

# Table des matières

|  |    |
|--|----|
| <b>Chapitre 1. Introduction aux systèmes embarqués</b> . . . . .                         | 15 |
| Ahmed-Amine JERRYAYA   |    |
| 1.1. Introduction . . . . .  | 15 |
| 1.2. Les systèmes sur puces . . . . .  | 16 |
| 1.3. La conception des systèmes sur puces . . . . .                                      | 20 |
| 1.4. Structure de l'ouvrage. . . . .   | 23 |
| 1.5. Bibliographie . . . . .   | 24 |
| <br>   |    |
| <b>Chapitre 2. La conception du logiciel</b> . . . . .                                   | 25 |
| Lovic GAUTHIER   |    |
| 2.1. Les systèmes embarqués . . . . .  | 26 |
| 2.1.1. Caractéristiques des systèmes embarqués . . . . .                                 | 26 |
| 2.1.2. Les contraintes des systèmes embarqués . . . . .                                  | 27 |
| 2.2. Les systèmes embarqués spécifiques . . . . .  | 27 |
| 2.3. Les systèmes monopuces . . . . .  | 27 |
| 2.4. Architecture des systèmes embarqués . . . . .                                       | 28 |
| 2.4.1. Les systèmes embarqués de première génération . . . . .                           | 28 |
| 2.4.1.1. Partie matérielle des systèmes embarqués<br>de première génération. . . . .     | 28 |
| 2.4.1.2. Partie logicielle des systèmes embarqués<br>de première génération. . . . .     | 29 |
| 2.4.2. Les systèmes embarqués de deuxième génération . . . . .                           | 29 |
| 2.4.2.1. Partie matérielle des systèmes embarqués<br>de deuxième génération . . . . .    | 30 |
| 2.4.2.2. Partie logicielle des systèmes embarqués<br>de deuxième génération . . . . .    | 30 |
| 2.4.3. Les systèmes embarqués de troisième génération . . . . .                          | 31 |
| 2.4.3.1. Parties matérielles des systèmes embarqués<br>de troisième génération . . . . . | 31 |

|  |    |
|--|----|
| 2.4.3.2. Parties logicielles des systèmes embarqués de troisième génération . . . . .  | 32 |
| 2.5. Conception des systèmes embarqués . . . . .                                       | 32 |
| 2.5.1. Flots classiques de conception des systèmes embarqués . . . . .                 | 33 |
| 2.5.1.1. Le flot. . . . .  | 33 |
| 2.5.1.2. Les limitations du flot classique . . . . .                                   | 34 |
| 2.5.2. Flots de conception récents . . . . .   | 35 |
| 2.5.2.1. Codéveloppement. . . . .  | 35 |
| 2.5.2.2. Cosimulation . . . . .  | 36 |
| 2.6. Exemple de flot de conception pour systèmes monopuces . . . . .                   | 37 |
| 2.6.1. Présentation générale . . . . .   | 37 |
| 2.6.1.1. Domaine d'application. . . . .  | 37 |
| 2.6.1.2. Les restrictions . . . . .  | 37 |
| 2.6.1.3. Le modèle de représentation de base . . . . .                                 | 38 |
| 2.6.1.4. Architecture générale du flot . . . . .                                       | 41 |
| 2.6.2. Architecture détaillée du flot . . . . .  | 42 |
| 2.6.2.1. L'entrée du flot au niveau fonctionnel . . . . .                              | 42 |
| 2.6.2.2. Etape de traduction vers Colif . . . . .                                      | 45 |
| 2.6.2.3. Etape d'allocation mémoire et de synthèse de la communication . . . . .       | 45 |
| 2.6.2.4. Etape d'affectation et d'optimisation de mémoire. . . . .                     | 45 |
| 2.6.2.5. Etape de génération d'architecture mémoire . . . . .                          | 46 |
| 2.6.2.6. Etape de génération d'interfaces matérielles . . . . .                        | 46 |
| 2.6.2.7. Etape de génération de systèmes d'exploitation . . . . .                      | 47 |
| 2.6.2.8. Les étapes de simulation. . . . .   | 47 |
| 2.6.2.9. Utilisation des résultats de simulation. . . . .                              | 48 |
| 2.7. De la compilation au ciblage du logiciel. . . . .                                 | 48 |
| 2.7.1. Introduction sur la compilation . . . . .                                       | 48 |
| 2.7.1.1. Définitions de la compilation . . . . .                                       | 49 |
| 2.7.1.2. Exemple de la compilation du langage C vers le langage d'assemblage . . . . . | 49 |
| 2.7.2. Le ciblage logiciel en général . . . . .  | 51 |
| 2.7.2.1. Notion d'exécutable . . . . .   | 51 |
| 2.7.2.2. Définition du ciblage logiciel . . . . .                                      | 52 |
| 2.7.2.3. Ciblage logiciel idéal. . . . .   | 52 |
| 2.7.3. Représentations pour le ciblage logiciel. . . . .                               | 53 |
| 2.7.3.1. Représentations initiales pour le ciblage logiciel . . . . .                  | 53 |
| 2.7.3.2. Les étapes du ciblage logiciel. . . . .                                       | 54 |
| 2.7.4. Le ciblage logiciel pour les architectures spécifiques . . . . .                | 57 |
| 2.7.4.1. Difficultés du ciblage logiciel . . . . .                                     | 57 |
| 2.7.4.2. Faisabilité de l'automatisation du ciblage logiciel . . . . .                 | 62 |
| 2.7.4.3. Les systèmes d'exploitation dans le ciblage logiciel . . . . .                | 64 |
| 2.8. Conclusion . . . . .  | 65 |
| 2.9. Bibliographie . . . . .   | 65 |

