d'activation des stimuli pdf, f

De la modélisation générale de la méthode SDTPD des événements stochastiques, la théorie de la dynamique des stimuli TSD choisit des formes particulières pour les taux d'activation de stimuli pdf.

**Stimuli régional.** L'influence de l'évolution temporelle des variables de conditionnement des phénomènes stochastiques, ainsi que les opérateurs d'alerte peut être décrite par les probabilités

des variables processus de l'espace des régions, afin de fournir des expressions explicites pour représenter celles-ci, nous supposons que les expériences sur le phénomène F, fournissent des probabilités d'activation  $q_{M_j}^F$  dans les régions  $M_j$  du partitionnement de l'espace des phases des variables processus, avec  $j = 1 \dots n$ .

Soit  $\tau_{ij}^F(\bar{u})$  le temps nécessaire, tout en évoluant dans la dynamique  $i$ , pour atteindre la frontière de la région  $M_{ij}$  balayée par les trajectoires du système (chemins transitoires) dans l'espace des variables processus.

Si nous supposons que le stimulus F est instantanément activé à l'entrée d'une région, on peut représenter le taux d'activation de stimulus pdf, avec la durée d'accident  $t_{mission}$  ou le temps de mission, sous la forme suivante:

$$f_i^F(t; \bar{u}) = q_{M_1}^F \delta(t - \tau_{i1}^F(\bar{u})) + (1 - q_{M_1}^F) q_{M_2}^F \delta(t - \tau_{i2}^F(\bar{u})) \\ + (1 - q_{M_1}^F)(1 - q_{M_2}^F) q_{M_3}^F \delta(t - \tau_{i3}^F(\bar{u})) + \dots + \prod_{j=1}^n (1 - q_{M_j}^F) \delta(t - t_{mission}) \quad (2.2)$$

Avec  $\tau_{i,j+1}^F(\bar{u}) > \tau_{ij}^F(\bar{u}) \forall j$ .

**Stimuli de l'événement** (c'est à dire événement activé / désactivé en raison de l'occurrence des événements dynamiques). Il peut arriver que les stimuli d'activation se désactivent et vice versa, suite à des événements dynamiques, comme on peut avoir certains stimuli activés au temps que d'autres sont désactivés ou inchangées, donc une variété de situations différentes peuvent être possibles dans un même système de protection. Les différentes situations sont décrites par des matrices ' $\Omega$ ' des événements dynamiques et dont les composantes sont des valeurs booléennes : 1, -1 ou 0. Ils sont des informations essentielles dans les deux méthodes SDTPD et TSD, ce qui permet des fonctionnalités de modélisation de conception communes. Par contre il est difficile de les inclure dans les méthodes classiques de PSA.

#### 2.2.4. Taux d'activation de délai pdf, h

Dans la TSD, il n'ya aucune restriction dans le traitement des fonctions  $h_{ij}(t, \bar{u})$  représentant les densités de probabilité de délai pour que les événements dynamiques se produisent, une fois que le stimulus est activé.

Pour un tel système en impliquant des actions humaines (ou des phénomènes aléatoires), le stimulus est activé au moment de la décision est prise, conditionnée par l'évolution de la situation, comme il est indiqué par la limite de temps de passage d'éq. 2.2, tandis que le délai après l'exécution de la décision des opérateurs peut être aléatoire, Un grand nombre de situations peuvent être décrites en utilisant à nouveau une formulation simple semblable à l'éq. 2.2

$$\begin{aligned}
h_{ij}^F(t; \bar{u}) &= \sum_1^N H_{M_n}^F / \Delta_i^F \theta(t - \tau_{in-1}(\bar{u})) \theta(\tau_{in}(\bar{u}) - t) \\
&+ \sum \left[ 1 - \left( \sum H_{M_n}^F \right) / (t_{mission} - \tau_{iN}) \right] \theta(t - \tau_{iN}) \theta(t_{mission} - t)
\end{aligned} \tag{2.3}$$

Avec :

$$\begin{aligned}
H_{M_n}^F &: \text{Sont des constantes caractérisant chaque région M et stimulus F} \\
\Delta_i^F &\equiv \tau_{in} - \tau_{in-1}
\end{aligned} \tag{2.4}$$

Sinon, il peut être donné par le format suivant (délais markoviens) :

$$h_{ij}(t, u) = p_{ij}(\bar{u}) \exp(-p_{ij}(\bar{u})) t \tag{2.5}$$

où :

$p_{ij}$  : est un paramètre du taux de délai de la transition qui est habituellement estimée en imposant des conditions connues.

Dans le cas général H peut être constaté empiriquement, à partir des expériences appropriées.

### **Par exemple dans l'exercice de Benchmark lié à l'industrie nucléaire :**

Comme il est précisé, "la probabilité d'occurrence de l'injection d'eau et de l'activation de pulvérisation est constante dans les intervalles de temps donné et égal à 1/2". Ceci peut être interprété de deux façons:

a / le taux de probabilité de transition est constant et la probabilité après l'intervalle de temps donné soit 1/2. Dans ce cas,

$$P_{ij}(\Delta t) = 1/2 \tag{2.6}$$

à partir de laquelle  $p_{ij}$  dans l'équation (2.5), peut être déduite.

b / La probabilité est constante (= 1 / 2) pendant l'intervalle. Ensuite, nous pouvons utiliser la relation suivante:

$$h_{ij}^F(t; \bar{u}) = H / \Delta t \theta(\Delta t - t) + (1 - H) / [t_{mission} - \Delta t] \theta(t_{mission} - t) \theta(t - \Delta t) \quad H = 1/2 \tag{2.7}$$

Comme pour les délais de la combustion d'hydrogène, elles sont semblables, mais la durée donnée est conditionnée par l'état d'activation du recombineur catalytique.

Dans l'exemple indiqué, il ya deux possibilités pour la probabilité de délai lié au démarrage des recombineurs. Un  $\Delta t$  variable, linéaire avec la concentration en hydrogène, est défini en l'absence de recombineurs, et sa valeur minimale étant maintenue constante, si les recombineurs sont actifs:

$$\Delta t = \begin{cases} \Delta t_{\max} & \text{if } [H_2]_{flam} \leq [H_2] \leq [H_2]_{igni} \\ 1200s & \text{if } [H_2] > [H_2]_{igni} \end{cases} \quad (2.8)$$

où :

$\Delta t_{\max}$  est donné par l'expression suivante:

$$\Delta t_{\max}([H_2]) = \frac{(14400 \cdot ([H_2]_{igni} - [H_2]) + 1200 \cdot ([H_2] - [H_2]_{flam}))}{([H_2]_{igni} - [H_2]_{flam})} \quad (2.9)$$

### 2.3. Solution des équations de la TSD (fréquence d'excès du domaine de dommage)

#### 2.3.1. Contexte

Pour la probabilité  $\pi_j(t)$  à l'état  $j$  et au temps  $t$ , les équations différentielles de Chapman-Kolmogorov (Semi-Markov) sont données par :

$$\frac{d}{dt} \pi_j(t) = -\pi_j(t) \cdot \sum_{j \neq k} p_{j \rightarrow k}(t) + \varphi_j(t) \quad (2.10)$$

Avec :

$$\varphi_j(t) \equiv \sum_{k \neq j} p_{k \rightarrow j}(t) \cdot \pi_k(t) \quad (2.10a)$$

Où : les taux de transition sont une fonction du temps.

Par développement en série de Neumann, on aboutit à la solution de l'équation (2.10) :

$$\pi_j(t) = \sum_k \left[ \exp \int_{\tau}^t ds A(s) \right]_{jk} \pi_k(t) \quad (2.11)$$

$$[A(s)]_{jk} \equiv \begin{cases} p_{j \rightarrow k}(s) & k \neq j \\ -\lambda_j(s) \equiv -\sum_{k \neq j} p_{j \rightarrow k}(s) & k = j \end{cases} \quad (2.11a)$$

La solution de système d'équations différentielles de Chapman-Kolmogorov (semi-Markovien) peut être écrite sous forme d'équations intégrales pour la fréquence de l'état d'entrée  $j$ . Donc la densité de probabilité  $\varphi_j(t)$  et la probabilité  $\pi(t)$  peuvent être données par :

$$\varphi_j(t) = \int_0^t d\tau \sum_{k \neq j} [\pi_k(\tau) \delta(\tau) + \varphi_k(t, \tau)] q_{jk}(t, \tau) \quad (2.12a)$$

$$\pi_j(t) = \int_0^t d\tau [\pi_j(\tau) \delta(\tau) + \varphi_j(\tau)] e^{-\int_{\tau}^t ds \sum_{k \neq j} p_{j \rightarrow k}(s)} \quad (2.12b)$$



Où :

$\delta$  : est delta Dirac.

$q_{jk}dt$  : est la probabilité à l'état  $k$  et au temps  $\tau$  pour que l'évènement  $jk$  prend place exactement à l'instant  $t$ . Elle est donnée par :

$$q_{jk}(t, \tau) = p_{k \rightarrow j}(t) e^{-\int_{\tau}^t \sum_{j \neq k} p_{k \rightarrow j}(s) ds} \quad (2.13)$$

La solution de l'équation (2.11) peut être trouvée également en termes d'équations itératives :

$$\varphi_j(t) = \sum_{n=1}^{\infty} \varphi_j^n(t) \quad (2.14a)$$

$$\varphi_j^n(t) = \sum_{k=j} \int_0^{\tau} d\tau \varphi_k^{n-1}(\tau) q_{jk}(t, \tau) \quad (2.14b)$$

$$\varphi_j^1(t) = \sum_{k=j} \pi_k(0) q_{jk}(t, 0) \quad (2.14c)$$

Ou :

$n$  : représente le nombre d'évènements expérimentés.

q.s. : peut satisfaire la relation suivante pour  $\tau_1 \prec \tau_2 \prec \tau$  :

$$q_{k,j}(t, \tau) \left( 1 - \sum_{i \neq j} \int_{\tau_1}^{\tau_2} dv q_{i,j}(v, \tau_1) \right) = q_{k,j}(t, \tau_1) \quad (2.15a)$$

Et cela peut assurer aussi à tout instant la relation suivante:

$$\sum_j \pi_j(t) = 1 \quad (2.15b)$$

On peut exprimer les fréquences d'un chemin, En remplaçant les itérations dans l'équation (2.14a):

$$Q_j^{seq\bar{j}}\left(\frac{t}{\tau_n}\right) = q_{j,j_n}(t, \tau_n) q_{j_n, j_{n-1}}(\tau_n, \tau_{n-1}) \dots q_{j_2, j_1}(\tau_2, \tau_1) \quad (2.16)$$

$$\text{Avec : } \tau_1 < \tau_2 < \dots < \tau_{n-1} < \tau_n < t \quad (2.16a)$$

Et :

$$\vec{\tau}_n \equiv (\tau_1, \dots, \tau_n) \quad (2.16b)$$

$$\varphi_j(t) = \sum_j \varphi_j^{seq\bar{j}}(t) \equiv \varphi_{j_1}^1(0) \sum_j \int_{V_{n,\bar{j}}(\tau < t)}^{\tau} d\vec{\tau}_n Q_j^{seq\bar{j}}\left(\frac{t}{\vec{\tau}_n}\right) \quad (2.17)$$

Où :

$\varphi_{j_1}^1(0)$  : Est la fréquence de l'évènement initiateur.

$\varphi_j^{seq\bar{j}}(t, \tau_n)$  : S'appelle chemin **Q**-Kernel.

$j$  : Ce vecteur est appelé 'Séquence'.

$(j, \tau)$  : Ce couple de vecteurs est appelé 'Chemin'.

Ce type de solution est nommé approche 'chemin et séquence'.

En PSA, chaque composant de la séquence 'j' est un en-tête de l'arbre d'évènements, où on ne peut pas distinguer entre un chemin et une séquence. Dans un système semi-Markovien comme celui de notre cas, tous les facteurs 'q' du produit  $Q^{seq}$ , ont les mêmes fonctions, quel que soit n. Et lorsque ces fonctions dépendent de n et j, Une extension de cette approche peut être faite, comme le cas avec les théories TPD et SDTPD.

Les conditions de normalisation des équations (2.14a) et (2.14b) ci-dessus, doivent être respectées, pour tous les n, Par contre l'approche de chemin et séquence perd son intérêt lorsque le nombre de chemins est incontrôlable. On expose ce cas, comme suit :

### 2.3.2. Extension à la fiabilité dynamique 'TPD'

En TPD [27], les taux de transition 'p' peuvent être des fonctions de variable de processus (température, pression,.....etc.) qui évoluent avec le temps le long d'une trajectoire dynamique. Les transitions se réunissent avec un changement dans la trajectoire (changement dans la dynamique ou événement dynamique).

Soit x le vecteur des variables de processus décrivant le comportement dynamique du système, nous désignons par 'i' le groupe de configurations de système dans lequel l'évolution dynamique est donnée par la forme équivalente explicite.

$$\bar{x} = \bar{x}(t, i) = \bar{g}_l(t, \bar{x}_0) \quad , \quad \bar{x}_0 = \bar{g}_l(0, \bar{x}_0) \quad (2.18)$$

Nous supposons dans ce qui suit:

- Le système démarre à un état de point d'équilibre  $(u_0, g_0)$  avec une probabilité donnée. Un événement initiateur instantané aléatoire avec une fréquence connue déclenche l'évolution dans le temps.
- Une variable du processus x peut être atteinte à partir de l'état initial et après une séquence d'événements dynamiques à travers un chemin composé défini par :

$$\bar{x} = \bar{x}(t, \vec{j}) = \bar{g}(t - \tau_n^+, \bar{u}) \tau_n \succ t \succ \tau_{n-1} \quad (2.19)$$

Avec :

$$\bar{u}_n = \bar{g}_{n-1}(\tau_n^- - \tau_{n-1}^+, \bar{u}_{n-1}) \quad (2.19a)$$

Où :

$\tau_n^{\pm}$  : Prend en considération la discontinuité «naturelle» dans les pentes quand les événements dynamiques ont lieu. Sous les hypothèses données, une fois que la dynamique est possible et l'état de point initial sont définis, les chemins possibles avec leurs délais peuvent être déterminés. Nous appellerons une séquence, l'ensemble de chemins  $\{j, \tau_{j_n}\}$  avec le même 'j' et des temps différents. Alors, l'approche générale de chemins et séquences peut être appliquée de telle sorte que nous associons les chemins dynamiques avec les chemins des équations (2.15a), (2.16) et (2.17) ci-dessus. Pour chaque chemin, nous avons maintenant une transition déterministe qui peut être simulée avec des simulateurs déterministes, offrant alors des fonctions 'q' données par :

$$q_{j \rightarrow j_n}^{seq\bar{j}}(t, \tau) = p_{j_n \rightarrow j}(t, \bar{x}(t, \bar{j})) e^{\int_{\tau}^t \sum_{i \neq j_n} q_{j_n \rightarrow i}(s, \bar{x}(s, \bar{j})) ds} \quad (2.20)$$

## 2.4. La méthodologie de la méthode TSD

### 2.4.1. Modélisation de la probabilité de l'événement suivant, le long d'un chemin

#### Dynamique avec des événements stimuli.

La méthode TSD [28], [26],[29], utilise une approche de type spécifique de chemin et séquence pour résoudre la méthode SDTPD, où les sous états  $j_n$  de  $(j_n, I)$ , liés avec les différentes dynamiques définissent les chemins dynamiques comme dans le cas ou aucun stimulus, mais l'état de stimulus est maintenu dans le format de vecteur de Markov.

