Table des matières

Préface **xxi**

Le mot des traducteurs **xxv**

1 Introduction **1**
1.1 Processeurs de langages 1
Exercices 3
1.2 Structure d'un compilateur 4
1.2.1 Analyse lexicale 5
1.2.2 Analyse syntaxique 6
1.2.3 Analyse sémantique 8
1.2.4 Production de code intermédiaire 9
1.2.5 Optimisation de code 9
1.2.6 Production de code 10
1.2.7 Gestion de la table de symboles 10
1.2.8 Regroupement des phases en passes 11
1.2.9 Outils de construction de compilateurs 11
1.3 Évolution des langages de programmation 12
1.3.1 Vers des langages de plus haut niveau 12
1.3.2 Conséquences pour les compilateurs 13
Exercices 14
1.4 De la science en compilation 14
1.4.1 Modèles pour la conception et la réalisation de compilateurs 14
1.4.2 De la science en optimisation de code 15
1.5 Applications de la technologie des compilateurs 16
1.5.1 Implémentation de langages de programmation de haut niveau . . . 16
1.5.2 Optimisations dépendant de l'architecture 18
1.5.3 Conception de nouvelles architectures 19
1.5.4 Traduction de programme 20
1.5.5 Outils de productivité 22
1.6 Notions de base des langages de programmation 23
1.6.1 Différence entre statique et dynamique 23
1.6.2 Environnements et états 24
1.6.3 Portée statique et structure de blocs 26
1.6.4 Contrôle d'accès explicite 28
1.6.5 Portée dynamique 29

1.6.6 Mécanismes de passage de paramètres . . . 31
1.6.7 Synonymie . . . 32
Exercices . . . 32
Résumé . . . 33
Bibliographie . . . 35

2 Un traducteur simple en une passe 37
2.1 Introduction . . . 37
2.2 Définition de la syntaxe . . . 40
2.2.1 Définition des grammaires . . . 41
2.2.2 Dérivations . . . 42
2.2.3 Arbres d'analyse . . . 43
2.2.4 Ambiguïté . . . 45
2.2.5 Associativité des opérateurs . . . 45
2.2.6 Priorité des opérateurs . . . 46
Exercices . . . 49
2.3 Traduction dirigée par la syntaxe . . . 50
2.3.1 Notation postfixée . . . 50
2.3.2 Attributs synthétisés . . . 51
2.3.3 Définitions simples dirigées par la syntaxe . . . 53
2.3.4 Parcours d'arbres . . . 54
2.3.5 Schémas de traduction . . . 55
Exercices . . . 57
2.4 Analyse syntaxique . . . 57
2.4.1 Analyse syntaxique descendante . . . 58
2.4.2 Analyse syntaxique prédictive . . . 60
2.4.3 Quand utiliser les ε-productions ? . . . 62
2.4.4 Développer un analyseur syntaxique prédictif . . . 63
2.4.5 Récursivité à gauche . . . 63
Exercices . . . 65
2.5 Un traducteur pour expressions simples . . . 65
2.5.1 Syntaxe abstraite et syntaxe concrète . . . 66
2.5.2 Adapter le schéma de traduction . . . 66
2.5.3 Procédures pour les non-terminaux . . . 68
2.5.4 Simplifier le traducteur . . . 69
2.5.5 Le programme complet . . . 69
2.6 Analyse lexicale . . . 72
2.6.1 Élimination des blancs et des commentaires . . . 73
2.6.2 Pré-vision . . . 73
2.6.3 Constantes . . . 74
2.6.4 Reconnaître les mots clés et les identificateurs . . . 74
2.6.5 Un analyseur lexical . . . 76
Exercices . . . 79
2.7 Tables de symboles . . . 80
2.7.1 Une table de symboles par portée . . . 81
2.7.2 Utilisation des tables de symboles . . . 84
2.8 Production de code intermédiaire . . . 86
2.8.1 Deux types de représentations intermédiaires . . . 86

2.8.2 Construction des arbres abstraits 87
2.8.3 Vérification statique 91
2.8.4 Code à trois adresses 93
Exercices 98
Résumé 99

3 Analyse lexicale **101**
3.1 Le rôle de l'analyseur lexical 101
3.1.1 Analyse lexicale et analyse syntaxique 103
3.1.2 Unités lexicales, motifs et lexèmes 103
3.1.3 Attributs d'une unité lexicale 104
3.1.4 Erreurs lexicales 105
Exercices 106
3.2 Mise en mémoire tampon de l'entrée 106
3.2.1 Couples de tampons 107
3.2.2 Sentinelles 108
3.3 Spécification des unités lexicales 109
3.3.1 Chaînes et langages 110
3.3.2 Opérations sur les langages 111
3.3.3 Expressions régulières 111
3.3.4 Définitions régulières 113
3.3.5 Extensions des expressions régulières 114
Exercices 115
3.4 Reconnaissance des unités lexicales 118
3.4.1 Diagrammes de transition 119
3.4.2 Reconnaissance des mots réservés et des identificateurs 121
3.4.3 Finalisation du traitement de l'exemple récurrent 122
3.4.4 Architecture d'un analyseur lexical reposant sur des diagrammes de transition 123
Exercices 125
3.5 Le constructeur d'analyseurs lexicaux `Lex` 129
3.5.1 Utilisation de `Lex` 129
3.5.2 Structure d'un programme `Lex` 130
3.5.3 Résolution de conflits dans `Lex` 132
3.5.4 L'opérateur de pré-vision 133
Exercices 134
3.6 Automates finis 135
3.6.1 Automates finis non déterministes 135
3.6.2 Tables de transition 136
3.6.3 Acceptation de chaînes d'entrée par des automates 137
3.6.4 Automates finis déterministes 137
Exercices 139
3.7 Des expressions régulières aux automates 140
3.7.1 Conversion d'un AFN en AFD 140
3.7.2 Simulation d'un AFN 143
3.7.3 Efficacité de la simulation d'un AFN 144
3.7.4 Construction d'un AFN à partir d'une expression régulière 146
3.7.5 Efficacité des algorithmes de traitement des chaînes 149

Exercices . . . 152
3.8 Développement d'un constructeur d'analyseurs lexicaux . . . 153
3.8.1 Structure de l'analyseur produit . . . 153
3.8.2 Reconnaissance de motifs à l'aide d'AFN . . . 154
3.8.3 AFD pour les analyseurs lexicaux . . . 156
3.8.4 Implémenter l'opérateur de pré-vision . . . 157
Exercices . . . 158
3.9 Optimisation des reconnaisseurs de motifs à base d'AFD . . . 158
3.9.1 États importants d'un AFN . . . 159
3.9.2 Fonctions calculées à partir de l'arbre abstrait . . . 160
3.9.3 Calcul de *annulable*, *premierePos* et *dernierePos* . . . 161
3.9.4 Calcul de *posSuivante* . . . 162
3.9.5 Conversion directe d'une expression régulière en un AFD . . . 164
3.9.6 Minimisation du nombre d'états d'un AFD . . . 165
3.9.7 Minimisation du nombre d'états dans les analyseurs lexicaux . . . 168
3.9.8 Compromis temps–espace pour la simulation des AFD . . . 169
Exercices . . . 170
Résumé . . . 170
Bibliographie . . . 172

