

COLLECTION INFORMATIQUE

# Prototypage rapide de logiciel pour les systèmes avioniques

*approches orientées modèle  
pour la certification de systèmes complexes*

Nicolas Larrieu et Antoine Varet



**ISTE**  
editions

---

# Table des matières

---

|   |    |
|---|----|
| <b>Introduction</b> . . . . .   | 9  |
| <b>Chapitre 1. Evolution des méthodes de conception orientée<br/>modèle en génie logiciel</b> . . . . . | 15 |
| 1.1. Historique de la conception orientée modèle . . . . .  | 15 |
| 1.2. L' <i>Unified Modeling Language</i> , support des méthodes orientées<br>modèle . . . . .           | 17 |
| 1.2.1. Philosophie et histoire de l' <i>Unified Modeling Language</i> . . . . .                         | 17 |
| 1.2.2. Les diagrammes normalisés de l' <i>Unified Modeling Language</i> . . . . .                       | 18 |
| 1.2.3. Avantages de la conception orientée modèle . . . . .   | 24 |
| 1.3. Les techniques de validation formelle basées sur les modèles . . . . .                             | 25 |
| 1.3.1. <i>Model Checking</i> . . . . .  | 25 |
| 1.3.2. Preuves formelles . . . . .  | 28 |
| 1.3.3. Assertion de code . . . . .  | 29 |
| 1.3.4. Application à la certification de systèmes complexes. . . . .                                    | 30 |
| <b>Chapitre 2. Méthodologie de prototypage rapide<br/>pour un logiciel avionique</b> . . . . .          | 33 |
| 2.1. Les spécificités du domaine avionique . . . . .  | 33 |
| 2.1.1. Virtualisation des systèmes : <i>Integrated Modular Avionics</i> . . . . .                       | 34 |
| 2.1.1.1. Interface ARINC 653 APEX : <i>Application Executive</i> . . . . .                              | 35 |
| 2.1.1.2. Bus AFDX : <i>Avionics Full-Duplex switched Ethernet</i> . . . . .                             | 35 |
| 2.1.2. Le MILS : diviser pour mieux régner sur un monde sûr . . . . .                                   | 36 |
| 2.1.3. Traitement conjoint des aspects sûreté et sécurité . . . . .                                     | 38 |
| 2.2. La certification d'un système avionique . . . . .  | 40 |

|  |           |
|--|-----------|
| 2.2.1. Qualification d'outils pour la certification . . . . .  | 40        |
| 2.2.2. Les approches de développement orienté modèle<br>dans l'aéronautique. . . . .   | 41        |
| 2.2.2.1. DO-178C : <i>Software Considerations</i><br><i>in Airborne Systems and Equipment Certification</i> . . . . .                                | 42        |
| 2.2.2.2. DO-331 : <i>Model-Based Development and Verification</i> . . . . .  | 42        |
| 2.2.3. Une méthodologie élaborée pour le développement<br>des systèmes embarqués complexes. . . . .  | 42        |
| 2.3. La méthodologie de développement rapide en sept étapes . . . . .  | 43        |
| 2.3.1. Présentation des différentes étapes. . . . .  | 43        |
| 2.3.2. Avantages de la méthodologie . . . . .  | 45        |
| 2.3.3. Exemple de bénéfice dans l'utilisation de notre méthodologie<br>orientée modèle . . . . .   | 49        |
| 2.3.4. Instanciation de la méthodologie avec différents outils. . . . .  | 50        |
| 2.3.4.1. Synthèse des chaînes d'outils compatibles. . . . .  | 50        |
| 2.3.4.2. Organisation de l'architecture de la solution logicielle. . . . .   | 52        |
| 2.3.4.3. Conception : modélisation avec Simulink et Stateflow . . . . .  | 54        |
| 2.3.4.4. Transformation avec Gene-Auto vers le langage C. . . . .  | 55        |
| 2.3.4.5. Exécution avec un système d'exploitation embarqué<br>durci . . . . .  | 56        |
| 2.4. Résumé du chapitre . . . . .  | 61        |
| <br>   |           |
| <b>Chapitre 3. Mise en œuvre de la méthodologie de prototypage<br/>pour le développement d'un routeur avionique de nouvelle génération . . . . .</b> | <b>63</b> |
| 3.1. Introduction aux domaines des communications aéronautiques<br>de nouvelle génération . . . . .  | 63        |
| 3.1.1. Domaines réseaux avioniques et aéronautiques . . . . .  | 63        |
| 3.1.2. Standards et protocoles de communications<br>pour l'aéronautique de nouvelle génération . . . . .   | 66        |
| 3.1.3. Apport d'un routeur avionique de nouvelle génération :<br>routeur SNG (sécurisé de nouvelle génération) . . . . .                             | 68        |
| 3.1.3.1. Interconnexion des domaines avioniques<br>par un routeur de nouvelle génération. . . . .  | 68        |
| 3.1.3.2. Mutualisation des liaisons aéronautiques sol-bord<br>par un routeur de nouvelle génération. . . . .   | 69        |
| 3.2. Mise en œuvre du routeur SNG . . . . .  | 71        |
| 3.2.1. Architecture du logiciel du routeur SNG . . . . .   | 71        |
| 3.2.2. Fonctionnalités de routage (IPv4) . . . . .   | 73        |
| 3.2.2.1. Les principes du routage pour le SNG . . . . .  | 73        |
| 3.2.2.2. Mise en œuvre des fonctionnalités de routage . . . . .  | 74        |

---

|  |     |
|--|-----|
| 3.2.3. Fonctionnalités de filtrage (IPv4) . . . . .  | 78  |
| 3.2.3.1. Les principes du filtrage pour le SNG. . . . .  | 78  |
| 3.2.3.2. Mise en œuvre des fonctionnalités de filtrage . . . . .                                       | 78  |
| 3.3. Evaluation des performances du routeur SNG . . . . .  | 81  |
| 3.3.1. Cadre expérimental . . . . .  | 82  |
| 3.3.1.1. Topologie réseau considérée . . . . .   | 82  |
| 3.3.2. Métriques et outils d'évaluation des performances . . . . .                                     | 84  |
| 3.3.2.1. Métriques sélectionnées . . . . .   | 84  |
| 3.3.2.2. Outils de mesure choisis. . . . .   | 85  |
| 3.3.2.3. Utilisation des outils actifs pour générer<br>du trafic de charge . . . . .                   | 87  |
| 3.3.2.4. Plate-forme matérielle utilisée pour l'évaluation<br>des performances du routeur SNG. . . . . | 89  |
| 3.3.3. Résultats des mesures de performance . . . . .  | 90  |
| 3.3.3.1. Impact du nombre de flux traités par le routeur SNG<br>sur ses performances. . . . .          | 91  |
| 3.3.3.2. Impact des mécanismes de sécurisation<br>sur les performances . . . . .                       | 94  |
| 3.3.3.3. Disponibilité du routeur sur une semaine. . . . .   | 95  |
| 3.3.3.4. Performances globales du système . . . . .  | 96  |
| 3.4. Résumé du chapitre . . . . .  | 97  |
| <b>Conclusion</b> . . . . .  | 99  |
| <b>Bibliographie</b> . . . . .   | 105 |
| <b>Index</b> . . . . .   | 115 |