
Miscela de Physique, Systématique &
Électronique
Tome I

Olivier Maurice

Le 2 avril 2022

Ce livre a été publié avec www.bookelis.com

ISBN : 979-10-359-5582-3

Édité par AFSCET, 2022
AFSCET (Association Française de Sciences des Systèmes),
ENSAM, 151 Boulevard de l'Hôpital, 75013 Paris.
www.afscet.asso.fr

Tous droits de reproduction, d'adaptation et de traduction, intégrale ou partielle réservés pour tous pays.

Res-Systemica Libri

L'Association française de science des systèmes (AFSCET, afscet.asso.fr) se réunit depuis plus de vingt ans chaque année pour des journées de travail au Moulin d'Andé.

Elle édite la revue en ligne Res-Systemica (res-systemica.org), fondée par Évelyne Andreewsky en 2001. Avec « Res-Systemica Libri », elle propose des ouvrages d'auteur, des publications collectives, des bandes dessinées ou la réédition d'ouvrages épuisés.

La collection « Res-Systemica Libri » permet de diffuser les travaux de science des systèmes ou systémique. L'approche peut être historique, disciplinaire ou pluridisciplinaire, théorique ou fondée sur les applications. Elle présente des œuvres issues de recherches originales ou des travaux pédagogiques.

Elle s'adresse à toute personne qui s'intéresse à la théorie des systèmes et à ses applications, aux enseignants et aux étudiants de l'université, des écoles d'ingénieurs, des écoles de management, des instituts de science politique et bien entendu aux professionnels qui se sentent concernés par l'approche systémique.

Bonne lecture !

Le Conseil d'administration de l'AFSCET, novembre 2020

Table des matières

Préface	11
Préambule	13
.1 Guide de lecture	14
La systémique	17
.2 Séance 1	17
.2.1 Qu'est-ce qu'un système?	18
.2.2 Échelle	18
.2.3 Reconnaissance	19
.2.4 Relations entre espaces	20
.2.5 Matrices et propriétés	21
.2.6 Entropie	21
.3 Séance 2	22
.3.1 Complexe cellulaire	22
.3.2 Dualité	23
.4 Séance 3	24
.4.1 Métrique	24
.4.2 Quelques exercices	25
.5 Séance 4	26
.5.1 Exercice	28
.5.2 Réponse	28
.5.3 Résultat pour une fonction logistique	31
.5.4 Résultat pour la fonction logistique complémentaire	31
.6 Séance 5	31
.6.1 Exercice	32
.7 Séance 6	34
Perception, traitement, action & transmission : prérequis	37
.8 Circuit	38
.9 Notations	38
.10 Branche de Kirchhoff	39

.10.1	Flux ou courant	44
.10.2	Différences de potentiels U	45
.10.3	Fonction scalaire appliquée aux points de l'espace	47
.10.4	Espace naturel et espace dual	47
.10.5	Forces motrices	52
.10.6	Équation de Kirchhoff	53
.10.7	Espace des cycles	55
.10.8	Force dans l'espace des cycles	60
.10.9	Divergence	63
.10.10	Le champ vu comme une branche : polarisation	65
.10.11	Champ tubulaire	68
.11	Tenseurs et matrices	72
.12	Contravariance et covariance	73
.13	Espace fonctionnel	73
.14	Spineurs	75
.15	Espace de configuration	77
.16	Cordes & référentiels	77
.17	Couplages dans l'espace des branches ou des cycles	84
.18	Géométrie différentielle	86
.18.1	L'algèbre des 4-vecteurs flux	89
.18.2	Géométrie différentielle	92
.18.3	Premières ébauches pour la modélisation d'objets réels	97
.19	De Laplace au temps	99
.19.1	Propagation des sources dans le domaine temporel	100
.19.2	Propagation laplacienne	102
.19.3	4-vecteur flux temporel	103
.20	Spineurs	103
.21	Référentiels en mouvement relatif	104
.22	Résumé des idées ou concepts importants abordés en préalable	109

