

# Table des matières

<b>Préface</b> . . . . .	1
Gildas GARNIER	
<b>Remerciements</b> . . . . .	3
<b>Introduction</b> . . . . .	5
<b>Partie 1. Théorie des systèmes</b> . . . . .	11
<b>Chapitre 1. Théorie des systèmes</b> . . . . .	13
1.1. Définition d'un système . . . . .	13
1.2. Définition d'un système complexe . . . . .	15
1.3. Définition d'un système de systèmes . . . . .	16
1.4. L'approche système . . . . .	17
1.4.1. L'approche réductionniste . . . . .	17
1.4.2. L'approche holistique . . . . .	17
1.4.3. L'approche analytique et systémique . . . . .	19
1.4.4. L'émergence . . . . .	20
1.5. La méthode systémique . . . . .	23
1.5.1. L'exploration systémique . . . . .	24
1.5.2. La modélisation qualitative . . . . .	26
1.5.3. La modélisation quantitative . . . . .	29
1.5.4. La simulation . . . . .	30
1.6. Comment appréhender la complexité d'un système ? . . . . .	31

1.6.1. Thème 1 : le système étant dans un environnement . . . . .	32
1.6.2. Thème 2 : le système étant architecturé . . . . .	33
1.6.3. Thème 3 : le système évoluant dans le temps et ayant une dynamique . . . . .	33
1.6.4. Thème 4 : le système étant piloté. . . . .	34
1.7. Conclusion . . . . .	40
<b>Partie 2. Ingénierie des systèmes et des exigences . . . . .</b>	<b>41</b>
<b>Chapitre 2. Introduction à l'ingénierie des systèmes. . . . .</b>	<b>43</b>
2.1. Le système répondant à des besoins . . . . .	43
2.1.1. Définition d'un besoin . . . . .	43
2.1.2. Définition d'une exigence des parties prenantes. . . . .	43
2.2. Comment passer du besoin au système ? . . . . .	44
2.3. Définition de l'ingénierie système . . . . .	44
2.4. Processus itératif d'ingénierie système. . . . .	45
2.4.1. Prescription et construction du système . . . . .	45
2.4.2. Analyse des besoins . . . . .	48
2.4.3. Spécification des exigences . . . . .	48
2.4.4. Conception fonctionnelle et logique . . . . .	49
2.4.5. Conception physique . . . . .	50
2.4.6. Vérification et validation . . . . .	51
2.4.7. Évaluation et comparaison. . . . .	51
2.4.8. Le cycle des exigences. . . . .	51
2.5. L'architecture système . . . . .	52
2.6. Cycle en V . . . . .	55
2.7. Cycle en W . . . . .	56
2.8. Conclusion . . . . .	57
<b>Chapitre 3. Introduction à l'ingénierie des exigences . . . . .</b>	<b>59</b>
3.1. Définition de l'ingénierie des exigences . . . . .	59
3.2. L'importance et les enjeux de l'ingénierie des exigences. . . . .	61
3.3. Domaine du problème et domaine de la solution. . . . .	61
3.4. Formaliser les besoins des parties prenantes et les exigences du système . . . . .	63
3.5. Valider les exigences du système . . . . .	64
3.6. Allouer les exigences du système aux sous-systèmes . . . . .	64