Soit :

$Q_{i,j}^{I,J}(t, \tau) dt$  : La probabilité de la transition  $(j, J) \rightarrow (i, I)$ , à l'intervalle de temps  $dt$  autour de  $t$  et après l'entrée dans un sous-état dynamique  $j$  au temps  $\tau$ .

Dans les conditions de la TSD,  $Q$  peut être écrite de la manière suivante :

$$Q_{j_n, j_{n-1}}^{J_n, J_{n-1}, seq\bar{j}}(\tau_n, \tau_{n-1}) \equiv q_{j_n, j_{n-1}}^{seq\bar{j}}(\tau_n, \tau_{n-1}) \pi(J_n, \frac{\bar{\tau}_n}{J_{n-1}}, \bar{\tau}_{n-1}) \quad (2.21)$$

Le dernier facteur signifie le vecteur de probabilité de stimulus au temps  $\bar{\tau}_n$  conditionné à être  $\pi^{J_{n-1}}(\bar{\tau}_{n-1})$  au temps  $\bar{\tau}_{n-1}$ .

Le calcul de la probabilité de stimulus est un problème typique du problème binaire classique de Markov  $\lambda, \mu$  de la méthode PSA avec la matrice de stimulus,  $ST_n$  associée à l'état (+ activé, - désactivé) de chaque stimulus (c'est-à-dire  $A \equiv ST_n$  dans l'équation 2.11) et le vecteur d'état du composant de stimulus I, une fois qu'un chemin dynamique est sélectionné, c.-à-d. la solution est :

$$\pi^J(t) = \sum_{K_n} \left[ \exp \int_{\tau_n}^t ST_n(u) du \right]_{J, K_n} \pi^{K_n}(\tau_n^+) \quad (2.22)$$

Avec les conditions initiales à  $\tau_n^+$  et le vecteur de probabilité :

$$\pi^{K_n}(\tau_n^+) = \sum_{J_n} \left[ \Omega_n^+ \right]_{K_n, J_n} \pi^{J_n}(\tau_n^-) \quad (2.23)$$

Le remaniement potentiel des modèles de la matrice  $|\Omega_n^+|$  de l'état du stimulus qui peuvent avoir lieu en raison de l'occurrence de l'événement dynamique 'n', c'est-à-dire certains sont activés, certains sont désactivés et d'autres restent comme ils étaient.

Il intègre également la caractéristique essentielle de SDTPD qui est le stimulus  $G_n$ , responsable de la nième transition dynamique, il devrait être activé pour que la transition ait lieu.

Alors l'équation (2.24) est équivalente à l'équation (2.17), elle est donnée par :

$$Q_{j, seq}^J(t/\vec{\tau}) = \sum_{J_1, J_2, \dots, J_n} Q_{j, J_n}^{J, J_n, seq}(\tau_n, \tau_n) Q_{j, J_{n-1}}^{J_n, J_{n-1}, seq}(\tau_n, \tau_{n-1}) \dots Q_{j_2, j_1}^{J_2, J_1, seq}(\tau_2, \tau_1) \pi^{J_2}(0^+) \quad (2.24)$$

Avec :  $\tau_1 < \tau_2 < \dots < \tau_{n-1} < \tau_n < t$

Et :

$$Q_{j_n, j_{n-1}}^{J_n, J_{n-1}, seq}(\tau_n, \tau_n) \equiv Q_{j_n, j_{n-1}}^{seq}(\tau_n, \tau_{n-1}) \times \sum_{K_n} \left[ \exp \int_{\tau_n}^t ST_n(u) du \right]_{J_n, K_n} \left[ \Omega_n^+ \right]_{K_n, J_{n-1}} \quad (2.25)$$

Elle devient une extension de la fréquence d'excès du prochain événement de l'approche de la méthode TSD. Cette situation est très fréquente et couvre les cas des événements relatifs aux points seuils d'activation de stimulus comme ceux indépendants sur la dynamique qui peut être désaccouplée, Cette approche n'est pas utile si le nombre de chemins est trop grand [29].

### Exemple

Dans cet exemple, on suppose que tous les stimuli sont initialement désactivés, et ne sont activés qu'après le déclenchement de l'évènement initiateur, et ils sont désactivés à nouveau quand l'évènement dynamique correspondant ne se produit pas.

Pour une séquence de N en-têtes, nous marquons de 1 à N les premiers stimuli des N en-têtes, c'est-à-dire les stimuli dont l'activation déclenche la transition dynamique. Ensuite, toutes les  $\lambda^F(t, x), \mu^F(t, x)$  sont nulles.

Définissons l'état composé  $J_G^-$ , différent de l'état composé J uniquement dans l'état du stimulus G, qui est activé ou désactivé, donc on peut définir :

$$\delta_{G_n \in I}^+ = \begin{cases} 1 & \text{si } G_n \in I \text{ est activé} \\ 0 & \text{si } G_n \in I \text{ est désactivé} \end{cases} \quad (2.26)$$

Alors :

$$ST_n = 0 \rightarrow \left[ \exp \int_{\tau_n}^t ST_n(u) du \right] = \text{Matrice identité} \quad (2.27)$$

$$\pi^J(\tau_n^+ \prec t \prec \tau_{n-1}^-) = \pi^J(\tau_n^+) = \sum_J [\Omega_n^+] \pi^J(\tau_n^-) = \sum_J \delta_{G_n \in J}^+ \delta_{I, J_{G_n}^-} \pi^J(\tau_n^-) \quad (2.28)$$

Puisqu'après l'événement initial, tous les stimuli deviennent activés, donc on peut écrire :

$$\pi^{J_1}(0^+) = \begin{cases} 1 & \text{pour } J_1 = (+, +, \dots, +_n) \text{ tous les stimuli sont activés} \\ 0 & \text{tous les autres états} \end{cases} \quad (2.29)$$

Et l'équation (2.19) s'écrit comme suit :

$$\pi^J(\tau_1^+ \prec \tau \prec \tau_2^-) = \pi^J(\tau_1^+) = \sum_J \delta_{G_1 \in J}^+ \delta_{I, J_{G_1}^-} \pi^J(\tau_1^-) = \begin{cases} 1 & \text{pour } I = J_{G_1}^- = (-, +, \dots, +_N) \\ 0 & \text{pour les autres états} \end{cases} \quad (2.30)$$

Répétition du processus :

$$Q_{j^{seq \bar{j}}}^I \left( \frac{t}{\bar{\tau}_n} \right) = \delta_{G_1 \in J}^+ \delta_{G_2 \in J_{G_1}^-}^+ \dots \delta_{G_n \in J_{G_1^- \dots G_{n-1}^-}^-}^+ \times \delta_{I, J_{G_1^- \dots G_n}^-} \times Q_j^{seq \bar{j}} \left( \frac{t}{\bar{\tau}_n} \right) \quad (2.31)$$

$$\text{Ou : } Q_{j^{seq \bar{j}}}^I \left( \frac{t}{\bar{\tau}_n} \right) \text{ est donnée par l'équation} \quad (2.16)$$

Pour  $n > N$ , tous les stimuli seraient désactivés et alors la matrice  $\lfloor \Omega_n^+ \rfloor_{J, J}$  de la contribution serait zéro, aussi bien que dans toute séquence avec les en-têtes répétées.

En d'autres termes, le résultat se réduit à un cas standard Semi-Markovien, mais dans la solution de l'équation (2.17) seulement les séquences non répétées, jusqu'à N événements sont autorisées. Ce cas académique illustre la réduction du nombre de séquences générées par la condition d'activation de stimulus qui limite le problème d'explosion de séquences du TPD d'une manière compatible à la pratique en matière usuelle explicite et implicite de la méthode PSA.

#### 2.4.2. Fréquence d'excès de dommage.

Dans la TSD, des stimuli additionnels sont également définis, y compris par exemple des stimuli de "dommage", une fois, qu'ils sont activés, correspondent aux conditions atteintes non sûres.

Alors, la fréquence d'excès de dommage est donnée par :

$$\varphi_j^{damage}(t) = \sum_{j, J_n} \varphi_{j_1}^{J_1}(0) \int_{V_n, \bar{J}(\bar{\tau} \prec t)}^{V_n, \bar{J}(\bar{\tau} = t)} d\bar{\tau} Q_{j, seq \bar{j}}^{J_n, damage}(t/\bar{\tau}) \quad (2.32)$$

Pour obtenir la fréquence d'excès de dommage, sauf que l'ensemble de chemins qui dépassent une quantité donnée de dommages sont d'intérêt. Parce qu'ils sont censés rares, il est d'abord d'une importance primordiale de trouver le domaine de dommage, c'est-à-dire les combinaisons de temps pour lesquelles les dommages peuvent survenir.

Les sections suivantes fournissent des algorithmes pour effectuer cette agrégation et les résultats montrés sont appliqués à un exemple simple. Un mélange gazeux air-vapeur où l'hydrogène est injecté à partir d'un événement initiateur et son taux change brusquement dès l'apparition d'un événement d'en-tête, le système d'aspersion (SIS), a été pris en considération. Un stimulus d'en-tête de combustion est activé si le mélange devient inflammable, et un événement dynamique de combustion (COMB) est inclut avec un stimulus de dommage associé à un pic de pression.

## 2.5. Intégration de chemins de la TSD. Recherche de domaine de dommage.

### 2.5.1. Volume supplémentaire d'un chemin.

Nous pouvons représenter graphiquement le domaine d'intégration de l'équation (2.32), par des points dans un volume d'intégration de dimension N. Chaque point correspond à un chemin spécifique, et nous distinguons trois types de chemins : chemins de dommage, chemins de sûreté et chemins impossibles (ceux qui n'activent pas le stimulus d'en-tête dans le temps). Par exemple, dans l'exemple ci-dessous une séquence de deux en-têtes de dimension 2 et les chemins impossibles sont aux où les stimuli d'inflammabilité s'activent après l'événement de combustion.

L'intégration numérique de la fréquence de dommage de l'équation (2.32) consiste à calculer le Q-Kernel dans les points situés à l'intérieur du domaine de dommages, en additionnant toutes les contributions, multiplié par le volume supplémentaire ( $\Delta V$ ), associé à chaque point d'échantillonnage.

La manière d'exécuter la stratégie d'échantillonnage, et le calcul précis du volume supplémentaire associés à chaque chemin sont des points clés pour le calcul correct de la fréquence de dommage.

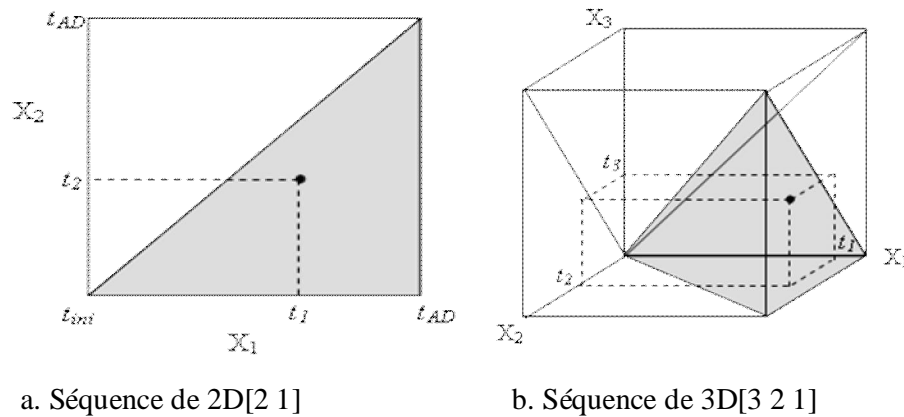
La figure (2.2a) montre un domaine de 2-dimensions (2D) contenant les séquences d'événements stochastiques 1 et 2, où  $X_1$  et  $X_2$  sont les variables d'échantillonnage des temps d'occurrence des événements 1 et 2 respectivement, les limites de temps des séquences sont  $t_{ini}$  (temps d'occurrence de l'événement initiateur) et  $t_{AD}$  (durée d'accident), et  $X_1, X_2 \in [t_{ini}, t_{AD}]$ .

Par conséquent, l'ensemble du domaine contient deux séquences différentes, dépend de l'événement qui se produit le premier. Le domaine de l'ombre correspond à la séquence [2 1]

peut être intégré en n'importe quel point pour  $t_2 \ll t_1$  (le domaine blanc étant celui de la séquence inverse [2 1]). La section A de chacun de ces domaines est donnée par l'expression suivante :

$$A(X_i \leq X_j) = \frac{(t_{AD} - t_{ini})^2}{2} (i, j = 1, 2; i \neq j) \quad (2.33)$$

De même, la figure (2.2b) montre le domaine d'échantillonnage d'une séquence de 3 dimensions (3D), dont le domaine d'ombre correspond à la séquence réduite [3 2 1], et le reste du domaine cubique correspond à des combinaisons des trois événements stochastiques dans des ordres différents. Ici les nombres se rapportent aux événements, pas aux états de j.



a. Séquence de 2D[2 1]

b. Séquence de 3D[3 2 1]

Fig. 2.2 : Domaines d'échantillonnage (ombrés) correspondent à :

a. Séquence de 2D[2 1], b. Séquence de 3D[3 2 1].

L'équation du volume V pour les séquences en 3D sera:

$$V(X_i \leq X_j \leq X_k) = \frac{(t_{AD} - t_{ini})^3}{6} (i, j, k = 1, 2, 3; i \neq j \neq k) \quad (2.34)$$

Et la généralisation de cette équation à N dimensions donnée par:

$$V(X_{i_1} \leq X_{i_2} \leq \dots \leq X_{i_N}) = \frac{(t_{AD} - t_{ini})^N}{N!} \quad (2.35)$$

$(i_1, i_2, \dots, i_N = 1, 2, \dots, N; i_1 \neq i_2 \neq \dots \neq i_N)$

On peut associer à tout point de dommage dans le domaine d'échantillonnage de N-dimensions, un volume supplémentaire de telle sorte que les temps supplémentaires sur chaque axe doit être déterminés.

Le volume supplémentaire est donné par la formule suivante :

$$\Delta V = \prod_{i=1}^N \Delta t_i \quad (2.36)$$

Cependant, il y aura quelques points situés aux limites du domaine d'échantillonnage, dont les volumes seront plus faibles, avec un facteur de réduction en fonction de la position relative du point d'échantillonnage dans le domaine.

Pour la détermination du facteur de réduction, nous distinguons entre les frontières intérieures, et les frontières extérieures, celles correspondant à des bords (2D) ou faces (3D) (Limites supérieure et inférieure de l'intervalle de temps de séquence). La figure 2.3, montre les domaines séquence 2D (figure 2.3a) et 3D (figure 2.3b) et quelques exemples des points de limite situés dans les limites intérieures (avec un point intérieur). Les facteurs de réduction qui leur sont associés sont donnés dans le tableau 2.1. De même, la figure 2.4 montre les domaines séquence 2D (figure 2.4a) et 3D (figure 2.4b) et quelques exemples de points de limite situés dans les limites extérieures (avec un point intérieur).

Les facteurs de réduction qui leur sont associés sont donnés dans le tableau 2.2.

