

IC2

Traité Informatique et Systèmes d'Information

# **Simulation et modélisation des systèmes de systèmes**

*vers la maîtrise de la complexité*

*sous la direction de*

**Pascal Cantot**

**Dominique Luzeaux**

**hermes**

*Lavoisier*

# Table des matières

|                                                                                         |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Introduction</b> . . . . .                                                           | 17 |
| Pascal CANTOT et Dominique LUZEAUX                                                      |    |
| <b>Chapitre 1. La simulation : historique, concepts et exemples</b> . . . . .           | 21 |
| Pascal CANTOT                                                                           |    |
| 1.1. Les enjeux : la simulation, outil de la complexité . . . . .                       | 21 |
| 1.1.1. Qu'est-ce qu'un système complexe ? . . . . .                                     | 21 |
| 1.1.2. Cas des systèmes de systèmes . . . . .                                           | 24 |
| 1.1.3. Pourquoi simuler ? . . . . .                                                     | 25 |
| 1.1.4. Peut-on se passer de la simulation ? . . . . .                                   | 32 |
| 1.2. Historique de la simulation . . . . .                                              | 35 |
| 1.2.1. Antiquité : les jeux de stratégie . . . . .                                      | 35 |
| 1.2.2. L'époque moderne : les fondements théoriques . . . . .                           | 36 |
| 1.2.3. Epoque contemporaine : la révolution des technologies<br>informatiques . . . . . | 38 |
| 1.3. Quelques exemples d'emploi actuels de la simulation. . . . .                       | 45 |
| 1.3.1. Cas d'Airbus . . . . .                                                           | 45 |
| 1.3.2. Cas de la délégation générale pour l'armement . . . . .                          | 48 |
| 1.4. Principes de base. . . . .                                                         | 51 |
| 1.4.1. Définitions . . . . .                                                            | 51 |
| 1.4.2. Typologie. . . . .                                                               | 57 |
| 1.5. Conclusion . . . . .                                                               | 73 |
| 1.6. Bibliographie . . . . .                                                            | 73 |

## **Chapitre 2. Principes de modélisation . . . . . 77**

Pascal CANTOT

|                                                 |     |
|-------------------------------------------------|-----|
| 2.1. Généralités sur la modélisation . . . . .  | 77  |
| 2.2. Typologie des modèles . . . . .            | 78  |
| 2.2.1. Statique/Dynamique . . . . .             | 79  |
| 2.2.2. Déterministe/stochastique . . . . .      | 79  |
| 2.2.3. Qualités d'un modèle. . . . .            | 83  |
| 2.3. Processus de modélisation . . . . .        | 87  |
| 2.3.1. Processus global. . . . .                | 88  |
| 2.3.2 Définition du problème . . . . .          | 89  |
| 2.3.3. Objectifs et organisation . . . . .      | 91  |
| 2.3.4. Analyse du système. . . . .              | 92  |
| 2.3.5. Modélisation . . . . .                   | 97  |
| 2.3.6. Collecte des données . . . . .           | 99  |
| 2.3.7. Codage/implantation . . . . .            | 104 |
| 2.3.8. Vérification . . . . .                   | 108 |
| 2.3.9. Validation . . . . .                     | 108 |
| 2.3.10. Exécution . . . . .                     | 109 |
| 2.3.11. Exploitation des résultats. . . . .     | 110 |
| 2.3.12. Rapport final . . . . .                 | 112 |
| 2.3.13. Mise en service/Capitalisation. . . . . | 112 |
| 2.4. Gestion de projet de simulation . . . . .  | 113 |
| 2.5. Conclusion . . . . .                       | 116 |
| 2.6. Bibliographie . . . . .                    | 116 |

