

Génie des procédés de l'École de Nancy

1000101001 011101011
110101000111101001
110101110 110001

André LAURENT

Sécurité des procédés chimiques

connaissances de base et méthodes d'analyse de risques

2^e édition

110101000111101001001110001010
1010111011000101001011101011
11010100 011110
001001110001
1010111011 000 001011101011
1101010001111010

10101110110001010 011101011
110101000111101001110001010

101011101100 1001011101011
1101010001101001

01110001010
10101110110001010 01011101011

110101000111101001001110001010
101 01110110101011 011101011

11010100011101001

01110001010
101011101100 010100101 1101011

11010100011101001001110001010
101011101100 0101001011101011

11010100011110100100 11
01010
111011000101001011

01011
110101000111101001001110001010
101011101100 0101001011101011

110101000111101001001110001010

Editions
TEC
& **DOC**

Lavoisier

Sécurité des procédés chimiques

**Connaissances de base
et méthodes d'analyse de risques**

2^e édition

Sécurité des procédés chimiques

Connaissances de base
et méthodes d'analyse de risques

2^e édition

André Laurent



11 rue Lavoisier
75008 Paris

Chez le même éditeur dans la même collection

Cinétique et catalyse

Scacchi G., Bouchy M., Foucaut J.-F., Zahraa O., Fournet R., 2^e édition, 2011

Commande des procédés

Corriou J.-P., 2^e édition, 2003

Pervaporation

Néel J., 1997

Génie de la réaction chimique : conception et fonctionnement des réacteurs

Villiermaux J., 2^e édition, 1995

Mécanique et rhéologie des fluides en génie chimique

Midoux N., 1993

Éléments de génie électrochimique

Cœuret F., Stork A., 1993



© Lavoisier, 2011
ISBN : 978-2-7430-1396-7

Toute reproduction ou représentation intégrale ou partielle, par quelque procédé que ce soit, des pages publiées dans le présent ouvrage, faite sans autorisation de l'éditeur ou du Centre français d'exploitation du droit de copie (20 rue des Grands Augustins – 75006 Paris), est illicite et constitue une contrefaçon. Seules sont autorisées, d'une part, les reproductions réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective, d'autre part les analyses et courtes citations justifiées dans le caractère scientifique ou d'information de l'œuvre dans laquelle elles sont incorporées (Loi du 1^{er} juillet 1992 – art. L. 122-4 et L. 122-5 et Code pénal art. 425).

Avant-propos

La seconde édition revue, actualisée et augmentée de l'ouvrage "Sécurité des procédés chimiques" résulte de la conjonction des nombreuses observations, remarques et suggestions générées par des lecteurs depuis la parution en mai 2003 de la première édition et aussi surtout de l'importante émergence réglementaire consécutive à l'explosion AZF du 21 septembre 2001 à Toulouse. En effet la loi du 30 juillet 2003 relative à la prévention des risques technologiques et naturels et à la réparation des dommages apporte de nouveaux éléments au cadre réglementaire de gestion des risques industriels. Cette loi a introduit dans les études de dangers le principe d'une analyse tenant compte non seulement des phénomènes dangereux, de l'intensité de leurs effets et de leurs cinétiques, mais également de la probabilité d'occurrence des accidents avec la promotion nouvelle d'une approche probabiliste. Le contenu de cette seconde édition actualise donc dans ce nouveau contexte les deux démarches complémentaires d'appréciation des risques d'une installation industrielle. La première, intitulée *analyse de risque*, permet d'identifier les dangers et d'en estimer la probabilité. Elle nécessite une définition précise de l'unité analysée portant tant sur les produits que sur le procédé exploité dans son environnement, un inventaire méthodique des dangers s'appuyant sur une méthodologie appropriée et une estimation de la probabilité d'apparition d'un événement redouté. La seconde démarche est constituée par la *modélisation des conséquences* dans le but d'apprécier la gravité de chaque accident envisagé, soit par une approche empirique appuyée sur un examen a posteriori, soit par une approche physique développée a priori, expérimentalement et/ou théoriquement.

Ces deux démarches sont ici structurées selon un point de vue volontairement équilibré où les deux aspects *connaissances de base* et *méthodologie* sont étroitement imbriqués. L'esprit du texte doit permettre au lecteur de se familiariser aux problèmes de sécurité en s'initiant à la recherche des incidents et accidents potentiels pouvant survenir dans une unité industrielle, en tentant ensuite d'apprécier la probabilité d'occurrence des événements redoutés et en cherchant à estimer l'ampleur de leurs conséquences dans le but de définir par la maîtrise des risques les actions de prévention, de protection et de mitigation permettant d'en réduire la probabilité et/ou la gravité.

En ce qui concerne l'aspect "Connaissances de base", après une introduction générale sur la sécurité des procédés (chapitre 1), l'approche systémique du processus de danger est rapportée sur la base du modèle MADS dans le chapitre 2. Les chapitres 3 à 7 permettent ensuite d'examiner exhaustivement les caractéristiques des phénomènes de dangers (combustion - explosion - feu - incendie - emballement - émission - dispersion...) liés aux risques industriels et la nature de leurs effets. Les seuils réglementaires des effets sur l'homme et les structures de la surpression d'une

explosion, du flux ou de la dose thermique d'une combustion ou d'un incendie et de la concentration ou de la dose de l'émission dispersion d'une substance toxique y sont indiqués. Le chapitre 8 traite de l'effet domino dont l'appréciation est maintenant réglementairement exigée. Le chapitre 9 est relatif aux risques complexes liés à l'électricité statique.