3.7. Valider les exigences allouées des sous-systèmes . . . . .	64
3.8. Choisir la solution : définir les exigences des sous-systèmes. . . . .	64
3.9. Gérer les exigences . . . . .	64
3.9.1. Pourquoi gérer les exigences ? . . . . .	64
3.9.2. Les risques liés à une mauvaise gestion des exigences . . . . .	65
3.9.3. Gérer les attributs des exigences . . . . .	65
3.9.4. Gérer la configuration des exigences . . . . .	66
3.9.5. Gérer les changements . . . . .	69
3.10. Conclusion . . . . .	70
<b>Partie 3. Définition des exigences . . . . .</b>	<b>71</b>
<b>Chapitre 4. Exemple fil rouge . . . . .</b>	<b>73</b>
4.1. Objectif du fil rouge. . . . .	73
4.2. Présentation du cahier des charges brut . . . . .	73
<b>Chapitre 5. Analyse des besoins . . . . .</b>	<b>77</b>
5.1. Objectifs de l'analyse des besoins . . . . .	77
5.2. Identification des parties prenantes . . . . .	78
5.2.1. Définition des parties prenantes . . . . .	78
5.2.2. L'analyse PESTEL . . . . .	79
5.2.3. L'analyse par type d'environnement. . . . .	80
5.2.4. Application au fil rouge : identification des parties prenantes. . . . .	82
5.3. Identification des interactions externes . . . . .	83
5.3.1. Objectifs de l'identification des interactions externes. . . . .	83
5.3.2. Application au fil rouge : identification des interactions externes. . . . .	85
5.4. Recueil des besoins . . . . .	88
5.4.1. Pourquoi capturer les besoins ? . . . . .	88
5.4.2. Méthodes de recueil des besoins . . . . .	89
5.4.3. Application au fil rouge : formalisation des besoins . . . . .	90
5.5. Identification du cycle de vie . . . . .	92
5.5.1. Construire le cycle de vie du système . . . . .	92
5.5.2. Application au fil rouge : identification du cycle de vie . . . . .	95
5.6. Identification des missions du système. . . . .	97
5.6.1. Définition des missions du système . . . . .	97
5.6.2. Application au fil rouge : définition des missions . . . . .	99

- 5.7. Identification des scénarios opérationnels . . . . . 102
  - 5.7.1. Définition d'un scénario opérationnel . . . . . 102
  - 5.7.2. Application au fil rouge : définition des scénarios opérationnels . . . . . 103
- 5.8. Identification des services et des contraintes . . . . . 105
  - 5.8.1. Des missions aux services . . . . . 105
  - 5.8.2. Application au fil rouge : identification des services et des contraintes . . . . . 107
- 5.9. Formalisation des besoins des parties prenantes . . . . . 107
  - 5.9.1. Le cahier des charges . . . . . 107
  - 5.9.2. Application au fil rouge : formalisation des besoins . . . . . 111
- 5.10. Conclusion . . . . . 113

**Chapitre 6. Spécification des exigences . . . . . 115**

- 6.1. Objectif du processus de spécification des exigences . . . . . 115
- 6.2. Identification des modes de fonctionnement du système . . . . . 117
  - 6.2.1. Définition et objectif des modes de fonctionnement . . . . . 117
  - 6.2.2. Que faire pour identifier les modes de fonctionnement ? . . . . . 117
  - 6.2.3. Application au fil rouge : identification des modes de fonctionnement . . . . . 119
- 6.3. Identification des fonctions du système . . . . . 120
  - 6.3.1. Définition d'une fonction du système . . . . . 120
  - 6.3.2. Que faire pour identifier les fonctions du système ? . . . . . 123
  - 6.3.3. Application au fil rouge : identification des fonctions du système . . . . . 125
- 6.4. Identification des interactions externes . . . . . 126
- 6.5. Définition des comportements du système . . . . . 127
  - 6.5.1. Objectif de la définition du comportement fonctionnel du système . . . . . 127
  - 6.5.2. Application au fil rouge : définition d'un scénario fonctionnel . . . . . 127
- 6.6. Définition des exigences du système . . . . . 129
  - 6.6.1. Pourquoi définir les exigences du système ? . . . . . 129
  - 6.6.2. Que faire pour définir les exigences du système ? . . . . . 131
  - 6.6.3. Comment définir les exigences du système : application au fil rouge . . . . . 133
- 6.7. Spécification du système . . . . . 137
  - 6.7.1. Le document de spécification . . . . . 137
  - 6.7.2. Application au fil rouge : spécification du système . . . . . 141
- 6.8. Conclusion . . . . . 142