4 Analyse syntaxique 175
4.1 Introduction . . . 176
4.1.1 Rôle de l'analyseur syntaxique . . . 176
4.1.2 Grammaires de référence . . . 178
4.1.3 Gestion des erreurs de syntaxe . . . 178
4.1.4 Stratégies de rattrapage d'erreurs . . . 180
4.2 Grammaires non contextuelles . . . 181
4.2.1 Définition formelle des grammaires non contextuelles . . . 181
4.2.2 Conventions de notation . . . 182
4.2.3 Dérivations . . . 183
4.2.4 Arbres d'analyse et dérivations . . . 185
4.2.5 Ambiguïté . . . 187
4.2.6 Contrôler le langage défini par une grammaire . . . 188
4.2.7 Grammaires non contextuelles et expressions régulières . . . 189
Exercices . . . 190
4.3 Écriture d'une grammaire . . . 192
4.3.1 Analyse lexicale et analyse syntaxique . . . 192
4.3.2 Éliminer l'ambiguïté . . . 193
4.3.3 Élimination de la récursivité à gauche . . . 194
4.3.4 Factorisation à gauche . . . 197
4.3.5 Constructions qui ne sont pas non contextuelles . . . 198
Exercices . . . 198
4.4 Analyse syntaxique descendante . . . 199
4.4.1 Analyse syntaxique par descente récursive . . . 201
4.4.2 PREMIER et SUIVANT . . . 202
4.4.3 Grammaires LL(1) . . . 204
4.4.4 Analyse syntaxique prédictive non récursive . . . 208
4.4.5 Rattrapage d'erreur en analyse syntaxique prédictive . . . 210

Exercices . . . 212
4.5 Analyse syntaxique ascendante . . . 214
4.5.1 Réductions . . . 215
4.5.2 Élagage des manches . . . 215
4.5.3 Analyse syntaxique par décalage-réduction . . . 217
4.5.4 Conflits pendant l'analyse syntaxique par décalage-réduction . . . 219
Exercices . . . 221
4.6 Introduction à l'analyse syntaxique LR : LR simple . . . 221
4.6.1 Pourquoi les analyseurs syntaxiques LR ? . . . 221
4.6.2 Les items et l'automate LR(0) . . . 223
4.6.3 L'algorithme LR d'analyse syntaxique . . . 227
4.6.4 Construction des tables d'analyse syntaxique SLR . . . 231
4.6.5 Préfixes viables . . . 234
Exercices . . . 236
4.7 Des analyseurs syntaxiques LR plus puissants . . . 238
4.7.1 Items canoniques LR(1) . . . 238
4.7.2 Construction des ensembles d'items LR(1) . . . 239
4.7.3 Tables d'analyse syntaxique LR(1) canonique . . . 243
4.7.4 Construction des tables d'analyse syntaxique LALR . . . 244
4.7.5 Construction efficace des tables d'analyse syntaxique LALR . . . 248
4.7.6 Compression des tables d'analyse syntaxique LR . . . 252
Exercices . . . 254
4.8 Utiliser des grammaires ambiguës . . . 255
4.8.1 Priorité et associativité pour la résolution des conflits . . . 255
4.8.2 L'ambiguïté du « sinon en suspens » . . . 257
4.8.3 Rattrapage d'erreur en analyse syntaxique LR . . . 259
Exercices . . . 261
4.9 Constructeurs d'analyseurs syntaxiques . . . 262
4.9.1 Le constructeur d'analyseurs syntaxiques `Yacc` . . . 262
4.9.2 Utiliser `Yacc` avec des grammaires ambiguës . . . 266
4.9.3 Création d'analyseurs lexicaux `Yacc` à l'aide de `Lex` . . . 269
4.9.4 Rattrapage d'erreurs en `Yacc` . . . 270
Exercices . . . 271
Résumé . . . 272
Bibliographie . . . 274

5 Traduction dirigée par la syntaxe **277**
5.1 Définitions dirigées par la syntaxe . . . 278
5.1.1 Attributs hérités et synthétisés . . . 278
5.1.2 Évaluation d'une DDS aux nœuds d'un arbre d'analyse . . . 280
Exercices . . . 283
5.2 Ordres d'évaluation pour les DDS . . . 283
5.2.1 Graphes de dépendances . . . 284
5.2.2 Ordre d'évaluation des attributs . . . 285
5.2.3 Définitions S-attribuées . . . 286
5.2.4 Définitions L-attribuées . . . 287
5.2.5 Règles sémantiques avec effets de bord contrôlés . . . 288
Exercices . . . 290

5.3 Applications de la traduction dirigée par la syntaxe . . . 290
5.3.1 Construction des arbres abstraits . . . 291
5.3.2 Structure d'un type . . . 294
Exercices . . . 295
5.4 Schémas de traduction dirigés par la syntaxe . . . 296
5.4.1 Schémas de traduction postfixes . . . 296
5.4.2 Implémentation des STDS postfixes par la pile d'analyse . . . 297
5.4.3 STDS avec des actions à l'intérieur des productions . . . 299
5.4.4 Élimination des récursivités à gauche dans les DDS . . . 300
5.4.5 STDS pour définitions L-attribuées . . . 302
Exercices . . . 307
5.5 Implémentation de DDS L-attribuées . . . 308
5.5.1 Traduction au cours d'une analyse par descente récursive . . . 309
5.5.2 Production de code à la volée . . . 311
5.5.3 DDS L-attribuées et analyse LL . . . 313
5.5.4 Analyse ascendante de DDS L-attribuées . . . 318
Exercices . . . 321
Résumé . . . 322
Bibliographie . . . 323

6 Production de code intermédiaire 325
6.1 Variantes des arbres abstraits . . . 326
6.1.1 Graphes orientés acycliques pour les expressions . . . 326
6.1.2 Méthode des nombres de valeur pour la construction des DAG . . . 328
Exercices . . . 330
6.2 Code à trois adresses . . . 331
6.2.1 Adresses et instructions . . . 331
6.2.2 Quadruplets . . . 333
6.2.3 Triplets . . . 334
6.2.4 Forme à affectation statique unique . . . 336
Exercices . . . 337
6.3 Types et déclarations . . . 337
6.3.1 Expressions de types . . . 338
6.3.2 Équivalence de types . . . 339
6.3.3 Déclarations . . . 340
6.3.4 Organisation de la mémoire pour les noms locaux . . . 340
6.3.5 Suites de déclarations . . . 342
6.3.6 Champs dans les structures et les classes . . . 343
Exercices . . . 344
6.4 Traduction des expressions . . . 345
6.4.1 Opérations dans les expressions . . . 345
6.4.2 Traduction incrémentale . . . 346
6.4.3 Adressage des éléments de tableau . . . 347
6.4.4 Traduction des références aux tableaux . . . 349
Exercices . . . 351
6.5 Contrôle de type . . . 352
6.5.1 Règles pour le contrôle de type . . . 352
6.5.2 Conversions de types . . . 353

