

# Table des matières

<b>Avant-propos</b> . . . . .	1
<b>Chapitre 1. Enjeux autour de la cybersécurité et de la traçabilité dans l'usine 4.0</b> . . . . .	5
1.1. Introduction . . . . .	5
1.2. Enjeux de la traçabilité dans l'usine 4.0 . . . . .	7
1.2.1. La volumétrie des données . . . . .	8
1.2.2. La transparence . . . . .	8
1.2.3. L'apport de la blockchain . . . . .	9
1.3. État des lieux de l'usine . . . . .	10
1.3.1. Définition des périmètres . . . . .	10
1.3.2. Interactions entre les périmètres . . . . .	12
1.3.3. Périmètres réseaux dans l'usine . . . . .	12
1.3.4. Contrôles des accès et surveillance des périmètres . . . . .	13
1.4. État des lieux de la cybersécurité dans l'industrie 4.0 . . . . .	14
1.5. Vulnérabilités, risques et menaces dans l'industrie 4.0 . . . . .	16
1.5.1. Définitions . . . . .	17
1.5.2. Impacts métiers . . . . .	18
1.5.3. Menaces de cybersécurité majeures en industrie 4.0 . . . . .	20
1.5.4. Vulnérabilités, risques et menaces par périmètre . . . . .	22
1.6. Revue des solutions de cybersécurité . . . . .	27
1.6.1. Définitions . . . . .	28
1.6.2. Contre-mesures en cybersécurité . . . . .	29
1.6.3. Propositions de solutions de cybersécurité dans la littérature . . . . .	30
1.6.4. <i>Honeypots</i> et <i>digital twins</i> . . . . .	47

1.7. Synthèse de bonnes pratiques techniques en cybersécurité . . . . .	50
1.7.1. Confiance et intégrité . . . . .	55
1.7.2. Sécurité du Cloud . . . . .	55
1.7.3. Sécurité machine à machine . . . . .	56
1.7.4. Protection des données . . . . .	56
1.7.5. Logiciel/mises à jour du micrologiciel . . . . .	57
1.7.6. Contrôle d'accès . . . . .	57
1.7.7. Réseaux, protocoles et cryptage . . . . .	57
1.7.8. Suivi et audit . . . . .	58
1.7.9. Gestion de la configuration . . . . .	58
1.8. Synthèse entre industrie 4.0, cybersécurité et traçabilité . . . . .	58
1.9. Bibliographie . . . . .	60

## **Chapitre 2. Approche globale de la traçabilité pour l'usine 4.0 . . . . . 65**

2.1. Principes de base . . . . .	65
2.1.1. Traçabilité de la chaîne . . . . .	66
2.1.2. Traçabilité interne . . . . .	67
2.1.3. Exemples de traçabilité interne . . . . .	67
2.1.4. Traçabilité en aval et traçabilité en amont . . . . .	69
2.1.5. Formats d'identification . . . . .	70
2.1.6. Collecte des données . . . . .	72
2.1.7. Enjeux et importance de la traçabilité . . . . .	74
2.2. Principes de mise en œuvre . . . . .	75
2.2.1. Formalisation du flux des objets . . . . .	75
2.2.2. Identification . . . . .	75
2.2.3. Gestion des liens/association . . . . .	77
2.3. Règlementations, lois et normes . . . . .	78
2.3.1. Règlementation générale . . . . .	79
2.3.2. Règlementation dans l'industrie automobile . . . . .	81
2.3.3. Règlementation des industries alimentaires et pharmaceutiques . . . . .	83
2.4. État de la recherche sur la traçabilité . . . . .	89
2.4.1. Terminologie et définitions . . . . .	89
2.4.2. Données de traçabilité . . . . .	90
2.5. État de l'art sur la traçabilité orientée produit . . . . .	91
2.5.1. La recherche sur la traçabilité orientée produit . . . . .	91
2.5.2. Innovations technologiques dans les systèmes de traçabilité . . . . .	93
2.6. Proposition d'une approche à la traçabilité pour l'usine 4.0 . . . . .	97
2.6.1. Vision du produit . . . . .	97
2.6.2. Caractérisation des données de traçabilité . . . . .	99
2.6.3. Enjeux de l'approche . . . . .	100