---

<b>Chapitre 7. Validation des exigences</b> . . . . .	145
7.1. Processus général . . . . .	146
7.2. Sélectionner les méthodes et définir les procédures de validation . . . . .	147
7.3. Établir la traçabilité des exigences . . . . .	147
7.3.1. Établir la traçabilité des besoins vers les exigences . . . . .	147
7.3.2. Établir la traçabilité des exigences vers les besoins . . . . .	147
7.4. Analyse des hypothèses et des exigences induites . . . . .	148
7.4.1. Analyse des hypothèses . . . . .	148
7.4.2. Analyse des exigences induites . . . . .	148
7.5. Dérouler la validation . . . . .	148
7.5.1. Vérifier unitairement les exigences ( <i>correctness</i> ) . . . . .	149
7.5.2. Vérifier globalement les exigences ( <i>consistency</i> ) . . . . .	149
7.5.3. Valider les exigences vis-à-vis des besoins . . . . .	150
7.6. Identifier et résoudre les écarts entre les besoins et les exigences . . . . .	150
7.6.1. Identifier les écarts et les conflits . . . . .	150
7.6.2. Évaluer les conflits . . . . .	150
7.6.3. Étude des compromis . . . . .	151
7.6.4. Identifier les compromis et les impacts . . . . .	151
7.7. Enregistrer une base d'exigences validées . . . . .	151
7.8. Conclusion . . . . .	152
<b>Partie 4. Conception du système</b> . . . . .	153
<b>Chapitre 8. Conception fonctionnelle et logique</b> . . . . .	155
8.1. Conception et architecture fonctionnelle . . . . .	155
8.1.1. L'architecture fonctionnelle statique . . . . .	155
8.1.2. L'architecture fonctionnelle dynamique . . . . .	156
8.1.3. L'architecture fonctionnelle comportementale . . . . .	158
8.2. Identifier les sous-fonctions du système et leurs interactions . . . . .	159
8.2.1. Objectif de l'identification des sous-fonctions . . . . .	159
8.2.2. Approche par analyse des chaînes fonctionnelles . . . . .	160
8.2.3. Application au fil rouge : identification des sous-fonctions . . . . .	163
8.2.4. Les sorties de l'architecture statique . . . . .	166
8.2.5. Règles sur la qualité d'une décomposition fonctionnelle . . . . .	170
8.3. Analyse des interfaces fonctionnelles . . . . .	170
8.3.1. Les matrices de couplage . . . . .	170
8.3.2. Caractériser les interfaces fonctionnelles . . . . .	173
8.4. Consolidation des modes de fonctionnement . . . . .	174

- 8.4.1. Objectif de la consolidation des modes de fonctionnement . . . . 174
- 8.4.2. Que faire pour identifier les sous-modes de fonctionnement ? . . 174
- 8.4.3. Application au fil rouge : reprise des modes de fonctionnement . 176
- 8.5. Reprendre le fonctionnement du système . . . . . 179
  - 8.5.1. Objectif de la reprise du fonctionnement du système . . . . . 179
  - 8.5.2. Application au fil rouge : reprise du fonctionnement  
du système . . . . . 181
- 8.6. Proposer des regroupements des sous-fonctions  
en composants logiques . . . . . 182
  - 8.6.1. L'utilisation des composants logiques . . . . . 182
  - 8.6.2. Proposer un schéma de principe de la solution. . . . . 183
- 8.7. Allouer les exigences fonctionnelles sur les sous-fonctions . . . . . 183
  - 8.7.1. Objectif de l'allocation des exigences du système  
sur les sous-fonctions . . . . . 183
  - 8.7.2. Application au fil rouge : allocation des exigences système  
aux sous-fonctions . . . . . 185
- 8.8. Conclusion . . . . . 186

**Chapitre 9. Vérification et validation  
de l'architecture fonctionnelle . . . . . 187**

- 9.1. Vérification de l'architecture fonctionnelle . . . . . 187
- 9.2. Validation de l'architecture fonctionnelle . . . . . 188
  - 9.2.1. Sélectionner les méthodes et définir les procédures  
de validation . . . . . 189
  - 9.2.2. Établir la traçabilité. . . . . 189
  - 9.2.3. Analyse des hypothèses . . . . . 189
  - 9.2.4. Dérouler la validation . . . . . 190
  - 9.2.5. Effectuer la revalidation . . . . . 190
  - 9.2.6. Enregistrer les résultats de validation  
de l'architecture fonctionnelle . . . . . 190
- 9.3. Conclusion . . . . . 190

