

# Table des matières

<b>Préface</b> . . . . .	1
André THOMAS	
<b>Introduction</b> . . . . .	5
Olivier CARDIN, William DERIGENT et Damien TRENTESAUX	
<b>Partie 1. Conceptualiser les systèmes industriels cyber-physiques</b> . . . . .	9
<b>Chapitre 1. Concepts généraux</b> . . . . .	11
Olivier CARDIN et Damien TRENTESAUX	
1.1. L'industrie au cœur de la société . . . . .	11
1.2. Le monde industriel à la recherche d'un nouveau modèle . . . . .	13
1.3. Les systèmes cyber-physiques. . . . .	15
1.4. Des systèmes cyber-physiques aux systèmes industriels cyber-physiques . . . . .	17
1.5. Perspectives d'étude des systèmes industriels cyber-physiques . . . . .	19
1.6. Bibliographie. . . . .	24
<b>Chapitre 2. Transiter vers un modèle durable : sociétal, économique et environnemental</b> . . . . .	27
Patrick MARTIN, Maroua NOURI et Ali SIADAT	
2.1. L'industrie du futur et le développement durable . . . . .	27
2.2. Apport des ICPS à la dimension sociale . . . . .	28

2.2.1. Contexte – présentation . . . . .	28
2.2.2. Aspects cognitifs . . . . .	31
2.2.3. Aspects santé et sécurité au travail . . . . .	32
2.3. Apport des ICPS à la dimension environnementale . . . . .	38
2.3.1. Objectifs et attendus . . . . .	38
2.3.2. Exemple d'application . . . . .	41
2.4. Apport des ICPS à la dimension économique. . . . .	41
2.5. Conclusion . . . . .	44
2.6. Bibliographie. . . . .	44

## **Partie 2. Capter et distribuer l'information au sein des systèmes industriels cyber-physiques . . . . .** 49

### **Chapitre 3. Flux d'informations au sein des systèmes industriels cyber-physiques . . . . .** 51

Thierry BERGER et Yves SALLEZ

3.1. Introduction. . . . .	51
3.2. Boucles informationnelles et décisionnelles lors de l'usage d'un ICPS . . . . .	52
3.3. Processus décisionnels au sein des boucles d'un ICPS . . . . .	53
3.3.1. Nature des processus décisionnels . . . . .	53
3.3.2. Nature de l'information . . . . .	54
3.3.3. Démarche d'étude des boucles informationnelles de la partie cyber d'un ICPS . . . . .	55
3.4. Éléments pour la mise en œuvre des boucles . . . . .	57
3.4.1. Architecture générique. . . . .	57
3.4.2. Lien avec les processus décisionnels et la nature de l'information. . . . .	60
3.5. Exemples illustratifs. . . . .	61
3.5.1. Exemple issu du transport ferroviaire . . . . .	61
3.5.2. Exemple issu du domaine manufacturier . . . . .	62
3.6. Conclusion . . . . .	64
3.7. Bibliographie. . . . .	64

### **Chapitre 4. Le concept de produit intelligent . . . . .** 67

William DERIGENT

4.1. Le produit intelligent, une notion phare, avant-gardiste, des systèmes industriels cyber-physiques. . . . .	67
------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----

4.2. Définitions du concept de produit intelligent . . . . .	68
4.3. Développements de la notion de produit intelligent . . . . .	71
4.3.1. Groupe 1 : les systèmes contrôlés par le produit ( <i>Product-Driven Systems</i> ou PDS). . . . .	73
4.3.2. Groupe 2 : <i>Product Lifecycle Information</i> Management – PLIM . . . . .	75
4.4. Conclusions et perspectives du produit intelligent . . . . .	78
4.5. Bibliographie . . . . .	79

