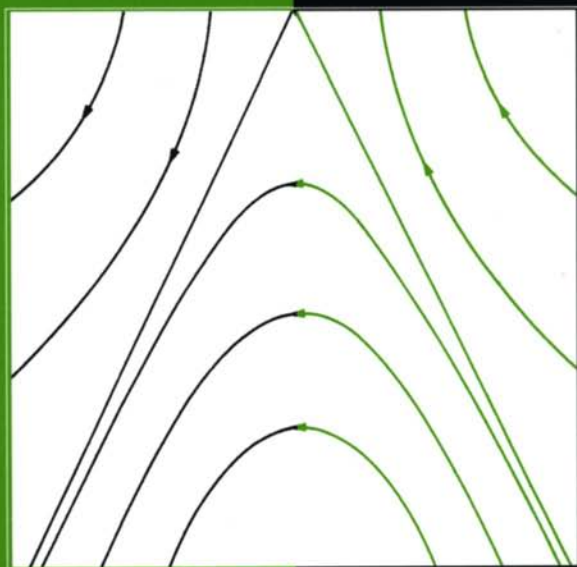


PHYSIQUE

Michel LE BELLAC

Des phénomènes critiques • aux champs de jauge •

*Une introduction aux méthodes et aux applications
de la théorie quantique des champs*



SAVOIRS ACTUELS

 CNRS EDITIONS


EDP
SCIENCES

Des phénomènes critiques aux champs de jauge

Des phénomènes critiques aux champs de jauge

Michel Le Bellac

Université de Nice

S A V O I R S A C T U E L S

EDP Sciences / CNRS ÉDITIONS

Troisième tirage corrigé, janvier 2002

© 2002, **EDP Sciences**, 7 avenue du Hoggar, BP 112, PA de Courtabœuf,
91944 les Ulis Cedex A.

CNRS ÉDITIONS, 15, rue Malebranche, 75005, Paris.

1^{re} édition :

© 1988, **InterÉditions – CNRS ÉDITIONS**

Tous droits de traduction, d'adaptation et de reproduction par tous procédés, réservés pour tous pays. La loi du 11 mars 1957 n'autorisant, aux termes des alinéas 2 et 3 de l'article 41, d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective », et d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation intégrale, ou partielle, faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droits ou ayants cause est illicite » (alinéa 1^{er} de l'article 40). Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles 425 et suivants du code pénal.

ISBN : 2-86883-359-4

ISBN : 2-271-06023-0

Table des matières

<i>Avant-propos</i>	15
<i>Références générales</i>	19
<i>Notations et conventions</i>	21

PREMIÈRE PARTIE. PHÉNOMÈNES CRITIQUES

CHAPITRE I. INTRODUCTION AUX PHÉNOMÈNES CRITIQUES

A. Transition ferromagnétique	25
B. Modèle d'Ising	28
B.1. Description du modèle	28
B.2. Modèle d'Ising à une dimension	30
B.3. Fonction de corrélation du modèle d'Ising à une dimension	32
B.4. Modèle d'Ising à deux dimensions	34
C. Champ moyen	34
C.1. Equation du champ moyen	34
C.2. Transition ferromagnétique en champ moyen	36
C.3. Comportement au voisinage de la transition	38
C.4. Exposants critiques α , β , γ , δ	41
D. Fonctions de corrélation	43
D.1. Définition, fonction génératrice	43
D.2. Théorème fluctuation-dissipation	45
D.3. Mesure de la fonction de corrélation	46
D.4. Exposants critiques η et ν	47
D.5. Transformation de Legendre	49
E. Description qualitative des phénomènes critiques	51
<i>Exercices</i>	55
<i>Notes et références</i>	59

CHAPITRE II. THÉORIE DE LANDAU

A. Hamiltonien de Ginzburg-Landau. Approximation de Landau	62
A.1. Cas d'un seul site	62
A.2. Généralisation à N sites	65
A.3. Formulation continue	68
B. Théorie de Landau des transitions de phase	71
B.1. Transitions du deuxième ordre	71
B.2. Transitions du premier ordre	71
C. Fonctions de corrélation	73
D. Critique de l'approximation de Landau et critère de Ginzburg	75
D.1. Critère de Ginzburg : première démonstration	75
D.2. Correction à la théorie de Landau	76
D.3. Critère de Ginzburg : deuxième démonstration	80
<i>Exercices</i>	82
<i>Notes et références</i>	88