D'un point de vue pédagogique chacun des chapitres relatifs aux connaissances de base peut être examiné, enseigné et assimilé de façon indépendante. De même si les prérequis sont acquis, il est possible de ne reprendre que certains éléments d'un chapitre. Par exemple dans le chapitre 3 si les bases de mécanique des fluides des écoulements monophasique et diphasique sont connues, le dimensionnement des événements peut être abordé directement.

Du point de vue de l'aspect "méthodologie", après le panorama général des méthodes d'analyse des risques du chapitre 10, les chapitres 11 à 16 proposent une sélection spécifique d'une part des méthodes simples et classiques les plus utilisées (APR - arbres - HAZOP) et la nouvelle méthode dite du noeud papillon et d'autre part quelques méthodes systémiques intégrées plus récentes (MOSAR - LOPA - ARAMIS).

Le chapitre 17 entièrement nouveau regroupe de façon complète les notions de défense en profondeur, de couche de protection, de ligne de défense, de fonctions de sécurité et de barrières rarement présentées simultanément dans la littérature et propose un panorama d'essai de classification et de performances des barrières de sécurité.

Le chapitre 18 détaille le contenu de l'étude de dangers, coeur l'analyse des risques, en reprenant l'essentiel du guide d'élaboration des études de dangers de la circulaire ministérielle du 10 mai 2010.

Le dernier chapitre de synthèse décrit les approches potentielles de la démarche de maîtrise des risques en privilégiant la présentation et l'illustration des différents principes liés au concept de "Procédé intrinsèquement plus sûr" tout en abordant aussi le principe de précaution.

Enfin l'épilogue montre les limites de l'approche systémique intégrée en soulignant, pour les différents acteurs concernés par la sécurité, leurs difficultés respectives d'appréciation de la conscience du risque et de la culture de sécurité.

Cette seconde édition de l'ouvrage "Sécurité des procédés chimiques" est destinée aux élèves-ingénieurs des Grandes Ecoles Scientifiques, en particulier ceux des Ecoles de la Fédération Gay-Lussac et du réseau ARI, aux étudiants des Instituts Universitaires de Technologie (IUT), en particulier ceux des départements Chimie, Génie Chimique, Génie des Procédés et Hygiène-Sécurité-Environnement, aux étudiants des classes de Brevet de Technicien Supérieur (BTS), aux étudiants des deuxième et troisième cycles des Universités, aux industriels et ingénieurs de procédés, aux équipes d'évaluation des DREAL, aux cadres techniques des collectivités territoriales et des communautés urbaines, etc.

Remerciements

J'exprime toute ma gratitude et toute mon amitié à Jean-Pierre Corriou, qui a partagé avec une disponibilité exceptionnelle tous les aléas scientifiques et matériels de l'actualisation de l'ouvrage.

Je salue la présence quotidienne à mes côtés de mes jeunes collègues Laurent Perrin et Olivier Dufaud, qui m'ont fait part, tout au long de la rédaction, de leurs retours

respectifs d'expérience pédagogique sur des publics variés tant en formation initiale qu'en formation continue.

Je ne saurais terminer sans remercier ma famille et en particulier la relève avec Arthur, Marie, Julie, Thibault, Lou, Nadia et Armand.

Nancy, mars 2011.

Professeur Emérite André LAURENT

Laboratoire Réactions et Génie des Procédés

UPR 3349 CNRS (INSIS)

Nancy-Université

Ecole Nationale Supérieure des Industries Chimiques

Institut National Polytechnique de Lorraine Nancy

Table des matières

1 Généralités sur la sécurité des procédés	1
1.1 Introduction	1
1.2 Terminologie de la sécurité	4
1.3 Accidentologie et indicateurs	9
1.3.1 Accidents mortels	9
1.3.1.1 Nombre de décès	9
1.3.1.2 Risque individuel de décès	10
1.3.1.3 Indice FAR	13
1.3.1.4 Indice URSI	14
1.3.2 Accidents du travail	16
1.3.2.1 TF	16
1.3.2.2 TG	17
1.3.3 Autres indicateurs	18
1.4 Quelques échelles de mesure du danger	18
1.5 Perception, acceptation et tolérabilité du risque	26
2 Le processus de danger	37
2.1 Rappels des notions de danger et d'accident	37
2.2 Les modèles de processus de danger	38
2.2.1 Le modèle de référence MADS	38
2.2.1.1 Application du modèle MADS à un motif architec- tural	45
2.2.1.2 Application du modèle MADS à une sphère de stoc- tage de propane liquéfié	49
2.2.2 Le modèle d'hyperespace des dangers	50
2.3 Les propositions de lois du danger	52
2.3.1 Les lois de Murphy	52
2.3.2 La loi de la réticularité cindynique	52
2.3.3 La loi de l'antidanger	52
2.3.4 La loi d'invalidité cindynogène	52
2.3.5 La loi de l'éthique cindynique	53
2.3.6 La loi d'accoutumance au danger	53
3 Débit d'émission et prédimensionnement des événements	57
3.1 Définition, rôle, type et utilisation des événements	57
3.1.1 Soupapes de sûreté	57
3.1.1.1 Définition d'une soupape de sûreté	57