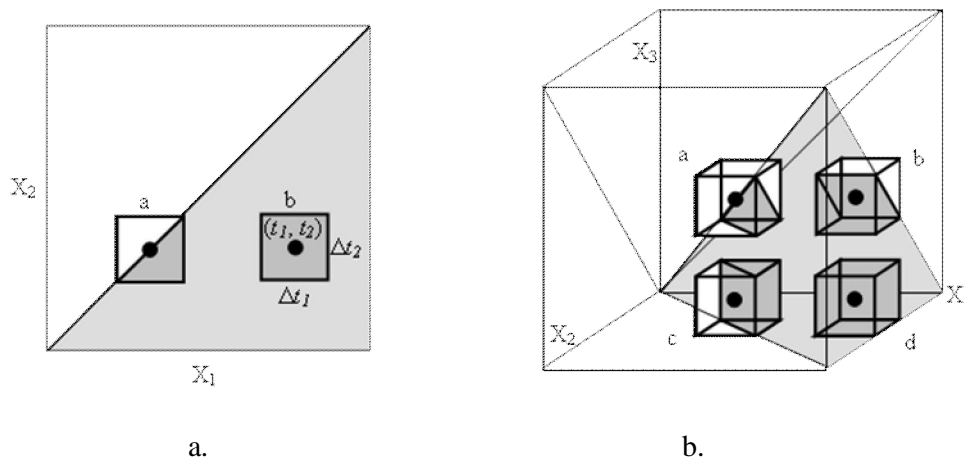
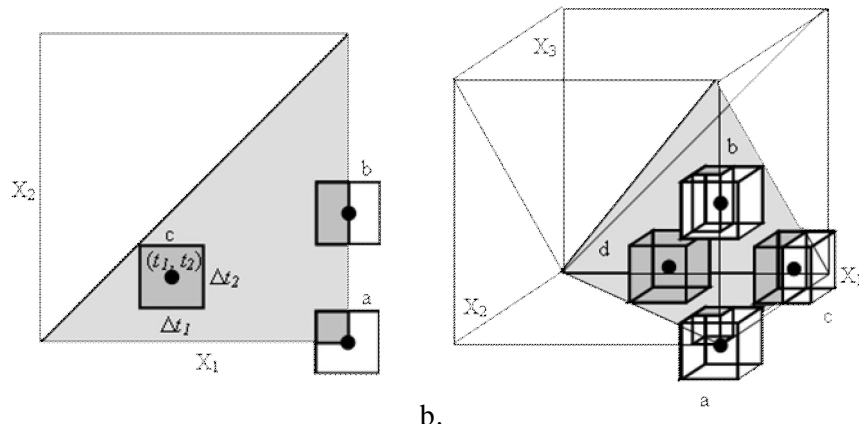


Fig. 2.3: Les points d'échantillonnage situés dans les limites intérieures du domaine correspondant à: a. La séquence 2D [2 1], b. La séquence 3D [3 2 1].

Tableau 2.1: Facteur de réduction du volume supplémentaire pour des points situés dans les limites intérieures du domaine (pour les domaines d'échantillonnage 2D et 3D).

Dimension	point d'échantillonnage	coordonnées	Incrémental surface / volume	facteur de réduction
2D	a	$t_2 = t_1$	$\Delta A = (\Delta t_1 \Delta t_2) / 2$	1/2
	b	$t_2 < t_1$	$\Delta A = (\Delta t_1 \Delta t_2)$	1
3D	a	$t_3 = t_2 = t_1$	$\Delta V = (\Delta t_1 \Delta t_2 \Delta t_3) / 6$	1/6
	b	$t_3 = t_2 < t_1$	$\Delta V = (\Delta t_1 \Delta t_2 \Delta t_3) / 2$	1/2
	c	$t_3 < t_2 = t_1$	$\Delta V = (\Delta t_1 \Delta t_2 \Delta t_3) / 2$	1/2
	d	$t_3 < t_2 < t_1$	$\Delta V = (\Delta t_1 \Delta t_2 \Delta t_3)$	1





a. b.  
 Fig. 2.4: Les points d'échantillonnage situés dans les limites extérieures du domaine correspondant à: a) La séquence 2D [2 1], b) La séquence 3D [3 2 1].

Tableau 2.2: Facteur de réduction du volume supplémentaire pour des points situés dans les limites extérieures du domaine (pour les domaines d'échantillonnage 2D et 3D).

Dimension	point d'échantillonnage	coordonnées	Incrémental surface / volume	facteur de réduction
2D	A	$t_{in} < t_1 = t_{AD}$ $t_{in} = t_2 < t_{AD}$	$\Delta A = (\Delta t_1 \Delta t_2) / 4$	1/4
	B	$t_{in} < t_1 = t_{AD}$ $t_{in} < t_2 < t_{AD}$	$\Delta A = (\Delta t_1 \Delta t_2) / 2$	1/2
	C	$t_{in} < t_1 < t_{AD}$ $t_{in} < t_2 < t_{AD}$	$\Delta A = (\Delta t_1 \Delta t_2)$	1
3D	A	$t_{in} < t_1 = t_{AD}$ $t_{in} < t_2 = t_{AD}$ $t_{in} = t_3 < t_{AD}$	$\Delta V = (\Delta t_1 \Delta t_2 \Delta t_3) / 8$	1/8
	B	$t_{in} < t_1 = t_{AD}$ $t_{in} < t_2 = t_{AD}$ $t_{in} < t_3 < t_{AD}$	$\Delta V = (\Delta t_1 \Delta t_2 \Delta t_3) / 4$	1/4
	C	$t_{in} < t_1 = t_{AD}$ $t_{in} < t_2 < t_{AD}$ $t_{in} < t_3 < t_{AD}$	$\Delta V = (\Delta t_1 \Delta t_2 \Delta t_3) / 2$	1/2
	D	$t_{in} < t_1 < t_{AD}$ $t_{in} < t_2 < t_{AD}$ $t_{in} < t_3 < t_{AD}$	$\Delta V = (\Delta t_1 \Delta t_2 \Delta t_3)$	1

Pour une donnée à N-dimensions séquence, et un chemin donné (point K) au sein de cette séquence avec  $t_1 < t_2 < \dots < t_n$ , le sous-domaine  $V_k$  volume (HIPER) est donné par l'équation (2.36), multipliée par les deux facteurs de réduction décrits dans les tableaux 1 et 2, qui peut être généralisée comme suit:!

$$V_k = \prod_{i=1}^N \Delta t_i \cdot \frac{1}{M_1!} \cdot \frac{1}{2^{M_2}} \tag{2.37}$$

Ou :

$M_1$ : est le cardinal de coordonnées de chemin  $t_r = t_s$  ( $r \neq s$ ) (conditions aux limites intérieures du point).

Et  $M_2$ : est le cardinal de coordonnées de chemin  $t_j = \{ t_{ini}, t_{AD} \}$  (conditions aux limites extérieures du point).

### 2.5.2. Analyse des chemins.

Pour trouver le domaine de dommage d'une séquence donnée, on doit vérifier tous les chemins possibles (combinaisons de temps d'occurrence des événements). En outre, chaque paramètre incertain ajoute une nouvelle dimension à l'échantillonnage de Monte Carlo des chemins possibles. En Grosso modo, des milliers de chemins doivent être analysés pour une seule séquence, afin de déterminer une valeur précise de la fréquence d'excès.

Ce fait conduit à effectuer nécessairement une analyse de raffinement progressive, en utilisant :

- ✓ Des modèles dynamiques simples aux étapes initiales plus détaillés et des modèles de calcul coûteux comme les limites de domaine de dommage sont limitées.
- ✓ Les premiers stimuli de dommage (conditions nécessaires pour le dommage) sont pris de l'arbre d'événement de dommages, et l'élimination progressive de chemins jusqu'à ce que le dommage final soit atteint.

Un schéma fonctionnel synthétique avec la structure principale du module d'analyse de chemins, dans lequel plusieurs boucles incluses peuvent être distinguées.

#### 2.5.2.1. Stratégie de l'échantillonnage des chemins : Recherche du domaine de dommage.

La stratégie d'échantillonnage décrit la façon de sélectionner individuellement les chemins dans le domaine subséquence afin d'effectuer l'intégration numérique nécessaire qui conduit à la fréquence d'excès de dommage de la séquence correspondante.

Comme indiqué précédemment, nous nous intéressons uniquement aux chemins de dommage, qui sont les seuls à contribuer à l'intégrale. Par conséquent, l'échantillonnage doit satisfaire les démarches suivantes :

- Minimiser le nombre de chemins de non-dommages (chemins impossibles et chemins de sûreté) qui doivent être échantillonnés et analysés.
- Être capable de rechercher et de définir la forme et la taille du domaine de dommage dans le domaine d'échantillonnage.

On considère trois principales stratégies d'échantillonnage :

- Non uniforme Monte Carlo (MC) :

Cette stratégie d'échantillonnage utilise les fonctions de densité de probabilité, de chaque événement pour effectuer l'échantillonnage, conduisant à une distribution

d'échantillonnage non uniforme. Cette approche ne peut pas être utilisée ici, car les fonctions de densité de probabilité sont déjà prises en compte dans les équations de la théorie de dynamique des stimuli TSD pour le calcul de Q-kernel.

- Uniforme Monte Carlo (MC) :

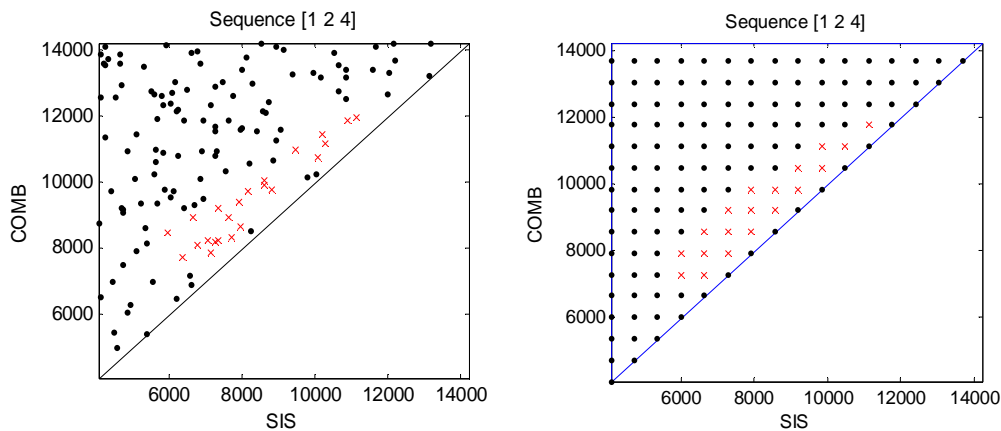
Les points sont échantillonnés de manière uniforme dans l'intervalle de temps de la séquence (N: nombres aléatoires compris entre  $t_{ini}$  et  $t_{AD}$  et classés par ordre croissant)

La zone de dommage à l'intérieur du domaine d'échantillonnage peut être de forme irrégulière, et conduit à nouveau à une densité d'échantillonnage hétérogène des points de dommage le long du domaine d'échantillonnage (voir Fig. 2.5a). On peut diviser le domaine d'échantillonnage en des petits sous-domaines où une répartition homogène des points d'échantillonnage pourrait être assumée, après quoi on donne une approximation à la division de volume différentiel de chaque point de sous-domaine des volumes sur le nombre de points situés à l'intérieur.

- Echantillonnage par maillage :

Dans cette stratégie d'échantillonnage, les points d'échantillonnage sont obtenus à partir d'une partition de maillage cartésienne du domaine d'échantillonnage (voir fig.2.5b).

Dans ce cas, le volume associé à chaque point d'échantillonnage (les chemins 'points' de dommage, impossibles et de sureté), est parfaitement déterminé par l'équation (2.37), avec  $\Delta t_i$  est le pas d'échantillonnage le long de la direction de l'axe i.



a. Stratégie d'échantillonnage uniforme de MC    b. Stratégie d'échantillonnage par maillage.

Fig.2.5 : Séquence du Benchmark [1 2 4] analysée avec deux stratégies d'échantillonnage différentes :

a. Stratégie d'échantillonnage uniforme de MC.

b. Stratégie d'échantillonnage par maillage. Les points en croix rouge sont des chemins de dommage et les points en noir sont des chemins impossibles. N=136.

Remarques sur la figure 2.5:

- ✓ Pour le même nombre de points d'échantillonnage ( $N=136$ ), le domaine de dommage est mieux déterminé dans la stratégie d'échantillonnage par maillage.
- ✓ Le volume incrémental associé à chaque chemin de dommage est beaucoup plus facile et plus précis pour quantifier dans la stratégie d'échantillonnage par maillage.
- ✓ Pour le raffinement, les points voisins de chaque chemin échantillonné sont mieux définis dans la stratégie d'échantillonnage par maillage.

Donc, pour toutes ces raisons, nous adoptons la stratégie d'échantillonnage par maillage.

### 2.5.2.2. Algorithme de recherche adaptatif :

Dans notre cas, l'analyse des chemins se fait par l'utilisation de l'algorithme adaptatif de recherche qui est basé sur la stratégie de l'échantillonnage par grille de maille, pour raffiner la recherche dans le domaine où les chemins de dommages sont détectés.

Donc l'objectif de notre algorithme adaptatif de recherche est de définir avec précision la taille du domaine de dommage avec le domaine de séquence, afin de le multiplier dans l'ordre par les facteurs de poids donnés par Q-kernel de chaque chemin. L'idée fondamentale est d'analyser le voisinage de chaque chemin de dommage, et l'échantillonner dans une grille de maille plus fine autour d'elle jusqu'à l'obtention des chemins de non-dommages (limites du domaine de dommage). L'algorithme est formé par une étape initiale et une étape de recherche adaptative divisée en trois parties : étape de raffinement, étape de plantation et étape d'agrandissement. L'étape de la recherche adaptative est répétée à des échelles successivement élevés (plusieurs grilles de maillage raffinées) jusqu'à ce que la convergence de la fréquence d'excès de dommage soit atteinte.

Nous décrivons les différentes étapes comme suit :

- Etape initiale : une grille de maillage initial est définie et des points dans cette grille sont échantillonnés et analysés, par l'intermédiaire des modèles dynamiques simplifiés (fonctions de transmission ou d'autres), afin de déterminer la nature de ces chemins : chemins de dommage, de sûreté ou impossibles. Et de s'assurer que le raffinement ultérieur de la grille de maille n'est pas lessive aux points en contradiction avec le pas de temps de modèle dynamique, le pas de temps  $dt$  de cette première étape, est le même pour tous les axes et choisi selon un barème dyadique de celui-ci.

En outre, des informations sur les voisins de chaque chemin échantillonné et enregistré dans un tableau, On attribue la valeur de 1 lorsque le voisin est un chemin de dommage, et la valeur 0 dans les autres cas (chemin de succès ou impossible), Les voisins sont définis ici seulement pour

les chemins à  $\pm dt$  sur chaque axe de direction (voir les points en haut lumineux autour de la croix du chemin de dommage sur la figure 2.6), au lieu de tous les points environnants (8 en 2D, 26 en 3D, etc.). La dernière option conduit à un nombre inabordable de nouveaux points échantillonnés et une augmentation de dimensions de séquence.

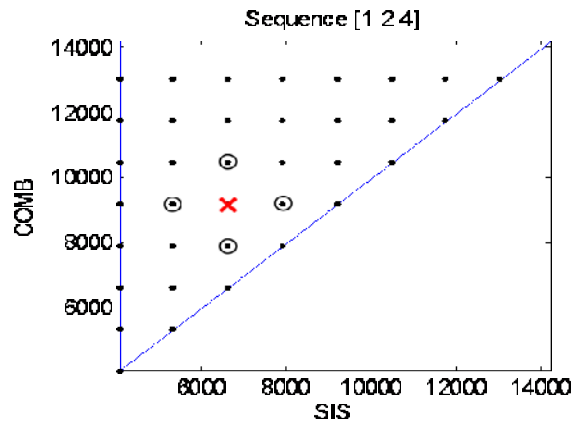


Fig. 2.6. Voisins de chemin de dommage donné.