6.5.3 Surcharge des fonctions et des opérateurs . . . 355
6.5.4 Inférence de type et fonctions polymorphes . . . 356
6.5.5 Un algorithme d'unification . . . 359
Exercices . . . 362
6.6 Flot de contrôle . . . 363
6.6.1 Expressions booléennes . . . 363
6.6.2 Code « court-circuit » . . . 364
6.6.3 Instructions de flot de contrôle . . . 364
6.6.4 Traduction des expressions booléennes en contrôle de flot . . . 367
6.6.5 Prévention des branchements redondants . . . 369
6.6.6 Valeurs booléennes et code de branchement . . . 370
Exercices . . . 371
6.7 Reprise arrière . . . 372
6.7.1 Génération de code en une passe avec reprise arrière . . . 373
6.7.2 Reprise arrière pour les expressions booléennes . . . 373
6.7.3 Instructions de flot de contrôle . . . 376
6.7.4 Instructions rompre, continuer et aller à . . . 378
Exercices . . . 379
6.8 Instructions d'aiguillage . . . 380
6.8.1 Traduction des instructions d'aiguillage . . . 380
6.8.2 Traduction dirigée par la syntaxe des instructions d'aiguillage . . . 381
Exercices . . . 382
6.9 Code intermédiaire pour les procédures . . . 383
Résumé . . . 384
Bibliographie . . . 385

7 Environnements d'exécution **387**
7.1 Organisation de l'espace mémoire . . . 387
7.1.1 Allocations de mémoire statiques et dynamiques . . . 390
7.2 Allocation en pile . . . 390
7.2.1 Arbre d'activation . . . 390
7.2.2 Blocs d'activation . . . 393
7.2.3 Séquences d'appel . . . 395
7.2.4 Données de taille variable dans la pile . . . 398
Exercices . . . 399
7.3 Accès en pile à des données non locales . . . 400
7.3.1 Accès aux données sans procédures imbriquées . . . 400
7.3.2 Problèmes dus à l'imbrication de procédures . . . 401
7.3.3 Un langage avec imbrication des déclarations de procédures . . . 401
7.3.4 Profondeur d'imbrication . . . 403
7.3.5 Liens d'accès . . . 404
7.3.6 Gestion des liens d'accès . . . 404
7.3.7 Liens d'accès pour les procédures en paramètres . . . 406
7.3.8 Adresseurs . . . 407
Exercices . . . 409
7.4 Gestion du tas . . . 410
7.4.1 Gestionnaire de mémoire . . . 410
7.4.2 Hiérarchie de la mémoire d'un ordinateur . . . 411

7.4.3 Localité des programmes . . . 413
7.4.4 Réduction de la fragmentation . . . 415
7.4.5 Demandes explicites de libération . . . 417
Exercices . . . 420
7.5 Introduction au ramassage de miettes (collecte du rebut) . . . 420
7.5.1 Objectifs des ramasse-miettes . . . 420
7.5.2 Accessibilité . . . 422
7.5.3 Ramasse-miettes à comptage de références . . . 424
Exercices . . . 425
7.6 Introduction au ramassage de miettes à marquage . . . 426
7.6.1 Un ramasse-miettes basique à marquage et balayage . . . 427
7.6.2 Abstraction de base . . . 428
7.6.3 Optimisation du marquage et balayage . . . 430
7.6.4 Ramassage de miettes par marquage et tassage . . . 431
7.6.5 Ramasse-miettes copiants . . . 434
7.6.6 Comparaison des coûts . . . 436
Exercices . . . 436
7.7 Ramasse-miettes à interruption brève . . . 437
7.7.1 Ramassage de miettes incrémental . . . 437
7.7.2 Analyse incrémentale de l'accessibilité . . . 438
7.7.3 Principes de la collecte partielle . . . 440
7.7.4 Ramassage de miettes à générations . . . 441
7.7.5 L'algorithme du train . . . 442
Exercices . . . 446
7.8 Sujets avancés en ramassage de miettes . . . 447
7.8.1 Ramassage de miettes parallèle et concurrent . . . 447
7.8.2 Relogement partiel . . . 449
7.8.3 Collecte prudente pour langage faiblement typé . . . 450
7.8.4 Références faibles . . . 450
Exercices . . . 451
Résumé . . . 451
Bibliographie . . . 453

8 Production de code **455**
8.1 Sujets importants pour la conception d'un générateur de code . . . 457
8.1.1 Données d'entrée du générateur de code . . . 457
8.1.2 Le programme cible . . . 457
8.1.3 Sélection des instructions . . . 458
8.1.4 Allocation de registres . . . 460
8.1.5 Ordre d'évaluation . . . 461
8.2 Langage cible . . . 461
8.2.1 Un modèle simple de machine cible . . . 462
8.2.2 Coût d'un programme et coût des instructions . . . 464
Exercices . . . 465
8.3 Adresses dans le code cible . . . 467
8.3.1 Allocation statique . . . 467
8.3.2 Allocation en pile . . . 469
8.3.3 Adresses des variables à l'exécution . . . 472

Exercices . . . 472
8.4 Blocs de base et graphes de flot de contrôle . . . 473
8.4.1 Blocs de base . . . 474
8.4.2 Information sur l'utilisation ultérieure . . . 476
8.4.3 Graphes de flot de contrôle . . . 476
8.4.4 Représentation des graphes de flot de contrôle . . . 478
8.4.5 Boucles . . . 478
Exercices . . . 479
8.5 Optimisation des blocs de base . . . 479
8.5.1 Représentation des blocs de base par des DAG . . . 480
8.5.2 Recherche des sous-expressions communes locales . . . 480
8.5.3 Élimination du code inutile . . . 482
8.5.4 Utilisation d'identités algébriques . . . 482
8.5.5 Représentation des accès aux tableaux . . . 484
8.5.6 Affectations de pointeurs et appels de procédures . . . 485
8.5.7 Reconstruction des blocs de base à partir des DAG . . . 486
Exercices . . . 487
8.6 Un générateur de code simple . . . 488
8.6.1 Descripteurs de registres et d'adresses . . . 489
8.6.2 L'algorithme de production de code . . . 490
8.6.3 Conception de la fonction *choiReg* . . . 493
Exercices . . . 494
8.7 Optimisation à lucarne . . . 495
8.7.1 Élimination des chargements et des rangements superflus . . . 495
8.7.2 Élimination du code inaccessible . . . 495
8.7.3 Optimisations du flot de contrôle . . . 496
8.7.4 Simplification algébrique et réduction de force . . . 497
8.7.5 Utilisation des idiomes de la machine . . . 497
Exercices . . . 497
8.8 Allocation et affectation de registres . . . 498
8.8.1 Allocation de registres globale . . . 498
8.8.2 Décomptes d'utilisation . . . 499
8.8.3 Affectation de registres pour les boucles externes . . . 500
8.8.4 Allocation de registres par coloriage de graphe . . . 500
Exercices . . . 502
8.9 Sélection des instructions par réécriture d'arbre . . . 502
8.9.1 Schémas de traduction d'arbres . . . 502
8.9.2 Génération de code par pavage d'arbre . . . 504
8.9.3 Filtrage par analyse syntaxique . . . 507
8.9.4 Routines de contrôle sémantique . . . 509
8.9.5 Filtrage d'arbre général . . . 509
Exercices . . . 510
8.10 Production d'un code optimal pour les expressions . . . 511
8.10.1 Nombres d'Ershov . . . 511
8.10.2 Production du code à partir des arbres d'expressions étiquetés . . . 512
8.10.3 Évaluation d'expressions avec trop peu de registres . . . 513
Exercices . . . 515
8.11 Production de code par programmation dynamique . . . 516