|  |    |
|--|----|
| <b>Chapitre 3. Etat de l'art sur les systèmes d'exploitation</b> . . . . .                               | 69 |
| Lovic GAUTHIER   |    |
| 3.1. Introduction sur les systèmes d'exploitation . . . . .  | 69 |
| 3.1.1. Systèmes d'exploitation : définitions . . . . .   | 70 |
| 3.1.1.1. Un système d'exploitation en tant qu'abstraction du matériel. . . . .                           | 70 |
| 3.1.1.2. Un système d'exploitation en tant que gestionnaire de ressources . . . . .                      | 71 |
| 3.1.1.3. Elargissement du terme système d'exploitation . . . . .   | 72 |
| 3.1.2. Propriétés des systèmes d'exploitation . . . . .  | 72 |
| 3.1.2.1. Modèles d'exécution pour les programmes. . . . .  | 73 |
| 3.1.2.2. Modèles temporels . . . . .   | 75 |
| 3.1.2.3. Modes de fonctionnement . . . . .   | 77 |
| 3.1.2.4. Modèles de mémoire pour un système d'exploitation . . . . .                                     | 78 |
| 3.1.2.5. Les services rendus par un système d'exploitation . . . . .                                     | 81 |
| 3.1.3. Quelques exemples de systèmes d'exploitation . . . . .  | 81 |
| 3.1.3.1. DOS [THO 93] . . . . .  | 82 |
| 3.1.3.2. Windows 3.x [PRE 97] . . . . .  | 82 |
| 3.1.3.3. UNIX [BOU 85] . . . . .   | 83 |
| 3.1.3.4. Windows NT [SOL 98] . . . . .   | 83 |
| 3.1.3.5. QNX [QNX]. . . . .  | 83 |
| 3.1.4. Remarques sur les systèmes d'exploitation multiprocesseurs . . . . .                              | 84 |
| 3.2. Les systèmes d'exploitation dans les systèmes embarqués . . . . .                                   | 84 |
| 3.2.1. Fonctionnalités requises pour le logiciel<br>dans les systèmes embarqués . . . . .                | 85 |
| 3.2.1.1. Fonctionnalités communes avec les systèmes<br>d'exploitation généraux . . . . .                 | 85 |
| 3.2.1.2. Fonctionnalités de communication spécifique . . . . .   | 85 |
| 3.2.1.3. Fonctionnalités temporelles . . . . .   | 87 |
| 3.2.1.4. Pilotes de périphériques . . . . .  | 88 |
| 3.2.1.5. Conséquence des fonctionnalités requises<br>sur les systèmes d'exploitation embarqués . . . . . | 88 |
| 3.2.2. Contraintes imposées par les systèmes embarqués pour le logiciel . . . . .                        | 88 |
| 3.2.2.1. Contraintes en surface et consommation . . . . .  | 88 |
| 3.2.2.2. Contraintes temporelles . . . . .   | 89 |
| 3.2.2.3. Contraintes en mémoire . . . . .  | 90 |
| 3.2.2.4. Les erreurs . . . . .   | 90 |
| 3.2.2.5. L'aspect multiprocesseur hétérogène . . . . .   | 90 |
| 3.2.3. Les degrés de liberté pour le logiciel<br>dans les systèmes embarqués . . . . .                   | 91 |
| 3.2.3.1. Gestion utilisateurs simple . . . . .   | 91 |
| 3.2.3.2. Evolution du logiciel lente . . . . .   | 91 |
| 3.2.4. Exemples de systèmes embarqués généralistes. . . . .  | 91 |
| 3.2.4.1. Les systèmes d'exploitation embarqués propriétaires . . . . .                                   | 91 |
| 3.2.4.2. Les extensions temps-réel . . . . .   | 92 |
| 3.2.5. Avantages et inconvénients des systèmes d'exploitation<br>pour les systèmes embarqués . . . . .   | 92 |