3.1.1.2	Inventaire des pressions mises en oeuvre dans une soupape	58
3.1.1.3	Types, fonctionnement et utilisation des soupapes de sûreté	59
3.1.2	Disques de rupture	59
3.2	Bilan énergétique d'un écoulement dans un système ouvert	60
3.3	Écoulement monophasique	64
3.3.1	Débit massique théorique à travers un orifice	64
3.3.1.1	Écoulement isotherme d'un fluide incompressible	64
3.3.1.2	Écoulement d'un fluide compressible	65
3.3.2	Débit massique théorique dans une conduite	68
3.3.2.1	Écoulement isotherme d'un fluide incompressible	68
3.3.2.2	Écoulement d'un fluide compressible	68
3.3.3	Débit massique théorique à travers un orifice associé à une conduite	70
3.4	Écoulement diphasique	71
3.4.1	Introduction	71
3.4.2	Les principaux modèles d'écoulement diphasique	73
3.4.2.1	Modèles homogènes à l'équilibre (HEM)	73
3.4.2.2	Modèles avec écart des vitesses	74
3.4.2.3	Modèles hors équilibre	75
3.4.3	Choix d'un modèle	76
3.4.4	Modèle de LEUNG - Méthode omega (ω)	77
3.4.4.1	Principe de la méthode	77
3.4.4.2	Débit massique théorique à travers un orifice	78
3.4.4.3	Débit massique théorique dans une conduite	83
3.5	Event et emballement thermique	89
3.5.1	Principe de la méthode supposant un fluide entièrement à l'état vapeur	89
3.5.2	Principe de la méthode supposant un fluide entièrement à l'état liquide	90
3.5.3	Principe des méthodes supposant un fluide à l'état diphasique	91
3.5.3.1	Classification des systèmes réactionnels	91
3.5.3.2	Méthodes de dimensionnement des événements des systèmes à forte tension de vapeur	93
3.5.3.3	Méthodes de dimensionnement des événements des systèmes produisant des gaz incondensables	101
3.5.3.4	Méthodes de dimensionnement des événements des systèmes hybrides	105
3.6	Event et système NON réactif	108
3.6.1	Enceinte soumise à une expansion thermique	108
3.6.2	Enceinte soumise à un incendie	109
3.6.2.1	Cas d'un liquide non réactif et non moussant	109
3.6.2.2	Cas d'un liquide non réactif et moussant	112
3.6.2.3	Exemple d'application à un autocuiseur ménager	113
3.7	Conclusion	115

4	Éléments de dispersion atmosphérique	121
4.1	Sources d'émission	121
4.2	Champ d'application de la dispersion atmosphérique	122
4.3	Equation fondamentale de la dispersion- diffusion	123
4.4	Modèle gaussien de dispersion passive	124
4.4.1	Equation du modèle de dispersion passive lors d'une émission instantanée (bouffée)	125
4.4.2	Equation du modèle de dispersion passive lors d'une émission continue (panache)	127
4.4.3	Données nécessaires pour l'utilisation du modèle gaussien de dispersion passive	128
4.4.3.1	Le vent	128
4.4.3.2	Les classes de stabilité atmosphérique	129
4.4.3.3	Les écarts-types de dispersion ou coefficients de dispersion	132
4.5	Dispersion de gaz dense	134
4.6	Modélisation de la dispersion d'un gaz dense	135
4.6.1	Processus de dispersion d'un gaz dense	136
4.6.2	Nomogrammes d'évaluation simplifiée des concentrations dans un nuage de gaz dense	139
4.7	Critère de sélection d'un modèle de dispersion : le nombre de Richardson	140
4.8	Modélisation 3D	142
4.9	Utilisation et exploitation des modèles de dispersion	142
4.9.1	Approche de la dispersion atmosphérique d'un gaz toxique .	144
4.9.1.1	Choix d'un critère de toxicité	144
4.9.1.2	Examen des conditions de l'effet redouté d'un toxique lors d'une émission continue	146
4.9.1.3	Examen des conditions de l'effet redouté d'un toxique lors d'une émission instantanée	147
4.9.1.4	Approche probabiliste de l'effet redouté et notion de fonction de Probit	147
4.9.2	Approche de la dispersion d'un gaz ou d'une vapeur inflam- mable	151
4.9.3	Approche de la dispersion atmosphérique d'une odeur . . .	152
4.9.4	Effet protecteur d'un bâtiment fermé lors du passage d'une vague de dispersion	153
4.10	Conclusion	153
5	Combustions-explosions et feux de gaz et de vapeurs	157
5.1	Caractéristiques des mélanges de gaz et de vapeurs inflammables .	157
5.1.1	Pression de vapeur	157
5.1.2	Points éclairs	157
5.1.3	Température d'autoinflammation	158
5.1.4	Limites d'inflammabilité	158
5.1.4.1	Limites inférieure et supérieure d'inflammabilité .	159
5.1.4.2	Influence de la température	159