8.11.1 Évaluation contiguë . . . 516
8.11.2 L'algorithme par programmation dynamique . . . 517
Exercices . . . 519
Résumé . . . 520
Bibliographie . . . 521

9 Optimisations indépendantes de la machine 523
9.1 Les sources principales d'optimisation . . . 524
9.1.1 Causes de redondance . . . 524
9.1.2 Un exemple à suivre : le tri rapide *Quicksort* . . . 525
9.1.3 Transformations préservant la sémantique . . . 527
9.1.4 Sous-expressions communes globales . . . 527
9.1.5 Propagation de copie . . . 530
9.1.6 Élimination de code inutile . . . 531
9.1.7 Déplacement de code . . . 532
9.1.8 Variables d'induction et réduction de force . . . 532
Exercices . . . 535
9.2 Introduction à l'analyse de flot de données . . . 536
9.2.1 Modélisation du flot de données . . . 536
9.2.2 Le schéma d'analyse de flot de données . . . 538
9.2.3 Schémas de flot de données sur les blocs de base . . . 539
9.2.4 Définitions visibles . . . 540
9.2.5 Analyse des variables actives . . . 547
9.2.6 Expressions disponibles . . . 549
9.2.7 Résumé . . . 552
Exercices . . . 553
9.3 Fondements de l'analyse de flot de données . . . 555
9.3.1 Demi-treillis . . . 556
9.3.2 Fonctions de transfert . . . 560
9.3.3 L'algorithme itératif pour les canevas généraux . . . 562
9.3.4 Signification d'une solution de flot de données . . . 564
Exercices . . . 566
9.4 Propagation de constantes . . . 567
9.4.1 Valeurs de flot de données pour la propagation de constante . . . 567
9.4.2 La jointure pour le canevas de propagation de constante . . . 568
9.4.3 Fonctions de transfert pour le canevas de propagation de constante . . . 568
9.4.4 Monotonie du canevas de propagation de constante . . . 569
9.4.5 Non distributivité du canevas de propagation de constante . . . 569
9.4.6 Interprétation des résultats . . . 571
Exercices . . . 572
9.5 Élimination de redondance partielle . . . 573
9.5.1 Les sources de redondance . . . 573
9.5.2 Peut-on éliminer toutes les redondances ? . . . 576
9.5.3 Problème du déplacement de code paresseux . . . 577
9.5.4 Anticipation des expressions . . . 578
9.5.5 L'algorithme de déplacement de code paresseux . . . 579
Exercices . . . 587
9.6 Boucles dans les graphes de flot . . . 588

9.6.1 Dominateurs . . . 588
9.6.2 Ordonnancement en profondeur . . . 591
9.6.3 Arcs dans un arbre de recouvrement en profondeur . . . 593
9.6.4 Arcs de retour et réductibilité . . . 595
9.6.5 Profondeur d'un graphe de flot . . . 596
9.6.6 Boucles naturelles . . . 596
9.6.7 Vitesse de convergence des algorithmes itératifs de flot de données . 598
Exercices . . . 600
9.7 Analyse par régions . . . 602
9.7.1 Régions . . . 602
9.7.2 Hiérarchies de régions pour les graphes de flot réductibles . . . 603
9.7.3 Description rapide d'une analyse par régions . . . 606
9.7.4 Hypothèses nécessaires sur les fonctions de transfert . . . 607
9.7.5 Un algorithme pour l'analyse par régions . . . 609
9.7.6 Traitement des graphes de flot non réductibles . . . 613
Exercices . . . 614
9.8 Analyse symbolique . . . 615
9.8.1 Expressions affines des variables de référence . . . 616
9.8.2 Formulation d'un problème de flot de données . . . 619
9.8.3 Analyse symbolique par régions . . . 622
Exercices . . . 627
Résumé . . . 627
Bibliographie . . . 630

10 Parallélisme entre instructions **633**
10.1 Architectures des processeurs . . . 635
10.1.1 Pipelines d'instructions, branchements retardés . . . 635
10.1.2 Exécution pipelinée . . . 636
10.1.3 Lancement multiple . . . 636
10.2 Contraintes de l'ordonnancement du code . . . 637
10.2.1 Dépendances de données . . . 637
10.2.2 Recherche des dépendances entre accès à la mémoire . . . 638
10.2.3 Compromis entre utilisation des registres et parallélisme . . . 640
10.2.4 Ordre des phases d'allocation de registres et d'ordonnancement de code . . . 642
10.2.5 Dépendances de contrôle . . . 642
10.2.6 Support matériel pour une exécution spéculative . . . 643
10.2.7 Un modèle simple de machine . . . 645
Exercices . . . 646
10.3 Ordonnancement d'un bloc de base . . . 647
10.3.1 Graphes de dépendances de données . . . 647
10.3.2 Ordonnancement de liste des blocs de base . . . 649
10.3.3 Tris topologiques avec priorité . . . 650
Exercices . . . 651
10.4 Ordonnancement global . . . 652
10.4.1 Principes du déplacement de code . . . 653
10.4.2 Déplacement de code vers l'amont . . . 655
10.4.3 Déplacement de code vers l'aval . . . 655