La figure (2.7a) montre un exemple de cette première étape de la séquence [1 2 4] du «Benchmark simplifiée» (probabilité cumulée  $P(\text{SIS})=0.75$  dans l'intervalle [4080 14220]). Cette étape est définie ici comme étant à l'échelle 1.

- Etape de la recherche adaptative : une boucle est réalisée successivement avec des échelles supérieures 2, 3, 4, etc. jusqu'à ce que le critère d'arrêt soit atteint.

Cette étape comprend les éléments suivants:

- ✓ Etape de raffinement : Lorsqu' on utilise une grande échelle, le nouveau pas de temps pour le processus d'échantillonnage sera la moitié du pas précédent,  $\frac{dt}{2}$ . Puis, l'algorithme échantillonne les nouveaux points à travers les frontières du domaine de dommage existant, Si un voisin d'un point de dommage existant n'est pas un dommage, alors un nouveau point est échantillonné et évalué. La figure (2.7b) montre le résultat de cette étape pour le même exemple de la séquence [1 2 4].
- ✓ Etape de plantation : Une plantation des points de nouvel échantillonnage le long du domaine entier a été incluse ici, afin de découvrir de nouvelles zones de dommage séparées des précédentes. Plusieurs paramètres de contrôle des critères d'arrêt à ce stade. En particulier, nous nous arrêtons lorsque le nombre de points semés est proportionnel au raffinement de la grille de maille de l'échantillonnage initial soit atteint. La figure (2.7c) montre le résultat de cette étape pour l'exemple actuel.
- ✓ Etape d'agrandissement : à ce stade, l'algorithme étend l'échantillonnage à travers toute la zone intérieure du domaine de dommage. Avec la combinaison de l'étape de raffinement

et l'étape de plantation, nous optimisons le nombre de nouveaux points qui doit être échantillonné tout en raffinant tous à l'intérieur du domaine de dommage.

La figure (2.7d) montre le résultat de cette étape dans la séquence de notre exemple.

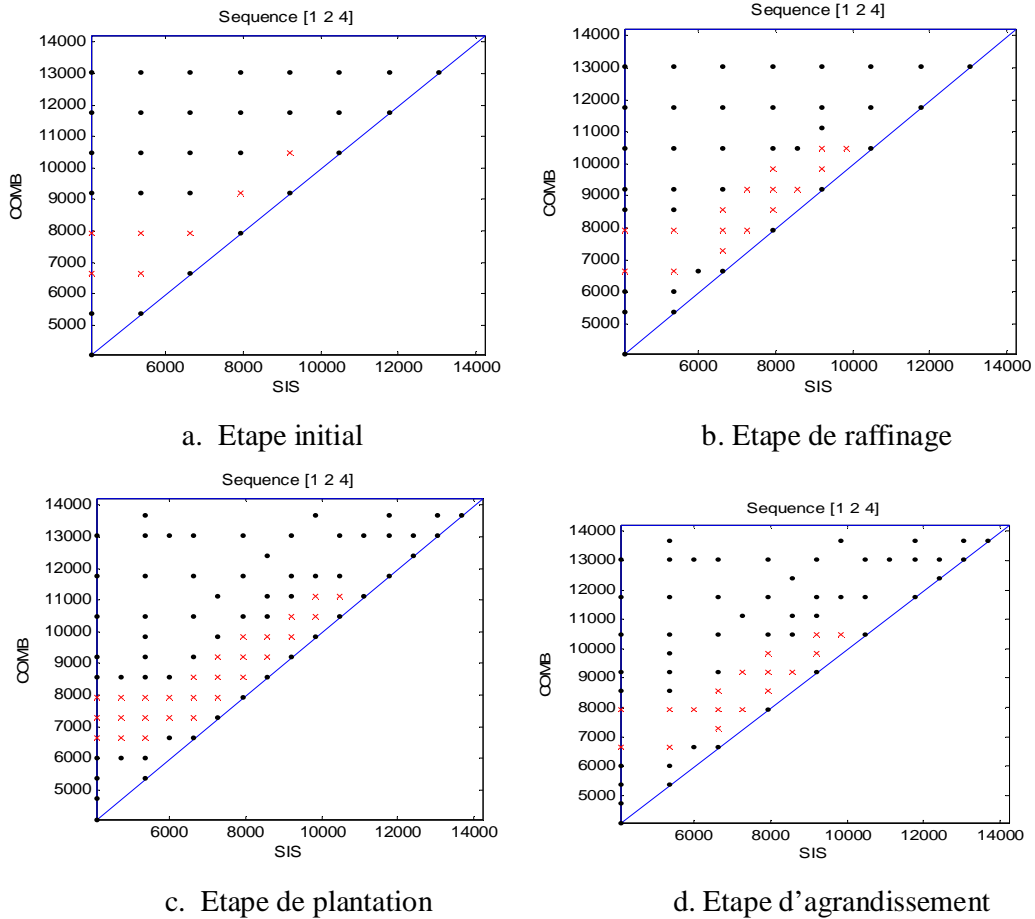


Fig.2.7. Etapes de l'algorithme de recherche adaptatif dans la séquence [1 2 4] :  
a. Etape initiale, b. Etape de raffinement, c. Etape de plantation, d. Etape d'agrandissement

Analyse Déterministe  
Cas de l'accident de Bhopal

### 3.1. Introduction

Dans ce chapitre, on procède à une analyse thermo-hydraulique dont le but de modéliser l'évolution de variables physiques telles que la pression, la température, les fractions molaires des espèces chimiques, ...) dans le temps.

En plus de la vapeur d'équilibre liquide de substances pures, les propriétés thermodynamiques à la ligne de saturation sont évaluées à l'aide de la méthode de Marquard-Livenberg et la formule de Cardano, toutes les propriétés thermodynamiques sont calculées grâce aux résidus de base et les relations thermodynamiques idéales. Les transitoires thermo-hydrauliques sont décrites par des équations différentielles qui décrivent le changement de masse et de température à l'intérieur du réservoir E610. Ces équations différentielles utilisées dans l'analyse des accidents sont alors résolues par la célèbre méthode de Runge-Kutta.

### 3.2. Description du réservoir de stockage de MIC

Dans l'usine de Bhopal [30], le système de stockage de MIC est constitué de trois réservoirs de stockage, deux pour un usage normal (réservoirs E610 et E611) et un pour un usage de secours (réservoir E619).

Un système de réfrigération de 30 tonnes permet de conserver le contenu du réservoir à 0°C en faisant circuler du fréon à travers un échangeur externe de chaleur.

Chaque réservoir (Voir fig. 3.1) est muni de :

- D'un contrôleur de pression dans le réservoir nécessitant la manipulation de deux vannes :
  - Une vanne d'alimentation en azote et une vanne de purge de vapeur.
- D'une soupape de sécurité protégée par un disque de rupture.
- D'une alarme sur la température.
- D'alarmes de niveau haut et bas.

Une tour de neutralisation et une torchère permettant de traiter les gaz d'évent. La tour de lavage neutralise les gaz avec de la soude. Il y'a deux entrées dans la colonne, l'une collectant les gaz des événements du réservoir (PVH) et l'autre collectant les rejets des soupapes de sécurité (RVVH). Les deux circuits sont également reliés à la torchère. La mise à l'atmosphère après passage dans la tour de lavage se fait à une hauteur de 33 m.

Le réservoir de stockage de MIC est l'endroit des réactions chimiques entre la vapeur d'eau et les espèces chimiques qui existaient initialement dans ces réservoirs lors d'une fuite ou l'oubli d'une vanne ouverte (événement initiateur dans notre cas), donc le réservoir de stockage est l'endroit de toute explosion probable.



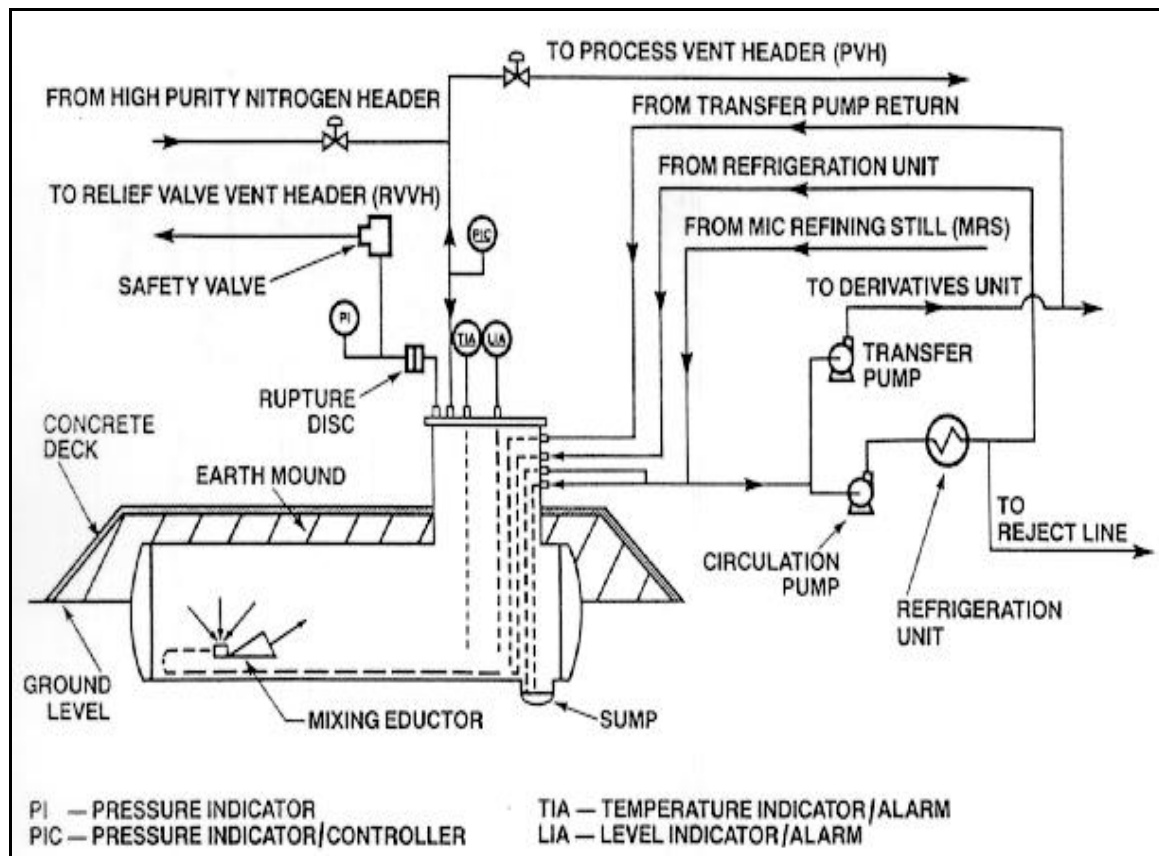


Fig.3.1 : Réservoir de stockage de MIC.

### 3.3. Description des réactions chimiques

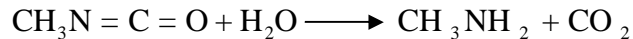
#### 3.3.1. Réactions exothermiques dans le réservoir E610

L'accident de Bhopal en Inde (en 1984) représente la plus grave catastrophe vécue dans l'histoire de l'industrie pétrochimique. Une population de 520 000 personnes a été exposée aux gaz dont 8000 morts sont estimés durant les premières semaines et 100 000 personnes ou plus ont subi des blessures permanentes [31].

Qu'est-ce qui s'est passé réellement ? Dans les premières heures du 3 Décembre 1984, on a estimé que 41 tonnes de Methyl-Isocyanate mortels (MIC) Dans le réservoir 610 C de l'usine de l'Union Carbides se sont échappé dans l'atmosphère. La cause principale de cet échappement été bien un excès de pression dans le réservoir, due à une réaction exothermique causée par l'introduction d'eau à l'intérieur du réservoir. Cette surpression a provoqué l'ouverture de la soupape de sécurité d'où l'échappement de gaz toxique.

Le Méthyl-isocyanate (MIC) est réactif, toxique, volatile et inflammable. Il n'y avait pas d'explosion à Bhopal, mais les propriétés de ce gaz permettent d'expliquer comment une telle catastrophe pourrait avoir eu lieu.

Le Méthyl-isocyanate réagit de façon exothermique avec l'eau pour former le Méthylamine avec un rejet de dioxyde de carbone [32].



Dans le réservoir 610, la réaction de Méthyl-isocyanate avec l'eau commence lentement avec la production de chaleur. Si la chaleur n'est pas évacuée, la température va augmenter, et la vitesse de réaction va augmenter aussi rapidement au point que le Méthyl-isocyanate va commencer à bouillir violemment. Dans un réservoir fermé, la pression peut augmenter au point que les soupapes de sécurité s'ouvrent, laissant s'échapper la vapeur de Méthyl-isocyanate et le dioxyde de carbone. Si les dispositifs de sécurité n'ont pas fonctionné, ou s'ils ont été submergés par les quantités les plus lourdes de vapeurs générées, à savoir, les vapeurs nocives de Méthyl-isocyanate s'échapperaient dans l'atmosphère.

### 3.3.2. Modélisation des réactions Thermodynamiques et chimiques

#### 3.3.2.1. Propriétés de la modélisation thermodynamique

Le calcul des propriétés thermodynamiques complètes nécessite le calcul d'une somme, la contribution des propriétés du gaz parfait et la correction résiduelle pour les comportements non-idéaux [33].

Par ailleurs, toutes les propriétés thermodynamiques peuvent être dérivées de la connaissance des équations d'état, qui relient des variables d'état du système.

L'utilisation d'équations d'état cubiques s'est répandue en raison de leurs caractéristiques mathématiques, leur simplicité et leurs faibles exigences en temps de calcul [34].

Beaucoup d'équations d'état cubiques comme celles de van der Waals, Redlich-Kwong, Redlich-Kwong-Soave, et Peng-Robinson sont fréquemment utilisées pour le calcul des équilibres de phases.

L'équation d'état cubique généralisée suivante est utilisée pour décrire le comportement de la pression :

$$p = \frac{RT}{V - b} - \frac{a_c m(T)}{V^2 + c_1 V + c_0} \quad (3.1)$$

Où  $a_c$  est la valeur du paramètre d'attraction à la température critique.

Pour de nombreuses classes de composés chimiques, de nombreuses équations d'état cubiques sont établies par les choix de la fonction de la température  $m(T)$  et des coefficients  $C_i$ .

### 3.3.2.1.1. Calcul de la pression

Dans notre étude, nous utilisons l'équation d'état de Peng-Robinson appliquée à un fluide pur pour les deux phases liquide et vapeur.

L'équation d'état de Peng-Robinson est écrite comme suit:

$$p = \frac{RT}{V-b} - \frac{a(T)}{V(V+b)+b(V-b)} \quad (3.2)$$

Avec :  $a(T) = a_c m(T)$

Où:

$$m(T) = \left( 1 + \kappa \left( 1 - \sqrt{\frac{T}{T_c}} \right) \right)^2 ;$$

$$a_c = 0.4572355 \frac{R^2 T_c^2}{P_c} ; b = 0.07779674 \frac{RT_c}{P_c} ;$$

Le paramètre  $\kappa$  est lié au facteur acentrique de Pitzer :

$$\kappa = 0.37464 + 1.5226 \omega + 0.26992 \omega^2$$

### 3.3.2.1.2. Calcul des quantités résiduelles

Une quantité résiduelle est la différence entre une propriété d'un fluide réel et la même propriété d'un gaz parfait à la même densité et température. Le résidu d'énergie libre de Helmholtz  $A^r(T, V)$  est obtenu comme suit:

$$A^r(T, V) = -\int_{\infty}^V \left( p - \frac{RT}{V} \right) dV \quad (3.3)$$

En substituant l'expression de la pression  $p$  de l'équation (3.2) dans (3.3), on peut écrire donc l'équation (3.3) en termes de densité sans dimension  $\xi = \frac{b}{V}$  et de température sans dimension

$$\bar{T} = \frac{T}{T_s} ;$$

$$\frac{A^r}{RT} = -\ln(1-\xi) - 2\sqrt{2} \frac{m(\bar{T})}{\bar{T}} \ln \frac{1+\xi(\sqrt{2}+1)}{1-\xi(\sqrt{2}-1)} \quad (3.4)$$

Avec :  $T_s$  représente la température caractéristique.

