

# Table des matières

<b>Avant-propos</b> . . . . .	1
<b>Introduction</b> . . . . .	5
<b>Chapitre 1. Internet des objets (IoT)</b> . . . . .	21
1.1. Définition . . . . .	21
1.2. Fondements de l'IoT . . . . .	23
1.2.1. Connectivité omniprésente . . . . .	23
1.2.2. Intelligence embarquée et analyse des données . . . . .	24
1.2.3. Interopérabilité et collaboration des systèmes . . . . .	24
1.2.4. Automatisation et optimisation des processus . . . . .	24
1.3. Architecture de l'IoT . . . . .	24
1.3.1. Architecture IoT à trois couches (modèle classique ou traditionnel) . . . . .	25
1.3.1.1. Couche de perception ( <i>perception layer</i> ) . . . . .	25
1.3.1.2. Couche réseau ( <i>network layer</i> ) . . . . .	26
1.3.1.3. Couche application ( <i>application layer</i> ) . . . . .	26
1.3.1.4. Limites de l'architecture IoT à trois couches . . . . .	26
1.3.2. Architecture IoT à plusieurs couches . . . . .	28
1.4. Capteur, actionneurs, passerelle et systèmes embarqués . . . . .	29
1.4.1. Capteur . . . . .	29
1.4.2. Actionneurs . . . . .	30
1.4.3. Passerelle ( <i>gateway</i> ) . . . . .	30
1.4.4. Systèmes embarqués . . . . .	30
1.5. Protocoles de communication IoT . . . . .	31

1.5.1. Protocoles de communication à longue portée (LPWAN) . . . . .	31
1.5.1.1. LoRaWAN ( <i>Long Range Wide Area Network</i> ) . . . . .	31
1.5.1.2. NB-IoT ( <i>Narrowband Internet of Things</i> ) . . . . .	32
1.5.1.3. Sigfox . . . . .	32
1.5.2. Protocoles de communication sans fil courte portée. . . . .	33
1.5.2.1. Wi-Fi . . . . .	33
1.5.2.2. BLE ( <i>Bluetooth Low Energy</i> ) . . . . .	33
1.5.2.3. Zigbee . . . . .	33
1.5.3. Protocoles réseau pour l'adressage IP . . . . .	34
1.5.3.1. 6LoWPAN ( <i>IPv6 over Low Power Wireless Personal Area Networks</i> ) . . . . .	34
1.5.3.2. Thread . . . . .	34
1.5.4. Protocoles d'échange de données et de messagerie . . . . .	35
1.5.4.1. MQTT ( <i>Message Queuing Telemetry Transport</i> ) . . . . .	35
1.5.4.2. CoAP ( <i>Constrained Application Protocol</i> ) . . . . .	35
1.5.4.3. HTTP/HTTPS ( <i>HyperText Transfer Protocol/HyperText Transfer Protocol Secure</i> ) . . . . .	36
1.5.4.4. AMQP ( <i>Advanced Message Queuing Protocol</i> ) . . . . .	37
1.5.4.5. DDS ( <i>Data Distribution Service</i> ) . . . . .	37
1.5.4.6. WebSocket . . . . .	38
1.6. Support de communication. . . . .	38
1.7. Domaines applicatifs de l'IoT : une révolution technologique . . . . .	39
1.7.1. Maison intelligente . . . . .	40
1.7.2. Villes intelligentes . . . . .	41
1.7.3. Santé numérique. . . . .	41
1.7.4. Transports intelligents . . . . .	42
1.7.5. IoT industriel (IIoT) . . . . .	42
1.7.6. Agriculture intelligente. . . . .	43
1.7.7. Environnement et agriculture intelligents . . . . .	43
1.7.8. Chaîne d'approvisionnement et logistique . . . . .	44
1.8. Différentes extensions de l'IoT . . . . .	45
1.8.1. IoV ( <i>Internet of Vehicles</i> ) . . . . .	45
1.8.2. IoMT ( <i>Internet of Medical Things</i> ) . . . . .	45
1.8.3. IIoT ( <i>Industrial Internet of Things</i> ) . . . . .	46
1.8.4. IoE ( <i>Internet of Everything</i> ) . . . . .	46
1.8.5. IoRT ( <i>Internet of Robotic Things</i> ) . . . . .	46
1.8.6. IoA ( <i>Internet of Agriculture</i> ) . . . . .	47
1.8.7. IoB ( <i>Internet of Behaviors</i> ) . . . . .	47
1.8.8. IoST ( <i>Internet of Space Things</i> ) . . . . .	47
1.9. Conclusion : enjeux, défis et perspectives pour un avenir connecté . . . . .	48