10.4.4 Mise à jour des dépendances de données . . . 657
10.4.5 Algorithmes d'ordonnancement global . . . 657
10.4.6 Techniques avancées de déplacement de code . . . 660
10.4.7 Interaction avec un ordonnanceur dynamique . . . 661
Exercices . . . 662
10.5 Le pipeline logiciel . . . 662
10.5.1 Introduction . . . 662
10.5.2 Pipeline logiciel des boucles . . . 664
10.5.3 Allocation de registres et génération de code . . . 666
10.5.4 Boucles avec dépendances entre les itérations . . . 668
10.5.5 Buts et contraintes du pipeline logiciel . . . 669
10.5.6 Un algorithme de pipeline logiciel . . . 672
10.5.7 Ordonnancement de graphes de dépendances sans circuit . . . 672
10.5.8 Ordonnancement de graphes de dépendances avec circuits . . . 674
10.5.9 Améliorations possibles des algorithmes de pipeline logiciel . . . 680
10.5.10 Expansion périodique de variable . . . 681
10.5.11 Instructions conditionnelles . . . 683
10.5.12 Support matériel pour le pipeline logiciel . . . 684
Exercices . . . 684
Résumé . . . 686
Bibliographie . . . 688

11 Parallélisme et localité des données 689
11.1 Concepts de base . . . 692
11.1.1 Multiprocesseurs . . . 692
11.1.2 Parallélisme dans les applications . . . 694
11.1.3 Parallélisme de boucle . . . 695
11.1.4 Localité des données . . . 697
11.1.5 Introduction à la théorie des transformations affines . . . 699
11.2 Multiplication de matrices . . . 702
11.2.1 L'algorithme de multiplication de matrices . . . 702
11.2.2 Optimisations . . . 704
11.2.3 Interférence de cache . . . 707
Exercice . . . 707
11.3 Espace des itérations . . . 707
11.3.1 Construction de l'espace d'itérations d'un nid de boucles . . . 708
11.3.2 Ordre d'exécution des nids de boucles . . . 710
11.3.3 Formulation matricielle des inégalités . . . 711
11.3.4 Utilisation de constantes symboliques . . . 712
11.3.5 Contrôler l'ordre d'exécution . . . 712
11.3.6 Changement d'axes . . . 716
Exercices . . . 717
11.4 Accès affines aux tableaux . . . 719
11.4.1 Accès affines . . . 719
11.4.2 Fonctions d'accès affines et non affines . . . 720
Exercice . . . 721
11.5 Réutilisation de données . . . 721
11.5.1 Types de réutilisation . . . 723

11.5.2 Réutilisation interne . . . 723
11.5.3 Réutilisation spatiale interne . . . 727
11.5.4 Réutilisation externe . . . 728
Exercices . . . 730
11.6 Analyse de dépendances pour les tableaux . . . 731
11.6.1 Définition de la dépendance de données entre accès à un tableau . . . 732
11.6.2 Programmation linéaire en nombres entiers . . . 733
11.6.3 Le test du PGCD . . . 734
11.6.4 Heuristiques de résolution des systèmes linéaires dans les entiers . . . 736
11.6.5 Résolution des systèmes linéaires en nombres entiers : cas général . . . 739
11.6.6 Résumé . . . 740
Exercices . . . 741
11.7 Recherche d'exécution parallèle sans synchronisation . . . 742
11.7.1 Un exemple en introduction . . . 743
11.7.2 Partition spatiale affine . . . 745
11.7.3 Contraintes de partitionnement spatial . . . 746
11.7.4 Résolution des contraintes de partitionnement spatial . . . 749
11.7.5 Un algorithme simple de génération de code . . . 752
11.7.6 Élimination des itérations vides . . . 754
11.7.7 Éliminer les tests des boucles internes . . . 757
11.7.8 Transformations du code source . . . 758
Exercices . . . 763
11.8 Synchronisation entre boucles parallèles . . . 765
11.8.1 Un nombre constant de synchronisations . . . 765
11.8.2 Graphe de dépendances d'un programme . . . 766
11.8.3 Temps hiérarchisé . . . 768
11.8.4 Algorithme de parallélisation . . . 770
Exercices . . . 771
11.9 Exécution pipelinée . . . 772
11.9.1 Qu'est-ce qu'une exécution pipelinée ? . . . 772
11.9.2 La sur-relaxation (SOR) : un exemple . . . 774
11.9.3 Boucles complètement permutables . . . 774
11.9.4 Pipeliner des boucles complètement permutables . . . 775
11.9.5 Théorie générale . . . 777
11.9.6 Contraintes de partitionnement temporel . . . 778
11.9.7 Résolution des contraintes de partitionnement temporel à l'aide du lemme de Farkas . . . 781
11.9.8 Transformation du code . . . 784
11.9.9 Parallélisation avec un minimum de synchronisations . . . 789
Exercices . . . 791
11.10 Optimiser la localité des données . . . 793
11.10.1 Localité temporelle des données calculées . . . 793
11.10.2 Contraction de tableau . . . 793
11.10.3 Entrelacement de parties indépendantes . . . 796
11.10.4 Utilisation de toutes les transformations . . . 798
Exercices . . . 799
11.11 Transformations affines : autres applications . . . 800
11.11.1 Machines à mémoire distribuée . . . 801

11.11.2 Processeurs à lancement multiple . . . 802
11.11.3 Instructions vectorielles et SIMD . . . 802
11.11.4 Préchargement . . . 803
Résumé . . . 804
Bibliographie . . . 806

12 Analyses interprocédurales 809
12.1 Concepts de base . . . 810
12.1.1 Graphe des appels . . . 810
12.1.2 Sensibilité au contexte . . . 812
12.1.3 Chaînes d'appels . . . 814
12.1.4 Analyse sensible au contexte par clonage . . . 816
12.1.5 Analyse sensible au contexte par résumés . . . 817
Exercices . . . 819
12.2 Pourquoi une analyse interprocédurale ? . . . 821
12.2.1 Invocation de méthodes virtuelles . . . 821
12.2.2 Analyse de synonymie des pointeurs . . . 821
12.2.3 Parallélisation . . . 822
12.2.4 Détection des erreurs logicielles et des trous de sécurité . . . 822
12.2.5 Injection de commandes SQL . . . 823
12.2.6 Débordement de tampon . . . 824
12.3 Représentation du flot de données par programmation logique . . . 825
12.3.1 Introduction à Datalog . . . 826
12.3.2 Règles Datalog . . . 827
12.3.3 Prédicats intensionnels et extensionnels . . . 828
12.3.4 Exécution des programmes Datalog . . . 831
12.3.5 Évaluation incrémentale des programmes Datalog . . . 832
12.3.6 Les règles Datalog qui posent problème . . . 833
Exercices . . . 835
12.4 Un algorithme simple d'analyse des pointeurs . . . 836
12.4.1 Pourquoi l'analyse des pointeurs est difficile . . . 836
12.4.2 Un modèle pour les pointeurs et les références . . . 838
12.4.3 Insensibilité au flot . . . 838
12.4.4 Formulation en Datalog . . . 839
12.4.5 Utilisation de l'information de type . . . 840
Exercices . . . 842
12.5 Analyse interprocédurale insensible au contexte . . . 843
12.5.1 Effets d'un appel de méthode . . . 843
12.5.2 Calcul du graphe des appels en Datalog . . . 845
12.5.3 Chargement dynamique : introspection dans les classes Java . . . 846
Exercices . . . 846
12.6 Analyse de pointeurs sensible au contexte . . . 847
12.6.1 Contextes et chaînes d'appels . . . 848
12.6.2 Ajout du contexte aux règles Datalog . . . 850
12.6.3 Observations complémentaires . . . 850
Exercices . . . 851
12.7 Implémentation de Datalog par les DDB . . . 852
12.7.1 Diagrammes de décisions binaires (DDB) . . . 852