CHAPITRE III. GROUPE DE RENORMALISATION

A. Notions fondamentales : blocs de spins, surface critique, points fixes	91
A.1. Blocs de spins et transformations non linéaires	92
A.2. Transformations linéaires	95
A.3. Surface critique et points fixes	97
B. Comportement au voisinage d'un point fixe. Exposants critiques	100
B.1. Discussion élémentaire	101
B.2. Linéarisation au voisinage du point fixe	102
B.3. Fonction de corrélation en champ nul	105
B.4. Fonction de corrélation $B \neq 0$	107
B.5. Energie libre	108
B.6. Lois d'échelle et remarques	110
C. Modèle d'Ising sur réseau triangulaire et approximation des cumulants	110

D. Modèle gaussien	114
D.1. Transformation dans l'espace de Fourier	115
D.2. Modèle gaussien	118
D.3. Point fixe gaussien	121
E. Calcul des exposants critiques à l'ordre ε	125
E.1. Point fixe non gaussien	125
E.2. Equations différentielles de renormalisation	126
E.3. Méthode de « raccordement »	128
F. Champs marginaux et fonction $\beta(g)$	132
F.1. Equation différentielle pour un champ marginal	132
F.2. Fonction de corrélation	139
<i>Exercices</i>	142
<i>Notes et références</i>	149

CHAPITRE IV. MODÈLES BIDIMENSIONNELS

A. Modèle XY : étude qualitative	153
A.1. Développement haute température	153
A.2. Développement basse température	155
A.3. Rôle des vortex	157
B. Analyse par le groupe de renormalisation	159
B.1. Modèle de Villain	159
B.2. Groupe de renormalisation pour le modèle XY	164
C. Modèles-σ non linéaires	167
<i>Exercices</i>	171
<i>Notes et références</i>	173

DEUXIÈME PARTIE. THÉORIE DES PERTURBATIONS ET RENORMALISATION : CHAMP SCALAIRE EUCLIDIEN

CHAPITRE V. DÉVELOPPEMENT PERTURBATIF. DIAGRAMMES DE FEYNMAN

A. Théorème de Wick et fonctionnelle génératrice	178
A.1. Fonction génératrice pour une seule variable	178
A.2. Théorème de Wick	180
A.3. Fonctionnelle génératrice	181

B. Développement perturbatif de $G^{(2)}$ et $G^{(4)}$. Diagrammes de Feynman	184
B.1. Développement perturbatif pour une variable	184
B.2. Calcul de $G^{(2)}$ à l'ordre g	185
B.3. Calcul de $G^{(2)}$ à l'ordre g^2	190
B.4. Fonction de corrélation à quatre points $G^{(4)}$	194
B.5. Règles de Feynman dans l'espace des k	197
C. Fonctions de corrélation connexes. Vertex propres	201
C.1. Cumulants d'une distribution de probabilité	202
C.2. Fonctionnelle génératrice des diagrammes connexes	202
C.3. Vertex propres et fonctionnelle génératrice	205
D. Potentiel effectif. Développement en nombre de boucles	211
D.1. Symétrie brisée et potentiel effectif	211
D.2. Développement en nombre de boucles	213
E. Evaluation des intégrales de Feynman	214
E.1. Un cas élémentaire	214
E.2. Méthode de l'identité de Feynman	215
E.3. Représentation paramétrique générale	217
E.4. Calcul de η à l'ordre ε^2	221
F. Comptage de puissances. Divergences ultraviolettes et infrarouges	223
F.1. Argument topologique	224
F.2. Argument dimensionnel	225
F.3. Divergences infrarouges	226
<i>Exercices</i>	229
<i>Notes et références</i>	234

CHAPITRE VI. RENORMALISATION

A. Introduction	237
A.1. Classification des théories	237
A.2. Diagrammes divergents d'une théorie renormalisable	238
A.3. Régularisation	239
B. Renormalisation de la masse et de la constante de couplage	240
B.1. $\Gamma^{(2)}$ à l'ordre d'une boucle : renormalisation de la masse	241
B.2. $\Gamma^{(4)}$ à l'ordre d'une boucle : renormalisation de la constante de couplage	242