De l'objet réel au circuit : préliminaires mathématiques 111

.23	Applications	111
.24	Relations et classes d'équivalences	112
.24.1	Homéomorphisme, orientations	112
.24.2	Objet et modèle	115
.25	Groupe	117
.26	Espace vectoriel	118
.27	Application linéaire, image et noyau	119
.28	Espace dual	119
.29	Produit interne de vecteurs & adjoint	119
.30	Tenseurs	120
.31	Espaces topologiques, espaces métriques et variétés	122
.32	Homéomorphisme et invariants topologiques	125
.33	Somme connectée	127
.33.1	Somme directe	127

.33.2	Somme connectée	127
.33.3	Couplage de type 1 ou somme connectée de type 1 : corde	127
.33.4	Couplage de type 2 ou somme connectée de type 2 : partage d'une branche	128
.33.5	Couplage de type 3 ou somme connectée de type 3 : partage d'un cycle	128
.34	Espaces de Hausdorff	129
.35	Homologie, groupes d'homologie	130
.36	Groupes d'homotopies	132
.36.1	Homotopie liée aux r-cycles	133
.36.2	Chirurgie	134
.37	Variété	135
.37.1	Localité plane	136
.37.2	Conclusion sur l'affinité locale	141
.37.3	Description Newtonienne	141
.38	Calculs sur les variétés	143
.38.1	Application différentielle	143
.38.2	Vecteurs	144
.38.3	Produit extérieur	144
.38.4	Généralisation du produit intérieur	146
.38.5	Opérateur de Hodge ou opérateur étoile	146
.38.6	Dérivée extérieure	147
.38.7	Divergence généralisée	148
.38.8	Théorème de Stokes	148
.38.9	Coordonnées curvilignes	149
.38.10	Analyse tensorielle	150
.39	Variétés riemanniennes & complexes	155
.39.1	Equations du mouvement de Boltzmann - Hamel	161
.39.2	Torsion	162

Le principe quantique & la chimie : regard déterministe versus regard probabiliste **163**

.40	Principes fondamentaux de la mécanique quantique	163
.41	Postulats mathématiques de la mécanique quantique	168
.42	Diagonalisation des matrices	168
.42.1	Bille dans un parabolöide elliptique	170
.42.2	Invariance cinétique en cas de changement d'axe	171
.42.3	Écriture du mouvement sous le formalisme de Dirac	172
.42.4	de Newton à Planck	173
.43	Gamma matrices	174
.44	Lien entre la mécanique quantique et l'ATR	178

Théorie des jeux et IA **181**

.45	Modèle mathématique de la connexion ATR - TDJ	182
.46	IA	183
.47	Modèle mathématique des microprocesseurs	184

Électrochimie	187
.48 Première loi de Faraday	187
.49 Seconde loi de Faraday	187
.50 Mobilité des ions	188
.50.1 Viscosité	188
.50.2 Relation d'Einstein	188
.51 Oxydoréduction	189
.51.1 Jargon de l'électrochimie	190
.51.2 Réaction Rédox	190
.52 Notion de courant	190
.52.1 Nature des porteurs de charges	191
.53 Description d'une chaîne électrochimique	192
.53.1 Potentiels & connectivité d'états	193
.53.2 Potentiel chimique & enthalpie	194
.54 Potentiels de Volta & Galvani	195
.55 Électrochimie des gaz & arcs	195
.56 Conductivité	200
Automatique	201
.57 Systèmes continus	201
.58 Système linéaire ou invariant	202
.59 Système causal	202
.60 Régime permanent	203
.61 Transformée de Laplace & valeur rms	203
.61.1 Fonction d'ordre exponentiel	204
.61.2 Changement d'échelle	204
.61.3 Fonctions périodiques	204
.61.4 Quelques transformées usuelles	205
.62 Fonction de transfert	205
.63 Schémas-blocs	206
.63.1 Boucle ouverte	208
.63.2 schémas-blocs équivalents	209
.64 Stabilité des systèmes	210
.64.1 Rapidité	211
.64.2 Stabilité	211
Matrices de diffraction, chaîne ou ABCD et métrique	213
.65 Matrice chaîne ou ABCD	213
.66 Matrice de diffraction	214
.67 Démarche d'utilisation	216
.68 Propagation modale	217
.68.1 Dispersion et pertes généralisées	219
.68.2 Réflexion sur une frontière	220
.68.3 Modèle de Branin	221
.69 Bruit & environnement	228

