

Table des matières

Préface	1
Neil MITCHISON	
Avant-propos	3
Chapitre 1. L'ère de la révolution industrielle 4.0	7
1.1. Historique des révolutions industrielles	7
1.2. Définition de l'usine du futur	9
1.3. Les technologies de l'industrie 4.0	10
1.3.1. Les technologies de rupture	10
1.3.1.1. Fabrication additive 3D et 4D	10
1.3.1.2. Robotique	10
1.3.2. Les technologies pour la communication et l'interconnexion	11
1.3.2.1. Applications web et mobiles	11
1.3.2.2. Internet des objets (IoT)	12
1.3.2.3. Internet industriel des objets (IIoT)	12
1.3.2.4. L'intelligence artificielle des objets (AIoT)	13
1.3.2.5. Réalité augmentée	13
1.3.2.6. Réalité virtuelle	13
1.3.2.7. Jumeau numérique	13
1.3.2.8. Produit intelligent (<i>Smart product</i>)	13
1.3.3. Les technologies de gestion des données	14
1.3.3.1. Le nuage et l'informatique en nuage (Cloud et Cloud Computing)	14

1.3.3.2. Mégadonnées (Big Data)	15
1.3.3.3. Fouille de données (<i>Data Mining</i>)	15
1.3.3.4. Chaîne de blocs (<i>Blockchain</i>)	17
1.3.3.5. Systèmes de cybersécurité	17
1.4. Essai de structuration des technologies	17
1.5. Conclusion	21
Chapitre 2. Le concept de sécurité 4.0	23
2.1. Contexte et définition	23
2.2. Historique de l'évolution de la sécurité	24
2.3. Cadre de la sécurité	26
Chapitre 3. Santé et sécurité au travail	29
3.1. Impact des conditions de travail de l'industrie 4.0	29
3.2. Définitions	31
3.3. SST <i>versus</i> sécurité des procédés	31
3.4. Évaluation des risques professionnels SST	32
3.4.1. Réglementation, normes et document unique	32
3.4.2. Inventaire des méthodes et techniques d'analyse des risques	38
3.4.3. Applicabilité des méthodes d'analyse des risques à la SST	40
Chapitre 4. Sécurité des procédés et cybersécurité	47
4.1. Rappel des méthodes d'analyse des risques en sécurité des dés : exemple de la méthode du nœud papillon	47
4.2. Matrice d'évaluation des risques en sécurité des procédés	50
4.3. Méthodes d'analyse des risques des systèmes d'information industrielle : exemple des méthodes EBIOS et de l'arbre d'attaque	53
4.4. Matrice d'évaluation des risques en cybersécurité	57
4.5. Approche coordonnée des méthodes d'analyse des risques	60
4.6. Réconciliation des méthodes de sécurité des procédés et de cybersécurité	60
4.6.1. Analyse préliminaire des risques et cyberanalyse préliminaire des risques	62
4.6.1.1. Analyse préliminaire des risques	62
4.6.1.2. Cyberanalyse préliminaire des risques (Cyber APR)	62
4.6.2. Méthodes HAZOP, CHAZOP et Cyber HAZOP	63

4.6.2.1. Méthode HAZOP	63
4.6.2.2. Méthode CHAZOP	64
4.6.2.3. Méthode Cyber HAZOP	64
4.6.3. Graphe du nœud papillon et cyber nœud papillon	66
4.6.3.1. Graphe du nœud papillon	66
4.6.3.2. Cyber nœud papillon	66
4.6.4. Méthodes LOPA et Cyber LOPA	68
4.6.4.1. Méthode LOPA	68
4.6.4.2. Méthode Cyber LOPA	69
4.6.5. Méthode intégrée d'approche simultanée (ATBT)	71
4.7. Concaténation des matrices	74
4.8. De l'usage raisonné des matrices de risques	75

Chapitre 5. Exemples : sécurité 4.0 et procédés 79

5.1. Commande d'une colonne de distillation	79
5.2. Essai de classification des applications d'un jumeau numérique dans le domaine de la sécurité 4.0	80
5.2.1. Potentialité d'un jumeau numérique en sécurité 4.0	81
5.2.2. Proposition de cadre de classification	81
5.3. Modernisation d'une installation pilote de pompage par éjecteur	84
5.4. Modèle de développement d'un jumeau numérique de prévention de SST dans l'industrie des procédés	87
5.4.1. Description du modèle	88
5.4.2. Mise en œuvre du modèle	89
5.4.3. Conclusion	90
5.5. Production à façon de produit alimentaire par projet	90
5.6. Impact de la conception d'un système cyberphysique sur un procédé industriel	92
5.6.1. Sélection des problèmes à examiner	93
5.6.2. Principe de conception du système cyberphysique	94
5.7. Principe de reconversion d'un procédé en un système cyberphysique de production	96
5.8. Approche systémique intégrée de remédiation d'un traitement de sédiments contaminés	100
5.8.1. Le procédé technique Novosol®	101
5.8.2. Le système sociotechnique Novosol®	101
5.8.3. Conclusion	102
5.9. La numérisation au service de la gestion de la sécurité	102
5.9.1. Amélioration de la qualité des évaluations des risques techniques et modélisation de l'impact des risques cumulés	104