5.1.4.3	Influence de la pression initiale	160
5.1.4.4	Influence simultanée de la température et de la pression en présence de liquide	161
5.1.4.5	Influence de l'énergie d'allumage	161
5.1.4.6	Limites d'inflammabilité dans l'oxygène	161
5.1.4.7	Limites d'inflammabilité d'un mélange de plusieurs gaz ou vapeurs inflammables dans l'air	161
5.1.4.8	Limites d'inflammabilité d'un mélange d'un gaz ou d'une vapeur inflammable, d'air et d'un gaz inerte	162
5.2	Processus de combustion de gaz ou de vapeurs inflammables	164
5.3	Le phénomène d'explosion	165
5.3.1	Déflagration	166
5.3.1.1	Déflagration en régime laminaire	166
5.3.1.2	Déflagration en régime turbulent	167
5.3.2	Détonation	167
5.4	Explosions de gaz ou de vapeurs en milieu confiné	171
5.4.1	Explosions DEFLAGRANTES de gaz ou de vapeurs en milieu confiné	171
5.4.1.1	Pression maximale d'explosion	171
5.4.1.2	Vitesse maximale de montée en pression	172
5.4.1.3	Facteurs influant la violence d'une déflagration	172
5.4.2	Explosions DETONANTES de gaz ou de vapeurs en milieu confiné	174
5.4.2.1	Pression de détonation	174
5.4.2.2	Réflexion de l'onde de choc	175
5.5	Approche de la modélisation des effets d'une explosion confinée	175
5.5.1	Evaluation des paramètres caractéristiques de l'onde de pression	176
5.5.1.1	Notion d'équivalent TNT	177
5.5.1.2	Estimation du champ de surpression aérienne	178
5.5.1.3	Estimation de l'émission, de la propagation et de la trajectoire des fragments	182
5.6	Prévention et protection des explosions de gaz en milieu confiné	186
5.6.1	Protection d'un milieu confiné par évènement d'explosion	186
5.6.2	Autres méthodes	188
5.6.3	Arrête-flamme	188
5.7	Explosions de gaz ou de vapeurs en milieu NON confiné	189
5.7.1	Régimes de combustion	190
5.7.2	Facteurs influant la déflagration en milieu non confiné	190
5.7.2.1	La réactivité du gaz combustible	190
5.7.2.2	L'énergie d'inflammation	191
5.7.2.3	La position de l'allumage	191
5.7.2.4	La composition du nuage	191
5.7.2.5	La nature de l'obstruction du milieu non confiné	192
5.7.3	Approches de la modélisation des effets de surpression d'une explosion non confinée	192
5.7.3.1	Méthode TNT	192

	5.7.3.2	Méthode de Baker-Strehlow	193
	5.7.3.3	Méthode multi-énergie	197
5.8		BLEVE	201
	5.8.1	La catastrophe de Feyzin	201
	5.8.2	Définition du BLEVE	202
	5.8.3	Description du phénomène de BLEVE	202
	5.8.4	Notion de température limite de surchauffe	203
	5.8.5	Les effets du BLEVE	204
	5.8.5.1	Effets de l'onde de surpression aérienne	205
	5.8.5.2	La boule de feu et ses effets	207
	5.8.5.3	Fragments et missiles lors d'un BLEVE	211
5.9		Boilover	213
	5.9.1	L'accident du port Edouard Herriot à Lyon	213
	5.9.2	Définition et description du phénomène	213
	5.9.3	Conditions nécessaires à la naissance du phénomène	213
	5.9.4	Caractéristiques nécessaires des hydrocarbures susceptibles de produire le phénomène	214
	5.9.5	Conséquences du phénomène	214
5.10		Rollover	215
	5.10.1	Le phénomène de rollover	215
	5.10.2	Formation des strates ou cellules et stabilité	215
	5.10.3	Prévention et protection contre les risques du rollover	217
5.11		Feux de nuages	218
5.12		Feux torche	219
	5.12.1	Phénomène d'un feu torche	219
	5.12.2	Régimes d'écoulement d'un feu torche	219
	5.12.3	Modélisation d'un feu torche	221
	5.12.3.1	Modèles de la géométrie de la flamme	221
	5.12.3.2	Modèles des effets thermiques	222
5.13		Feux de flaque ou de cuvette	223
	5.13.1	La vitesse de combustion du liquide	223
	5.13.2	La géométrie de la flamme	224
	5.13.2.1	Diamètre de base	224
	5.13.2.2	Hauteur de la flamme	225
	5.13.2.3	Inclinaison de la flamme	226
	5.13.2.4	Effet de traînée à la base	226
	5.13.3	Le flux thermique rayonné par la flamme (émetteur)	226
	5.13.4	Le flux thermique reçu par la cible(récepteur)	227
	5.13.4.1	Le facteur géométrique de forme	227
	5.13.4.2	Le facteur de transmission de l'air	228
5.14		Les effets des explosions de gaz ou de vapeurs sur l'homme	229
	5.14.1	Effets directs primaires des explosions sur l'homme	229
	5.14.1.1	Lésions aux tympans	229
	5.14.1.2	Blessures aux poumons	230
	5.14.2	Effets indirects secondaires des explosions sur l'homme	231
	5.14.2.1	Effets des fragments tranchants pénétrants	232