.69.1	Ports	230
.70	Système	230
.70.1	Nombreuses interactions	231
.70.2	Comportement aléatoire	231
.70.3	Émergence	231
.70.4	Réduction autour des ports	232
.70.5	Matrice d'interaction	233
.71	Systèmes multi-ports : torons de lignes couplées	234
.72	Topologie & cavité	235
.72.1	Puissance dans une structure de ligne fermée	236
.72.2	Ligne ouverte ou fermée, rayonnement	237
.72.3	Guide d'onde	242
.72.4	Non linéarité	251
.73	Les équations de Maxwell	254
.73.1	Expérience de Rowland	254
.73.2	Loi de Laplace & 4-vecteur champ	259
.73.3	Équations de Maxwell	265
.73.4	Unification du champ	266
.73.5	Quadrichamp	275
.73.6	Maxwell & les circuits électroniques	278
.73.7	Invariant généralisé	283
.74	Remarques sur les relations relativistes	283

Cohabitation des échelles : émergences 285

.75	Le monde comme superposition d'échelles	286
.76	Barrière de potentiel	289
.77	Fonction d'onde et action	292
.78	Diode tunnel	295
.79	Thermodynamique	297
.79.1	Premier principe de la thermodynamique	300
.79.2	Second principe de la thermodynamique	302
.79.3	Synthèse des concepts de thermodynamique & gaz de cycles	303
.80	Rappels sur les variétés avant d'aborder le gaz de cycles	308
.80.1	Circuits & géométrie différentielle	310
.80.2	Lagrangien, métrique et moindre action	312
.81	Particules et circuits, gaz de cycles	314
.82	Moindre action, géométrie différentielle et circuits	319
.83	Métrique & action	324
.83.1	Valeur rms comme invariant	327
.83.2	Écart d'action	328
.84	Relativité	334
.85	Relativité - II	338
.85.1	Transformation de Minkowski	340
.85.2	Espace de Minkovski à 4 dimensions	343
.85.3	De Minkovski à Lorentz	343

.86	Équation purement contravariante de la dynamique	345
.86.1	Causalité	347
.86.2	Contractions	348
.86.3	Cinématique relativiste	348
.87	4-vecteurs	351
.87.1	Analyse variationnelle du principe de moindre action	352
.87.2	Action d'une particule libre relativiste	353
.87.3	Quadrivecteur vitesse	354
.87.4	Quadrivecteur impulsion-énergie	354
.87.5	Quadrivecteur force	354
.87.6	Le tenseur du champ électromagnétique	355
.87.7	Champ de gravitation	356
.88	Les équations d'Einstein : prémisses	358
.88.1	Machine électrique	358
.88.2	Système non holonomique	362
.88.3	Écart de chemins incluant le temps	364
.88.4	Première synthèse	365
.89	Mécanique	365
.89.1	Particule chargée dans un champ électrique uniforme constant	367
.89.2	Particule chargée dans un champ magnétique constant	368
.89.3	Particule dans une ambiance de champ électromagnétique	369
.89.4	Oscillateur harmonique	369
.89.5	Accélération et gravité	371
.89.6	Équation d'Einstein I	372
.89.7	Tenseur de Riemann	376
.89.8	Espace de configuration d'un système dynamique	378
.89.9	Cinématique relativiste	379
.89.10	Dynamique relativiste	380
.89.11	Équations d'Einstein II	381
.90	Modèle de machine électrique	383
.91	Le sandwich des échelles	384
.91.1	Couche matérielle sous-jacente	385
.92	Statique & dynamique	385