Pour plus de commodité de l'équation de Peng-Robinson, on peut l'écrire souvent sous forme polynomiale cubique:

$$(8 - T' - p')\xi^3 + (2T' + 3p' - 8)\xi^2 + (T' - p')\xi - p' = 0 \quad (3.5)$$

Avec:

$$p' = \frac{p.b}{R.T_s.m(\bar{T})} \quad \text{et} \quad T' = \frac{\bar{T}}{m(\bar{T})};$$

De l'énergie résiduelle libre de Helmholtz, toutes les autres propriétés thermodynamiques résiduelles nécessaires des fonctions thermodynamiques peuvent être des dérivées. Par conséquent, l'énergie résiduelle libre de Gibbs peut être écrite comme suit:

$$\frac{G^r}{RT} = \frac{A^r}{RT} + Z - 1 \quad (3.6)$$

En outre, l'énergie résiduelle interne peut être écrite comme:

$$\frac{U^r}{RT} = -T \left( \frac{\partial (A^r/RT)}{\partial T} \right)_v \quad (3.7)$$

L'enthalpie résiduelle peut alors être écrite comme suit:

$$\frac{H^r}{R} = \frac{U^r}{RT} + Z - 1 \quad (3.8)$$

Les capacités résiduelles de la chaleur isochore et isobare peuvent être écrites comme suit:

$$\frac{C_v^r}{R} = -2 \left( \frac{\partial (A^r/RT)}{\partial T} \right) - T \left( \frac{\partial^2 (A^r/RT)}{\partial T^2} \right) \quad (3.9)$$

Et:

$$\frac{C_p^r}{R} = \frac{C_v^r}{R} \frac{\alpha_p^2}{\kappa_T} - 1 \quad (3.10)$$

Où :  $\alpha_p$  et  $\kappa_T$  représentent respectivement, le coefficient de dilatation isobare thermique et le coefficient de compressibilité isotherme.

$$\alpha_p = \frac{1}{V} \left( \frac{\partial V}{\partial T} \right)_p \quad \text{et} \quad \kappa_T = \left( \frac{\partial p}{\partial \rho} \right)_T \quad (3.11)$$

### 3.3.2.1.3. Calcul des quantités idéales

La capacité calorifique isobarique idéale est obtenue par des formes de l'équation polynomiale de Shomate [35]:

$$C_p^{id} = A + BT + CT^2 + DT^3 + E/T^2 \quad (3.12)$$

Les constantes A, B, C, D et E sont données par la banque de données NIST.

La capacité thermique isochore idéale peut être écrite comme:

$$C_V^{id} = C_p^{id} - R \quad (3.13)$$

Pour calculer l'enthalpie idéale, et l'entropie, nous utilisons les équations standards:

$$H^{id} = \int_{T_{ref}}^T C_p^{id} dT \quad (3.14)$$

Avec :  $T_{ref}$  représente la température de référence sous les conditions standards.

$$(T_{ref} = 29815K \text{ Et } p_{ref} = 0.1 MPa)$$

### 3.4. Modélisation des réactions chimiques

#### 3.4.1. Vitesse de réaction

Comme il est connu [36], une approche générale de la modélisation de la  $k^{ième}$  réaction chimique impliquant  $S_{k,dir}$  espèces qui sont les constituants d'entrée et  $S_{k,rev}$  qui sont les constituants de sortie. La vitesse de réaction de la  $j^{ième}$  espèce en supposant que leur participation à la  $k^{ième}$  réaction, et le tout dans  $V_j$ .

La vitesse de réaction est donnée par:

$$q_k \equiv K_k^{dir} \prod_{m=1, \dots, S_{k,dir}} [X]_{m,k}^{\beta_{m,k}^k} - K_k^{rev} \prod_{m=1, \dots, S_{k,rev}} [X]_{m,k}^{\beta_{m,k}^k} \quad (3.15)$$

Avec : les fractions molaires sont données par la formule suivante:

$$[X]_j \equiv \frac{N_j}{V_j} \quad (3.16)$$

Les coefficients  $\beta_m^k$  sont usuellement les mêmes comme les coefficients  $\chi_{mk}$  [37].

L'approche combinée d'Arrhenius et de Landau-Teller est prise comme une expression par défaut pour la constante cinétique de réaction directe  $K_k^{dir}$  [38]. Elle est alors donnée par:

$$K_k^{dir}(T) = A_k T^{a_k} \exp\left(\frac{-E_k}{RT}\right) \quad (3.17)$$

Où : les constantes  $A_k$ ,  $a_k$  et  $E_k$  sont les paramètres qui sont disponibles dans les bases de données de la cinétique chimique [39]. L'inverse des constantes cinétiques de réaction sont

mieux mesurées par les constantes des taux d'équilibre de réaction  $K_k^{eq}$ , en les rapportant avec les constantes de réaction directe, car ils sont liés par la relation suivante:

$$K_k^{rev}(T) = \frac{K_k^{dir}(T)}{K_k^{eq}(T)} \quad (3.18)$$

### 3.4.2. Taux de chaleur de réaction

Toute réaction est censée avoir lieu pendant un certain temps  $\tau_k$ , et génère un taux d'énergie durant celle-ci :

$$\dot{Q}_k = V_k q_k \Delta h_k \quad (3.19)$$

Où  $\Delta h_k$  désigne l'enthalpie de réaction.

### 3.5. Modélisation des équilibres entre phases de substances pures

La condition d'équilibre vapeur-liquide peut être écrite, en utilisant la définition de l'énergie de Gibbs, comme suit:

$$\mu_f = G_f = H_f - TS_f = H_g - TS_g = G_g = \mu_g \quad (3.20)$$

Le réarrangement donne la relation entre l'entropie et l'enthalpie d'une transition de phase:

$$\Delta S = S_g - S_f = \frac{1}{T}(H_g - H_f) = \frac{\Delta H}{T} \quad (3.21)$$

Un petit changement du potentiel chimique d'une phase doit être adapté par le changement du potentiel chimique de l'autre phase. Par conséquent, on conclut que:

$$d\mu_f = -S_f dT + V_f dp = -S_g dT + V_g dp = d\mu_g \quad (3.22)$$

La réorganisation des rendements de l'équation différentielle suivante pour la courbe limite de phase est donnée par:

$$\frac{dp}{dT} = \frac{S_f - S_g}{V_f - V_g} \quad (3.23)$$

L'équation (3.22) peut être utilisé pour remplacer l'entropie de transition, résultant de l'équation de Clapeyron :

$$\frac{dp}{dT} = \frac{\Delta H}{T\Delta V} \quad (3.24)$$

Il est justifié de supposer  $\Delta V \approx V_g = \frac{RT}{p}$ ; en le substituant dans l'équation (3.25) et on intègre

afin d'avoir la fameuse équation de Clausius et Clapeyron et la courbe de pression de vapeur.

$$\ln \frac{p}{p_0} = - \frac{\Delta H}{R} \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \quad (3.25)$$

Ici  $(p_0, T_0)$  est un état de référence sur la courbe de pression de vapeur. Les critères d'équilibre de phase dans l'équation (3.21) peuvent être alternativement évalués comme suit:

$$\Delta G_{fg} = G_g - G_f = A_g^r - A_f^r - \ln \left( \frac{V_g}{V_f} \right) + \frac{p_{sat}}{RT} (V_g - V_f) \quad (3.26)$$

Où :  $p_{sat}$  désigne la pression de vapeur saturante.

Le critère de l'équilibre peut être réarrangé pour le rendement par :

$$\int_{V_f}^{V_g} p(V, T) dV = p_{sat} (V_g - V_f) \quad (3.27)$$

Les équations (3.27) et (3.28) constituent des équations non linéaires de la pression de vapeur, connue comme critère de Maxwell. Le critère de Maxwell de la surface égale est basé sur l'égalité de pression, selon une horizontale (pression constante) qui est un segment de droite joignant les points  $V_f$  et  $V_g$  sur la pression-volume (PV) isotherme coupe les aires égales de la courbe ci-dessus et ci-dessous. Il peut être utilisé pour calculer les courbes de pression de vapeur à partir des équations d'état, à condition qu'une estimation initiale de la pression de vapeur soit disponible, pour lequel l'équation d'état donne des densités de liquides et de vapeur distinctes.

Comme le montre la Figure.3.2, le critère de Maxwell est évalué comme une fonction objective, la pression initiale augmente ou diminue, selon la courbure de l'équation d'état. Les régions des deux phases sont situées en résolvant l'équation d'Etat de Peng-Robinson avec la formule de Cardano.

Le critère de Maxwell est résolu au moyen de la méthode de Marquardt-Levenberg, où la pression optimale et le volume molaire aux points de saturation sont obtenus.

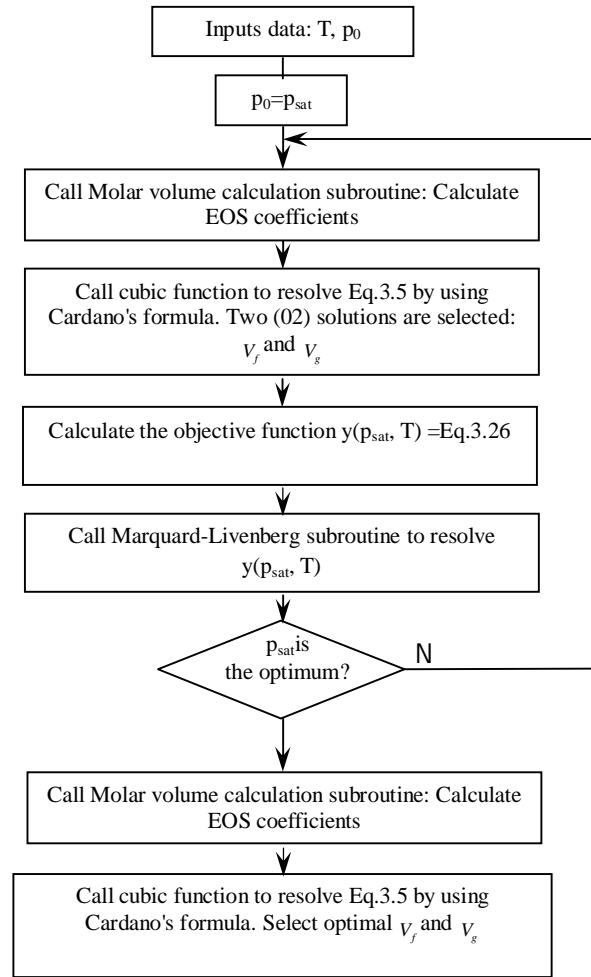


Fig.3.2 : Schéma général du calcul VLE

### 3.6. Calcul de la Variation de Mole (en masse) (Block 1 de chapitre 04)

La durée du transport est importante quand il y a un transfert de matières à travers la surface du volume, dans le cas le plus simple consiste en un ensemble connu de flux à travers cette surface, en fonction du temps, avec le débit volumétrique  $\dot{V}_f$  et le débit massique  $\dot{M}_j$  à travers la portion de surface  $r$ . Ainsi, une équation de la conservation des moles est donnée par:

$$\frac{dN_j}{dt} \equiv \sum_r \left[ \frac{\dot{M}_j}{M_j} - \frac{N_j}{V_j} \dot{V}_j \right] + \sum_k \chi_{jk} q_k(t) \quad (3.28)$$



Comme il est indiqué dans le block 1 du chapitre 04 et au début, on passe dans une boucle pour chaque gaz et on calcule le volume spécifique  $v_k$ , le débit massique  $\dot{M}_k$  et le débit volumique  $\dot{V}_k$ .

En dernier, lorsqu'on fait la boucle pour chaque gaz, on calcule la chaleur qui se manifeste par des réactions chimiques en utilisant l'équation (3.19). L'évolution temporelle des différentes espèces formées par des réactions différentes à l'intérieur du réservoir est calculée en résolvant l'équation (3.28). La forme de la résolution de cette équation différentielle est obtenue par une méthode numérique de Runge-Kutta en utilisant un pas de temps sous le pas de temps déterminé.

### 3.7. Calcul de l'évolution de la température (Block 2 de chapitre 04)

En utilisant la première loi de la thermodynamique pour la variation de l'énergie interne, dans notre cas, il va exprimer comme suit:

$$\frac{dU}{dt} = \dot{Q}(t) + \sum_j (\dot{m}h_{in})_j - P \frac{dV}{dt} \quad (3.29)$$

Où :  $\dot{Q}(t)$  est la puissance calorifique d'échange avec l'extérieur et  $\sum_j (\dot{m}h_{in})_j$  est l'entrée

de puissance calorifique due aux gaz entrants. En exploitant cette équation, nous pouvons arriver à une équation différentielle de la température, sachant que:

$$\frac{dU}{dt} = \left. \frac{dU}{dt} \right|_{structure} + \left. \frac{dU}{dt} \right|_{mixture} \quad (3.30)$$

En outre, nous savons que:

$$\left. \frac{dU}{dt} \right|_{structure} = MC \frac{dT}{dt} \quad (3.31)$$

Et :

$$\left. \frac{dU}{dt} \right|_{mixture} = \sum_k \left( \frac{dU_k}{dV} \frac{dV}{dt} + \frac{dU_k}{dm_k} \frac{dm_k}{dt} + \frac{dU_k}{dT} \frac{dT}{dt} \right) \quad (3.32)$$

Où : MC est la capacité calorifique des structures solides comprises dans le volume.

Si nous résolvons la valeur de  $\frac{dT}{dt}$ , nous obtenons l'expression différentielle suivante:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{\dot{Q} + \sum_j (\dot{m}h_{in})_j - \sum_k \left[ \frac{\partial U_k}{\partial V} + P \right] dV/dt - \sum_k \frac{\partial U_k}{\partial m_k} \frac{dm_k}{dt}}{MC + \sum_k \frac{\partial U_k}{\partial T}} \quad (3.33)$$

L'analyse des différents termes qui apparaissent dans la variation temporaire de la température se compose des équations suivantes:

- **La pression p**

La pression p est la somme de toutes les pressions partielles de chaque composant dans le mélange. Les pressions partielles peuvent être calculées en utilisant l'Eq. (3.2).

- **Variation de l'énergie interne par rapport au volume**

Pour chaque composante présente dans le mélange:

$$\frac{\partial U_k}{\partial V} = T \left( \frac{\partial p_k}{\partial T} \right) - p_k \quad (3.34)$$

- **Variation de l'énergie interne par rapport à la masse**

Pour chaque composante présente dans le mélange:

$$\frac{\partial U_k}{\partial m_k} = u_k \quad (3.35)$$

Où:

$$u_k = h_k - pv_k \quad (3.36)$$

$h_k$  : est la somme des termes résiduels et idéaux

où:

$$h_k = h_k^r + h_k^{id} \quad (3.37)$$

$h_k^r$  et  $h_k^{id}$  sont obtenus respectivement par les équations (3.9) et (3.16).