C. Renormalisation du champ. Contre-termes	243
C.1. $\Gamma^{(2)}$ à l'ordre de deux boucles : renormalisation du champ	243
C.2. Contre-termes	247
D. Cas général	249
D.1. $\Gamma^{(4)}$ à l'ordre de deux boucles	249
D.2. Relation entre fonctions de corrélation nues et renormalisées	253
D.3. Cas de la masse nulle	254
E. Opérateurs composés et leur renormalisation	255
E.1. Fonctionnelle génératrice	256
E.2. Exemple : $\Gamma^{(2,1)}$ à l'ordre d'une boucle	258
E.3. Comptage de puissances et contre-termes	259
F. Schéma de soustraction minimal	261
<i>Exercices</i>	265
<i>Notes et références</i>	270

CHAPITRE VII. ÉQUATIONS DE CALLAN-SYMANZIK

A. Renormalisation et groupe de renormalisation	273
A.1. Analyse dimensionnelle	273
A.2. Identification de la constante de couplage renormalisée	275
A.3. Classification des théories	278
A.4. Identification de Z_3	279
A.5. Schémas de renormalisation et définition de $\beta(g_0)$..	280
B. Equations de Callan-Symanzik pour la théorie nue ($T = T_c$)	283
B.1. Divergences infrarouges	283
B.2. Démonstration de l'équation de Callan-Symanzik	284
B.3. Calcul de $\beta(g_0, \epsilon)$ à l'ordre d'une boucle	286
B.4. Solution de l'équation de Callan-Symanzik	287
B.5. Application aux phénomènes critiques	289
C. Equations de Callan-Symanzik pour la théorie renormalisée	290
C.1. Equation de Callan-Symanzik pour $T = T_c$	291
C.2. Points fixes	292
C.3. Equation de Callan-Symanzik pour $T > T_c$	296

D. Le groupe de renormalisation en dimension $D = 4$	302
D.1. Calcul de $\beta(g)$	302
D.2. Théorie des perturbations améliorée par le groupe de renormalisation	304
E. Le groupe de renormalisation en dimension $D < 4$	305
E.1. Une équation pour $\beta(g, \varepsilon)$	306
E.2. Calcul de $\beta(g, \varepsilon)$ et $\gamma(g, \varepsilon)$ dans le schéma minimal	307
E.3. Calcul de β , γ et $\bar{\gamma}$ à l'ordre de deux boucles	308
E.4. Calcul des exposants critiques à l'ordre ε^2	310
<i>Exercices</i>	311
<i>Notes et références</i>	315

TROISIÈME PARTIE. THÉORIE QUANTIQUE DES CHAMPS SCALAIRES

CHAPITRE VIII. INTÉGRALES DE CHEMIN EN MÉCANIQUE QUANTIQUE ET MÉCANIQUE STATISTIQUE

A. Spin quantique et modèle d'Ising	323
A.1. Intégrale de chemin pour un spin 1/2	323
A.2. Correspondances	325
B. Particule dans un potentiel	328
B.1. Représentation d'une amplitude de probabilité par une intégrale de chemin	329
B.2. Fonctionnelle génératrice des produits- T . Expression du produit- T	333
B.3. Oscillateur harmonique et condition aux limites de Feynman	336
C. Prolongement euclidien et commentaires	340
C.1. Fonction de partition quantique	340
C.2. Analogie classique	343
C.3. Oscillateur harmonique euclidien	344
<i>Exercices</i>	345
<i>Notes et références</i>	349

CHAPITRE IX. QUANTIFICATION DU CHAMP DE KLEIN-GORDON

A. Quantification des vibrations élastiques	354
A.1. Système à N degrés de liberté : lagrangien, hamiltonien, quantification	354
A.2. Quantification de la ligne continue	356
A.3. Modes normaux	358
A.4. Phonons, espace de Fock	360
B. Quantification du champ de Klein-Gordon	363
B.1. Equation d'onde, lagrangien	363
B.2. Décomposition de Fourier	364
B.3. Quantification canonique	366
B.4. Commutateur à $t \neq t'$	367
B.5. Propagateur	368
B.6. Singularités sur le cône de lumière	370
C. Couplage à une source classique. Théorème de Wick	372
C.1. Opérateur d'évolution. Equation de Dyson	372
C.2. Oscillateur harmonique couplé à une source classique	374
C.3. Champ de Klein-Gordon couplé à une source classique	377
C.4. Théorème de Wick	379
<i>Exercices</i>	382
<i>Notes et références</i>	385