Table des figures

1	Branche de Kirchhoff	40
2	Force extérieure	59
3	Concept de bord d'un ruban	62
4	Branched de Kirchhoff avec source de flux externe	64
5	Champ tubulaire	69
6	Champ H et B	72
7	Changement de référentiels	80
8	Rotations	81
9	Connexion de ports	85
10	Transformation de Lorentz	104
11	Opérations sur une pièce	113
12	Fabrication d'un cylindre	114
13	Cylindre avec trois branches	115
14	Bac avec deux anses	116
15	Bac avec deux anses, seconde vue	117
16	Chemins privilégiés	124
17	Déplacement parallèle	156
18	Énergie cinétique suivant l'axe 1	165
19	Bille sur la surface parabolöide	170
20	Graphe et dessin du problème des fentes d'Young	175
21	Distribution d'intensité obtenue	176
22	Distribution d'intensité obtenue suivant la mécanique quantique	177
23	Graphe de l'équation $a(bx+c)$	184
24	Schéma de la pile	192
25	Fonction de transfert et schéma-bloc	206
26	Nouveau schéma-bloc	207
27	Asservissement	207
28	Asservissement 2	208

29	Cellule des télégraphistes	214
30	Méthode des ondes mobiles	215
31	Onde guidée	218
32	Ligne court-circuitée	239
33	E et B d'une charge en mouvement	256
34	Relevés temporels ou spatiaux	262
35	Mesure du temps de la particule	264
36	Mesure de la vitesse de la particule	265
37	Cône d'espace-temps	268
38	Diode tunnel	295
39	trajectoire thermodynamique	304
40	Cycle de Carnot	305
41	Variété	309
42	Deux trajectoires envisagées	331
43	Différence d'action	337
44	Rotation	341
45	événements dans l'espace-temps	347
46	Contraction du temps et de l'espace	349
47	Parcours fermé	377

À mon frère Pascal

Préface

C'est un honneur d'écrire la préface de cet ouvrage qui est unique en son genre et l'aboutissement de près de 40 années de recherches et de réflexions de son auteur. J'ai eu le privilège de côtoyer Olivier Maurice depuis plus d'une décennie, d'abord en tant que membre du comité scientifique des colloques sur la compatibilité électromagnétique, et ensuite dans le cadre de divers projets de recherche européens.

Je dois avouer que la première fois que j'ai reçu ce manuscrit, il m'a paru pour le moins surprenant, voire insolite. En réalité, le problème venait de moi. J'attendais de voir un livre classique abordant un thème défini et bien cadré, comme par exemple la théorie des circuits, la compatibilité électromagnétique, ou tout autre domaine de la physique ou de l'ingénierie que maîtrise son auteur. Or, ce livre est tout sauf un livre classique et ce n'était surtout pas le but d'Olivier Maurice d'écrire un texte de référence sur un sujet spécifique.

A première vue, l'ouvrage peut paraître comme un mélange quelque peu arbitraire de théories et d'outils mathématiques d'une part, et de différentes branches et disciplines de la physique et d'ingénierie d'autre part. Mais en réalité, ce livre est beaucoup plus qu'un miscela de physique, systémique et électronique. Le concept central du livre est l'analyse tensorielle des réseaux qui est utilisée tout au long du livre pour décrire différents systèmes physiques. La démarche est cependant loin d'une présentation classique et rappelle plutôt le cheminement intuitif et parfois sinueux d'un chercheur qui tâtonne, qui cherche des pistes, et qui fait des allers-retours pour arriver à un résultat aussi solide et robuste que possible. En ce sens, le livre d'Olivier Maurice s'apparente à une carte routière permettant au lecteur d'accéder, tout en forgeant son propre chemin, à des schémas d'analyse et de résolution d'une multitude de problèmes physiques et multi-physiques.

Le style d'écriture de l'auteur est clairement dans la lignée de Feynman. En effet, Olivier Maurice s'appuie fortement sur une communication verbale et orale, rendant la lecture du livre très plaisante. Des répétitions volontaires, offrant à chaque fois de nouveaux points de vue, permettent d'approfondir les sujets complexes abordés dans le livre.