2.7. Synthèse des points forts et points faibles de la contribution . . . . .	101
2.8. Bibliographie . . . . .	103

### **Chapitre 3. Intégration de la blockchain dans la traçabilité de l'usine 4.0** . . . . .

3.1. Présentation du paradigme blockchain . . . . .	107
3.1.1. Blockchain . . . . .	108
3.1.2. Réseau blockchain . . . . .	109
3.1.3. Nœud . . . . .	109
3.1.4. Bloc . . . . .	109
3.1.5. Transaction . . . . .	109
3.1.6. Algorithme de consensus . . . . .	110
3.1.7. <i>Smart contract</i> (contrat intelligent) . . . . .	110
3.1.8. Types d'implémentations et environnements . . . . .	110
3.1.9. Exemples d'algorithmes de consensus . . . . .	111
3.2. La plate-forme de blockchain Multichain . . . . .	113
3.2.1. Fonctionnalités . . . . .	113
3.2.2. Paramètres principaux . . . . .	114
3.2.3. Multichain API JSON . . . . .	115
3.2.4. Comparaison avec d'autres solutions blockchain . . . . .	116
3.3. État de la recherche sur la blockchain pour l'industrie 4.0 . . . . .	130
3.4. Notre approche de blockchain pour la traçabilité dans l'usine 4.0 . . . . .	132
3.4.1. Objectifs et garanties visés . . . . .	133
3.4.2. Vue d'ensemble de l'architecture . . . . .	135
3.4.3. Gestion des données . . . . .	136
3.4.4. Gestion de la confidentialité . . . . .	138
3.4.5. Gestion de la non-répudiation . . . . .	139
3.5. Description fonctionnelle de l'implémentation Multichain de BPCAT . . . . .	140
3.5.1. Architecture réseau et représentation des acteurs . . . . .	140
3.5.2. Gestion du stockage et de la blockchain . . . . .	143
3.5.3. Gestion des données brutes de traçabilité . . . . .	143
3.5.4. Garantie de la confidentialité . . . . .	144
3.5.5. Gestion des fichiers . . . . .	146
3.5.6. Signature des données . . . . .	147
3.5.7. Vérification de l'intégrité des données . . . . .	150
3.6. Défis techniques à relever et solutions proposées . . . . .	151
3.6.1. Minage et consommation énergétique . . . . .	151
3.6.2. Optimisation du volume de stockage . . . . .	152
3.7. Description technique de l'implémentation Multichain de BPCAT . . . . .	158
3.7.1. Configuration et déploiement des nœuds . . . . .	159

3.7.2. Initialisation de la blockchain . . . . .	162
3.7.3. Pré-chargement de données . . . . .	163
3.8. Mesures, performances et benchmark . . . . .	164
3.8.1. Récupération des mesures . . . . .	164
3.8.2. Lecture des mesures dans l'application cliente . . . . .	165
3.8.3. Principe de fonctionnement du benchmark . . . . .	166
3.9. Synthèse des points forts et points faibles de la contribution . . . . .	167
3.10. Bibliographie . . . . .	170

## **Chapitre 4. Évaluation de l'impact de la blockchain sur l'usine 4.0 . . . . .**

175

4.1. État de l'art sur l'évaluation des systèmes usines et de la blockchain . . . . .	175
4.2. Fondements théoriques de la simulation . . . . .	178
4.2.1. Définitions . . . . .	178
4.2.2. Classes de modèles . . . . .	180
4.2.3. Hiérarchie de spécification . . . . .	180
4.2.4. Formalismes de modélisation . . . . .	181
4.3. Présentation de ARTIS* : une librairie DEVS C++ 11 . . . . .	181
4.3.1. Modèle atomique . . . . .	182
4.3.2. Modèle couplé . . . . .	188
4.3.3. Constructeur et paramètres . . . . .	188
4.4. Cahier des charges pour l'évaluation proposée . . . . .	191
4.5. Présentation fonctionnelle du modèle de simulation . . . . .	192
4.5.1. À l'échelle de l'usine . . . . .	192
4.5.2. À l'échelle des lignes de production . . . . .	193
4.6. Présentation technique du simulateur de l'usine 4.0 avec ARTIS* . . . . .	196
4.6.1. Architecture . . . . .	196
4.6.2. Générateur de scénario . . . . .	197
4.6.3. Paramétrage des scénarios . . . . .	201
4.7. Présentation des scénarios simulés . . . . .	209
4.7.1. Évaluation de l'espace de stockage utilisé . . . . .	209
4.7.2. Évaluation de la consommation énergétique . . . . .	215
4.7.3. Évaluation des émissions de carbone (CO <sub>2</sub> ) . . . . .	226
4.8. Synthèse des points forts et points faibles de la contribution . . . . .	231
4.9. Bibliographie . . . . .	231

---

<b>Chapitre 5. Perspectives autour de la digitalisation de l'usine 4.0</b> . . . . .	235
5.1. Vers une digitalisation plus sûre et plus sécurisée des usines . . . . .	235
5.1.1. Contributions de l'ouvrage à la cybersécurité de l'usine 4.0 . . . . .	235
5.1.2. Contributions de l'ouvrage à une blockchain pour la traçabilité . . . . .	236
5.1.3. Perspectives . . . . .	237
5.2. Vers une gestion plus dynamique grâce aux jumeaux numériques . . . . .	237
5.2.1. Contributions de l'ouvrage à l'évaluation de projet blockchain . . . . .	237
5.2.2. Perspectives . . . . .	238
5.3. Vers une digitalisation préservant la résilience des usines . . . . .	239
5.3.1. État des lieux de la résilience des usines face à la digitalisation . . . . .	239
5.3.2. Perspectives . . . . .	241
5.4. Bibliographie . . . . .	241
<b>Liste des acronymes</b> . . . . .	243
<b>Liste des auteurs</b> . . . . .	247
<b>Index</b> . . . . .	249