---

<b>Chapitre 2. Les transformateurs de l'avenir : du numérique (4.0) à l'humain (5.0) . . . . .</b>	<b>51</b>
2.1. Introduction . . . . .	51
2.2. Industrie 4.0 : le passage de la vision à la réalité . . . . .	54
2.2.1. Origines et définition . . . . .	54
2.2.2. Les piliers de l'industrie 4.0 . . . . .	55
2.2.2.1. L'Internet des objets (IoT) . . . . .	56
2.2.2.2. Les systèmes cyber-physiques (CPS) . . . . .	56
2.2.2.3. La fabrication additive . . . . .	56
2.2.2.4. L'intelligence artificielle (IA) . . . . .	57
2.2.2.5. Le Big Data et l'analyse des données . . . . .	59
2.2.2.6. La connectivité avancée . . . . .	60
2.2.3. Impacts et défis de l'industrie 4.0 . . . . .	62
2.3. Industrie 5.0 : vers une approche plus humaine. . . . .	63
2.3.1. Définition et différences avec l'industrie 4.0 . . . . .	63
2.3.1.1. La collaboration homme-machine . . . . .	63
2.3.1.2. La durabilité environnementale . . . . .	64
2.3.1.3. L'intelligence artificielle . . . . .	64
2.3.1.4. Les usines intelligentes . . . . .	64
2.3.2. Impacts et défis de l'industrie 5.0 . . . . .	65
2.4. De la société 1.0 à la société 5.0 . . . . .	66
2.4.1. L'évolution accélérée des sociétés humaines . . . . .	66
2.4.2. De la société traditionnelle à l'industrie 4.0 et à la société 4.0 : une société augmentée par la technologie . . . . .	67
2.4.2.1. Une société hyperconnectée . . . . .	68
2.4.2.2. L'humain au cœur d'un écosystème numérique . . . . .	68
2.4.2.3. Un monde du travail en mutation . . . . .	68
2.4.2.4. La gouvernance par les données . . . . .	69
2.4.2.5. Vers une société plus intelligente, mais aussi plus responsable . . . . .	69
2.4.3. De la société 4.0 à la société 5.0 : replacer l'humain au cœur de la technologie . . . . .	69
2.5. Société 5.0 : une vision d'avenir humain . . . . .	70
2.5.1. Origine et définition . . . . .	70
2.5.2. Les principes de la société 5.0 . . . . .	72
2.5.3. Les applications de la société 5.0 . . . . .	73
2.5.4. Les défis de la société 5.0 . . . . .	74
2.6. Interactions entre industrie 4.0, industrie 5.0 et société 5.0 . . . . .	77
2.7. Conclusion : vers un équilibre entre innovation, humanité et durabilité . . . . .	79