En réalisant cette unique et superbe synthèse qui propose des pistes de réflexions inspirantes au lecteur en créant des ponts entre des disciplines scientifiques distinctes, Olivier Maurice rend un immense service aux jeunes chercheurs en les incitant à sortir de leur zone de confort pour développer leur faculté de raisonnement et leur capacité d'innovation, plutôt que de se contenter de suivre des chemins déjà bien établis.

Bonne lecture!

Farhad Rachidi

Professeur à l'EPFL

Préambule

Les techniques de calcul des circuits électroniques donnent accès à des méthodes de modélisation universelles. Il est frappant de réviser tous les "schémas équivalents" qui ont pu être développés pour la thermique, pour la mécanique, pour les fluides, etc. Sans doute penserons-nous rapidement aux correspondances de tous ces phénomènes physiques en équations différentielles, lesquelles sont aussi une base d'élaboration des équations des circuits électroniques. Une machine électrique est un assemblage de deux systèmes coaxiaux en rotation relative. Une machine électrique implique de fait le concept de deux référentiels en mouvement relatif accéléré. Ce concept renvoie aux notions développées par Einstein dans le cadre de la relativité générale.

L'une des difficultés posée aux étudiants dans l'interprétation des modèles de la physique est l'ambivalence entre les représentations dans le domaine temporel et le domaine des fréquences. Notre culture classique nous positionne dans un espace - temps à quatre dimensions. Mais la réalité factuelle nous impose une modélisation sous forme de résonateurs en fréquence qui peuvent évoluer dans le temps. Cette dualité implique l'usage d'un outil mathématique particulier : la transformation de Laplace. Cet outil est de nouveau une composante usuelle de l'électronique. Gabriel Kron a inventé l'analyse tensorielle des réseaux. Ce formalisme très général, appuyé et importé en France par des ingénieurs d'exceptions comme Arnold Kaufmann, André Angot, Denis Papin, va nous permettre d'établir les équations de tout problème de physique, dont des problèmes de systèmes pourvus d'électronique.

L'enfant de la nature qu'est l'électronique rassemble ces traits de caractère. La science de l'électronique ne permettrait-elle pas dès lors de bien modéliser ses sciences consœurs ?

Expliquer la nature c'est juste prédire nos observations par le langage des mathématiques en s'appuyant sur des modèles, ici inspirés de l'électronique. Par ailleurs la systémique peut être vue comme une tentative de modéliser la nature.

Dans l'idée d'aborder la systémique et toute la complexité qu'elle aborde, il m'a semblé que l'électronique donnait les moyens de modéliser nombre des problèmes qu'elle traite. Il nous reste énormément de progrès à réaliser pour comprendre la complexité de la nature et notre appartenance à son monde. Beaucoup de raisonnements restent trop simplistes et trop souvent encore, un animal, une plante qui contredisent nos prétentions sont brutalement supprimés sans considérations pour l'impact écologique de ces suppressions. C'est à nous tous de contribuer à trouver un mode de société qui cohabite avec la faune et la flore. Le but est extrêmement complexe, peut-être le plus grand de nos défis. Parallèlement, l'électronique a envahi notre mode de vie et nous ne pourrions pas revenir en arrière, cela n'aurait d'ailleurs aucun sens. Profitons de nos connaissances en électronique et in-

formatique pour essayer de modéliser la nature et par là, mieux la comprendre et nous y réinscrire. Ce peut être en tout cas, la modeste contribution des électroniciens et des physiciens à un élan écologique qui ne peut se résoudre à protester sur quelques thèmes quand l'extinction de tant d'espèces se passe et qui dépend de nous tous. Trouver ces compromis devient indispensable et un des objectifs que nous devons tous avoir dans nos actions et constructions de tous les jours.