5.14.2	Effets des missiles contondants	232
5.14.3	Effets indirects tertiaires des explosions sur l'homme	234
5.14.4	Valeurs de références relatives aux seuils d'effets de surpres- sion sur l'homme	236
5.15	Les effets des explosions de gaz ou de vapeurs sur les bâtiments, constructions et structures	237
5.16	Les effets du rayonnement thermique sur l'homme	240
5.16.1	Valeurs de références relatives aux seuils d'effet thermique sur l'homme	243
6	Explosions de poussières	251
6.1	Introduction	251
6.2	Définition d'une explosion de poussières	251
6.3	Sensibilité à l'ignition des poussières	254
6.3.1	Energie minimale d'inflammation	254
6.3.2	Température minimale d'inflammation	254
6.3.3	Concentration minimale en poussières explosibles	254
6.4	Sévérité d'une explosion de poussières	255
6.4.1	Surpression maximale d'explosion (P_{max})	255
6.4.2	Vitesse d'accroissement de la pression (dP/dt)	256
6.5	Propagation d'une flamme dans un nuage de poussières en combustion	258
6.5.1	Modèle de Cassel	259
6.5.2	Modèle de la flamme mince de Dahoe	260
6.5.3	Approche de Silvestrini	263
6.5.4	Prise en compte de la turbulence	264
6.6	Revue des paramètres intervenant dans l'initiation et la progression d'une explosion de poussières	265
6.6.1	Composition chimique	265
6.6.2	Granulométrie - Dispersibilité - Stabilité	265
6.6.3	Concentration en poussières de la suspension	267
6.6.4	Taux d'humidité	268
6.6.5	Rétention de solvant - Présence de gaz inflammables et/ou de solvants - Mélanges hybrides	269
6.6.6	Température minimale d'inflammation	269
6.6.7	Energies d'inflammation	269
6.6.8	Influence de la source d'inflammation	270
6.6.9	Composition de l'atmosphère - Concentration limite en oxy- gène	270
6.6.10	Température et pression	271
6.6.11	Turbulence du mélange air et poussières	271
6.7	Détermination expérimentale de quelques caractéristiques d'inflammabilité et d'explosivité des nuages de poussières	272
6.7.1	Energie minimale d'inflammation	273
6.7.2	Température minimale d'inflammation en nuage	275
6.7.3	Température minimale d'inflammation en couche	276
6.7.4	Pression d'explosion et vitesse de montée en pression	278
6.7.5	Technique de mesure de la vitesse de flamme	280

6.8	Méthodes de prévention contre les explosions de poussières	284
6.8.1	Action sur le combustible	284
6.8.2	Action sur le mélange air-poussières	284
6.8.3	Prévention par inertage	284
6.8.3.1	Inertage par un gaz	284
6.8.3.2	Inertage par un solide	285
6.8.4	Utilisation du vide	285
6.8.5	Suppression des sources d'inflammation	285
6.8.5.1	Sources thermiques	286
6.8.5.2	Sources mécaniques	286
6.8.5.3	Sources électriques	286
6.8.5.4	Sources chimiques	288
6.9	Méthodes de protection contre les explosions de poussières	288
6.9.1	Construction résistant aux explosions	288
6.9.2	Events de décharge d'explosion	288
6.9.2.1	Principe de fonctionnement d'un événement d'explosion	289
6.9.2.2	Paramètres de définition d'un événement d'explosion .	290
6.9.2.3	Dimensionnement de la surface d'un événement d'explosion	291
6.9.2.4	Effets de surpression des décharges par événement des explosions de poussières	300
6.9.3	Système de détente de pression sans flamme : Q-Rohr	301
6.9.4	Suppression de l'explosion par extincteurs déclenchés	302
6.9.4.1	Principe d'action d'un extincteur déclenché	302
6.9.4.2	Schéma de principe d'une installation avec extincteur déclenché	303
6.9.5	Systèmes de séparation et d'isolement des installations	303
6.10	Conclusion	307
7	Emballement thermique	315
7.1	Définition	315
7.2	Emballement thermique et retour d'expérience	315
7.3	Typologie des causes de l'emballement thermique	316
7.3.1	L'emballement thermique homogène par excès de température	316
7.3.2	L'emballement thermique homogène initié par introduction	318
7.3.3	L'emballement thermique hétérogène initié par une température locale excessive	320
7.3.4	L'emballement thermique hétérogène par manque de transfert thermique par conduction de la chaleur	320
7.3.4.1	Modèle de Frank-Kamenetski	320
7.3.4.2	Modèle de Thomas	321
7.3.5	L'emballement thermique dû à une durée d'exposition excessive	321
7.3.6	L'emballement thermique par accumulation liée à une température trop basse	322
7.3.7	L'emballement thermique dû à la pressurisation de l'enceinte par un intermédiaire gazeux oxydant	322

7.3.8	L'emballlement thermique par ségrégation	322
7.3.9	L'emballlement thermique par mélange de réactifs incompatibles précédemment dans deux phases séparées	323
7.3.10	L'emballlement thermique initié par un incendie ou un chauf- fage externe	323
7.3.11	L'emballlement thermique initié par la présence de traces d'impuretés	323
7.4	Approche préliminaire de la stratégie d'évaluation des risques d'emballlement thermique	324
7.4.1	Examen de la formule chimique	324
7.4.2	Inventaire des réactions dangereuses	325
7.4.3	Enthalpies de réaction	326
7.4.4	Essai de caractérisation théorique du comportement d'une charge réactionnelle en évolution adiabatique	329
7.4.4.1	Descriptif sommaire d'un scénario d'emballlement	329
7.4.4.2	Estimation de l'accroissement adiabatique de tem- pérature	329
7.4.4.3	Température maximale de la réaction de synthèse (MTSR)	330
7.4.4.4	Temps d'accès à la vitesse maximale de réaction en régime adiabatique (TMR)	331
7.4.5	Concept de zones et classification des procédés	331
7.4.6	Nombres adimensionnels	333
7.5	Principales méthodes expérimentales d'études des emballlements ther- miques	335
7.5.1	Mesures en progression de température par calorimétrie différentielle à balayage (DSC Differential Scan- ning Calorimetry)	335
7.5.2	Mesures en exposition isotherme par analyse thermique différentielle (ATD)	338
7.5.3	Mesures adiabatiques ou pseudoadiabatiques	340
7.5.3.1	Accelerating Rate Calorimeter (ARC)	341
7.5.3.2	Vent Sizing Package (VSP)	341
7.5.3.3	Reactive System Screening Tool (RSST)	344
7.5.3.4	Automatic Pressure Tracking Adiabati Calorime- ter (APTAC)	345
7.5.3.5	Vase Dewar fermé	346
7.5.3.6	Principe de la détermination du débit de gaz in- condensable généré dans une cellule adiabatique de laboratoire	346
7.5.4	Méthodes isopériboliques et calorimétrie réactionnelle	347
7.6	Méthodologie d'évaluation et de prédiction des risques d'emballe- ment thermique	349
7.7	Conclusion	351
8	Effet domino	357
8.1	Introduction	357
8.2	Définition de l'effet domino	357
8.3	Approche théorique de l'effet domino	359