### **Partie 3. Digitaliser au service des systèmes industriels cyber-physiques . . . . . 83**

#### **Chapitre 5. La virtualisation des ressources, des produits et du système d'information . . . . . 85**

Theodor BORANGIU, Silviu RĂILEANU et Octavian MORARIU

5.1. La virtualisation – la technologie des systèmes industriels cyber-physiques . . . . .	85
5.2. La virtualisation dans l'environnement industriel . . . . .	87
5.3. La virtualisation en atelier des charges de travail des ressources et des produits . . . . .	91
5.3.1. Virtualisation des ressources et des produits grâce aux profils d'atelier. . . . .	92
5.3.2. Virtualisation des charges de travail collaboratives des produits et des ressources . . . . .	99
5.4. La virtualisation de MES dans le Cloud (vMES). . . . .	105
5.5. Perspectives offertes par la virtualisation à l'industrie du futur . . . . .	112
5.6. Bibliographie . . . . .	113

#### **Chapitre 6. Cybersécurité des systèmes industriels cyber-physiques . . . . . 115**

Antoine GALLAIS et Youcef IMINE

6.1. Quels sont les risques encourus ? . . . . .	116
6.1.1. Indisponibilité des systèmes. . . . .	116
6.1.2. Perte de confidentialité ou d'intégrité . . . . .	119
6.1.3. Contournement des contrôles d'accès et d'authentification . . . . .	122
6.2. Quels moyens de protection ? . . . . .	122
6.2.1. Assurer la disponibilité. . . . .	123
6.2.2. Garantir la confidentialité . . . . .	125

6.2.3. Mettre en place des mécanismes d'authentification . . . . .	126
6.2.4. Contrôler l'accès, les autorisations et la journalisation . . . . .	127
6.3. Conclusion . . . . .	130
6.4. Bibliographie . . . . .	132

## **Partie 4. Piloter les systèmes industriels cyber-physiques . . . . . 137**

### **Chapitre 7. Agents industriels : des holons aux systèmes industriels cyber-physiques . . . . . 139**

Paulo LEITÃO, Stamatis KARNOUSKOS et Armando Walter COLOMBO

7.1. Aperçu des systèmes multi-agents et de l'holonique . . . . .	140
7.1.1. Systèmes multi-agents . . . . .	140
7.1.2. Paradigme holonique . . . . .	143
7.2. Agents industriels . . . . .	145
7.2.1. Définition et caractéristiques . . . . .	145
7.2.2. Interfacer les agents avec leurs actifs physiques . . . . .	147
7.3. Agents industriels pour la réalisation de systèmes industriels cyber-physiques . . . . .	148
7.3.1. Soutenir le développement de produits, de machines et de systèmes intelligents dans le cadre de systèmes cyber-physiques . . . . .	148
7.3.2. Mise en œuvre d'un système multi-agent industriel comme ICPS . . . . .	149
7.4. Discussion et orientations futures . . . . .	151
7.5. Bibliographie . . . . .	153

### **Chapitre 8. Architectures de contrôle holoniques . . . . . 157**

Olivier CARDIN, William DERIGENT et Damien TRENTESAUX

8.1. Introduction . . . . .	157
8.2. Fondamentaux des HCA . . . . .	158
8.3. Les HCA dans la partie physique des ICPS . . . . .	160
8.4. Les architectures dynamiques, vers une reconfiguration de la partie physique depuis la partie cyber des ICPS . . . . .	163
8.5. Les HCA et le Big Data . . . . .	165
8.6. Les HCA et le jumeau numérique : vers la digitalisation des architectures . . . . .	167
8.7. Bibliographie . . . . .	168

---

**Partie 5. Apprendre et interagir avec les systèmes industriels cyber-physiques . . . . . 173**

**Chapitre 9. Big Data Analytics et *machine learning* pour les systèmes industriels cyber-physiques . . . . . 175**

Yasamin ESLAMI, Mario LEZOUCHE et Philippe THOMAS

9.1. Introduction. . . . .	175
9.2. La massification des données dans les systèmes industriels cyber-physiques . . . . .	177
9.3. Big Data et fouille de données multirelationnelles (MRDM) . . . . .	178
9.3.1. <i>Formal Concept Analysis</i> (FCA) . . . . .	179
9.3.2. <i>Relational Concept Analysis</i> (RCA) . . . . .	182
9.4. L'apprentissage machine . . . . .	184
9.4.1. Bases du <i>machine learning</i> . . . . .	184
9.4.2. Perceptron multicouche (PMC). . . . .	185
9.5. Exemple illustratif. . . . .	190
9.6. Conclusion . . . . .	191
9.7. Bibliographie. . . . .	192