|  |     |
|--|-----|
| 3.2.5.1. Avantages des systèmes d'exploitation pour les systèmes embarqués . . . . .   | 92  |
| 3.2.5.2. Inconvénients des systèmes d'exploitation pour les systèmes embarqués . . . . .   | 93  |
| 3.2.5.3. Solutions alternatives aux systèmes d'exploitation . . . . .  | 94  |
| 3.3. Intégration des systèmes d'exploitation dans les flots de conception . . . . .  | 96  |
| 3.3.1. Méthode classique : système d'exploitation fixe et écriture à la main du code des applications adopté au système. . . . . | 96  |
| 3.3.1.1. Présentation du flot . . . . .  | 97  |
| 3.3.1.2. Les architectures visées par ce flot classique. . . . .   | 97  |
| 3.3.1.3. Les inconvénients et limitations de ce flot . . . . .   | 98  |
| 3.3.2. De nos jours : configuration des systèmes d'exploitation . . . . .  | 99  |
| 3.3.2.1. Les systèmes d'exploitation modulaires . . . . .  | 99  |
| 3.3.2.2. Les constructeurs de systèmes d'exploitation . . . . .  | 100 |
| 3.3.2.3. Les inconvénients et limitations de ces flots . . . . .   | 101 |
| 3.3.3. Approches récentes . . . . .  | 103 |
| 3.3.3.1. Combiner génération de code séquentiel et utilisation d'un système d'exploitation. . . . .                              | 103 |
| 3.3.3.2. Systèmes d'exploitation abstraits . . . . .   | 104 |
| 3.3.3.3. Spécialisation de système d'exploitation . . . . .  | 105 |
| 3.3.3.4. Génération d'exécutif (travail de T. Grandpierre) . . . . .   | 105 |
| 3.4. Conclusion . . . . .  | 106 |
| 3.5. Bibliographie . . . . .   | 107 |