## **Chapitre 3. Crédibilité des modélisations et des simulations . . . . . 121**

Roland RABEAU

|                                                                       |     |
|-----------------------------------------------------------------------|-----|
| 3.1. Les études et simulations technico-opérationnelles . . . . .     | 121 |
| 3.2. Exemples d'ETO s'appuyant sur des outils de simulation . . . . . | 123 |
| 3.2.1. Suppression des défenses aériennes . . . . .                   | 123 |
| 3.2.2. Hélicoptères lourds . . . . .                                  | 124 |
| 3.3. VV&A des simulations technico-opérationnelles . . . . .          | 124 |
| 3.3.1. Définitions officielles . . . . .                              | 124 |
| 3.3.2. Crédibilité . . . . .                                          | 125 |
| 3.3.3. Principaux acteurs du domaine . . . . .                        | 127 |
| 3.4. Problématique du VVA. . . . .                                    | 131 |
| 3.4.1. Eléments concernés. . . . .                                    | 131 |



|                                                                         |     |
|-------------------------------------------------------------------------|-----|
| 3.4.2. Techniques de vérification et validation. . . . .                | 137 |
| 3.4.3. Démarches de vérification, validation et accréditation . . . . . | 147 |
| 3.4.4. Responsabilités dans une démarche VV&A . . . . .                 | 167 |
| 3.4.5. Niveaux de validation . . . . .                                  | 169 |
| 3.4.6. Accréditation. . . . .                                           | 170 |
| 3.5. Conclusions. . . . .                                               | 171 |
| 3.5.1. Techniques de validation . . . . .                               | 171 |
| 3.5.2. Démarches de validation. . . . .                                 | 173 |
| 3.5.3. Perspectives . . . . .                                           | 175 |
| 3.6. Bibliographie. . . . .                                             | 178 |

## **Chapitre 4. Modélisation des systèmes et de leur environnement . . . . . 185**

Pascal CANTOT

|                                                                                            |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 4.1. Généralités . . . . .                                                                 | 185 |
| 4.2. La modélisation du temps . . . . .                                                    | 186 |
| 4.2.1. Simulation temps réel . . . . .                                                     | 186 |
| 4.2.2. Simulation pas à pas . . . . .                                                      | 187 |
| 4.2.3. Simulation à événements discrets . . . . .                                          | 188 |
| 4.2.4. Quelle approche choisir ? . . . . .                                                 | 188 |
| 4.2.5. Cas de la simulation distribuée . . . . .                                           | 189 |
| 4.3. Modélisation des lois physiques. . . . .                                              | 190 |
| 4.3.1. Comprendre le système . . . . .                                                     | 190 |
| 4.3.2. Obtention d'un système d'équations. . . . .                                         | 190 |
| 4.3.3. Discrétisation de l'espace . . . . .                                                | 191 |
| 4.3.4. Résolution du problème . . . . .                                                    | 192 |
| 4.4. Modélisation des phénomènes aléatoires . . . . .                                      | 193 |
| 4.4.1. Les processus stochastiques . . . . .                                               | 193 |
| 4.4.2. Utilisation des probabilités . . . . .                                              | 193 |
| 4.4.3. Utilisation des statistiques . . . . .                                              | 197 |
| 4.4.4. Générateurs aléatoires . . . . .                                                    | 200 |
| 4.4.5. Exécution et dépouillement des résultats<br>d'une simulation stochastique . . . . . | 202 |
| 4.5. Modélisation de l'environnement naturel . . . . .                                     | 205 |
| 4.5.1. Environnement naturel. . . . .                                                      | 205 |
| 4.5.2. Bases de données d'environnement . . . . .                                          | 205 |
| 4.5.3. Production d'une BDES . . . . .                                                     | 207 |
| 4.5.4. Qualité d'une BDES . . . . .                                                        | 209 |

|                                                        |     |
|--------------------------------------------------------|-----|
| 4.5.5. Systèmes de coordonnées . . . . .               | 210 |
| 4.5.6. Multiplicité des formats . . . . .              | 212 |
| 4.6. Modélisation du comportement humain . . . . .     | 220 |
| 4.6.1. Enjeux et limites . . . . .                     | 220 |
| 4.6.2. Qu'est-ce qu'un comportement humain ? . . . . . | 222 |
| 4.6.3. Le processus décisionnel. . . . .               | 224 |
| 4.6.4. La perception de l'environnement . . . . .      | 225 |
| 4.6.5. Les facteurs humains . . . . .                  | 226 |
| 4.6.6. Techniques de modélisation. . . . .             | 227 |
| 4.6.7. Perspectives . . . . .                          | 230 |
| 4.7. Bibliographie . . . . .                           | 231 |