12.7.2 Transformations sur les DDB 853
12.7.3 Représentation de relations par des DDB 854
12.7.4 Opérations sur les relations et les DDB 855
12.7.5 Utilisation des DDB pour l'analyse de pointeurs 857
Exercices 858
Résumé 858
Bibliographie 860

A Une partie frontale complète **863**
A.1 Le langage source 863
A.2 Programme principal 864
A.3 Analyseur lexical 865
A.4 Tables de symboles et types 868
A.5 Code intermédiaire pour les expressions 869
A.6 Code de branchement 872
A.7 Code intermédiaire pour les instructions 875
A.8 Analyseur syntaxique 879
A.9 Création de la partie frontale 883

B Recherche de solutions linéairement indépendantes **885**

Alfred V. Aho est professeur d'informatique à l'université de Columbia, titulaire de la chaire Lawrence Gussman. Le professeur Aho a reçu plusieurs récompenses, notamment le prix de la *Society of Columbia Graduates* pour le meilleur enseignant en 2003 (*Great Teacher Award for 2003*) et la médaille John von Neumann de l'*Institute of Electrical and Electronics Engineer* (IEEE). Il est Membre de la *National Academy of Engineering* (NAE) et *Fellow* de l'*Association of Computing Machinery* (ACM) et de l'IEEE.

Monica S. Lam est professeur d'informatique à l'université de Stanford. Elle a été directeur scientifique de la société Tensilica et est le PDG fondateur de *moka5*. Elle a dirigé le projet *SUIF*, qui a produit l'un des compilateurs les plus populaires du monde de la recherche et a ouvert la voie à de nombreuses techniques de compilation utilisées dans l'industrie.

Ravi Sethi est à l'origine de la branche recherche de la société Avaya et est président d'Avaya Labs. Auparavant, il avait été vice-président des Laboratoires Bell et directeur technique pour le logiciel de communication chez Lucent Technologies. Il a occupé des postes de professeur à l'université d'État de Pennsylvanie et à l'université de l'Arizona. Il a également enseigné à l'université de Princeton et à l'université Rutgers. Il est *Fellow* de l'ACM.

Jeffrey D. Ullman est PDG de Gradiance Corp. et professeur émérite d'informatique à l'université de Stanford, titulaire de la chaire W. Ascherman. Ses recherches portent principalement sur la théorie des bases de données, l'intégration des bases de données, la fouille de données et l'enseignement assisté par ordinateur *via* l'internet. Il est Membre de la NAE et *Fellow* de l'ACM, et a remporté le trophée Karlstrom et le prix Knuth.

Philippe Deschamp est docteur en informatique. Il est chargé de recherches à l'Institut National de Recherche en Informatique et en Automatique (Inria) dans le domaine des outils et ressources pour la linguistique. Il a travaillé sur la sémantique et la traduction des langages de programmation. Il a participé à la traduction en français de la première édition de ce livre, parue en 1989.

Bernard Lorho est docteur en informatique. Il est conseiller scientifique pour les formations à la Direction générale de l'enseignement supérieur. Il a précédemment occupé des fonctions importantes à l'Inria, au Conseil National des Universités (CNU) et au CNRS. Il est professeur d'informatique à l'université d'Évry Val d'Essonne. Il a participé à la traduction de la première édition de ce livre.

Benoît Sagot est polytechnicien et docteur en informatique. Il est chargé de recherches à l'Inria dans le domaine de l'informatique linguistique, et travaille en particulier sur les techniques informatiques, les formalismes grammaticaux et les ressources linguistiques pour l'analyse syntaxique automatique du français.

François Thomasset est docteur en informatique. Il est directeur de recherches à l'Inria dans le domaine des outils et ressources pour la linguistique. Il a traduit plusieurs ouvrages spécialisés sur la compilation et les langages de programmation.

Préface

Depuis la première édition de ce livre, en 1986, le monde de la compilation a grandement changé. Les langages de programmation ont évolué, présentant de nouveaux problèmes de compilation. Les architectures des ordinateurs offrent des ressources diverses, que le concepteur d'un compilateur doit mettre à profit le mieux possible. Le plus intéressant est peut-être que l'optimisation de code, technique vénérable, a trouvé un emploi dans d'autres domaines. On l'utilise maintenant dans des outils qui recherchent les erreurs dans les logiciels et, mieux encore, qui mettent au jour des trous de sécurité dans des codes existants. Et on utilise toujours largement une grande part de la technologie de la partie frontale — les grammaires, les expressions régulières, les analyseurs syntaxiques et les traducteurs s'appuyant sur la syntaxe.

C'est pourquoi notre philosophie reste celle des versions précédentes de ce livre. Peu de nos lecteurs auront un jour à construire, ou même à maintenir, un compilateur pour un langage de programmation majeur. Pourtant les modèles, la théorie et les algorithmes associés aux compilateurs peuvent être mis à profit pour un grand nombre de problèmes liés à la conception et au développement logiciels. Nous mettrons donc l'accent sur les problèmes les plus fréquemment rencontrés lors de la conception des logiciels de traitement des langages, quels que soient le langage source ou la machine cible.

Comment utiliser ce livre

Pour couvrir tout le contenu de ce livre ou presque, un cours doit durer au moins deux trimestres, voire deux semestres. La première moitié du livre sera généralement utilisée dans un cours d'introduction en premier cycle. La deuxième moitié — traitant plus particulièrement de l'optimisation de code — servira de matière à un cours plus avancé, de second cycle ou au-delà.

Le premier chapitre expose les motivations ainsi que quelques notions fondamentales de l'architecture des ordinateurs et des principes des langages de programmation.

Le chapitre 2 présente un compilateur jouet et introduit de nombreux concepts importants, développés dans les chapitres suivants. Le compilateur lui-même fait l'objet d'une annexe.

Le chapitre 3 traite de l'analyse lexicale, des expressions régulières, des machines à états finis et des outils de production d'analyseurs lexicaux. Tout cela est fondamental pour tout outil de traitement automatique de texte.

Le chapitre 4 couvre les principales techniques d'analyse syntaxique, aussi bien descendantes (descente récursive, LL) qu'ascendantes (LR et ses variantes).

Le chapitre 5 introduit les principes fondamentaux des définitions et de la traduction dirigées par la syntaxe.

Le chapitre 6 montre comment utiliser les idées du chapitre 5 pour produire un code intermédiaire pour un langage de programmation typique.