---

<b>Chapitre 3. Automatisation intelligente et cobots dans l'industrie 5.0 . . . . .</b>	<b>81</b>
3.1. Introduction à l'automatisation intelligente et à l'industrie 5.0 . . . . .	81
3.2. Fondements de l'industrie 5.0 . . . . .	82
3.3. Contexte et défis de l'industrie 5.0 . . . . .	84
3.4. Rôle des cobots dans l'industrie 5.0 . . . . .	86
3.5. Intégration des cobots avec l'IoT et le Cloud Computing. . . . .	87
3.6. Développement des solutions IoT et langages clés. . . . .	91
3.7. Étude de cas : application pratique . . . . .	93
3.7.1. Supervision intelligente d'une station de traitement d'eau par système embarqué IoT . . . . .	95
3.8. Dimensions sociétales 5.0 . . . . .	101
3.8.1. Éducation 5.0 . . . . .	101
3.8.2. Ingénierie 5.0 . . . . .	103
3.8.3. Éthique 5.0 . . . . .	105
3.8.4. Université 5.0 . . . . .	107
3.8.5. Gouvernance 5.0 . . . . .	109
3.9. Défis, acceptabilité sociale et impact environnemental . . . . .	111
3.10. Réglementations et normes de sécurité . . . . .	114
3.11. Perspectives d'évolution et innovations futures. . . . .	115
3.12. Conclusion . . . . .	117
 <b>Chapitre 4. Défis et solutions du paradigme 5.0 . . . . .</b>	 <b>119</b>
4.1. Introduction . . . . .	119
4.2. Caractéristiques et défis de l'industrie 5.0 et de la société 5.0 . . . . .	119
4.2.1. Défis communs et synergies. . . . .	121
4.2.2. Fabrication additive intelligente et durabilité sociétale . . . . .	122
4.2.3. Maintenance prédictive et résilience sociétale . . . . .	123
4.2.4. L'hyperpersonnalisation : une innovation centrée sur l'humain . .	124
4.2.5. Systèmes cyber-physiques cognitifs et collaboration homme-machine . . . . .	125
4.3. Technologies clés de l'industrie 5.0 et de la société 5.0 : opportunités et défis . . . . .	126
4.3.1. Informatique en périphérie (Edge Computing). . . . .	128
4.3.2. Jumeaux numériques . . . . .	128
4.3.3. Robots collaboratifs (cobots) . . . . .	130
4.3.4. Déploiement à grande échelle de l'IoT : enjeux et opportunités. .	130
4.3.5. Blockchain . . . . .	131
4.3.6. Réseaux 6G et au-delà : enjeux et perspectives . . . . .	133

---

4.3.7. Sécurité et confidentialité des données . . . . .	133
4.3.8. Interopérabilité et intégration des systèmes. . . . .	134
4.3.9. Consommation énergétique et durabilité . . . . .	135
4.3.10. Formation et adaptation des compétences. . . . .	136
4.3.11. Éthique et responsabilité . . . . .	137
4.3.12. Accessibilité et inclusion. . . . .	137
4.3.13. Technologies avancées au service de l'industrie 5.0 et de la société 5.0 . . . . .	139
4.4. Sécurité et confidentialité des données IoT . . . . .	141
4.4.1. Sécurité des données . . . . .	141
4.4.2. Réglementation et conformité. . . . .	141
4.5. Gestion de l'interopérabilité . . . . .	142
4.6. Résilience numérique . . . . .	144
4.7. Applications de l'industrie 5.0 et de la société 5.0 : une vision unifiée . . . . .	145
4.7.1. Santé durable . . . . .	147
4.7.2. Éducation continue . . . . .	148
4.7.3. Mobilité intelligente . . . . .	148
4.7.4. Gestion énergétique. . . . .	149
4.7.5. Sécurité alimentaire. . . . .	150
4.7.6. Inclusion sociale. . . . .	151
4.7.7. Épanouissement . . . . .	152
4.7.8. Engagement . . . . .	153
4.8. Conclusion . . . . .	153

## **Chapitre 5. L'avenir des industries intelligentes : tendances et innovations (2030-2050) . . . . .** 155

5.1. Introduction. . . . .	155
5.1.1. Contexte et enjeux des industries intelligentes à l'horizon 2050 . . .	155
5.1.2. Méthodologie : approche prospective et scénarios explorés . . . .	157
5.1.3. Cadres théoriques mobilisés : techno-futurisme, éthique anticipative, <i>design fiction</i> . . . . .	157
5.2. Innovations technologiques majeures . . . . .	158
5.2.1. La fusion du biologique et du numérique : l'émergence du Bio-IoT . . . . .	159
5.2.2. L'IoT quantique : vers une connectivité ultrarapide et sécurisée. . . . .	159
5.2.3. Les jumeaux numériques : des usines aux villes intelligentes . . . .	159
5.2.4. La révolution des réseaux 6G et de l'IoT spatial. . . . .	160
5.2.5. L'informatique neuromorphique : des puces inspirées du cerveau humain . . . . .	160