## **Chapitre 5. Modélisation et simulation de systèmes complexes :**

### **pièges et limites des interprétations . . . . . 235**

Dominique LUZEAUX

|                                                                                                       |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 5.1. Introduction. . . . .                                                                            | 235 |
| 5.2. Des systèmes complexes, des modèles, des simulations<br>et de leur lien avec la réalité. . . . . | 237 |
| 5.2.1. Systèmes . . . . .                                                                             | 237 |
| 5.2.2. Complexité. . . . .                                                                            | 239 |
| 5.2.3. Parcours dans la jungle des concepts : modèles, modélisation,<br>simulation . . . . .          | 244 |
| 5.3. Deux caractéristiques principales de la simulation des systèmes<br>complexes . . . . .           | 247 |
| 5.3.1. La clé de la complexité : la non-linéarité . . . . .                                           | 247 |
| 5.3.2. Limites informatiques : dénombrabilité et calculabilité . . . . .                              | 252 |
| 5.3.3. Modèle discret ou continu ? . . . . .                                                          | 256 |
| 5.4. Retour sur quelques familles de modèles . . . . .                                                | 257 |
| 5.4.1. Approches équationnelles . . . . .                                                             | 259 |
| 5.4.2. Approches calculatoires . . . . .                                                              | 262 |
| 5.4.3. Approches qualitatives phénoménologiques . . . . .                                             | 267 |
| 5.4.4. Approche qualitative structuraliste : application de la théorie<br>des catégories . . . . .    | 271 |
| 5.5. Exemple des opérations militaires basées sur les effets<br>et de contre-insurrection . . . . .   | 274 |
| 5.6. Conclusion . . . . .                                                                             | 277 |
| 5.7. Bibliographie . . . . .                                                                          | 280 |



**Chapitre 6. Moteurs de simulation et structures d'accueil . . . . . 285**

Pascal CANTOT

|                                                                         |     |
|-------------------------------------------------------------------------|-----|
| 6.1. Généralités . . . . .                                              | 285 |
| 6.2. Moteur de simulation . . . . .                                     | 286 |
| 6.2.1. Evolution des variables d'état. . . . .                          | 286 |
| 6.2.2. Gestion des événements et causalité . . . . .                    | 287 |
| 6.2.3. Modes de simulation . . . . .                                    | 289 |
| 6.2.4. Exemple concret. . . . .                                         | 290 |
| 6.3. Les structures d'accueil de simulation . . . . .                   | 292 |
| 6.3.1. Quelques rappels d'ingénierie du logiciel. . . . .               | 292 |
| 6.3.2. Les structures d'accueil . . . . .                               | 301 |
| 6.3.3. Obstacles à la mise en œuvre d'une structure d'accueil . . . . . | 303 |
| 6.3.4. Exemple détaillé : ESCADRE . . . . .                             | 305 |
| 6.4. La capitalisation des modèles . . . . .                            | 324 |
| 6.5. Conclusion et perspectives . . . . .                               | 325 |
| 6.6. Bibliographie . . . . .                                            | 326 |

**Chapitre 7. La simulation distribuée . . . . . 329**

Jean-Louis IGARZA

|                                                                          |     |
|--------------------------------------------------------------------------|-----|
| 7.1. Généralités . . . . .                                               | 329 |
| 7.1.1. Le principe . . . . .                                             | 329 |
| 7.1.2. Historique . . . . .                                              | 331 |
| 7.1.3. Quelques définitions . . . . .                                    | 333 |
| 7.1.4. L'interopérabilité en simulation . . . . .                        | 335 |
| 7.1.5. La standardisation. . . . .                                       | 336 |
| 7.1.6. Les avantages et les limites de la simulation distribuée. . . . . | 337 |
| 7.1.7. Quelques compléments. . . . .                                     | 338 |
| 7.2. Les mécanismes de base de la simulation distribuée. . . . .         | 339 |
| 7.2.1. Quelques grands principes. . . . .                                | 340 |
| 7.2.2. Mise à jour des attributs . . . . .                               | 341 |
| 7.2.3. Les interactions . . . . .                                        | 342 |
| 7.2.4. La gestion du temps . . . . .                                     | 343 |
| 7.2.5. Le <i>dead reckoning</i> ou principe d'extrapolation . . . . .    | 344 |
| 7.2.6. Modélisation multi-niveau. . . . .                                | 345 |
| 7.2.7. Conclusion intermédiaire . . . . .                                | 346 |
| 7.3. Les principaux standards d'interopérabilité . . . . .               | 347 |
| 7.3.1. Historique . . . . .                                              | 347 |