**Chapitre 10. Intégration humains et ICPS : méthodes de conception et d'évaluation . . . . . 197**

Marie-Pierre PACAUX-LEMOINE et Frank FLEMISCH

10.1. Introduction . . . . .	197
10.2. Méthodes de conception . . . . .	200
10.3. Méthode d'intégration de HCPS. . . . .	202
10.3.1. Phase descendante. . . . .	203
10.3.2. Phase ascendante . . . . .	206
10.4. Synthèse et conclusion . . . . .	211
10.5. Bibliographie . . . . .	212

**Partie 6. Transformer les industries grâce aux systèmes industriels cyber-physiques . . . . . 215**

**Chapitre 11. Impact des ICPS sur les systèmes de production reconfigurables . . . . . 217**

Catherine DA CUNHA et Nathalie KLÉMENT

11.1. Contexte . . . . .	217
--------------------------	-----

11.1.1. Évolutions . . . . .	218
11.1.2. Enjeux . . . . .	219
11.1.3. Ressources . . . . .	219
11.2. Reconfiguration . . . . .	220
11.2.1. Mise en œuvre et niveaux de décision . . . . .	220
11.2.2. Systèmes d’information . . . . .	221
11.2.3. Déclinaison dans le contexte des CPPS/RMS. . . . .	222
11.2.4. Où et quand reconfigurer ? . . . . .	223
11.3. Modélisation . . . . .	224
11.3.1. Collecte des données . . . . .	224
11.3.2. Plateformes de simulation . . . . .	225
11.4. Ergonomie/cognitivité. . . . .	226
11.5. Exploitation du système d’information . . . . .	227
11.5.1. Niveau opérationnel : l’approvisionnement . . . . .	228
11.5.2. Réaction face aux aléas. . . . .	228
11.5.3. Aide à la décision . . . . .	229
11.6. Exemple illustratif . . . . .	230
11.7. Bibliographie . . . . .	231

**Chapitre 12. Impact des ICPS sur une logistique globale et interconnectée . . . . .**

**235**

Shenle PAN, Mariam LAFKIHI et Éric BALLOT

12.1. La logistique et ses enjeux . . . . .	235
12.2. Systèmes et organisations logistiques contemporains . . . . .	238
12.2.1. Logistique intra-site. . . . .	238
12.2.2. Logistique intra-urbaine . . . . .	239
12.2.3. Logistique inter-sites interurbains . . . . .	240
12.3. L’internet physique comme organisation logistique moderne et prometteuse . . . . .	241
12.3.1. Concept et définition . . . . .	241
12.3.2. Topologies des réseaux de réseaux . . . . .	242
12.4. Perspectives d’applications des ICPS dans une logistique interconnectée : exemple de l’internet physique . . . . .	244
12.4.1. Modélisation de l’internet physique par les ICPS : l’exemple du routage . . . . .	246
12.4.2. Exploitation des ICPS : approches basées sur les données et les jumeaux numériques . . . . .	249
12.5. Conclusion . . . . .	252
12.6. Bibliographie . . . . .	252

## **Chapitre 13. Impact des systèmes industriels cyber-physiques sur les transports** . . . . . 257

John MBULI et Damien TRENTEAUX

13.1. Introduction . . . . .	257
13.1.1. Forces d'attraction. . . . .	258
13.1.2. Facteurs de complexité du secteur des transports . . . . .	259
13.1.3. Forces de poussée . . . . .	260
13.2. L'impact de l'ICPS sur le transport . . . . .	261
13.3. Service de transport ferroviaire : un exemple illustratif . . . . .	264
13.3.1. L'espace physique de SUPERFLO . . . . .	267
13.3.2. Le superviseur humain de la flotte . . . . .	270
13.3.3. Le cyberspace de SUPERFLO . . . . .	270
13.3.4. Évaluation du modèle proposé et attentes des industriels . . . . .	270
13.4. Remarques finales . . . . .	272
13.5. Remerciements . . . . .	273
13.6. Bibliographie . . . . .	273

