
Table des matières

Préface	15
Maryline CHETTO	
Chapitre 1. Introduction à l’ordonnancement temps réel	17
Emmanuel GROLLEAU	
1.1. Systèmes temps réel	17
1.2. Architectures matérielles	20
1.2.1. Calculateurs	20
1.2.2. Réseaux de communication	22
1.2.3. Capteurs et actionneurs	22
1.3. Systèmes d’exploitation	23
1.3.1. Généralités	23
1.3.2. Systèmes d’exploitation temps réel	24
1.3.3. Primitives offertes par un noyau	25
1.4. Ordonnancement	27
1.4.1. Ordonnancement en-ligne et hors-ligne	27
1.4.2. Caractérisation des tâches	28
1.4.3. Criticité	31
1.4.4. Métriques liées à l’ordonnancement	31
1.4.5. Facteurs pratiques	32
1.4.6. Ordonnancement multicœur	36
1.5. Modélisation et analyse des applications temps réel	39
1.5.1. Modélisation	39
1.5.2. Analyse	40
1.6. Architecture d’un système et ordonnançabilité	41

Chapitre 2. Solutions pour les architectures monoprocesseurs	45
Laurent GEORGE et Jean-François HERMANT	
2.1. Introduction	46
2.2. Caractérisation d'un problème d'ordonnancement	47
2.2.1. Modèles de tâche	47
2.2.2. Modèles de contraintes temporelles	49
2.2.3. Modèles d'ordonnancement	50
2.2.4. Concepts et notations	52
2.3. Algorithmes d'ordonnancement / optimalité	54
2.3.1. Algorithmes à priorités fixes au niveau des tâches FP	54
2.3.2. Algorithmes FPJL	56
2.3.3. Algorithmes à priorités dynamiques	57
2.4. Périodes actives et <i>scenarii</i> pires cas	59
2.4.1. Périodes actives	59
2.4.2. <i>Scenarii</i> pires cas	60
2.5. Conditions de faisabilité	64
2.5.1. Conditions de faisabilité FP	65
2.5.2. Conditions de faisabilité FPJL	67
2.6. Analyse de sensibilité	70
2.6.1. Sensibilité des WCETs	72
2.6.2. Sensibilité des périodes	79
2.6.3. Sensibilité des échéances	80
2.7. Conclusion	85
2.8. Bibliographie	86
Chapitre 3. Solutions pour les architectures multiprocesseurs	91
Joël GOOSSENS et Pascal RICHARD	
3.1. Introduction	91
3.1.1. Modélisation des applications	92
3.1.2. Modélisation de la plate-forme	93
3.2. Classification des ordonnanceurs	93
3.2.1. Ordonnanceurs en-ligne et hors-ligne	93
3.2.2. Prémptions et migrations des tâches	94
3.2.3. Priorités des tâches	95
3.2.4. Classification : définition	95
3.3. Propriétés des ordonnanceurs	96
3.3.1. Propriétés qualitatives	96
3.3.2. Propriétés quantitatives	100
3.4. Ordonnancement partitionné	103
3.4.1. Algorithmes de partitionnement	103
3.4.2. Evaluation des algorithmes de partitionnement	107
3.5. Ordonnancement global	110

3.5.1. Algorithmes équitables	111
3.5.2. Généralisation des algorithmes d'ordonnancement monoprocesseur	118
3.6. Conclusion	119
3.7. Bibliographie	119

Chapitre 4. Synchronisations : protocoles d'accès

aux ressources partagées	123
---	------------

Serge MIDONNET et Frédéric FAUBERTEAU

4.1. Introduction	123
4.2. Terminologie et notations	124
4.2.1. Diagrammes	125
4.3. Protocoles de synchronisation	126
4.3.1. Cas des architectures monoprocesseurs	126
4.3.2. Cas des architectures multiprocesseurs	128
4.4. Problèmes dus aux synchronisations	131
4.4.1. Inversion de priorité non bornée	131
4.4.2. Interblocages	136
4.4.3. Blocages multiples	140
4.5. Calcul du facteur de blocage	144
4.5.1. Cas des architectures monoprocesseurs	144
4.5.2. Cas des architectures multiprocesseurs	147
4.6. Conclusion	152
4.7. Bibliographie	152