**Chapitre 10. Conception physique . . . . . 193**

- 10.1. Objectif de la conception physique . . . . . 193
- 10.2. Identification des composants physiques. . . . . 195
  - 10.2.1. Identifier les composants et allouer les fonctions techniques. . . 196
  - 10.2.2. Compléter l'identification des composants avec les missions  
du système . . . . . 197

10.2.3. Compléter l'identification des composants avec les exigences non fonctionnelles . . . . .	197
10.2.4. Identification des variantes dans l'architecture physique . . . . .	197
10.2.5. Construire des architectures physiques avec une approche par ligne de produits . . . . .	198
10.2.6. Construire des architectures physiques à partir d'une architecture logique . . . . .	199
10.2.7. Application au fil rouge : identification des composants . . . . .	200
10.3. Décomposition des composants . . . . .	203
10.3.1. Principes d'architecture. . . . .	204
10.3.2. Matrice de couplage. . . . .	207
10.3.3. Qualité de couplage global d'une architecture . . . . .	208
10.3.4. L'arborescence physique. . . . .	211
10.3.5. L'architecture des composants . . . . .	213
10.3.6. Application au fil rouge : composants et interfaces . . . . .	214
10.4. Caractérisation des interfaces . . . . .	217
10.5. Identification des configurations du système . . . . .	220
10.5.1. Définition d'une configuration technique . . . . .	220
10.5.2. Les activités pour identifier les configurations techniques . . . . .	221
10.5.3. Application au fil rouge : identification des configurations . . . . .	221
10.6. Identification du fonctionnement physique du système . . . . .	224
10.6.1. Définition du fonctionnement physique du système . . . . .	224
10.6.2. Application au fil rouge : scénario organique. . . . .	225
10.7. Allocation et définition des exigences des sous-systèmes . . . . .	225
10.7.1. Émergence de propriétés . . . . .	225
10.7.2. Dimensionnement de l'architecture. . . . .	228
10.7.3. Allouer les exigences non fonctionnelles . . . . .	229
10.7.4. Définition des exigences des sous-systèmes . . . . .	230
10.8. Conclusion . . . . .	232

## **Chapitre 11. Vérification et validation de l'architecture physique . . . . . 233**

11.1. Vérification de l'architecture physique . . . . .	233
11.1.1. Définir les procédures de vérification de la conception physique . . . . .	234
11.1.2. Effectuer la vérification de la conception physique . . . . .	234
11.1.3. Effectuer la revérification de la conception physique . . . . .	235
11.1.4. Enregistrer les résultats de la vérification de la conception physique . . . . .	235

11.2. Validation de l'architecture physique . . . . . 235  
 11.3. Conclusion . . . . . 237

**Chapitre 12. Évaluation et comparaison des solutions . . . . . 239**

12.1. Évaluation d'architectures . . . . . 239  
 12.1.1. Sélection des critères communs . . . . . 239  
 12.1.2. Les critères de valeurs . . . . . 239  
 12.1.3. Les critères de risques et de coûts. . . . . 240  
 12.2. Comparaison d'architectures . . . . . 240  
 12.2.1. Choisir des parties prenantes . . . . . 240  
 12.2.2. Caractériser le poids de chaque critère. . . . . 241  
 12.2.3. Faire voter les parties prenantes. . . . . 241  
 12.2.4. Comparer les architectures. . . . . 242  
 12.2.5. Justifier les choix d'architectures . . . . . 243  
 12.3. Conclusion . . . . . 243

**Partie 5. Intégration virtuelle du système . . . . . 245**

**Chapitre 13. Intégration sur un cycle en W . . . . . 247**

13.1. Intégration virtuelle et intégration réelle . . . . . 247  
 13.2. Modèles de simulation . . . . . 249  
 13.3. Conclusion . . . . . 251

**Chapitre 14. Réaliser un modèle de conception simulable . . . . . 253**

14.1. Définir les objectifs de la simulation . . . . . 253  
 14.2. La simulation et la démarche systémique . . . . . 253  
 14.3. Analyse et modélisation de l'architecture du système . . . . . 254  
 14.4. Analyse et modélisation causale. . . . . 256  
 14.4.1. Extraire les variables de simulation . . . . . 256  
 14.4.2. Les relations entre les variables . . . . . 257  
 14.4.3. Les boucles de rétroaction . . . . . 257  
 14.4.4. Application au fil rouge : analyse causale. . . . . 260  
 14.5. Formaliser le modèle de simulation. . . . . 263  
 14.5.1. La classification des variables. . . . . 263  
 14.5.2. Modélisation dynamique. . . . . 264  
 14.5.3. Application au fil rouge : formalisation du modèle causal . . . . . 266