CHAPITRE X. FONCTIONS DE GREEN ET MATRICE S

A. Développement perturbatif des fonctions de Green	389
A.1. Représentation interaction et matrice S	389
A.2. Formule de Gell-Mann et Low	395
A.3. Développement perturbatif	397
A.4. Renormalisation et conditions de normalisation	400
B. Intégrale de chemin et théorie euclidienne	401
B.1. Intégrale de chemin pour $Z(j)$	401
B.2. $\Gamma^{(4)}$ au deuxième ordre en g . Rotation de Wick	403
B.3. Relation avec la théorie euclidienne	405
B.4. Equations du mouvement	408
C. Sections efficaces et matrice S	409
C.1. Sections efficaces	410

C.2. Application : 2 particules $\rightarrow$ 2 particules	413
C.3. Calcul d'un élément de matrice S	414
C.4. Formules de réduction	417
C.5. Matrice S et fonctions de Green renormalisées	420
C.6. Unitarité et renormalisation	422
D. Unitarité de la matrice S	423
D.1. Unitarité et relation de dispersion	423
D.2. Règles de coupure	428
E. Généralisations	434
E.1. Champ scalaire chargé	434
E.2. Champ vectoriel massif	437
E.3. Couplages dérivatifs	440
<i>Exercices</i>	441
<i>Notes et références</i>	443

QUATRIÈME PARTIE. THÉORIES DE JAUGE

CHAPITRE XI. QUANTIFICATION DU CHAMP DE DIRAC ET DU CHAMP ÉLECTROMAGNÉTIQUE

A. Quantification du champ de Dirac	449
A.1. Espace de Fock pour les fermions	449
A.2. Equation de Dirac	452
A.3. Solutions de l'équation de Dirac	455
A.4. Quantification du champ de Dirac	458
A.5. Propagateur du champ de Dirac	462
B. Théorème de Wick pour les fermions	463
B.1. « Oscillateur fermionique » couplé à une source externe	463
B.2. Formulation fonctionnelle : intégration sur des variables de Grassmann	466
C. Formalisme lagrangien pour le champ électromagnétique classique	468
C.1. Equations de Maxwell et potentiel électromagnétique	468
C.2. Formulation covariante	469
C.3. Invariance de jauge et conservation du courant	471

D. Quantification du champ électromagnétique	473
D.1. Problèmes dans la quantification du champ électromagnétique	473
D.2. Quantification dans la jauge de Lorentz : fonctionnelle génératrice	477
<i>Exercices</i>	481
<i>Notes et références</i>	484

CHAPITRE XII. ÉLECTRODYNAMIQUE QUANTIQUE

A. Règles de Feynman pour l'électrodynamique quantique	487
A.1. Fonctions de Green dans l'espace de configuration ..	487
A.2. Eléments de matrice S	492
B. Applications	495
B.1. Diffusion d'un électron par un champ coulombien ...	495
B.2. Calcul de $e^+ e^- \rightarrow \mu^+ \mu^-$	497
B.3. Application : calcul du rapport R	499
C. Diagrammes à une boucle en électrodynamique	501
C.1. Comptage de puissances pour l'électrodynamique	501
C.2. Propagateur du photon et polarisation du vide	504
C.3. Propagateur de l'électron	511
C.4. Vertex électron-photon	515
C.5. Moment magnétique anormal de l'électron	519
D. Identités de Ward, unitarité, renormalisation	521
D.1. Identités de Ward	521
D.2. Unitarité	527
D.3. Renormalisation	529
D.4. Groupe de renormalisation de l'électrodynamique	532
<i>Exercices</i>	535
<i>Notes et références</i>	542

CHAPITRE XIII. THÉORIES DE JAUGE NON ABÉLIENNES

A. Champs de jauge non abéliens : théorie classique	546
A.1. Le groupe $SU(2)$	546
A.2. Transport parallèle et dérivation covariante	551
A.3. Tenseur $F^{\mu\nu}$ et lagrangien	556

B. Quantification des théories de jauge non abéliennes	559
B.1. Fonctionnelle génératrice	559
B.2. Règles de Feynman	562
B.3. Renormalisation et identités de Ward	566
C. Modèle des interactions électro-faibles	568
C.1. Bosons de Goldstone et phénomène de Higgs	569
C.2. Théorie de Fermi des interactions faibles	573
C.3. Modèle de Glashow-Salam-Weinberg	575
D. Chromodynamique quantique	583
D.1. Liberté asymptotique	584
D.2. Annihilation $e^+ e^-$: cinématique	590
D.3. Equation d'Altarelli-Parisi	592
D.4. Correction d'ordre α_s au rapport R	598
E. Théories de jauge sur réseau	599
E.1. Modèle de Wegner	600
E.2. Action de Wilson et couplage fort	602
E.3. Couplage faible et invariance d'échelle asymptotique ...	606
<i>Exercices</i>	609
<i>Notes et références</i>	616
Appendice A : Transformées de Fourier. Intégration gaussienne ...	619
A.1. Transformées de Fourier	619
A.2. Intégrales gaussiennes	621
A.3. Intégrales en dimension D	623
Appendice B : Intégrales de Feynman en régularisation dimension- nelle (cas euclidien)	625
Appendice C : Formulaire	627
C.1. Groupe de Lorentz	627
C.2. Matrices de Dirac	628
C.3. Sections efficaces	630
C.4. Règles de Feynman	631
<i>Index</i>	635