- **Variation de l'énergie interne par rapport à la température**

Pour chaque composante présente dans le mélange:

$$\frac{\partial U_k}{\partial T} = C_{v,k} \quad (3.38)$$

$C_v$  : Est la somme des termes résiduels et idéaux où:

$$C_{v,k} = C_{v,k}^r + C_{v,k}^{id} \quad (3.39)$$

$C_{v,k}^r$  et  $C_{v,k}^{id}$  : Sont obtenus en utilisant respectivement les équations (3.9) et (3.13).

Comme il est indiqué dans le block 2 du chapitre 04, on calcule l'équation de la variation de température. Tous les termes de l'équation (3.33) sont calculés en utilisant leurs équations correspondantes (3.2), (3.19), (3.34), (3.35), (3.37) et (3.38).

Finalement, avec ces valeurs que nous avons calculé, nous résolvons l'équation différentielle (3.33) en utilisant la méthode numérique de Runge-Kutta.

Simulation et Résultats

## 4.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous allons exploiter, adapter, et justifier les choix proposés pour l'évaluation dynamique des risques auxquels nous allons appliquer la méthode TSD. L'exemple que nous avons choisi est considéré comme exclusif vu la complexité de sa dynamique et aussi la particularité de la partie probabiliste à appliquer. Nous verrons à chaque étape comment ces choix ont été implémentés. Nous décrirons en premier lieu, d'une façon simple, claire, générale et encore une fois proche de la réalité de l'accident de Bhopal, nous expliquons ensuite les deux grandes parties de notre étude, la partie dynamique à travers l'analyse thermo hydraulique et la partie probabiliste traduite par la TSD. Nous verrons alors les différentes étapes pour une implémentation qui respecte l'exemple choisi ainsi que les descriptions des chapitres précédents. Nous expliquerons la méthode utilisée pour le calcul des fréquences de dommage par la TSD, nous verrons aussi l'interconnexion de la TSD avec l'analyse-thermo hydraulique. Enfin nous représentons les résultats sous forme de tableaux et graphes, nous commentons ainsi nos résultats tout en appréciant l'avantage mené par notre méthode d'évaluation choisie.

## 4.2. Description de l'accident de Bhopal [40]

**Le 2 décembre 1984**, la direction de l'usine ordonne le nettoyage de plusieurs canalisations reliant le secteur phosgène au laveur de gaz d'échappement. L'opération débute vers 21h30.

Toutes les vannes sont fermées au moment de l'accident à l'exception de celle conduisant à la soupape de sécurité et au disque de rupture. Les cuves contiennent 63 t de MIC : 42 t dans E610 (remplie au-delà de la limite imposée), 20 t dans E 611 et 1 t dans E619.

**Le 2 décembre vers 23h30**, des opérateurs décèlent dans l'unité de stockage du MIC : une fuite de MIC qui provoque une irritation oculaire et une fuite «d'eau sale » au-dessus de la cuve de stockage de MIC E610. La pression augmente rapidement de 0,14 à 3,8 bars, le disque de rupture se rompt, la soupape de sécurité s'ouvre. Au maximum des réactions chimiques (hydrolyse et polycondensation du MIC), la pression atteint 13,79 bars et la température 200°C. Sous l'effet de la chaleur, la cuve E610 se dilate sans céder et fait éclater le sarcophage de béton.

**A 00h30**, l'alarme de l'usine est déclenchée. Cent vingt ouvriers sont présents sur le site. Les vannes de communication avec les autres cuves sont fermées pour limiter la quantité de MIC impliquée. La manette de commande du laveur est activée mais le voyant lumineux reste éteint.

**Vers 01h00**, des lances à incendie ainsi que des rideaux d'eau sont utilisés dans le but de diluer les émanations toxiques et de refroidir la citerne.

**Vers 02h00**, la police enregistre les premiers appels téléphoniques concernant l'accident.

**Vers 02h30**, la sirène avertissant la population est activée alors que 23 ou 42 t de MIC (selon les sources) ont déjà été émises dans l'atmosphère. L'émission de MIC s'arrête vers 02h30 après

fermeture de la soupape, la pression étant retombée au-dessous du seuil de tarage de 2,76 bars. Les gaz émis sont refroidis au contact de l'air froid ambiant et cheminent au niveau du sol car le MIC est plus lourd que l'air. Un vent faible du N/NO dirige le nuage toxique vers le SE en direction des bidonvilles. Il s'étend sur plus de 3 km et sur une superficie estimée à 20 km<sup>2</sup> ou plus de 50 km<sup>2</sup> selon les sources.

**Vers 05h30**, la température du réservoir n'est plus que de 45-60°C. **A 06h00**, la température de la soude d'abattage est de 60°C montrant que des gaz sont passés dans le VGS (Vent Gas Scrubber). Mais, le titrage de la soude n'avait pas été contrôlé depuis le 23 octobre 1984.

### **4.3. Architecture générale du module d'évaluation dynamique TSD-analyse thermo hydraulique**

#### **4.3.1. Contexte et objectif**

Comme nous l'avons expliqué dans le chapitre 2, et afin d'évaluer le risque d'explosion pour notre cas d'étude, il est indispensable de bien connaître la nature de l'évolution dynamique des paramètres process et cela à chaque instant "t". Cela n'est vrai que si on établit les équations dynamiques modélisant la variation de la température, de la pression et de masse à l'intérieur du réservoir, cette variation continue dans le temps englobe un ensemble de transitoires, ces derniers peuvent induire un incident ou un accident si on dépasse une certaine limite admissible imposée par les codes, normes ou standards de design.

Pour déterminer avec précision la nature du dommage liée aux transitoires des réactions, nous sommes invités à interconnecter l'évolution dynamique au sein de réservoir à une probabilité liée aux paramètres process, qui sera notre moyen pour savoir si le niveau de risque inadmissible est atteint ou non.

A cette effet, nous avons exploité les performances et l'objectivité de la TSD pour calculer les fréquences d'excès dus aux transitoires modélisés par l'analyse thermo hydraulique.

#### **4.3.2 Mécanisme d'interconnexion Analyse Thermo Hydraulique–TSD**

Le processus d'évaluation dynamique des risques implique plusieurs étapes réparties sur les deux modules de calcul l'analyse thermo hydraulique et la TSD, chaque étape est traduite par une subroutine de calcul spécifique. La figure (4.1) représente la chaîne de calcul de l'analyse thermo-hydraulique couplé à la TSD.

La première étape dans le processus d'évaluation dynamique passe tout d'abord par l'analyse thermo-hydraulique qui est chargée par le calcul des paramètres process (P, T, N) pour chaque transitoire, les valeurs de la variation de ces paramètres dans le temps est le résultat d'une résolution des différentes équations non linéaires par la méthode de Runge Kutta.

Les valeurs des paramètres process seront ensuite transférées à chaque instant "t" par l'interconnexion à la TSD qui permet de déterminer le domaine de dommage dans une séquence quelconque et qui permet aussi de calculer par sa caractéristique probabiliste les fréquences d'excès de ce domaine de dommage.

L'ensemble de l'analyse thermo hydraulique – TSD est développé avec deux langages différents. La TSD développée sous Matlab et dans le but de la coupler avec l'analyse thermo-hydraulique développée sous le Compaq Visual Fortran nécessite une interconnexion binaire sous forme d'un fichier dll, le but c'est de réaliser un langage commun pour permettre un transfert réel des outputs de l'analyse thermo-hydraulique en inputs TSD. Nous avons utilisé pour cela les performances de MEX-files qui permettent de relier deux langages différents.

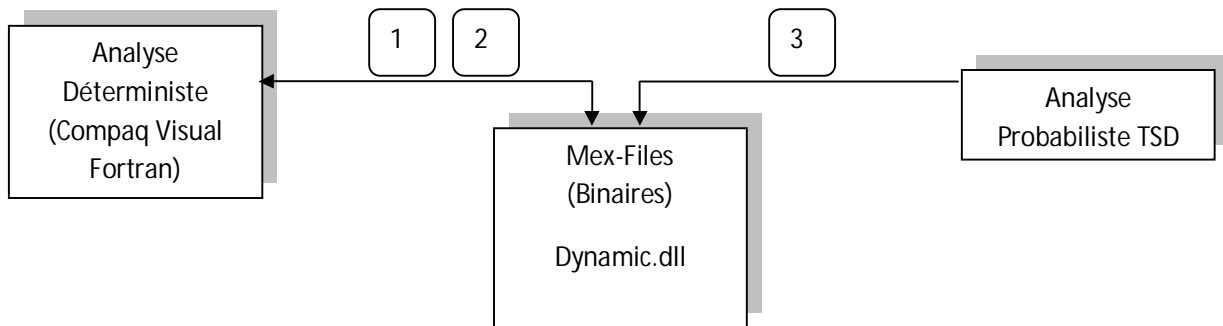


Fig. 4.1. Architecture de l'analyse thermo-hydraulique -TSD

#### 4.4. Partie dynamique : Analyse thermo-hydraulique

##### 4.4.1. Description de la méthodologie

Notre outil thermo-hydraulique calcule l'évolution de la pression, la température, les concentrations molaires des mélanges gazeux à des taux différents au cours de la phase critique, avec des réactions exothermiques.

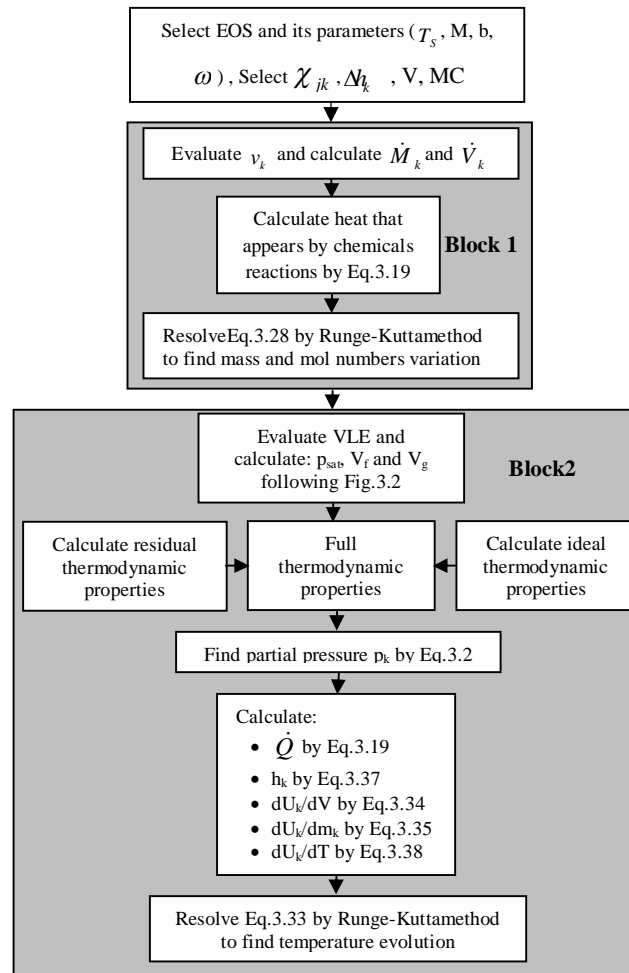


Fig. 4.2 : Diagramme de l'analyse thermo-hydraulique

Comme le montre la figure 4.2, au début, nous sélectionnons l'équation d'état cubique avec ses paramètres ( $T_s$ ,  $M$ ,  $b$  et  $\omega$ ). Pour chaque réaction, nous introduisons les coefficients stœchiométriques et l'enthalpie de réaction. Nous introduisons également le volume total de réservoir avec la capacité thermique des structures solides. Le Block 1 décrit les principales étapes à suivre pour résoudre l'équation de transfert de masse pour les différentes espèces.

Le Block 2 décrit les principales étapes à travers lesquelles on résout l'équation de température.

#### 4.4.2. Hypothèses générales

Comme il est mentionné, il y'a de nombreuses réactions qui tendent à être exothermiques et vigoureuses. Du point de vue pratique, et pour simplifier notre problème, seul un nombre limité de ces réactions concevable aurait pu prendre place dans notre étude.

Nous supposons que seul le Méthyle-isocyanate réagit de façon exothermique avec l'eau pour donner le Méthylamine et du dioxyde de carbone. Le Méthyl-isocyanate constitue un mélange pur de vapeur-liquide de phase, le Méthylamine et le CO<sub>2</sub> forment la région du mélange gazeux incondensable. Pour notre simulation, il est supposé également que le réservoir E610, contient seulement un mélange gazeux de Méthyl-isocyanate et de la vapeur d'eau avec un volume spécifique pour chacun  $v > v_g$ .

#### 4.4.3. Description des réactions chimiques dans le réservoir Bhopal E610

La cause directe de la réaction chimique entre l'eau et le Méthyl-isocyanate est l'introduction de l'eau à l'intérieur du réservoir E610, il y a de nombreuses théories qui annoncent la façon de l'échappement d'eau à l'intérieur de réservoir, l'eau aurait pu s'infiltrer à un moment donné dans la ligne de l'azote à proximité du réservoir, l'eau aurait pu s'infiltrer par la ligne de réfrigération ou l'eau aurait pu entrer directement dans le système de ventilation. Dans tous ces cas, nous supposons que la vapeur d'eau était présente dans le réservoir.

Nous supposons également que la température initiale du mélange à l'intérieur du réservoir au début des réactions globales est de 325 ° K. Selon la pression initiale, nous simulerons un cas accidentel avec l'hypothèse suivante :- le réservoir contient un mélange gazeux initial composé de 6000 kg de vapeur d'eau et de 2000 kg de Méthyl-isocyanate, aux mêmes conditions initiales.

Comme il est décrit dans la figure.4.2, et pour notre cas, l'utilisateur ne change que le fichier d'entrée qui contient la température initiale à l'intérieur du réservoir, les coefficients stœchiométriques, les masses molaires, l'enthalpie de réaction, et en fonction de l'équation d'état, l'entrée du fichier contient également le covolume, le facteur acentrique et les températures spécifiques pour chaque composant du mélange.

##### 4.4.3.1. Variation de la masse dans le réservoir E610

Les figures 4.3 et 4.4 montrent respectivement la variation des masses de Méthylamine et du dioxyde de carbone et les masses de la vapeur d'eau et du Méthyl-isocyanate à l'intérieur du réservoir E610.

Dans la figure 4.3, on voit clairement l'augmentation des masses Méthylamine et dioxyde de carbone.



Dans la figure 4.4, et comme un résultat logique on constate la diminution progressive de composants de notre mélange initial, c.à.d. la diminution de Méthyl-isocyanate et la vapeur d'eau.

Les variables thermodynamiques continuent de varier, et le réservoir évolue vers son état instable.