**Chapitre 4. Ciblage automatique avec génération de systèmes d'exploitation . . . . .**

|  |     |
|--|-----|
| Lovic GAUTHIER . . . . .   | 111 |
| 4.1. Les représentations pour le flot de ciblage. . . . .  | 111 |
| 4.1.1. Organisation générale des représentations utilisées pour la génération de systèmes d'exploitation . . . . . | 111 |
| 4.1.2. Construction des langages Lidel et Colif . . . . .  | 113 |
| 4.1.2.1. Motivations pour introduire le langage Middle . . . . .   | 113 |
| 4.1.2.2. Utilisation de XML . . . . .  | 113 |
| 4.1.2.3. Le langage Middle . . . . .   | 115 |
| 4.1.3. La bibliothèque de systèmes d'exploitation. . . . .   | 116 |
| 4.1.3.1. Concepts de base pour la bibliothèque . . . . .   | 116 |
| 4.1.3.2. Détails sur les objets de la bibliothèque . . . . .   | 119 |
| 4.1.3.3. Utilisation des objets de la bibliothèque . . . . .   | 122 |
| 4.1.4. Choix d'organisation et de sémantique pour la bibliothèque. . . . .   | 122 |
| 4.1.4.1. Hiérarchie des services. . . . .  | 122 |
| 4.1.4.2. Hiérarchie des médias . . . . .   | 124 |
| 4.1.4.3. Choix pour la représentation du code des éléments . . . . .   | 124 |
| 4.1.4.4. Exemple de bibliothèque de système d'exploitation . . . . .   | 126 |
| 4.1.5. La spécification d'entrée du flot de ciblage . . . . .  | 127 |
| 4.1.5.1. Colif. . . . .  | 127 |

|  |     |
|--|-----|
| 4.1.5.2. Interprétation de Colif pour le ciblage logiciel . . . . .  | 129 |
| 4.1.6. Les macros qui encapsulent le code du système d'exploitation . . . . .  | 131 |
| 4.1.6.1. Intérêt de la macrogénération . . . . .   | 131 |
| 4.1.6.2. Le langage d'expansion de macro choisi . . . . .  | 132 |
| 4.1.6.3. Principales caractéristiques du langage de macro Rive . . . . .   | 132 |
| 4.2. La génération automatique de système d'exploitation . . . . .   | 133 |
| 4.2.1. Architecture globale du flot de ciblage<br>avec génération de systèmes d'exploitation . . . . .                           | 133 |
| 4.2.1.1. Principe de la génération de systèmes d'exploitation . . . . .  | 133 |
| 4.2.1.2. Présentation générale du flot de ciblage<br>avec génération de systèmes d'exploitation . . . . .                        | 133 |
| 4.2.2. Description détaillée des entrées du flot . . . . .   | 135 |
| 4.2.2.1. Description de l'architecture matérielle et logicielle . . . . .  | 135 |
| 4.2.2.2. Les allocations de ressources locales au processeur . . . . .   | 136 |
| 4.2.2.3. Description du comportement de l'application logicielle . . . . .   | 138 |
| 4.2.2.4. La bibliothèque de systèmes d'exploitation . . . . .  | 138 |
| 4.2.3. Description des sorties du flot . . . . .   | 138 |
| 4.2.4. Enchaînement détaillé des étapes du flot . . . . .  | 139 |
| 4.2.5. Analyse de l'architecture . . . . .   | 140 |
| 4.2.5.1. Interprétation de la spécification d'entrée . . . . .   | 141 |
| 4.2.5.2. Décomposition de la spécification en unités de génération . . . . .   | 145 |
| 4.2.5.3. Informations requises pour l'étape de sélection<br>de code du système d'exploitation . . . . .                          | 146 |
| 4.2.5.4. Informations requises pour l'étape de génération<br>du code du système d'exploitation . . . . .                         | 146 |
| 4.2.5.5. Informations requises pour l'étape<br>de génération des fichiers de compilation . . . . .                               | 146 |
| 4.2.6. Sélection des éléments du système d'exploitation . . . . .  | 146 |
| 4.2.6.1. Première étape de sélection . . . . .   | 148 |
| 4.2.6.2. Deuxième étape de sélection . . . . .   | 150 |
| 4.2.6.3. Choix de l'utilisateur dans la sélection des éléments . . . . .   | 154 |
| 4.2.6.4. Services inutiles pour un élément . . . . .   | 155 |
| 4.2.7. Génération du code du système d'exploitation . . . . .  | 155 |
| 4.2.7.1. Traitement des informations d'entrée provenant<br>des étapes d'analyse d'architecture et de sélection de code . . . . . | 156 |
| 4.2.7.2. Expansion des macros . . . . .  | 156 |
| 4.2.7.3. Adaptation des éléments . . . . .   | 156 |
| 4.2.7.4. Assemblage des éléments . . . . .   | 160 |
| 4.2.7.5. Adaptation de l'application logicielle . . . . .  | 163 |
| 4.2.8. Génération des fichiers de compilation . . . . .  | 166 |
| 4.2.8.1. Création des dépendances de compilation entre les sources . . . . .   | 166 |
| 4.2.8.2. Choix des outils pour la compilation . . . . .  | 166 |
| 4.2.8.3. Création des makefiles . . . . .  | 167 |
| 4.2.9. L'allocateur de ressources . . . . .  | 168 |
| 4.2.9.1. Allocation de mémoire . . . . .   | 169 |
| 4.2.9.2. Allocation d'interruptions . . . . .  | 170 |