Avant-propos

En 1965, J. Bjorken et S. Drell concluait leur ouvrage classique (*), qui fut la bible d'une génération de physiciens des particules, par ces considérations pessimistes : « Par conséquent toutes les conclusions reposant sur le groupe de renormalisation... sont hasardeuses et doivent être prises avec la plus grande prudence. Ainsi en est-il de tous les résultats des théories des champs relativistes. » La même année, F. Dyson, l'un des pères fondateurs de l'électrodynamique quantique, écrivait (**): « On imagine aisément que d'ici quelques années les concepts de la théorie des champs auront totalement disparu du vocabulaire quotidien des physiciens des hautes énergies. » On sait que le développement de la physique n'a pas confirmé ces prévisions : la physique moderne des particules élémentaires est devenue indissociable des théories de jauge non abéliennes, généralisation de l'électrodynamique quantique élaborée au lendemain de la Deuxième Guerre mondiale par Schwinger, Feynman, Dyson et Tomonaga.

Après tout, la théorie quantique des champs avait été inventée pour décrire la création et l'annihilation de particules, et son retour en force dans ce domaine, après une période de disgrâce d'une dizaine d'années, n'était pas une surprise totale. Plus étonnant fut l'impact de la théorie des champs sur la compréhension des phénomènes critiques, au début des années soixante-dix. Certes les méthodes de la théorie des champs (fonctions de Green, diagrammes de Feynman...) avaient déjà été empruntées par les physiciens du solide et les physiciens nucléaires, dans le cadre du « problème à N -corps », mais il s'agissait avant tout d'outils de travail, qui n'introduisaient pas d'idées fondamentalement nouvelles (sauf en supraconductivité et superfluidité, mais c'étaient là les prémisses d'une approche très générale et très féconde, celle des symétries brisées). Au contraire l'irruption du concept de renormalisation en physique statistique était révolutionnaire, car rien ne laissait prévoir que l'élimination des infinis, qui furent la plaie initiale de la théorie des champs, pouvait jouer un rôle dans un domaine où ils étaient a priori absents. Le mérite de Wilson fut de réaliser que les

(*) Bjorken-Drell, chapitre 19.

(**) *Physics Today* (juin 1965).

fonctions de corrélation d'un système au voisinage d'un point critique étaient, à longue distance, décrites par une théorie renormalisée. Cette observation fondamentale devait d'ailleurs donner un éclairage nouveau sur la renormalisation.

Il m'a semblé utile d'écrire un ouvrage d'introduction, qui mette les développements de ces vingt dernières années à la portée d'étudiants de troisième cycle, ainsi que de physiciens non spécialistes qui souhaitent s'initier aux méthodes de la théorie des champs. J'ai suivi un plan d'ensemble assez différent des exposés traditionnels, qui sont, en règle générale, orientés uniquement soit vers la physique statistique, soit vers la physique des hautes énergies. La démarche choisie permet d'arriver rapidement au cœur de la théorie des champs, à savoir la renormalisation et le groupe de renormalisation, dans le cadre du modèle le plus simple possible : le modèle en φ^4 , ou modèle de Ginzburg-Landau, tout en conduisant à des applications fondamentales à la physique des phénomènes critiques.

Le livre est divisé en quatre parties. La première est une introduction aux phénomènes critiques et au groupe de renormalisation, dans la version de Wilson. Des applications comme le « développement ε » et le modèle XY sont traitées en détail. La deuxième partie traite du développement perturbatif, toujours dans le cadre de la physique statistique. Le chapitre V introduit les techniques de base (fonctionnelles génératrices, diagrammes de Feynman). C'est un chapitre un peu technique et quelque peu fastidieux, mais nécessaire pour l'étude des deux chapitres suivants qui abordent les concepts fondamentaux de la théorie : renormalisation et groupe de renormalisation, cette fois dans la version des équations de Callan-Symanzik.