8.4	Méthodologie pratique d'analyse de l'effet domino	360
8.5	Remarques sur la mise en oeuvre de la méthode d'analyse de l'effet domino	362
8.6	Conclusion	363
9	Les risques de l'électricité statique dans les procédés	367
9.1	Introduction	367
9.2	Génération des charges électrostatiques	368
9.2.1	Génération par contact ou rupture de contact	368
9.2.1.1	Exemple de deux solides	368
9.2.1.2	Exemple d'un liquide et d'un solide	369
9.2.2	Génération par influence	369
9.2.3	Génération par dispersion	371
9.3	Accumulation des charges électrostatiques	371
9.3.1	Accumulation dans les solides	371
9.3.1.1	Solides conducteurs isolés	372
9.3.1.2	Solides isolants	372
9.3.2	Accumulation dans les poudres et poussières	372
9.3.3	Accumulation dans les liquides	373
9.3.4	Accumulation dans les gaz	375
9.4	Ecoulement des charges électrostatiques	375
9.5	Différents types de décharges électrostatiques	376
9.5.1	Décharges par étincelle à partir de conducteurs isolés	376
9.5.2	Décharges de surfaces isolées, de liquides isolants et de poudres isolantes	377
9.5.2.1	Décharges en aigrette ou en couronne (Corona)	377
9.5.2.2	Décharges de surface dite de Lichtenberg	378
9.5.2.3	Décharges de cône ou en aigrette propageante	379
9.5.3	Décharges de type éclairs	379
9.5.4	Décharges du corps humain	380
9.6	Identification du risque d'inflammation par décharge électrostatique	380
9.7	Principes généraux de prévention et de protection	381
9.8	Quelques orientations de moyens et mesures de prévention et de protection	383
9.8.1	Mise à la terre des installations	384
9.8.2	Mise à la terre des personnes	385
9.8.3	Cas de la manutention et du stockage des liquides	385
9.8.3.1	Mise à la terre	385
9.8.3.2	Minimisation de la génération des charges	385
9.8.3.3	Maximisation de la dissipation des charges	386
9.8.4	Cas de la manutention et du stockage des poudres solides	386
9.8.4.1	Mise à la terre	387
9.8.4.2	Minimisation de la génération des charges	387
9.8.4.3	Maximisation de la dissipation des charges	387

10 Panorama général des méthodes d'analyse des risques	393
10.1 Introduction	393
10.2 Objectif de l'analyse des risques	393
10.3 Principe des démarches d'analyse des risques	394
10.4 Méthodologie générale : les étapes d'une analyse des risques	394
10.4.1 La définition du système étudié	395
10.4.2 L'identification des risques du système	395
10.4.3 La modélisation du système	396
10.4.4 L'analyse qualitative et/ou quantitative	396
10.5 Les différentes méthodes d'analyse des risques	396
10.5.1 L'Analyse Préliminaire des Risques	399
10.5.2 La méthode de l'arbre des défaillances	399
10.5.3 La méthode HAZOP	399
10.5.4 L'AMDE et l'AMDEC	399
10.5.5 La méthode de l'arbre des événements ou des conséquences	399
10.5.6 La méthode du noeud papillon	399
10.5.7 La méthode MADS-MOSAR	400
10.5.8 La méthode ARAMIS	400
10.5.9 La méthode LOPA	400
10.5.10 Les méthodes de fiabilité humaine	401
10.6 Choix des méthodes d'analyse des risques	402
10.6.1 La motivation des participants à l'étude	402
10.6.2 Le type de résultats demandés	402
10.6.3 La nature des informations disponibles	402
10.6.4 Les caractéristiques du problème à analyser	402
10.6.5 La perception des risques	403
10.6.6 L'expérience de l'équipe	403
10.7 Exploitation des méthodes d'analyse des risques	403
10.8 Conclusion	406
11 APR	411
11.1 Objectifs de l'analyse préliminaire	411
11.2 Principe général de la méthode d'Analyse Préliminaire des Risques	411
11.3 Mise en oeuvre de l'Analyse Préliminaire des Risques	413
11.4 Démarche de l'Analyse Préliminaire des Risques	413
11.4.1 Analyse des antécédents et retour d'expérience	414
11.4.2 Dangers liés aux PRODUITS	414
11.4.3 Matrices d'incompatibilité	414
11.4.3.1 Incompatibilité produit - produit	415
11.4.3.2 Incompatibilité produit - matériau	416
11.4.4 Risques liés aux procédés	416
11.4.4.1 Risques liés aux réactions et aux opérations unitaires	416
11.4.4.2 Risques liés aux équipements	417
11.5 Conclusion	419