Chapitre 5. Focus sur l'ordonnancement probabiliste 155

Liliana CUCU-GROSJEAN, Adriana GOGONEL et Dorin MAXIM

5.1. Introduction	155
5.2. Notations et définitions	158
5.3. Modèle d'un système temps réel probabiliste	159
5.4. Propriétés imposées	160
5.5. Modèles pire cas probabilistes	161
5.5.1. Systèmes temps réel avec des arrivées probabilistes	162
5.5.2. Comparaison entre les deux modèles	162
5.6. Ordonnancement temps réel probabiliste	163
5.6.1. Problème d'algorithme d'ordonnancement à priorités fixes (BPAP)	163
5.6.2. Non-optimalité de l'algorithme Rate Monotonic	163
5.7. Analyse probabiliste d'ordonnançabilité	165
5.8. Classification des principaux résultats existants	167
5.9. Bibliographie	169

Chapitre 6. L'ordonnement dans les réseaux	173
Ye-Qiong SONG	
6.1. Introduction	173
6.2. Protocole CAN	176
6.3. Un exemple d'application embarquée automobile distribuée autour d'un réseau CAN	179
6.4. Analyse des temps de réponse des messages CAN	182
6.4.1. Méthode d'analyse du pire temps de réponse	182
6.4.2. Méthode de calcul de la borne des temps de réponse	184
6.4.3. Application à une messagerie CAN	185
6.5. Conclusion et discussions	186
6.6. Bibliographie	188
Chapitre 7. Approches inductives pour l'ordonnement de paquets dans les réseaux de communication	189
Malika BOURENNANE et Abdelhamid MELLOUK	
7.1. Introduction	189
7.1.1. L'approche par priorité	190
7.1.2. L'approche guidée par le partage de la bande passante (SD)	191
7.1.3. L'approche guidée par l'échéance	191
7.1.4. L'approche inductive	192
7.2. Concept d'ordonnement	193
7.3. Approches pour l'ordonnement temps-réel	194
7.3.1. La priorité stricte	195
7.3.2. Le paradigme <i>Generalized Processor Sharing</i> (GPS)	195
7.3.3. L'ordonneur PGPS (<i>Packet-by-packet Generalized Processor Sharing</i>)	196
7.3.4. <i>Earliest Deadline First</i> (EDF)	196
7.3.5. Ordonnement adaptatif	196
7.4. Concepts préalables	199
7.4.1. Apprentissage mono-agent	199
7.4.2. Apprentissage par renforcement multi-agents	203
7.5. Modèle proposé	206
7.5.1. L'algorithme d'apprentissage	208
7.6. Q-learning avec approximation (NQ-learning)	209
7.6.1. Evaluation	212
7.6.2. Cas d'un seul agent	213
7.6.3. Espace d'action	213
7.6.4. Espace d'état	213
7.6.5. Fonction récompense	213

7.6.6. Algorithme d'apprentissage	214
7.6.7. Cas multi-agents	216
7.7. Conclusion	217
7.8. Remerciements	218
7.9. Bibliographie	218
Chapitre 8. Focus sur les réseaux avioniques	223
Jean-Luc SCHARBARG et Christian FRABOUL	
8.1. Introduction	223
8.2. Architectures de réseaux avioniques	224
8.2.1. Evolution historique	224
8.2.2. Le réseau AFDX	225
8.3. L'analyse temporelle d'un réseau AFDX	226
8.4. Caractéristiques d'un scénario pire cas	227
8.5. Calcul d'une borne supérieure du délai	232
8.5.1. Une borne supérieure du délai sur un AFDX par calcul réseau	232
8.5.2. Une borne supérieure du délai sur un AFDX par la méthode des trajectoires	236
8.6. Résultats sur une configuration embarquée avion	241
8.7. Conclusion	242
8.8. Bibliographie	243
Chapitre 9. Optimisation de la consommation énergétique	245
Cécile BELLEUDY	
9.1. Introduction	245
9.2. Etat de l'art	248
9.2.1. Généralités	248
9.2.2. Modélisation de la consommation d'un système d'exploitation	249
9.2.3. Stratégies de gestion de la consommation au sein de systèmes multicœurs	250
9.3. Modélisation de la consommation	253
9.3.1. Plate-forme de caractérisation : aspect matériel et logiciel	253
9.3.2. Modélisation de la consommation	254
9.3.3. Changement de contexte	254
9.3.4. Communication interprocessus	257
9.4. Ordonnancement faible consommation	259