Avec la troisième partie, on quitte l'espace euclidien de la physique statistique pour l'espace de Minkowski de la théorie quantique relativiste. L'essentiel du formalisme est déjà en place, car les fonctions de Green de la théorie quantique ne sont qu'un prolongement analytique des fonctions de corrélation de la théorie euclidienne. Ceci est expliqué au chapitre VIII, dans le cas de la mécanique quantique ordinaire. Alors que les intégrales fonctionnelles avaient été jusqu'à ce point utilisées de façon systématique, le chapitre IX ouvre une brève parenthèse pour exposer la quantification canonique, tandis que dans le chapitre suivant est rassemblé l'essentiel des résultats indispensables pour les applications à la physique des particules... s'il n'existait que des particules de spin zéro ! Enfin la quatrième partie introduit les théories de jauge : on y décrit la quantification du champ de Dirac et du champ électromagnétique (chapitre XI). L'électrodynamique quantique est étudiée de façon assez détaillée au chapitre XII, tandis que le chapitre XIII contient une introduction aux champs de jauge non abéliens. Le livre se conclut par un bref aperçu des théories de jauge sur réseau,

ce qui permet de faire une synthèse de l'essentiel des concepts introduits dans l'ensemble de l'exposé. Le lecteur intéressé uniquement par l'aspect « théorie quantique des champs » pourra commencer au chapitre V et sauter dans le chapitre VII le paragraphe A et les passages plus spécifiquement consacrés aux phénomènes critiques.

Comme j'ai voulu écrire un livre d'introduction, et non de référence, j'ai été amené dans certains cas à renoncer à des démonstrations générales trop complexes pour les remplacer par des exemples illustratifs. J'ai également choisi d'exposer la plupart des calculs de façon très détaillée ; j'espère que cela ne masquera pas la physique sous-jacente. Enfin un certain nombre de sujets importants ont été omis, afin de garder une dimension raisonnable à ce livre ; c'est le cas par exemple de la solution exacte du modèle d'Ising à deux dimensions, des lois d'échelle pour l'équation d'état, des invariances (Lorentz, symétries discrètes), des développements en produits d'opérateurs, des anomalies, de l'approche géométrique aux théories de jauge, etc. Le lecteur trouvera ces sujets exposés de façon excellente dans les livres ou articles cités en référence. De façon générale, j'ai plutôt insisté sur les *méthodes*, et donné assez peu de détails sur les *systèmes* physiques utilisés pour illustrer ces méthodes.

Quelques notions de mécanique statistique suffisent pour aborder la première partie. En dehors de certains passages où le volume des calculs devient assez important, l'essentiel des trois premiers chapitres peut d'ailleurs être enseigné en fin de maîtrise, comme complément à un cours de mécanique statistique. La seconde partie ne fait appel à aucune notion avancée ; cependant les calculs sont parfois un peu longs. Enfin des connaissances de mécanique quantique, au niveau d'un cours de maîtrise, sont indispensables pour les deux dernières parties. Quelques notions élémentaires sur les fonctions de variables complexes, sur la théorie des groupes et sur la physique des particules élémentaires faciliteront également la compréhension de ces deux parties.

L'exposé est accompagné de 120 exercices de difficulté très variée. Certains sont de simples applications du cours, d'autres peuvent être de petits problèmes ouvrant la voie à des développements nouveaux. J'ai essayé (sans toujours y parvenir), d'éviter le style « Démontrer l'équation (36) » en donnant des énoncés détaillés, des indications de solutions ou des réponses partielles ; dans certains cas le renvoi à une référence permettra au lecteur de vérifier ou de compléter sa solution.

Un certain nombre de livres et d'articles de revue ont été rassemblés dans les références générales. Ce sont ceux qui m'ont été les plus utiles dans la préparation de cet ouvrage, et aussi ceux qui, à mon avis, seront les plus facilement accessibles au lecteur. Il était évidemment hors de question de donner une bibliographie complète et, selon la formule

consacrée, j'adresse mes excuses anticipées à ceux de mes collègues dont le travail n'a pas été convenablement cité.