12 La méthode HAZOP	429
12.1 Introduction	429
12.2 Objectifs de la méthode	429
12.3 Principe de la méthode	430
12.4 Stratégie d'utilisation de la méthode Hazop	430
12.4.1 Quand utiliser la méthode ?	430
12.4.1.1 L'étude HAZOP proprement dite	430
12.4.1.2 L'étude HAZOP complémentaire	430
12.4.1.3 L'étude HAZOP de modification	431
12.4.1.4 L'étude HAZOP d'installations existantes	431
12.4.2 Pourquoi utiliser la méthode ?	432
12.4.3 Où utiliser la méthode ?	432
12.5 Organisation et mise en oeuvre de la méthode Hazop	432
12.5.1 L'équipe	432
12.5.1.1 Les membres de l'équipe	433
12.5.1.2 L'animateur	433
12.5.1.3 Le secrétaire	434
12.5.2 La documentation	434
12.5.3 La session de travail	434
12.5.4 La mise en oeuvre de la méthode HAZOP	435
12.5.4.1 Préparation préalable de la session	435
12.5.4.2 Principe du déroulement d'une session	437
12.5.5 L'enregistrement et le suivi des travaux de la session HAZOP	442
12.6 Avantages et inconvénients de la méthode Hazop	442
12.7 Conclusion	443
13 Méthodes des arbres et du noeud papillon	447
13.1 Arbre des causes ou des défaillances ou des défauts ou des fautes .	447
13.1.1 Introduction	447
13.1.2 Objet de la méthode	448
13.1.3 Eléments et symboles de représentation utilisés	449
13.1.3.1 Evénement sommet - Evénement de tête	449
13.1.3.2 Evénements de base	449
13.1.3.3 Evénements intermédiaires	449
13.1.3.4 Evénements conditionnels	449
13.1.3.5 Symboles de représentation des événements	450
13.1.3.6 Portes logiques	450
13.1.4 Principes d'élaboration	452
13.1.4.1 Recherche des causes immédiates, nécessaires et suffisantes	452
13.1.4.2 Classement des événements intermédiaires	453
13.1.4.3 Recherche des causes immédiates, nécessaires et suffisantes des événements intermédiaires jusqu'à obtention des événements de base	453
13.1.4.4 Démarche itérative	455
13.1.5 Règles d'élaboration	455
13.1.6 Mise en oeuvre de la méthode	455
13.1.6.1 Définition de l'événement sommet	455

13.1.6.2	Analyse et examen du système	456
13.1.6.3	Construction de l'arbre	456
13.1.7	Exploitation de l'arbre	457
13.1.7.1	Niveau système	457
13.1.7.2	Analyse qualitative	457
13.1.7.3	Analyse semi-quantifiée	461
13.1.7.4	Analyse quantitative	462
13.1.8	Apport de la méthode	463
13.2	Arbre des événements	464
13.2.1	Objet de la méthode	464
13.2.2	Principe de la méthode	464
13.2.3	Application de la méthode	465
13.2.4	Exploitation de l'arbre	466
13.2.4.1	Analyse qualitative	466
13.2.4.2	Analyse quantitative	466
13.3	Méthode du noeud papillon	466
13.3.1	Objet de la méthode	466
13.3.2	Principe de la méthode	467
13.3.3	Application de la méthode	469
13.3.3.1	Application qualitative	469
13.3.3.2	Application quantitative	470
13.3.4	Apport de la méthode	472
13.4	Conclusion sur les méthodes des arbres et du noeud papillon	472
14	La méthode MOSAR	477
14.1	Analyse macroscopique : module A	477
14.1.1	Représenter l'installation	478
14.1.2	Identifier les dangers et les scénarios d'accidents principaux	479
14.1.3	Evaluer les risques principaux	482
14.1.4	Négocier les objectifs globaux	483
14.1.5	Définir et qualifier les barrières principales	483
14.2	Analyse microscopique : module B	488
14.2.1	Identifier de manière détaillée les risques de fonctionnement	489
14.2.2	Evaluer les risques en construisant des arbres logiques du type arbres des défaillances et en les qualifiant	489
14.2.3	Négocier des objectifs précis de prévention, protection et mitigation	489
14.2.4	Définir les moyens complémentaires de prévention, protec- tion et mitigation	489
14.2.5	Gérer les risques	490
14.3	Conclusion	490
15	La méthode ARAMIS	495
15.1	Introduction	495
15.2	Structure globale de la méthode	495
15.3	Enchaînement détaillé de la méthode	495
15.3.1	Module MIMAH	495