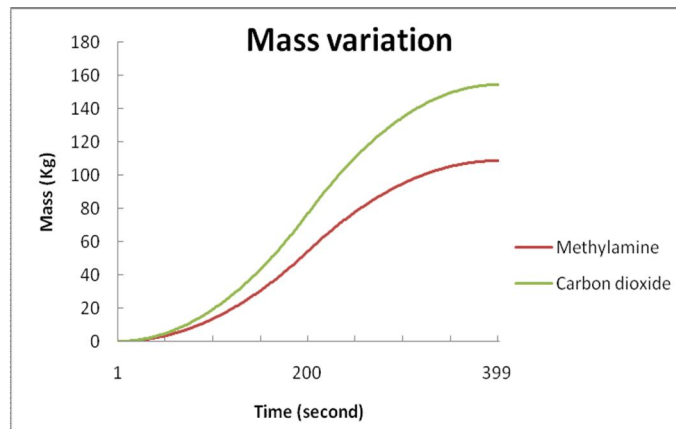


Fig. 4.3 : Variation de masse de Méthylamine et du dioxyde de carbone

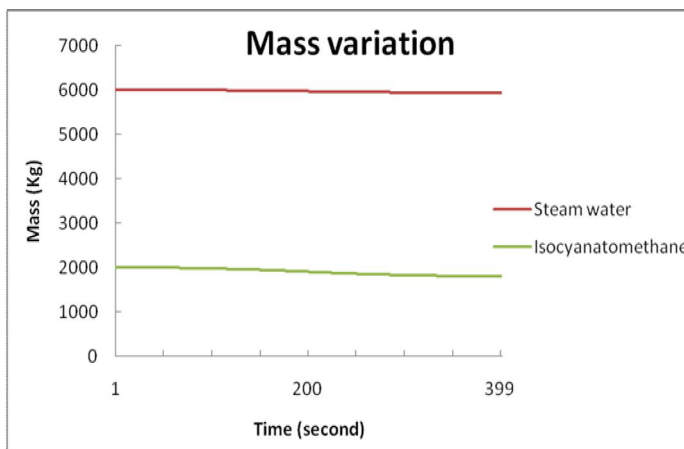


Fig. 4.4 : Variation de masse de vapeur et de Méthyl-isocyanate

#### 4.4.3.2. Evolution de la température et de la pression dans le réservoir

Les figures 4.5 et 4.6 montrent respectivement l'évolution de la température et de la pression à l'intérieur du réservoir. À 0 seconde, la réaction exothermique entre la vapeur d'eau et le Méthyl-isocyanate a lieu, nous pouvons confirmer que la température et la pression augmentent. Pendant notre simulation, les variables thermodynamiques continuent à varier et le réservoir évolue vers son état instable.

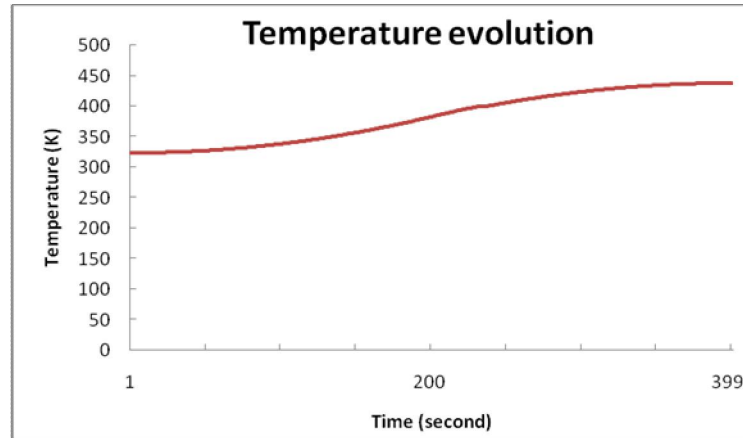


Fig.4.5 évolution de la température dans le réservoir

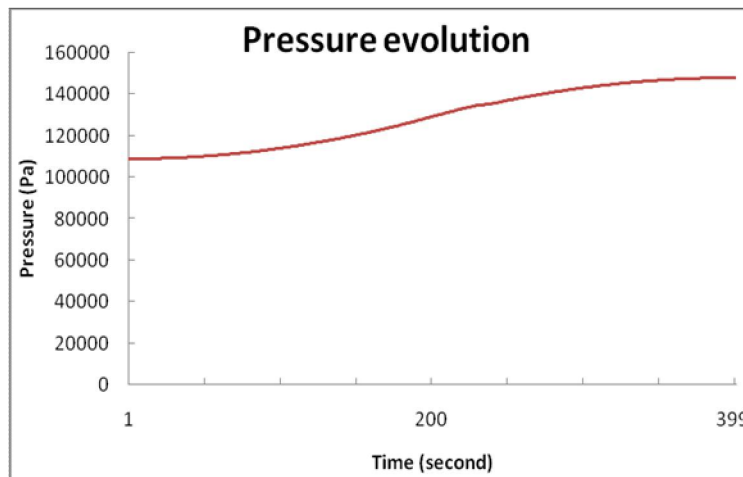


Fig.4.6 évolution de la pression dans le réservoir

## 4.5. Partie probabiliste : TSD

### 4.5.1. Description du système de protection

Pour éviter l'échappement de MIC directement dans l'atmosphère, le système de protection présent dans l'usine de Bhopal [42] est composé essentiellement de:

- Système d'épuration de gaz de passage pour neutraliser les gaz toxiques libérés par les différents équipements de l'usine. Ces derniers étaient en panne durant la nuit de la catastrophe. Ce système est relié au système de torchage qui assure le brûlage des gaz toxiques évacués avec un taux contrôlé. Ce système à son tour était en maintenance.
- Système de réfrigération installé pour maintenir le réservoir de stockage de MIC en dessous de 5°C. Ce système a été en période d'arrêt en mai 1984 pour ne pas consommer beaucoup de puissance.

- Système de déluge pour neutraliser les gaz toxiques en cas de fuite et d'échappement vers l'atmosphère. L'eau de déluge qui était présent dans l'usine ne pouvait pas atteindre la hauteur de nuage toxique, et donc ne pouvait pas neutraliser tout le gaz échappé. Ce système pour notre cas simplifié peut être interprété comme un système de refroidissement du réservoir.
- Système de soupape de sécurité connecté au système de ventilation à partir duquel le MIC a été libéré après rupture du disque de sécurité.

#### 4.5.2. Analyse du domaine de dommage

##### 4.5.2.1 Description des séquences

Pour démontrer les performances de la recherche du domaine dommage, nous avons pris le cas simple déjà décrit dans la section 4.5.1. L'objectif principal de cette section est d'analyser le domaine de dommage dû à une surpression provoquée par l'entrée de MIC à l'intérieur du réservoir. Les événements concernés sont indiqués dans le tableau 4.1.

**Tableau 4.1.**

Evènements dynamiques.

Événement	description
1	Événement initiateur (INI): MIC (gazeux) introduit à l'intérieur du réservoir
2	Événement de déluge de refroidissement (DEL) résultant de déclenchement aléatoire du système de déluge de l'eau.
3	Évènement d'injection de Fréon (RFF) dans le réservoir après le déclenchement aléatoire du système de réfrigération.
4	Évènement de l'évolution des réactions exothermiques (REA) entre le MIC et l'eau (gazeux).
5	La rupture de disque de sécurité (RUP) lorsque la pression atteint le point seuil, le MIC s'échappe à partir du système d'épuration de gaz d'évacuation après l'ouverture de la soupape de sécurité.

Pour le cas de notre étude, une condition simplifiée des fonctions de probabilités a été adoptée, et des séquences d'accident simple ont été conçues avec des pdf uniformes pour les événements dynamiques. Ainsi, neuf (09) séquences ont été étudiées, et le calcul analytique à l'aide de la TSD a été effectué:

- Séquence [1 2]: après le déclenchement de l'événement initiateur, l'événement de déluge survient à  $t_2$  et rien ne se passe jusqu'à la fin de la transitoire.

- Séquence [1 2 3]: après le déclenchement de l'événement initiateur, l'événement de déluge survient à  $t_2$ , et l'événement de l'injection de Fréon se produit à  $t_3 > t_2$ , puis rien ne se passe jusqu'à la fin de la transitoire.
- Séquence [1 2 4]: après le déclenchement de l'événement initiateur, l'événement de déluge survient au  $t_2$ , et l'événement des réactions exothermiques se produit à  $t_3 > t_2$ , puis rien ne se passe jusqu'à la fin de la transitoire.
- Séquence [1 2 4 3]: après le déclenchement de l'événement initiateur, l'événement de déluge survient à  $t_2$ , l'événement des réactions exothermiques se produit à  $t_3 > t_2$  et l'événement de l'injection de Fréon survient à  $t_4 > t_3 > t_2$  puis rien ne se passe jusqu'à la fin de la transitoire.
- Séquence [1 2 3 4]: après le déclenchement de l'événement initiateur, l'événement de déluge survient à  $t_2$ , l'événement de l'injection de Fréon survient à  $t_3 > t_2$  et l'événement des réactions exothermiques se produit à  $t_4 > t_3 > t_2$  et rien ne se passe jusqu'à la fin de la transitoire.
- Séquence [1 3 2]: après le déclenchement de l'événement initiateur, l'événement de l'injection de Fréon survient  $t_2$ , l'événement de déluge survient à  $t_3 > t_2$  et rien ne se passe jusqu'à la fin de la transitoire.
- Séquence [1 3 4]: après le déclenchement de l'événement initiateur, l'événement de l'injection de Fréon survient à  $t_2$  et l'événement des réactions exothermiques se produit à  $t_3 > t_2$  puis rien ne se passe jusqu'à la fin de la transitoire.
- Séquence [1 3 4 2]: après le déclenchement de l'événement initiateur, l'événement de l'injection de Fréon survient à  $t_2$ , l'événement des réactions exothermiques se produit à  $t_3 > t_2$ , et l'événement de déluge survient à  $t_4 > t_3 > t_2$ , puis rien ne se passe jusqu'à la fin de la transitoire.
- Séquence [1 3 2 4] : après le déclenchement de l'événement initiateur, l'événement de l'injection de Fréon survient à  $t_2$ , l'événement de déluge survient à  $t_3 > t_2$ , et l'événement des réactions exothermiques se produit à  $t_4 > t_3 > t_2$ , puis rien ne se passe jusqu'à la fin de la transitoire.

Lorsque le stimulus de rupture du disque de la sécurité est activé, il est donc considéré comme un stimulus de dommage, il n'est pas donc nécessaire de l'inclure dans le vecteur de séquences lors de la simulation des accidents.

#### 4.5.2.2. Description des stimuli et des délais

- Réaction exothermique

Le bilan thermique est en équilibre lorsque la chaleur produite  $\dot{Q}_k$  est égale à la chaleur absorbée par le système de refroidissement  $\dot{Q}_{cool}$ . Ceci se produit aux deux intersections de la courbe exponentielle de taux de la chaleur libérée avec la ligne droite de la courbe de changement de la chaleur représentée dans un diagramme appelé le diagramme de Semenov [43]. L'emballement se développe lorsque la puissance de refroidissement par systèmes de réfrigération et déluge est inférieure au taux de production de chaleur de la réaction de MIC et de l'eau. La capacité de refroidissement devient insuffisante et la température augmente. Le stimulus de réaction d'emballement est alors activé lorsque:

$$T - T_0 \leq \frac{T^2}{E/R} \quad (4.1)$$

L'activation de stimulus d'explosion thermique dépend de la température d'activation  $E/R$ , et la différence entre la température de refroidissement  $T_0$  et la température du mélange  $T$ . Cette différence  $(T-T_0)$  a une limite supérieure pour garantir des conditions de réaction stable ou en d'autres termes la température de référence/ refroidissement a une limite inférieure.

Le temps de taux maximum sous des conditions adiabatiques ( $TMR_{ad}$ ) est le temps d'une explosion thermique prise à se développer sous des conditions adiabatiques. Ce temps est aussi appelé le Temps de Non Retour (TNR). Après l'écoulement de ce temps sous les conditions adiabatiques et même si le système de refroidissement est redevenu opérationnel, il est impossible de refroidir le réservoir, car son équilibre thermique devient supercritique, donc le TNR est une caractéristique importante si le système de refroidissement d'urgence doit faire face à une réaction imminente d'emballement, il doit devenir efficace dans un temps plus court que TNR.

Le  $TMR_{ad}$  est une fonction de la réaction cinétique, de taux de la réaction  $q_0$  aux conditions initiales  $T_0$ , la capacité thermique spécifique de la masse de réaction  $c'_p$  et l'énergie d'activation  $E$  de la réaction, on peut l'évaluer comme suit:

$$TMR_{ad}(T) = \frac{c'_p RT_0}{q_0 e^{-E/RT_0} E} \quad (4.2)$$

Le  $TMR_{ad}$  peut être traduit comme un délai nécessaire pour que l'explosion thermique se développe sous TNR, après ce délai le système de réfrigération et le système de déluge deviennent inefficaces pour refroidir le réservoir.

- **Disque de Rupture de sécurité**

Pour simplifier l'analyse des résultats, le disque de sécurité est supposé défaillant si la suppression provoquée par les réactions exothermiques dépasse la valeur de  $P_{RUP}$ . La valeur du  $P_{RUP} = 0,3$  MPa sera retenue comme une valeur de référence. L'occurrence de l'événement de rupture est légèrement retardée par rapport à la  $P_{RUP}$ , ce délai est petit et peu incertain et que l'on peut ignorer.

- **Activation automatique de déluge et de la réfrigération.**

L'action de l'activation automatique de déluge et de réfrigération peut être considérée en supposant que la probabilité pour que le système de déluge peut être activé avant la rupture du disque de sécurité est égale à 0,5. La probabilité pour avoir l'injection de Fréon pendant le processus de dégradation est égal à 0,5. L'occurrence des événements de déluge et de l'injection de Fréon est légèrement retardée par rapport au point seuil, ce délai est petit et peu incertain donc on peut l'ignorer.

#### 4.5.3. Résultats numériques

Les tableaux 4.2 et 4.3 présentent les résultats de notre simulation avec les accumulations de la pression et de la température. Les différentes séquences sont caractérisées par un nombre de chemins de dommages, un nombre de chemins de sûreté et un nombre de chemins impossibles.

La dernière colonne indique la fréquence des dommages associés à chaque séquence.

La première partie de la simulation comme il est indiqué dans le tableau 4.2, calcule la fréquence d'excès du dommage liée aux réactions exothermiques (entrant dans la région de développement de l'explosion thermique, après la deuxième intersection représentée dans le diagramme de Semenov).

**Tableau 4.2**

Les résultats de domaine dommage, avec l'activation de stimulus de dommage de l'explosion thermique.

Séquence	Chemins dommage	Chemins de sûreté	Chemins impossibles	Total des chemins	Fréquence de dommage
[1]	0	1	0	1	0
[1 2]	30	4	0	34	0.3448
[1 2 3]	343	7	149	499	0.0243
[1 3]	19	15	0	34	0.1357
[1 3 2]	846	15	143	1004	0.0543
<b>TOTAL</b>	<b>1238</b>	<b>42</b>	<b>292</b>	<b>1572</b>	<b>0.5591</b>

La deuxième partie de la simulation comme il est indiqué dans le tableau 4.3, calcule la fréquence d'excès du dommage de stimulus de dommage de disque de rupture de sécurité pour chaque séquence possible.

**Tableau 4.3**

Les résultats de domaine dommage, avec l'activation de stimulus de dommage du disque de rupture de sécurité.

séquence	Chemins dommage	Chemins de sûreté	chemins impossibles	Total des chemins	Fréquence de dommage
[1 2 4]	669	0	2331	3000	2.49e-003
[1 2 4 3]	324	0	3140	3464	5,48e-04
[1 2 3 4]	15621	1745	3009	20375	0.0209
[1 3 4]	1494	420	1506	3420	2.74e-003
[1 3 4 2]	474	220	2151	2845	6,01e-04
[1 3 2 4]	16995	0	2946	19941	0.1261
<b>TOTAL</b>	<b>35577</b>	<b>2385</b>	<b>15083</b>	<b>53045</b>	<b>0,1533</b>

Plusieurs commentaires peuvent être tirés à partir des résultats obtenus:

- Le rapport élevé des chemins de dommages par rapport aux chemins de succès est juste le résultat de l'algorithme de raffinement de domaine de dommages. L'échantillonnage n'a aucune relation avec le délai pdf de ces événements, car ils sont déjà pris en compte dans les formules de la TSD. Au lieu de cela, le processus d'échantillonnage se concentre dans le domaine de dommage, ce qui implique que pour le même nombre total des chemins échantillonnés, plus de chemins de dommages sont détectés, plus le calcul de la fréquence d'excès est beaucoup plus efficace et précis.
- Les séquences les plus graves sont : [1 2 4], [1 2 3 4], [1 3 4] et [1 3 2 4], qui représentent 99,3% de toute la fréquence d'excès du domaine de dommage.