Si l'électronique est polluante, nous pouvons réduire son impact et a contrario elle permet d'optimiser les systèmes de façon à augmenter leurs rendements. Et ces optimisations sont aussi fonctions de conceptions multiphysiques où les outils de l'électronique sont inspirants pour établir les équations de ces systèmes multidisciplinaires. Voilà un peu tout ce que j'espère communiquer aux lecteurs de cet ouvrage : des idées pour fabriquer des systèmes innovants et optimaux.

Le but de ce livre n'est pas de donner au lecteur un recueil de solutions, mais de lui communiquer des pistes parfois incomplètes, parfois restant à compléter ou formuler, mais inspirantes pour innover, du moins je l'espère ! Il retrace des chemins de raisonnement et de pensées.

Je ne veux pas vous donner des solutions, mais des pistes et des idées pour que vous puissiez vous-même les reconstruire.

Sur la légitimité des modèles d'électronique et électromagnétisme pour les autres physiques, un argument fort est de savoir qu'en topologie cellulaire, les équations obtenues à partir des dérivées du lagrangien sont les mêmes que les équations dans l'espace des cycles de Kron. De fait : équations de l'électromagnétisme, de l'électronique et de la physique en général se recourent.

Prérequis Il est extrêmement difficile de faire un exposé qui puisse s'adresser à tout le monde. Il me semble que celui-ci puisse s'adresser à des étudiants de niveau master ou à des ingénieurs. Il faut connaître l'algèbre matricielle et les notions d'espace vectoriel, ainsi que quelques notions de base en physique. Enfin il faut connaître la transformée de Laplace.

.1 Guide de lecture

Après une introduction portant plus sur l'aspect mathématique de l'analyse tensorielle des réseaux, l'ensemble du livre est une succession de réflexions basées sur des problématiques au départ assez simples. Le lecteur pourra piocher de-ci de-là diverses idées qui pourront alimenter ses propres réflexions et recherches. Néanmoins, certains concepts se construisent au fil de l'écriture et sous-tendent tout le matériel qui précède à leur exposé. Pour ces concepts, le lecteur ne pourra en couvrir toute la signification qu'à condition d'avoir lui-même abordé tous les prérequis. Par ailleurs, le but de ce livre N'EST PAS de fournir des textes de références auxquels l'utilisateur puisse se reporter sans réflexion. Certaines équations peuvent être non terminées ou incomplètes ! Cela peut surprendre, voire choquer. Mais d'ailleurs quelle équation de la physique pourrait aujourd'hui prétendre être exacte ? Ce ne sont que des modèles qui tentent tant bien que mal de prédire ce que nous allons observer dans diverses expériences. Pour ma part je suis persuadé que tout physicien avance par essais - erreurs et ne peut innover que par ce processus. J'ai donc délibérément choisi d'aborder les sujets présentés comme les réflexions que je mène en tant réel, en empruntant divers détours et en parvenant - parfois - à un résultat robuste après plusieurs

essais. Ainsi les répétitions sont volontaires, sous diverses formes, car nous ne pouvons aborder des thèmes compliqués que par ces exercices répétitifs. Le texte se veut donc une série de proposition de pistes de solutions à des problèmes de physique, pour que le lecteur puisse se forger son propre chemin. S'il désire trouver des solutions de références, ma foi, de nombreux ouvrages écrits par des physiciens talentueux remplissent cet objectif.

J'ai aussi dispersé les thèmes au sein de thèmes connexes qui en réalité en englobent la matière. Un second objectif important de ce livre est de fournir au lecteur les techniques et méthodes pour aborder des problèmes de multiphysique complexes. A mesure que l'ingénierie progresse, la conception des systèmes se fait de plus en plus comme des compromis entre les exigences des différents métiers. Il ne faut donc plus voir une matière comme exclusive, mais plutôt comme un point d'entrée vers une problématique qui intégrera diverses physiques.

Comme chapitre d'introduction, il m'a semblé intéressant après réflexion de proposer un cours de systémique que j'avais préparé pour des doctorants et qui aborde pas mal des notions que nous fouillons par la suite.