5.2.6. L'IA génératrice et la conception autonome des systèmes industriels . . . . .	161
5.2.7. L'énergie intelligente et distribuée : microgrids, batteries organiques, IoT énergétique . . . . .	161
5.2.8. L'ingénierie adaptative : vers des systèmes industriels auto-évolutifs . . . . .	162
5.2.9. Agents intelligents et métiers augmentés : la coévolution homme-machine . . . . .	162
5.2.10. L'informatique quantique et le piégeage d'ions : vers une puissance de calcul post-classique . . . . .	163
5.3. L'automatisation poussée et ses implications . . . . .	165
5.3.1. L'usine autonome : vers une production sans intervention humaine. . . . .	165
5.3.2. L'évolution des usines vers l'autonomie intelligente . . . . .	166
5.3.3. Robotique collaborative et cobots ultra-avancés. . . . .	167
5.3.4. La singularité industrielle : l'ère des usines autonomes . . . . .	167
5.4. Économie, durabilité et symbiose techno-bio-écologique. . . . .	167
5.4.1. L'économie symbiotique : fusion intelligente entre technologie et nature . . . . .	168
5.4.2. L'IoT au service de l'économie circulaire et de la réduction des déchets. . . . .	169
5.4.3. Les matériaux intelligents et autoréparants . . . . .	169
5.4.4. L'équilibre technologique : entre innovation et durabilité . . . . .	170
5.4.5. Usines à empreinte carbone négative et écologie industrielle automatisée . . . . .	170
5.5. Enjeux géopolitiques et réglementaires . . . . .	171
5.5.1. La bataille des standards : un enjeu géopolitique majeur. . . . .	171
5.5.2. L'IoT comme outil de <i>soft power</i> : Chine, États-Unis et Europe en compétition. . . . .	172
5.5.3. Cyberguerres et vulnérabilités des infrastructures intelligentes . . . . .	172
5.5.4. Vers une gouvernance mondiale de l'IA industrielle ? . . . . .	172
5.6. Impacts sociétaux et défis éthiques . . . . .	174
5.6.1. Vers une société massivement instrumentée : opportunités et risques . . . . .	174
5.6.2. Surveillance généralisée : sécurité <i>versus</i> libertés individuelles. . . . .	175
5.6.3. L'obsolescence humaine et le futur du travail dans un monde hyper-automatisé . . . . .	175
5.6.4. Fracture numérique 2.0 : marginalisation des pays non connectés . . . . .	176
5.6.5. L'identité numérique industrielle : l'humain augmenté au travail . . . . .	177

---

5.6.6. Réinventer le travail à l'ère des intelligences artificielles : compétences, métiers et humanité augmentée . . . . .	177
5.7. Scénarios prospectifs et visions du futur. . . . .	178
5.7.1. L'Internet des pensées (IoMT) : contrôler les machines par la pensée. . . . .	180
5.7.2. Les usines vivantes : biologie synthétique et fabrication organique . . . . .	181
5.7.3. L'avènement du Vibe Coding : révolutionner la création logicielle . . . . .	182
5.8. Conclusion . . . . .	183
5.8.1. Synthèse des tendances clés. . . . .	183
5.8.2. Incertitudes et pistes de réflexion pour l'avenir . . . . .	184
5.8.3. La nécessité d'une éthique mondiale de l'innovation industrielle . . . . .	185
5.8.4. Industries intelligentes : définir un horizon humaniste et durable. . . . .	187
<b>Conclusion . . . . .</b>	<b>189</b>
<b>Bibliographie . . . . .</b>	<b>193</b>
<b>Index . . . . .</b>	<b>203</b>