Des conclusions qui concernent les consignes des différents systèmes de protection devraient être obtenues à partir de n'importe quelle évaluation de la sûreté fiable. Les domaines de dommage reflètent l'influence des consignes des stimuli sur la sécurité et à travers eux, l'influence de la conception du système de protection. Le domaine des dommages obtenus pour atteindre le dommage de rupture de disque de sécurité reflète la violation du seuil de rupture.

Il est important de mentionner que le domaine total des dommages obtenu pour toutes les séquences possibles, comme il est indiqué dans le tableau 4.3 est plus considérable que le domaine de dommage total obtenu dans le tableau 4.2 lorsque le  $TMR_{ad}$  s'écoule et la TNR est atteint. Le déluge ou le système de réfrigération sont activés après l'événement des réactions exothermiques. On peut constater comment le domaine de dommage peut être réduit progressivement pour l'exemple des séquences [1 2 4 3] et [1 3 4 2] par rapport aux séquences [1 2 4] et [1 3 4].

#### 4.6. Conclusion

L'évaluation dynamique des risques par la méthode TSD que nous avons proposé dans ce travail est très efficace pour l'identification du domaine de dommage de tous les scénarios qu'on a pu rencontrer dans l'étude de l'accident de Bhopal.

Notre travail s'inclue dans un processus dynamique interconnecté avec un processus probabiliste, où l'évaluation des risques est effectuée par une évaluation des probabilités d'occurrence des dommages en prenant connaissance des évolutions dynamiques des paramètres process qui amènent à la limite imposée par la réglementation dans la phase de l'engineering et de design.

Notre simulation Thermo-hydraulique -TSD établit donc une évaluation dynamique du risque de surpression due à des réactions exothermiques entre le H<sub>2</sub>O et le MIC à l'intérieur du réservoir de stockage de MIC, nous avons essayé dans notre travail d'être plus proche de la réalité de l'accident en se limitant à étudier la région du mélange gazeux avec des conditions aux limites, sans tenir compte du changement de phase, ce travail nous a permis de déterminer :

1. Le domaine de dommage de chaque séquence qui représente un scénario, nous avons exploité les performances de l'algorithme de recherche adaptatif.
2. La fréquence de dommage ou la probabilité d'atteindre les limites admissibles, ces fréquences sont considérées comme étant la clé de l'engineering de protection, sur la base de ces valeurs, le designer peut contribuer à améliorer les couches de protection des installations qui représentent des risques technologiques majeurs.



---

## *CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES*

---

Ce travail de simulation des séquences accidentelles au sein du réservoir de stockage de MIC nous a permis de tirer les conclusions suivantes :

- ✓ L'évaluation dynamique des risques par la méthode proposée 'TSD' est très efficace pour l'identification du domaine de dommage de tous les scénarios.
- ✓ La simulation Analyse thermo-hydraulique-TSD établit une évaluation dynamique du risque de surpression due aux réactions exothermiques au sein du réservoir E610.

Et il nous permet de déterminer ce qui suit :

- ✓ Le domaine de dommage de chaque séquence qui représente un scénario, nous avons exploité les performances de l'algorithme de recherche adaptatif.
- ✓ La fréquence de dommage ou la probabilité d'atteindre les limites admissibles, ces fréquences sont considérées comme étant la clé de l'engineering de protection, sur la base de ces valeurs, le designer peut contribuer à améliorer les couches de protection des installations qui représentent des risques technologiques majeurs.

Et finalement, comme perspectives, nous allons aborder dans les prochaines recherches l'exploitation des performances de notre outil d'analyse thermo-hydraulique dans la transition gaz-liquide-solide afin d'augmenter la puissance de notre calcul, certains modules qui sont actuellement en développement fournissent la capacité d'introduire des mélanges binaires pour calculer les propriétés thermodynamiques en utilisant les différentes équations d'état pour toutes les phases.

## *RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES*



- [1]**Kaufmman A., Gronchko G., Cruon R:** Modèles mathématiques pour l'étude de fiabilité des systèmes. Masson et Cie, 1975.
- [2] **Villemeur A:** Sûreté de fonctionnement des systèmes industriels.  
Edition Eyrolles.1988.
- [3]**Cocozza-Thivent C :**Processus stochastiques et fiabilité des systèmes.  
Mathématiques et Applications. Springer, 1997.
- [4] **Siu, N.** Risk assessment for dynamic systems: An overview.  
Reliability Engineering and System Safety43,1994,p.43–73.
- [5]**Cojazzi G., Cacciabue P. C:** The DYLAM approach for the reliability analysis of systems with dynamic interactions.  
EUR.15266 Reports, JCR Ispra, 1993.
- [6]**Devooght J., Smidts C:** Probabilistic reactor dynamics – I: The theory of continuous event trees.  
Nuclear science and engineering, 111, 1992, p.229 – 240.
- [7]**Smidts C:** Probabilistic dynamics: a comparison between continuous event trees and discrete event tree model.  
Reliability Engineering System Safety 4, 1994, p.189–206.
- [8]**Cassandras C. G., Lafortune S:** Introduction to discrete event systems.  
Kluwer Academic Publishers, 1999.
- [9] **David R., Alla H:** Du grafctet aux réseau de Petri.  
Paris. Hermès, 1989.
- [10]**Veach E:** Robust Monte Carlo methods for light transport simulation.  
A dissertation submitted to the department of computer science and the committee on graduate studies of Stanford University, for the degree of doctor of philosophy. 1997.
- [11]**Dubi A:** Monte Carlo Applications in systems engineering.  
John Wiley et Sons, Ltd. England, 2000.
- [12]**Niel E., Craye E:**Maîtrise des risques et sûreté de fonctionnement des systèmes de production.  
Productique : information, commande, communication. Lavoisier, 2002.
- [13]**Labeau P. E., Smidts C., Swaminathan S:**Dynamique reliability: towards an integrated parform for probabilistic risk assessment.  
Reliability Engineering and System Safety, Elsevier. 68, 2000, p. 219 – 254.

- [14] **Smidts C., Devooght J:** Probabilistic reactor dynamics–II: A Monte Carlo study of a fast reactor transient. Nuclear science and engineering, 111, 1992, p. 241–256.
- [15] **Marseguerra M., Zio E:** Devooght J., Labeau P. E. A concept paper on Dynamic Reliability via Monte Carlo Simulation. Mathematics and Computers in Simulation 47, 1998, p. 371-382.
- [16] **Cabarbaye A., Laulheret R:** Evaluation de la sûreté de fonctionnement des systèmes dynamiques par modélisation récursive. 6<sup>ème</sup> Congrès International pluridisciplinaire, qualité et sûreté de fonctionnement, Qualita2005, Bordeaux, 2005.
- [17] **Cocozza-Thivent C., Eymard R:** Algorithmes de fiabilité dynamique. Maîtrise de risques et sûreté de fonctionnement, lambda mu 15. Lille, 2006.
- [18] **J.R. Lamarsh:** Introduction to nuclear Engineering. Addison –Wesley, Reading, 1983.
- [19] **J. fleurot., J. M. evrard., B. chaumont:** Les études d'évaluation des termes sources sur les REP. Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire, 2002.
- [20] **Izquierdo, J.M., Cañamón, I:** Status report on dynamic reliability : SDTPD path and sequence TSD developments. Application to the WP5.3 benchmark Level 2 PSA exercise. SARNET-PSA2 WP5.3 D73. December 2006.
- [21] **Izquierdo, J.M., Cañamón, I:** TSD, a SCAIS suitable variant of the SDTPD. CSN-UPM internal report. 2008.
- [22] **Labeau P.E., Izquierdo J.M:** Modeling PSA problems. I The stimulus driven
- [23] NEA/CSNI/R(2007)9, Task Group on Safety Margins Action Plan (SMAP) Safety Margins Action Plan. Final Report. See also NEA/SEN/SIN/LOSMA(2008)1,
- [24] **Labeau P.E., Izquierdo J.M.,** 2004. Modeling PSA problems. I The stimulus driven theory of probabilistic dynamics. II A cell-to-cell transport theory approach. NSE: 150, 115-154 (2005).
- [25] **Izquierdo José M. Labeau Pierre E.** The stimulus-driven theory of probabilistic dynamics as framework for probabilistic safety assessment. PSAM-7/ESREL-04 Conference, Springer, Berlin, Germany. 2004.
- [26] **Chaumont B. and Raymond E.** Specification of a benchmark exercise relative to hydrogen combustion for application of dynamic reliability methods. Sarnet Portal PSA2 Team site SARNET-PSA2-P12 - Rev: 0 Draft (2).
- [27] **Izquierdo J.M., Melendez E., Devooght J:** Relationship between probabilistic dynamics and event trees. Rel. Eng. Syst. Safety 52, pp. 197-209, 1996.

- [28] **Izquierdo José M. Labeau Pierre E:** The stimulus-driven theory of probabilistic dynamics as framework for probabilistic safety assessment. PSAM-7/ESREL-04 Conference, Springer, Berlin, Germany. 2004.
- [29] **J.M Izquierdo Rocha et I. C Valera:** Conclusions of the SDTDP/TDS methods development: Results of its application to the WP5.3 benchmark Level 2 PSA, Consejo de Seguridad Nuclear (CSN) . Madrid, Spain, October 2008.
- [30] **Twinning Project RO 06 IB EN 05, REPA Pitești – cas de Bhopal.**  
INERIS – November -2008.
- [31] **Lepkowski, W.** Bhopal, Indian city begins to heal but conflicts remain. Chemical & Engineering News, ACS Publications. 1985, 63 (48), p. 18–34.
- [32] **Themistocles, D. Anibal, L., Russell, L., Sureerat, S, John K. Chan.** Studies of Methyl Isocyanate Chemistry in the Bhopal Incident. The Journal of Organic Chemistry, ACS Publications. 1986, 51, p. 3781-3788
- [33] **Vidal, J.** Thermodynamique, Application au génie chimique et à l'industrie pétrolière. Edition Technip, 1997.
- [34] **Hasan, O. Stanley, S. Arvind, V.** Modeling Vapor-Liquid Equilibria: Cubic Equations of State and Their Mixing Rules. Cambridge University Press, 1998.
- [35] **The NIST Chemistry Web Book,** 2008. <http://webbook.nist.gov>.
- [36] **Thermodynamics and chemical rates expressions.** Chemkin code manual Chapter 2. June 2006.
- [37] **Gas-Phase Kinetics Core Utility Manual.** Chemkin Collection, 2003.
- [38] **Jelezniak, M. Jelezniak, I.** Differential Equations of Gas-Phase Chemical Kinetics. Chemked – A Program for Chemical Kinetics of Gas-Phase Reactions, 2009. <http://chemked.com>
- [39] **The NIST Chemical Kinetics Database on the Web.** A Compilation of Kinetics Data on Gas - Phase Reactions, 2000. <http://kinetics.nist.gov/kinetics/index>
- [40] **'Fuite de gaz toxiques dans une usine agrochimique, Nuit du 2 au 3 décembre 1984 en Bhopal (Inde)'** ARIA 7022- Février 2008

## Références bibliographiques

---

[41] **Izquierdo, J.M., Hortal, J., Meléndez, E., Sánchez, M:** Consolidation Plan for the Integrated Sequence assessment (ISA) CSN Code system SCAIS.

CSN internal report Área MOSI. February 2003 (in Spanish).

[42] **Gupta, J.P:** ‘The Bhopal gas tragedy: could it have happened in a developed country?.

Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2002; 15, p. 1 –4.

[43] **Stoessel, F :**Thermal Safety of Chemical Processes.

Wiley-VCH Edition, 2008.

---

## *ANNEXES*

---



### Méthode de Runge-Kutta-Fehlberg

La sous-routine dderkf utilise la méthode de Runge-Kutta-Fehlberg (RKF(4,5)) pour résoudre une ou plusieurs équations différentielles de la forme  $\dot{y} = f(t, y)$ . Cette méthode évalue les dérivées en plusieurs instants avec un pas de temps  $h$ , et calcule les six valeurs suivantes :

$$k_1 = h \cdot f(t_j, y_j)$$

$$k_2 = h \cdot f\left(t_j + \frac{1}{4}h, y_j + \frac{1}{4}k_1\right)$$

$$k_3 = h \cdot f\left(t_j + \frac{3}{8}h, y_j + \frac{3}{32}k_1 + \frac{9}{32}k_2\right)$$

$$k_4 = h \cdot f\left(t_j + \frac{12}{13}h, y_j + \frac{1932}{2197}k_1 + \frac{7200}{2197}k_2 + \frac{7296}{2197}k_3\right)$$

$$k_5 = h \cdot f\left(t_j + h, y_j + \frac{439}{216}k_1 - 8k_2 + \frac{3680}{513}k_3 - \frac{845}{4104}k_4\right)$$

$$k_6 = h \cdot f\left(t_j + \frac{1}{2}h, y_j - \frac{8}{27}k_1 + 2k_2 - \frac{3544}{2565}k_3 - \frac{1859}{4104}k_4 - \frac{11}{40}k_5\right)$$

Avec les valeurs ci-dessus, on peut obtenir une solution d'approximation par le polynôme de Runge-Kutta d'ordre 4 et d'autres polynômes d'ordre 5:

$$y_{j+1} = y_j + \frac{25}{216}k_1 + \frac{1408}{2565}k_3 + \frac{2197}{4104}k_4 - \frac{1}{5}k_5$$

$$z_{j+1} = y_j + \frac{16}{135}k_1 + \frac{6656}{12825}k_3 + \frac{28561}{56430}k_4 - \frac{9}{50}k_5 + \frac{2}{55}k_6$$

## Les matrices $\Omega$

Comme pour les évènements stimuli, les matrices  $\Omega$  sont définies dans le cas de l'industrie nucléaire comme suit :

	Aspersion	Injection	Combustion	Rupture
Aspersion	1	0	0	0
Injection	0	1	0	0
Combustion	0	0	1	0
Rupture	0	0	0	1

Tableau A1 : Matrice  $\Omega$  d'activation de l'exercice de Benchmark

	Aspersion	Injection	Combustion	Rupture
Aspersion	-1	0	0	0
Injection	0	-1	0	0
Combustion	0	0	-1	0
Rupture	0	0	0	-1

Tableau A2 : Matrice  $\Omega$  de désactivation de l'exercice de Benchmark

	LOCA	Aspersion	Combustion	Rupture
LOCA	-1	1	0	0
Aspersion	0	-1	0	0
Injection	0	0	0	0
Combustion	0	0	-1	0
Rupture	0	0	0	-1

Tableau A3 : matrice  $\Omega$  dynamique de l'exercice de Benchmark

Ces tableaux indiquent que si un stimulus d'aspersion est activé, l'état des autres stimuli reste tel qu'ils étaient, et que l'évènement initiateur active les stimuli associés à l'aspersion et l'injection d'eau ainsi ceux-ci peuvent se produire à tout moment plus tard.