Ce livre est issu de cours de troisième cycle, enseignés sous des formes diverses dans le DEA de Physique Théorique (Marseille-Nice), dans le DEA de Physique de la Matière Condensée (Nice) et dans le Magistère de Constantine. Je suis très reconnaissant aux étudiants dont les remarques ont été précieuses dans la mise au point de ce livre. Victor Alessandrini a lu l'intégralité du manuscrit et m'a fait bénéficier de remarques très pertinentes, en particulier sur l'organisation générale de l'ouvrage. J'ai également bénéficié des critiques et suggestions de E. Brezin, J. P. Provost, J. L. Meunier et F. Guérin. P. de Giovanni m'a fait part de remarques très utiles sur le texte et les exercices. Je suis très reconnaissant à Michèle Leduc, qui a beaucoup fait pour que ce livre paraisse. J'ai mis à rude épreuve la patience de Chantal Djankoff, qui a dactylographié de multiples versions du manuscrit avec sa compétence et son efficacité habituelles, et je l'en remercie très vivement. Enfin, Joanna a partagé avec moi doutes et incertitudes pendant la rédaction ; sans son soutien de tous les jours, ce livre n'aurait pas pu être écrit.

Nice, décembre 1986

Références générales

- E. ABERS et B. LEE : « Gauge Theories », *Physics Reports*, **9**, 141 (1973).
- D. AMIT : *Field Theory, the Renormalization Group and Critical Phenomena*, World Scientific (1984) (2^e édition).
- J. BJORKEN et S. DRELL : Vol. I. *Relativistic Quantum Mechanics* et Vol. II. *Relativistic Quantum Fields*, McGraw-Hill (1965).
- N. BOGOLIUBOV et D. CHIRKOV : *Introduction à la théorie quantique des champs*, Dunod (1960).
- E. BREZIN, J. C. LE GUILLOU et J. ZINN-JUSTIN : « Field Theoretical Approach to Critical Phenomena » in *Phase Transitions and Critical Phenomena*, Vol. VI, Academic Press (1976).
- J. C. COLLINS : *Renormalization*, Cambridge University Press (1983).
- S. GASIOROWICZ : *Elementary Particle Physics*, Wiley (1966).
- G. 'HOOFT et M. VELTMAN : « Diagrammar » in *Particle Interactions at Very High Energies*, Plenum Press, New York (1974).
- C. KITTEL : *Introduction à la physique de l'état solide*, Dunod (1970).
- C. ITZYKSON et J. B. ZUBER : *Quantum Field Theory*, McGraw-Hill (1980).
- J. KOGUT : « An Introduction to Lattice Gauge Theory and Spin Systems », *Reviews of Modern Physics*, **51**, 659 (1979).
- L. LANDAU et E. LIFSHITZ : *Physique statistique*, Editions MIR (1967).
- S. K. MA : *Modern Theory of Critical Phenomena*, Benjamin (1976).
- A. MESSIAH : *Mécanique quantique*, Dunod (1961).
- V. POPOV : *Functional Integration in Quantum Field Theory and Statistical Mechanics*, Reidel (1983).
- P. RAMOND : *Field Theory : a Modern Primer*, Benjamin (1980).
- S. SHENKER : « Field Theories and Phase Transitions » in *Recent Advances in Field Theory and Statistical Mechanics*, Ecole des Houches (1982).
- R. STREATER et A. WIGHTMAN : *PCT, Spin, Statistics and All That*, Benjamin (1964).
- G. TOULOUSE et P. PFEUTY : *Introduction au groupe de renormalisation et à ses applications*, Presses Universitaires de Grenoble (1975).
- K. WILSON : « The Renormalization Group : Critical Phenomena and the Koudo Problem », *Reviews of Modern Physics*, **47**, 774 (1975).

Landau (approximation de) : 62, 67.
 Landau (théorie de) : 71.
 Largeur de la région critique : 106, 107.
 Legendre (transformation de) : 49, 206.
 Liberté asymptotique : 295, 584.
 Lie (groupe de) : 546.
 Lie (algèbre de) : 548.
 Ligne physique : 97.
 Localité : 368, 390.
 Logarithmes dominants : 279, 304.
 Longueur de corrélation : 33, 47, 246, 327, 599.

M

Marginal (champ, opérateur ou variable) : 103, 132.
 Masse nue : 236, 240.
 Masse renormalisée : 242.
 Matrice S : 376, 389, 393, 409, 414, 419.
 Matrice T : 410.
 Matrice de transfert : 328.
 Méson : 584.
 Métastabilité : 72.
 Minimal (MS ; schéma de soustraction) : 261, 307, 508, 587.
 Modèle :
 — gaussien : 79, 118,
 — de Heisenberg : 29, 167,
 — d'Ising : 28, 325,
 — σ -non linéaire : 167,
 — de Villain : 159,
 — de Wegner : 600,
 — XY : 153.
 Modes normaux : 121, 352, 358.
 Moment : 21, 178, 367.
 Moment conjugué : 355, 358.
 Moment magnétique anormal : 485, 520.
 Muon : 497.