9.4.1. Environnement de simulation	259
9.4.2. Politique d'ordonnancement faible consommation	261
9.5. Résultats expérimentaux	264
9.5.1. Application test : décodeur H264	264
9.5.2. Analyse des résultats de simulation	266
9.6. Conclusion et perspectives	269
9.7. Bibliographie	269

Chapitre 10. L'ordonnancement dans les objets autonomes

en énergie	273
-----------------------------	------------

Maryline CHETTO

10.1. Introduction	273
10.2. Modélisation et terminologie	276
10.2.1. Modèle de système	276
10.2.2. Les types de pénurie	278
10.2.3. Terminologie	278
10.3. Faiblesses des ordonnanceurs classiques	279
10.3.1. Ordonnancement par EDF	279
10.3.2. Stratégie ASAP	280
10.3.3. Stratégie ALAP	281
10.4. Propriétés fondamentales	282
10.5. Concepts liés à l'énergie	283
10.5.1. Demande processeur	283
10.5.2. Demande énergétique	285
10.6. Ordonnancement ED-H	286
10.6.1. Description informelle	286
10.6.2. Règles de ED-H	286
10.6.3. Analyse d'optimalité	288
10.6.4. Analyse de clairvoyance	289
10.6.5. Test d'ordonnançabilité	289
10.7. Conclusion	290
10.8. Bibliographie	291

Chapitre 11. Conception conjointe commande-ordonnancement

Daniel SIMON, Ye-Qiong SONG et Olivier SENAME

11.1. Objectifs de commande et modèles	294
11.1.1. Commande en boucle fermée	294
11.1.2. Commande et paramètres temporels	296
11.2. Ordonnancement des boucles de commande	299

11.2.1. Robustesse et relâchement de contraintes temps réel dur	301
11.3. Approche continue : ordonnancement régulé	304
11.3.1. Architecture, capteurs et actionneurs	304
11.3.2. Capteurs	305
11.3.3. Actionneurs	306
11.3.4. Lois de commande	307
11.4. Approche discrète : ordonnancement sous contrainte (m,k)-firm	309
11.4.1. Modèle (m,k)-firm	310
11.4.2. Ordonnancement sous contrainte (m,k)-firm	311
11.4.3. Ordonnancement (m,k)-firm régulé	312
11.5. Etude de cas : ordonnancement régulé de décodeur vidéo	315
11.6. Conclusion	321
11.7. Bibliographie	321
Chapitre 12. Approche synchrone et ordonnancement	325
Yves SOREL et Dumitru POTOP-BUTUCARU	
12.1. Introduction	325
12.2. Classification	329
12.2.1. Langages synchrones	329
12.2.2. Langages apparentés	333
12.3. Langages synchrones	334
12.3.1. SIGNAL	334
12.3.2. LUSTRE	343
12.3.3. ESTEREL	345
12.4. Ordonnancement avec les langages synchrones	347
12.5. Langages synchrones étendus pour faire de l'ordonnancement	350
12.5.1. LUSTRE	350
12.5.2. PRELUDE	351
12.5.3. SYNDEX	353
12.5.4. TAXYS	358
12.5.5. PSIC, <i>Embedded Code</i> et <i>Network Code</i>	358
12.6. Conclusion	360
12.7. Bibliographie	360
Chapitre 13. Estimation de temps d'exécution et délais	365
Claire MAIZA, Pascal RAYMOND et Christine ROCHANGE	
13.1. Le calcul de temps d'exécution pire cas : un exemple	366
13.1.1. Analyse de l'architecture du système embarqué	368
13.1.2. Analyse de chemin d'exécution	374
13.2. Pour aller plus loin	378

13.2.1. Multitâche : le prix de la préemption	378
13.2.2. Multicœur et autres architectures complexes	381
13.2.3. Influence des méthodes de conception de l'embarqué critique	384
13.2.4. Les outils	388
13.3. Conclusion	389
13.4. Bibliographie	389
Index	393