Le chapitre 7 étudie l'environnement d'exécution des programmes, en particulier la gestion de la pile et la récupération du rebut.

Le chapitre 8 est consacré à la production de code cible. On y expose notamment la construction des blocs de base, la production de code pour les expressions et les blocs de base, ainsi que les techniques d'allocation de registres.

Le chapitre 9 introduit les techniques d'optimisation de code, notamment les méthodes d'analyse des flots de données et les algorithmes d'optimisation s'appuyant sur cette analyse.

Le chapitre 10 traite de l'optimisation au niveau des instructions cibles. On s'y intéresse à l'extraction du parallélisme possible entre courtes séquences d'instructions et à leur ordonnancement sur des processeurs capables de faire plusieurs choses à la fois.

Le chapitre 11 s'intéresse à la détection et à l'exploitation du parallélisme à plus grande échelle. On se concentre ici sur les programmes numériques exploitant de nombreuses boucles travaillant sur des tableaux multidimensionnels.

Le chapitre 12 traite de l'analyse interprocédurale. On y étudie l'analyse de pointeur, la synonymie et l'analyse de flot de données prenant en compte les suites d'appels de procédures permettant d'atteindre un point déterminé dans le code.

Les auteurs ont enseigné le contenu de ce livre dans les universités de Columbia, Harvard et Stanford. À Columbia, les huit premiers chapitres sont la base d'un cours d'introduction et de perfectionnement sur les langages de programmation et les traducteurs. Ce cours comporte un projet d'un semestre, dans lequel les étudiants, travaillant en petites équipes, définissent et implémentent un petit langage de leur propre conception. Les étudiants ont créé des langages couvrant des domaines d'application très variés, par exemple le calcul quantique, la synthèse musicale, le dessin, le jeu vidéo, les opérations matricielles. Ils utilisent des outils de construction de compilateurs comme ANTLR, Lex ou Yacc, ainsi que les techniques de traduction dirigée par la syntaxe des chapitres 2 et 5. Les chapitres 9 à 12 sont utilisés dans un cours de troisième cycle sur la génération de code et son optimisation pour des machines actuelles, y compris les architectures utilisant des réseaux de processeurs.

À Stanford, un cours d'initiation d'un trimestre se fonde sur une partie du contenu des chapitres 1 à 8, et comprend également une introduction à l'optimisation de code globale issue du chapitre 9. Un second cours de compilation couvre les chapitres 9 à 12 ainsi que le contenu plus avancé du chapitre 7 concernant la récupération de rebut. Les étudiants utilisent un système développé localement en Java, appelé `Joeq`, pour l'implémentation des algorithmes d'analyse de flot de données.

Connaissances préalables

Pour pouvoir tirer profit de cet ouvrage, le lecteur devra avoir une certaine « culture informatique », incluant au moins un cours avancé de programmation et des cours sur les structures de données et les mathématiques discrètes. Il lui sera utile de connaître plusieurs langages de programmation.

Exercices

Ce livre propose des exercices nombreux et approfondis pour pratiquement chaque section. Un point d'exclamation signale les exercices ou les parties d'exercice plus difficiles. Les exercices les plus délicats sont signalés par un double point d'exclamation.

Suivi sur la Toile

La page d'accueil de la version originale du livre est

`dragonbook.stanford.edu`

On y trouve notamment des errata [1] et des supports de cours. Les auteurs ont également prévu d'y placer des descriptions de compilateurs importants, faites par leurs implémenteurs eux-mêmes.

Remerciements

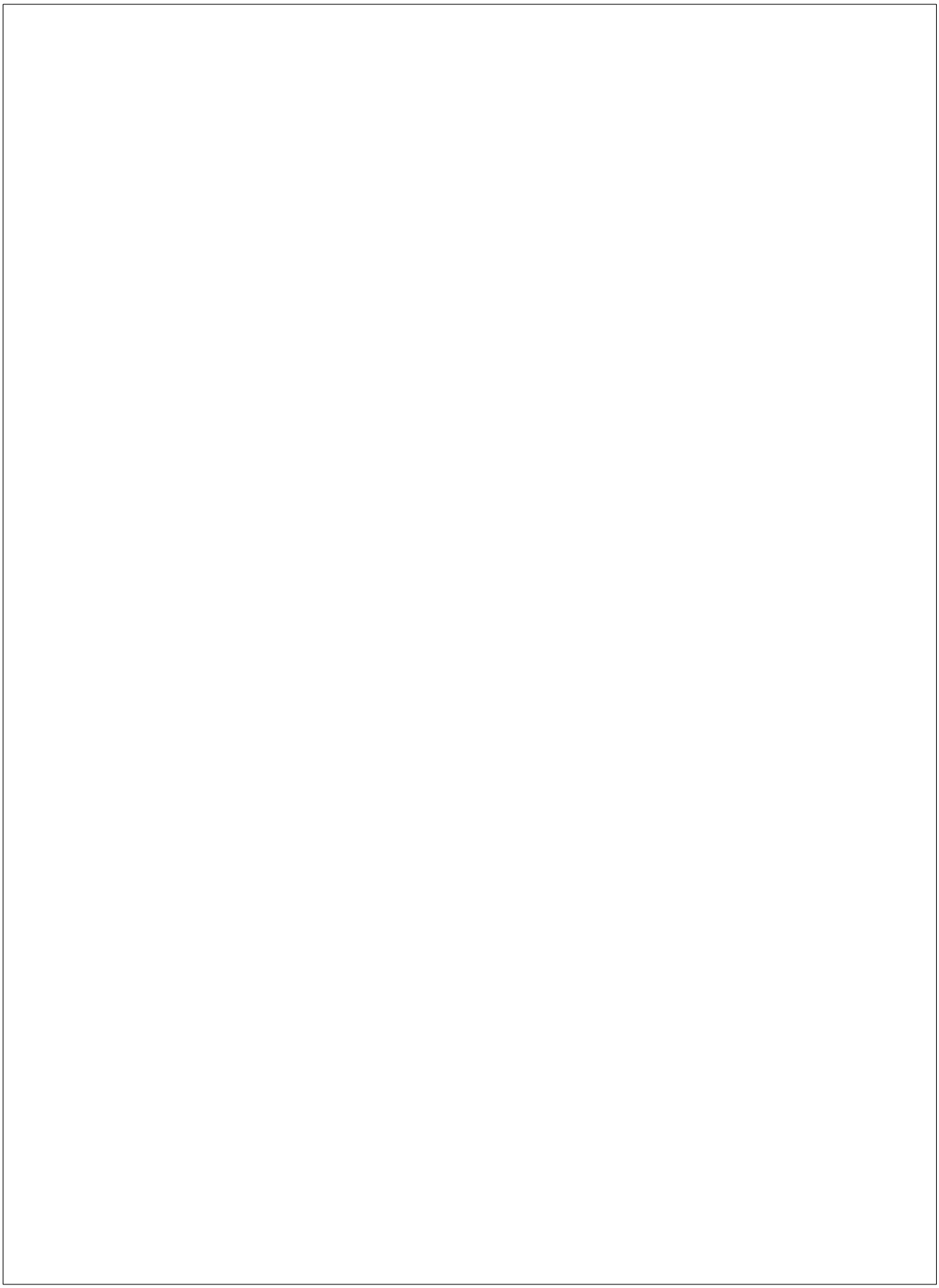
L'image de couverture de la version originale est due à S. D. Ullman de la société Strange Tonic Productions.