N

Noether (théorème de) : 471.
 Nombre d'occupation : 361, 450.
 Normalisation (conditions de) : 245, 254, 260, 400.

O

Opérateur composé : 236, 255.
 Opérateur d'évolution : 323, 372.
 Onde de spin : 158, 162.

P

Paquet d'ondes : 365.
 Paramètre d'ordre : 27.
 Pauli (matrices de) : 547, 628.
 Perturbatif (développement) : 121, 184, 397.
 Phonon : 361.
 Plaquette : 93, 600.
 Point fixe : 98, 287, 292.
 — gaussien : 125,
 — infrarouge stable : 293,
 — non gaussien : 126,
 — ultraviolet stable : 294.
 Poisson (formule de sommation de) : 161.
 Polarisation : 439, 473.
 Polarisation du vide : 510, 532.
 Potentiel effectif : 212.
 Potentiel thermodynamique (ou de Gibbs) : 49.
 Produit normal : 362.
 Produit- T : 327, 333, 370, 462.
 Propagateur : 189, 370, 462, 479, 488, 489.

Q

Quantification :
 — d'un champ classique : 352,
 — du champ de Dirac : 458,
 — du champ électromagnétique : 473,
 — du champ de Klein-Gordon : 366,
 — des théories de jauge non abéliennes : 559,
 — des vibrations élastiques : 359.
 Quark : 448, 499, 583.

R

Réduction (formules de) : 417.
 Relations de dispersion : 426.

Régularisation : 239,
 — dimensionnelle : 215, 240, 403,
 504, 585,
 — de Schwinger : 218, 239,
 — sur réseau : 240, 603.

Renormalisables, non renormalisa-
 bles, super-renormalisables (théo-
 ries) : 238.

Renormalisation :
 — du champ : 243,
 — (constante de) : 244,
 — de la constante de couplage :
 242,
 — sur couche de masse : 400,
 — de l'électrodynamique : 529,
 — (équations différentielles de) :
 126,
 — (groupe de) cf. groupe,
 — de la masse : 241,
 — des opérateurs composés : 258,
 — des théories de jauge non abé-
 liens : 566.

Représentation :
 — adjointe : 550,
 — fondamentale : 548, 550,
 — d'un groupe : 548.

Représentation interaction : 373, 392.

S

Saveur : 583.
 Schwinger (régularisation de) : 218,
 239.
 Section efficace : 412, 630.
 Singularité infrarouge : 594.
 Singularité de masse (ou colinéaire) :
 594.
 Source (du champ) : 181, 334, 363,
 377, 467, 488.
 Soustraction (point de) : 254, 400.
 Spin-statistique (théorème) : 461.
 Structure (constante de) : 550.
 Structure (fonctions de) : 592.

Stuëckelberg (lagrangien de) : 479.
 Susceptibilité magnétique : 39.
 Surface critique : 97.
 Symétrie brisée : cf. brisure de symé-
 trie.
 Symétrie $O(n)$: 184.

T

Tadpole : 214, 398.
 Taux de désintégration : 412, 630.
 Tension de la corde : 605.
 Transformation du groupe de renor-
 malisation (TGR) : 90, 92, 117.
 Transmutation dimensionnelle : 589.
 Transport parallèle : 552, 555.
 Tricritique (point) : 103.

U

Ultraviolette (divergence) : 215, 223.
 Unitarité : 377, 390, 423, 527.
 Universalité : 52, 107.

V

Valeur moyenne sur le vide : 569.
 Variable essentielle, marginale, ines-
 sentielle : cf. champ —.
 Vertex : 186, 189, 399, 489.
 Vertex propre : 205, 399.
 Vide : 333, 361, 388, 569.
 Villain (modèle de) : 159.
 Vortex : 157.

W

Ward (identité de) : 523, 566, 610.
 Wegner (modèle de) : 600.
 Weinberg (angle de) : 577, 580.
 Weinberg (théorème de) : 229.
 Wick (rotation de) : 405.
 Wick (théorème de) : 180, 379, 465.
 Wilson (action de) : 604.
 Wilson (boucle de) : 602, 604.

XYZ

XY (modèle) : 153.