15.3.2	Module identification des barrières de sécurité et évaluation de leurs performances	499
15.3.3	Module d'évaluation de l'efficacité du management et de son influence sur les performances des barrières	502
15.3.4	Module MIRAS	502
15.3.5	Module Estimation et cartographie de la sévérité	504
15.3.6	Module cartographie de la vulnérabilité de l'environnement	506
15.4	Conclusion	508
16	La méthode LOPA	511
16.1	Introduction	511
16.2	Principe et structure de la méthode	511
16.3	Examen détaillée de la méthode	511
16.4	Formalisation de la méthode	513
16.5	Conclusion	515
17	Défense en profondeur et barrières	517
17.1	Défense en profondeur	517
17.2	Notion de couche de protection	520
17.3	Lignes de défense	521
17.4	Fonction de sécurité	523
17.5	Panorama des barrières de sécurité	524
17.5.1	Essai de classification des barrières	524
17.5.2	Performances des barrières de sécurité	530
17.5.2.1	Efficacité ou capacité de réalisation	531
17.5.2.2	Temps de réponse	531
17.5.2.3	Niveau de confiance	531
17.6	Conclusion	535
18	Etude de dangers	539
18.1	Introduction	539
18.2	Objet de l'étude de dangers	539
18.3	Contenu de l'étude de dangers	541
18.3.1	Description et caractérisation de l'environnement	541
18.3.2	Description des installations et de leur fonctionnement	541
18.3.3	Présentation du Système de Gestion de Sécurité (SGS)	542
18.3.4	Identification et caractérisation des potentiels de danger	543
18.3.5	Réduction des potentiels de dangers	543
18.3.6	Enseignements tirés du Retour d'EXpérience (REX)	544
18.3.7	Evaluation des risques	545
18.3.7.1	Analyse Préliminaire des Risques	545
18.3.7.2	Etude détaillée de réduction des risques	545
18.3.8	Caractérisation et classement des différents phénomènes et accidents, tenant compte de l'efficacité des mesures de prévention et de protection	546
18.3.8.1	Probabilité d'occurrence	547
18.3.8.2	Cinétique	547

18.3.8.3	Intensité des effets	547
18.3.8.4	Grille matrice probabilité - gravité	550
18.3.9	Evolutions et mesures d'amélioration proposées par l'exploitant	552
18.3.10	Représentation cartographique	553
18.3.11	Résumé non technique de l'étude de dangers	553
19	Démarche de la maîtrise des risques	555
19.1	Les étapes	555
19.2	Les approches	555
19.3	La tactique de la maîtrise des risques	556
19.4	Principes d'aide à la maîtrise des risques	557
19.4.1	Identification	557
19.4.2	Réduction	557
19.4.3	Substitution	560
19.4.3.1	Substitution d'une substance	560
19.4.3.2	Substitution d'un procédé	560
19.4.4	Atténuation	561
19.4.5	Simplification	562
19.4.6	Conception tolérante	563
19.4.7	Protections multiples	565
19.4.8	Redondance	566
19.4.9	Gestion des modes communs de défaillances	568
19.4.10	Confinement	569
19.4.11	Mitigation	570
19.4.12	Protection	572
19.5	Essai de synthèse de la démarche de maîtrise des risques	572
19.6	Principe de précaution	572
19.7	Exemples de prise en compte et d'application des principes de la maîtrise des risques	579
19.8	Les résistances à l'application des principes de la maîtrise des risques	581
19.9	La latitude d'appréciation de la tactique de la maîtrise des risques	582
19.10	Application de la démarche de la maîtrise des risques	584
Index		599

1500

11000101001 011101011
 0110101000111101001001110001010
 011010110 110001 01001011101

La maîtrise des risques technologiques et industriels est maintenant une exigence sociétale majeure. À la suite de l'accident AZF à Toulouse, un foisonnement de protocoles et d'applications réglementaires a induit une évolution de la conception du danger et de la notion de risque, qui a conduit au passage d'une évaluation déterministe à une causalité probabiliste.

La deuxième édition de **Sécurité des procédés chimiques** vise à fournir les outils permettant d'appréhender l'analyse du risque et l'appréciation des conséquences. La terminologie y est actualisée avec les nouveaux termes d'aléa, d'enjeux, d'intensité, de cinétique et de vulnérabilité. Les connaissances de base sont présentées suivant les récentes typologies classiques des caractéristiques des effets des phénomènes de dangers. Outre les méthodes simples et classiques d'analyse des risques (APR – HAZOP – Arbres), l'aspect méthodologique est complété par la présentation de la méthode du nœud papillon et de quelques nouvelles méthodes systémiques intégrées (MOSAR – ARAMIS – LOPA). La démarche de la maîtrise des risques est enrichie d'une revue très complète des concepts de défense en profondeur, de couches de protection, de lignes de défense, de fonctions de sécurité et de différentes barrières rarement proposés simultanément. Enfin, le contenu de l'étude de dangers est décrit d'après la base réglementaire de leur guide d'élaboration.

Compte tenu de son approche systémique et pédagogique, ce livre est accessible au débutant tout en répondant aux exigences des spécialistes. Il s'adresse donc aussi bien aux ingénieurs, industriels, techniciens, cadres des services publics, des communautés urbaines et des collectivités territoriales, enseignants, chercheurs qu'aux élèves ingénieurs des grandes écoles scientifiques et aux étudiants de licence, master et doctorat des universités...

André Laurent est professeur émérite à l'École Nationale Supérieure des Industries Chimiques, Institut National Polytechnique de Lorraine, Université de Lorraine.

Génie des procédés de l'École de Nancy

01101010001111010
 010011100010
 010101110110001001011101011
 0110101000111101001110001010
 0101011101100010011101011
 01101010001111010
 001110001010
 010101110110001001011101011
 01101010001111001001110001010
 0101 0111011000101001 011101011
 0110101000111101001
 001110001010
 0101011101100 010100101 1101011
 0 110101000111101001001110001010
 01010111011000101001011101011
 011010100011110100100 11
 10001010
 01010 111011000101001011
 101011
 0110101000111101001001110001010
 0101011101100 0101001011101011
 0110101000111101001001110001010



978-2-7430-1396-7