Jon Bentley a fait de nombreux commentaires pertinents sur le premier jet de certains chapitres. Nous avons également reçu des commentaires et des corrections de Domenico Bianculli, Peter Bosch, Marcio Buss, Marc Eaddy, Stephen Edwards, Vibhav Garg, Kim Hazelwood, Gaurav Kc, Wei Li, Mike Smith, Art Stamness, Krysta Svore, Olivier Tardieu et Jia Zeng, que nous remercions tous très sincèrement. Les erreurs qui subsistent sont bien évidemment de notre fait.

Monica Lam souhaiterait également remercier, pour dix-huit années d'apprentissage de la compilation, ses collègues de l'équipe de compilation SUIF : Gerald Aigner, Dzintars Avots, Saman Amarasinghe, Jennifer Anderson, Michael Carbin, Gerald Cheong, Amer Diwan, Robert French, Anwar Ghuloum, Mary Hall, John Hennessy, David Heine, Shih-Wei Liao, Amy Lim, Benjamin Livshits, Michael Martin, Dror Maydan, Todd Mowry, Brian Murphy, Jeffrey Oplinger, Karen Pieper, Martin Rinard, Olatunji Ruwase, Constantine Sapuntzakis, Patrick Sathyanathan, Michael Smith, Steven Tjiang, Chau-Wen Tseng, Christopher Unkel, John Whaley, Robert Wilson, Christopher Wilson et Michael Wolf.

A. V. A., Chatham, New Jersey
M. S. L., Menlo Park, Californie
R. S., Far Hills, New Jersey
J. D. U., Stanford, Californie
Juin 2006

[1] Les errata se réfèrent à la version américaine du livre. Lire page xxv le mot des traducteurs. (N.d.T.)



Le mot des traducteurs

Traduire en français un ouvrage d'informatique est toujours une tâche difficile. C'est par ces mots que commençait l'avertissement de la première version française de ce livre. Deux décennies plus tard, cette phrase est toujours d'actualité. En effet, pour des raisons diverses qui n'ont pas à être discutées ici, la domination des termes anglo-saxons en informatique s'est confirmée. De plus, le monde de la compilation est toujours largement dominé par les nord-américains anglophones, et les spécialistes du domaine utilisent l'anglais comme langue véhiculaire.

La tâche des traducteurs d'un livre de référence tel que celui-ci, très complet et mettant en œuvre un vocabulaire conséquent, est donc ardue. Certes, le succès d'un tel ouvrage dépend avant tout de la qualité de son contenu, qui a été défini par les auteurs. Mais mieux il sera traduit, plus il sera facilement compréhensible. Il convient par conséquent d'employer des traductions appropriées des termes anglais, en respectant au maximum l'usage parfois bien établi tout en évitant l'utilisation abusive de termes anglais ou de calques trop directs.

L'équipe de traduction de la première édition s'était efforcé d'éviter ces deux écueils que sont la francisation à outrance et le recours au franglais. Ses efforts avaient porté leurs fruits, cette première édition étant reconnue comme un ouvrage de référence en français. De plus, certains des termes forgés à cette occasion sont entrés dans l'usage, comme « proto-phrase » (qui traduit *sentential form*). Espérons que certains des choix que nous avons faits pour cette nouvelle édition connaîtront le même sort, contribuant ainsi à réduire le nombre d'anglicismes employés couramment par les spécialistes du domaine.

Ces choix n'ont pas toujours été faciles, certains ont pu donner lieu à des débats, parfois animés, entre traducteurs. De plus, nous avons pensé que certains de nos lecteurs seront intéressés à approfondir tel ou tel sujet, ce qui les amènera vraisemblablement à consulter la littérature publiée en anglais. Nous avons donc jugé utile d'ajouter au début de chaque chapitre un encart terminologique, afin d'expliciter, pour les termes non transparents, la correspondance avec leurs équivalents en anglais. Ces encarts, intitulés *Notes terminologiques du traducteur*, nous permettent également de détailler les raisons de certains de nos choix.

Comme dans la précédente édition, nous avons également traduit les identificateurs apparaissant dans les équations, les figures et les programmes, ainsi que les mots clés dans les fragments de pseudo-code qui illustrent le propos. Dans le cas particulier des fragments de programmes, nous avons cependant préféré préserver la correction syntaxique du résultat, en ne faisant pas usage, par exemple, de caractères accentués (sauf dans les commentaires).

Avec l'idée d'apporter le meilleur service au lecteur intéressé, nous avons décidé de mettre à sa disposition divers compléments. Ceux-ci sont accessibles sur le site internet géré par les traducteurs [1].

[1] Ce site est à l'adresse `http://dragon2007.free.fr/`.

On y trouvera notamment une bibliographie complémentaire, proposant des références vers des publications en langue française ainsi que vers des publications qui nous ont semblé faire défaut dans l'original. Y figurent également certains codes source, notamment celui de la partie frontale d'un compilateur, qui fait l'objet de l'annexe A.

Enfin, notre travail de traduction nous a permis de détecter un certain nombre d'imperfections dans la version originale. Nous les avons corrigées avec l'aval des auteurs, de même que toutes celles qui leur ont été signalées par ailleurs, jusqu'à la date à laquelle nous avons remis notre traduction à l'éditeur. La perfection n'étant pas de ce monde, il est certain que des inexactitudes se sont glissées dans notre travail. Nous invitons donc le lecteur à consulter notre site afin de reporter dans son exemplaire du livre les corrections que nous proposerons au fur et à mesure de la découverte de problèmes.

Nous remercions les auteurs, non seulement pour avoir produit cette nouvelle édition du livre au dragon, mais également pour leur concours tout au long de la phase de traduction — tout particulièrement Jeffrey Ullman qui a inlassablement répondu à nos demandes de précisions. Nos remerciements vont également aux deux correctrices qui ont eu la rude tâche de relire notre production, ainsi qu'au représentant de l'éditeur qui a fait montre d'une patience exemplaire. Nous pensons avoir tous collaboré au mieux pour que cet ouvrage soit aussi agréable à lire que possible, sans rien perdre des qualités intrinsèques qui en font la référence fondamentale du domaine.

Ph. Deschamp
B. Lorho
B. Sagot
F. Thomasset
Septembre 2007