---

14.6. Exécuter la simulation. . . . .	267
14.6.1. Identifier et paramétrer les équations. . . . .	267
14.6.2. Paramétrer la simulation . . . . .	267
14.6.3. Application au fil rouge : simulation . . . . .	267
14.7. Analyser les résultats . . . . .	269
14.7.1. Objectif de l'analyse des résultats . . . . .	269
14.7.2. Application au fil rouge : analyse des résultats. . . . .	269
14.8. Conclusion . . . . .	270
<b>Chapitre 15. Réaliser un modèle de spécification simulable. . . . .</b>	<b>271</b>
15.1. Le modèle de <i>monitoring</i> . . . . .	271
15.1.1. Pourquoi faire un modèle de <i>monitoring</i> ? . . . . .	271
15.1.2. Comment construire un modèle de <i>monitoring</i> ? . . . . .	272
15.2. Rédiger des exigences structurées. . . . .	273
15.2.1. Rappel sur la structure d'une exigence. . . . .	273
15.2.2. Application au fil rouge : sélection d'exigences structurées . . . . .	273
15.3. Formaliser les exigences en propriétés . . . . .	274
15.3.1. Les propriétés . . . . .	274
15.3.2. Comment formaliser une propriété ? . . . . .	275
15.3.3. Application au fil rouge : formalisation des propriétés . . . . .	276
15.4. Construire un modèle de <i>monitoring</i> . . . . .	278
15.4.1. Application sur une propriété . . . . .	278
15.4.2. Création du modèle de spécification . . . . .	279
15.5. Exécuter la simulation. . . . .	280
15.5.1. Connecter le modèle de spécification . . . . .	280
15.5.2. Application au fil rouge : exécution du modèle de spécification. . . . .	281
15.6. Analyser les résultats . . . . .	282
15.6.1. Résultat du modèle de spécification . . . . .	282
15.6.2. Application au fil rouge : analyse des résultats. . . . .	282
15.7. Conclusion . . . . .	287
<b>Partie 6. Intégration du système . . . . .</b>	<b>289</b>
<b>Chapitre 16. Utilisation des modèles . . . . .</b>	<b>291</b>
16.1. Les modèles en ingénierie système . . . . .	291
16.2. Typologie des modèles . . . . .	291
16.3. Les modèles analytiques comportementaux . . . . .	292

- 16.3.1. Utilisation du modèle comportemental dans la V&V . . . . . 293
- 16.3.2. Conception basée sur les modèles . . . . . 293
- 16.4. Les modèles analytiques métier . . . . . 295
  - 16.4.1. Utilisation du modèle métier dans la V&V . . . . . 296
- 16.5. Conclusion . . . . . 296
  
- Chapitre 17. Intégration, vérification et validation du système . . . . . 297**
  - 17.1. Intégration du système . . . . . 297
    - 17.1.1. Réceptionner les sous-systèmes . . . . . 298
    - 17.1.2. Assembler les sous-systèmes . . . . . 299
  - 17.2. Vérification du système . . . . . 299
    - 17.2.1. Définir la stratégie de vérification du système . . . . . 300
    - 17.2.2. Définir les procédures de vérification du système . . . . . 302
    - 17.2.3. Effectuer la vérification du système . . . . . 302
    - 17.2.4. Établir la conformité du système . . . . . 304
  - 17.3. Validation du système . . . . . 304
    - 17.3.1. Préparer la validation . . . . . 305
    - 17.3.2. Effectuer la validation . . . . . 306
    - 17.3.3. Analyser les résultats . . . . . 307
    - 17.3.4. Enregistrer les résultats de la validation . . . . . 307
  - 17.4. Conclusion . . . . . 307
  
- Conclusion . . . . . 309**
  
- Bibliographie . . . . . 311**
  
- Liste des auteurs . . . . . 315**
  
- Index . . . . . 317**