|                                                                                                   |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 7.3.2. L'architecture de haut niveau . . . . .                                                    | 348 |
| 7.3.3. DIS . . . . .                                                                              | 355 |
| 7.3.4. TENA . . . . .                                                                             | 357 |
| 7.3.5. Le futur de la simulation distribué : l'étude LVC AR . . . . .                             | 360 |
| 7.3.6. Autres standards d'intérêts pour la simulation distribuée. . . . .                         | 361 |
| 7.4. Les aspects méthodologiques : processus d'ingénierie<br>de la simulation distribuée. . . . . | 362 |
| 7.4.1. Le FEDEP . . . . .                                                                         | 363 |
| 7.4.2. Le SEDEP . . . . .                                                                         | 365 |
| 7.4.3. Le DSEEP . . . . .                                                                         | 366 |
| 7.5. Conclusion : l'état de l'art : vers l'interopérabilité « substantive » . . .                 | 367 |
| 7.6. Bibliographie. . . . .                                                                       | 367 |

## Chapitre 8. Le concept de *Battlelab* . . . . . 369

Pascal CANTOT

|                                                                    |     |
|--------------------------------------------------------------------|-----|
| 8.1. Introduction. . . . .                                         | 369 |
| 8.2. Le laboratoire technico-opérationnel (LTO) français . . . . . | 372 |
| 8.2.1. Historique . . . . .                                        | 372 |
| 8.2.2. Objectifs du LTO . . . . .                                  | 373 |
| 8.2.3. Principes du LTO . . . . .                                  | 375 |
| 8.2.4. Les services du LTO . . . . .                               | 377 |
| 8.2.5. Processus d'expérimentation . . . . .                       | 379 |
| 8.2.6. Présentation d'une expérimentation : PHOENIX 2008 . . . . . | 383 |
| 8.2.7. Bilan et perspectives du LTO . . . . .                      | 385 |
| 8.3. Le projet Niteworks britannique . . . . .                     | 386 |
| 8.4. Conclusion et perspectives. . . . .                           | 387 |
| 8.5. Bibliographie. . . . .                                        | 388 |

## Chapitre 9. Conclusion : quel retour sur investissement peut-on attendre de la simulation ? . . . . . 391

Dominique LUZEAUX

|                                                                                             |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 9.1. Retour sur la simulation pour l'acquisition . . . . .                                  | 391 |
| 9.2. Analyse économique du gain de l'utilisation intelligente<br>de la simulation . . . . . | 393 |
| 9.2.1. Surcoût de la SACQ . . . . .                                                         | 394 |

|                                                                                                      |            |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 9.2.2. Surcoût dû à un événement imprévu ou une mauvaise<br>planification. . . . .                   | 401        |
| 9.3. Acquisition multi-projet . . . . .                                                              | 403        |
| 9.4. En guide de conclusion (quasi) définitive : les conditions de succès<br>de la démarche. . . . . | 405        |
| 9.5. Bibliographie. . . . .                                                                          | 407        |
| <br>                                                                                                 |            |
| <b>Index . . . . .</b>                                                                               | <b>411</b> |



L'informatique, omniprésente dans notre vie, est multiforme. A la fois profondément unitaire quant à ses principes d'écriture et ceux qui sont à la base des machines, l'informatique est infiniment variée par ses applications.

**INFORMATIQUE ET SYSTÈMES D'INFORMATION** couvre l'ensemble des domaines suivants :

- Apprentissage
- Arithmétique des ordinateurs
- Bases de données
- Bioinformatique
- Représentation des connaissances
- Informatique parallèle et répartie
- Logique et programmation
- Recherche d'information et web
- Recherche opérationnelle

Chaque ouvrage décrit les aspects aussi bien fondamentaux qu'expérimentaux. Une classification des différents chapitres contenus dans chacun, une bibliographie et un index détaillé orientent le lecteur vers ses points d'intérêt immédiats : celui-ci dispose ainsi d'un guide pour ses réflexions et ses choix.

Sur chaque aspect, le traité s'efforce de marier chapitres de synthèse et connaissances les plus récentes pour donner au lecteur le panorama complet d'un sujet.