5.9.2. Fournir une vue en temps réel de l'état des équipements critiques et de leur impact sur les risques	106
5.10. Détection des dérives du fonctionnement d'un échangeur thermique par réseau de neurones artificiels	107
5.11. RFID appliquée à la prévention des risques professionnels	109
5.11.1. Champs d'application de la RFID	110
5.11.1.1. Champs d'applications relatifs à l'étiquetage d'objets	110
5.11.1.2. Champs d'applications avec référence directe potentielle aux êtres vivants	110
5.11.2. Application de la RFID à la santé et sécurité au travail	110
5.11.2.1. Application aux risques machines	110
5.11.2.2. Gestion des EPI	111
5.11.2.3. Contrôle d'accès et sécurisation de zone dangereuse	111
5.11.2.4. Détection et localisation de personnes	111
5.12. L'apport de la RFID à la sécurité de l'ingénierie industrielle	111
5.13. Exploration d'un lieu de travail socialement sûr et durable de l'opérateur 4.0	112
5.14. Challenge industrie 4.0 en sécurité et environnement de la filière cuir	115
5.15. Sécurité 4.0 : métriques et indicateurs de performances	118
5.15.1. Indicateur d'impact (<i>lagging</i>)	119
5.15.2. Indicateur d'activité (<i>leading</i>)	119
5.15.3. Quelques exemples recommandés d'indicateurs de performance de la sécurité des procédés	121
5.15.3.1. Cas des ICPE classées Seveso	121
5.15.3.2. Cas des installations des industries pétrolière et chimique	121
5.15.4. Exemples d'application d'indicateurs de performance en sécurité	123
5.15.4.1. Indicateur et fabrication plus sûre	123
5.15.4.2. Indicateurs de performance dans un important groupe chimique	125

Chapitre 6. Intensification et sécurité propre : mythe ou réalité ? 129

6.1. Rappel des éléments essentiels de l'intensification des procédés	129
6.2. Quelques exemples de procédés d'intensification	132
6.2.1. Le principe de réduction en appui à la maîtrise des risques	132
6.2.2. Exploitation du domaine d'intérêt des réacteurs microstructurés	135
6.2.3. Transposition d'une réaction exothermique dans un réacteur-échangeur continu intensifié	136

6.2.4. Pilote IMPULSE de démonstration de la production de trioxyde de soufre par oxydation du dioxyde de soufre par l'air	138
6.2.4.1. Procédé conventionnel	139
6.2.4.2. Nouveau procédé à l'échelle pilote	139
6.2.5. Synthèse de liquides ioniques par alkylation dans un réacteur microstructuré	141
6.2.6. Développement d'un procédé intensifié de synthèse de méthanol à partir de dioxyde de carbone industriel	141
6.2.7. Faisabilité de l'intensification de la production d'acétate de vinyle monomère	143
6.2.7.1. Procédé conventionnel	143
6.2.7.2. Procédé intensifié dans un réacteur microstructuré	144
6.2.8. Le réacteur à paroi catalytique microstructurée : accélérateur des performances d'un réacteur tubulaire classique	145
6.2.8.1. Procédé conventionnel à moyenne température	146
6.2.8.2. Procédé intensifié reconfiguré	146
6.2.9. Exemple générique de la fluoration gazeuse directe d'un hydrocarbure liquide	148
6.3. Essai de rationalisation des équipements d'intensification	151
6.4. Concept et application d'un cadre général méthodologique pour la synthèse et la conception de procédés intégrant l'intensification	153
6.5. Mythe ou réalité de la sécurité 4.0 des procédés d'intensification	157
6.5.1. Quelques outils d'évaluation	157
6.5.1.1. Indicateurs de performances	157
6.5.1.2. Méthodes dédiées à la sécurité intrinsèque d'un procédé	158
6.5.2. Exemples de conflit sécurité <i>versus</i> intensification	165
6.5.2.1. Sélection d'un solvant de réaction	165
6.5.2.2. Situation classique d'un réacteur continu par rapport à un réacteur semi-fermé	166
6.5.2.3. Amélioration de la fabrication d'un oxychlorure minéral	169
6.5.2.4. Effet de la minimisation de la rétention liquide dans le fonctionnement d'un train de colonnes de distillation	170
6.5.2.5. Comparaison de deux procédés continus de nitration d'un composé organique	171
6.5.2.6. Incinération par combustion catalytique des composés organiques volatils (COV)	173
6.5.3. Vigilance lors de l'application pratique des méthodes d'analyse des risques fondées sur l'emploi des données numériques	176

Conclusion	181
Liste des notations	187
Bibliographie	193
Index	207