## **Chapitre 14. Impact des systèmes industriels cyber-physiques sur les métiers du bâtiment.** . . . . 277

William DERIGENT et Laurent JOBLOT

14.1. Introduction . . . . .	277
14.2. La place du BIM au sein de la construction 4.0 . . . . .	280
14.3. Exemples de transformations du secteur de la construction. . . . .	281
14.3.1. Piloter : gestion du chantier en temps réel. . . . .	282
14.3.2. Apprendre et interagir : réalité virtuelle et apprentissage automatique . . . . .	283
14.3.3. Capter et distribuer : utilisation de technologies sans fil (RFID et RCSF). . . . .	285
14.3.4. Digitaliser : technologies de digitalisation pour le BIM. . . . .	287
14.4. Exemple d'ICPS en construction . . . . .	288
14.5. Réaliser la transformation numérique des entreprises . . . . .	290
14.6. Bibliographie . . . . .	292

## **Chapitre 15. Impact des systèmes cyber-physiques sur le système de santé** . . . . . 297

Franck FONTANILI et Maria DI MASCOLO

15.1. Introduction . . . . .	297
15.1.1. Le système de santé et ses spécificités . . . . .	297

15.1.2. L'évolution numérique de la production de soins et de la santé. . . . .	299
15.2. Les CPS-S dans la littérature. . . . .	300
15.2.1. Les CPS-S pour le suivi médical . . . . .	302
15.2.2. Les CPS-S pour le bien-être et la prévention . . . . .	302
15.2.3. Les CPS-S pour le suivi organisationnel des parcours . . . . .	303
15.2.4. Les capteurs pour le suivi des patients et des ressources . . . . .	305
15.3. L'apport d'un double numérique dans un CPS-S. . . . .	306
15.3.1. Principe général des doubles numériques en santé. . . . .	307
15.3.2. Une proposition de CPS-S à base d'un double numérique des parcours à l'hôpital . . . . .	308
15.4. Conclusion . . . . .	311
15.5. Bibliographie . . . . .	312

**Partie 7. Imaginer les systèmes industriels cyber-physiques  
d'après-demain. . . . . 315**

**Chapitre 16. Éthique et responsabilité des systèmes industriels  
cyber-physiques . . . . . 317**

Sylvie JONAS et Françoise LAMNABHI-LAGARRIGUE

16.1. Introduction . . . . .	317
16.2. L'éthique et les systèmes industriels cyber-physiques. . . . .	319
16.2.1. Gestion et protection des données . . . . .	321
16.2.2. La maîtrise dans la conception des algorithmes . . . . .	322
16.3. La responsabilité et les systèmes industriels cyber-physiques . . . . .	325
16.3.1. Les régimes de responsabilités existants appliqués aux systèmes industriels cyber-physiques . . . . .	326
16.3.2. Les propositions d'évolution des régimes de responsabilité . . . . .	329
16.4. Bibliographie . . . . .	331

**Chapitre 17. Enseignement et apprentissage des ICPS :  
leçons apprises et meilleures pratiques . . . . . 335**

Bilal AHMAD, Freeha AZMAT, Armando Walter COLOMBO  
et Gerrit Jan VELTINK

17.1. Introduction . . . . .	335
17.2. Université de Warwick – programme d'études de niveau licence . . . . .	337
17.2.1. L'enseignement des ICPS : fusion de l'informatique et de l'ingénierie . . . . .	338



---

17.2.2. Principales technologies habilitantes dans le programme d'études de l'ICPS . . . . .	339
17.2.3. Principes pédagogiques : enseignement des modules ICPS . . .	340
17.3. Université des sciences appliquées d'Emden/Leer – cursus de niveau master . . . . .	341
17.3.1. Enseignement de l'ICPS : fusion de l'informatique, du génie électrique et de la mécatronique. . . . .	341
17.3.2. Principales technologies habilitantes dans le programme d'études de l'ICPS . . . . .	343
17.3.3. Principes pédagogiques : enseignement des modules ICPS . . .	345
17.4. Conclusion . . . . .	347
17.5. Bibliographie . . . . .	348
<b>Conclusion</b> . . . . .	<b>353</b>
William DERIGENT, Olivier CARDIN et Damien TRENTESAUX	
<b>Liste des auteurs</b> . . . . .	<b>357</b>
<b>Index</b> . . . . .	<b>361</b>