|  |     |
|--|-----|
| 4.2.10. Extension de la bibliothèque de système d'exploitation . . . . . | 170 |
| 4.2.10.1. Découpage du code en éléments . . . . .                        | 170 |
| 4.2.10.2. Ajout d'un processeur ou d'un matériel . . . . .               | 171 |
| 4.3. Conclusion . . . . .  | 171 |
| 4.4. Bibliographie . . . . .   | 172 |

**Chapitre 5. Application du flot de ciblage logiciel . . . . . 173**

Yanick PAVIOT

|   |     |
|---|-----|
| 5.1. Description d'une application : un framer VDSL . . . . .   | 173 |
| 5.1.1. Le sous-ensemble de l'application VDSL utilisé<br>pour la démonstration . . . . .                          | 174 |
| 5.1.2. Spécification de l'application . . . . .   | 176 |
| 5.1.2.1. Construction de la spécification . . . . .   | 176 |
| 5.1.2.2. La spécification que nous avons utilisée dans le flot . . . . .  | 176 |
| 5.1.2.3. Les protocoles utilisés . . . . .  | 179 |
| 5.2. La bibliothèque de système d'exploitation pour l'application . . . . .                                       | 181 |
| 5.2.1. Les choix effectués pour la construction de la bibliothèque . . . . .                                      | 181 |
| 5.2.1.1. Les langages utilisés pour le code des éléments :<br>le langage C et les langages d'assemblage . . . . . | 181 |
| 5.2.1.2. Découpage en éléments . . . . .  | 182 |
| 5.2.1.3. L'interface entre les tâches de l'application<br>et le système d'exploitation . . . . .                  | 183 |
| 5.2.2. Contenu de la bibliothèque . . . . .   | 185 |
| 5.2.2.1. Relations entre les éléments et les services . . . . .   | 185 |
| 5.2.2.2. Les éléments fournissant les services d'API . . . . .  | 185 |
| 5.2.2.3. Les éléments fournissant les services de « Kernel » . . . . .  | 186 |
| 5.2.2.4. Les éléments fournissant les services de « Interrupt » . . . . .   | 187 |
| 5.2.2.5. L'élément fournissant les services de « Synchronization » . . . . .                                      | 187 |
| 5.2.2.6. Les éléments fournissant les services de « Driver » (pilotes) . . . . .                                  | 187 |
| 5.3. Résultats . . . . .  | 188 |
| 5.3.1. Evaluation du flot de génération de système d'exploitation . . . . .                                       | 188 |
| 5.3.1.1. La spécification d'entrée . . . . .  | 189 |
| 5.3.1.2. La bibliothèque de système d'exploitation . . . . .  | 192 |
| 5.3.1.3. L'outil de génération . . . . .  | 193 |
| 5.3.1.4. Compilation du système d'exploitation généré . . . . .   | 193 |
| 5.3.1.5. Validation du résultat . . . . .   | 194 |
| 5.3.2. Résultats concernant les systèmes d'exploitation générés . . . . .   | 194 |
| 5.3.2.1. Le code généré . . . . .   | 195 |
| 5.3.2.2. Qualité du système d'exploitation généré . . . . .   | 197 |
| 5.4. Conclusion . . . . .   | 197 |
| 5.5. Bibliographie . . . . .  | 197 |

|                 |     |
|-----------------|-----|
| Index . . . . . | 199 |
|-----------------|-----|