

N° d'ordre :

UNIVERSITE PARIS XI
UFR SCIENTIFIQUE D'ORSAY

THESE

Présentée

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR EN SCIENCES
DE L'UNIVERSITE PARIS XI ORSAY

Discipline : Physique des Accélérateurs

Par

Laurent NADOLSKI

Sujet : Application de l'Analyse en Fréquence à l'Etude de la
Dynamique des Sources de Lumière

Soutenue le 6 juillet 2001 devant la Commission d'Examen :

M.	O.	BOHIGAS	Président
M.	J.	LASKAR	Directeur de thèse
Mme	M.P.	LEVEL	Examineur
M.	A.	NADJI	Examineur
M.	L.	RIVKIN	Rapporteur
M.	D.	ROBIN	Rapporteur
M.	F.	RUGGIERO	Rapporteur
M.	A.	MOSNIER	Correspondant CEA

Application de l'Analyse en Fréquence à l'Etude de la Dynamique des Sources de Lumière

Résumé

Cette thèse est consacrée à l'étude de la dynamique du faisceau dans les anneaux de stockage : seule la dynamique transverse des particules individuelles est abordée. Dans une première partie, nous présentons des outils permettant l'étude et la caractérisation de la dynamique (Hamiltonien, intégrateur, Analyse en Fréquence) ainsi que des simulations numériques réalisées sur quatre machines de rayonnement synchrotron : l'ALS, l'ESRF, SOLEIL et Super-ACO. Un code d'intégration des équations du mouvement a été écrit utilisant une nouvelle classe d'intégrateurs symplectiques à pas tous positifs (Laskar et Robutel, 2000). L'intégrateur, plus précis d'un ordre de grandeur que le traditionnel schéma de Forest et Ruth, est comparé avec les codes BETA, DESPOT et MAD. L'Analyse en Fréquence (Laskar, 1990), méthode numérique d'analyse de systèmes dynamiques fondée sur une technique de Fourier raffinée, est notre principal outil d'analyse; il permet de calculer des cartes en fréquence, véritables empreintes de la dynamique d'un accélérateur. La grande sensibilité de la dynamique aux défauts magnétiques et aux réglages hexapolaires est mise en évidence.

La seconde partie est dédiée à l'analyse d'expériences réalisées sur deux sources de lumière. Avec l'équipe de l'ALS (Berkeley), nous avons obtenu la première carte en fréquence expérimentale d'un accélérateur. L'accord entre l'expérience et la modélisation est remarquable. A Super-ACO (Orsay), l'étude des glissements des nombres d'ondes avec l'amplitude a permis de mettre en évidence un fort pseudo-octupôle issu des champs de fuite des quadripôles. Les implications sont importantes et permettent de mieux comprendre les performances actuelles de l'anneau. Ces résultats reposent sur l'analyse de données tour par tour. De nombreux phénomènes connexes tels l'analyse des matrices-réponse et la décohérence sont également abordés.

Mots clefs : Analyse en Fréquence, dynamique transverse, nonlinéarités, décohérence, intégrateur symplectique, Hamiltonien, source de lumière, mesures tour par tour

Application of the Frequency Map Analysis to the Study of the Beam Dynamics of Light Sources

Abstract

The topic of this thesis is the study of beam dynamics in storage rings with a restriction to single particle transverse dynamics. In a first part, tools (Frequency Map Analysis, Hamiltonian, Integrator) are presented for studying and exploring the dynamics. Numerical simulations of four synchrotron radiation sources (the ALS, the ESRF, SOLEIL and Super-ACO) are performed. We construct a tracking code based on a new class of symplectic integrators (Laskar and Robutel, 2000). These integrators with only positive steps are more precise by an order of magnitude than the standard Forest and Ruth's scheme. Comparisons with the BETA, DESPOT and MAD codes are carried out. Frequency Map Analysis (Laskar, 1990) is our main analysis tool. This is a numerical method for analysing a conservative dynamical system. Based on a refined Fourier technique, it enables us to compute frequency maps which are real footprints of the beam dynamics of an accelerator. We stress the high sensitivity of the dynamics to magnetic errors and sextupolar strengths.

The second part of this work is dedicated to the analysis of experimental results from two light sources. Together with the ALS accelerator team (Berkeley), we succeeded in obtaining the first experimental frequency map of an accelerator. The agreement with the machine model is very impressive. At the Super-ACO ring, the study of the tune shift with amplitude enabled us to highlight a strong octupolar-like component related to the quadrupole fringe field. The aftermaths for the beam dynamics are important and give us a better

understanding the measured ring performance. All these results are based on turn by turn measurements. Many closely related phenomena are treated such as response matrix analysis or beam decoherence.

Key words : Frequency Map Analysis, beam dynamics, nonlinearities, beam decoherence, symplectic integrator, Hamiltonian, light source, turn by turn measurements

Au lecteur,
A l'amoureux de la Physique,
A celui qui sait lire au-delà du texte ...

Remerciements

Je tiens à remercier du plus profond du cœur celui qui a guidé mes pas vers le monde de la recherche : Jacques LASKAR. Ce qu'il m'a enseigné, la confiance qu'il m'a accordée et l'amitié qui nous lie sont inestimables devant ma modeste contribution à la physique des accélérateurs.

Je suis reconnaissant à Phi NGHIEM de m'avoir initié au monde des accélérateurs. Son expérience et ses conseils m'ont été d'un très grand secours.

Ma gratitude va à Dave ROBIN pour m'avoir accueilli à l'ALS, m'avoir permis le premier contact avec un accélérateur, expérience impressionnante mais à laquelle j'ai très vite pris goût ! Sa disponibilité et sa gentillesse m'ont beaucoup touché.

Comment remercier Philippe ROBUTEL ? bien qu'astronome (ce n'est pas un défaut), je crois qu'il a été mon interlocuteur le plus attentif et le plus régulier. Sa gentillesse et sa bonté naturelles, sa clarté pour transformer un problème compliqué en solution évidente ont rendu ma thèse encore plus agréable.

Dois-je encore dire toute ma reconnaissance à Amor NADJI ? il est rare de trouver à la fois la compétence, la disponibilité et l'amitié chez une même personne.

Je mesure l'honneur que me font Lenny RIVKIN et Francesco RUGGIERO d'être rapporteurs de ce travail.

Je remercie Oriol BOHIGAS d'avoir accepté de participer à ce jury.

Mes remerciements vont à Yannis PAPAPHILIPPOU pour ses nombreuses suggestions lors de la relecture de ce mémoire.

Ma gratitude va aux équipes qui m'ont accueilli durant ces trois années :

- L'équipe Astronomie et Systèmes Dynamiques. Je ne peux pas citer tous ses membres, chercheurs et étudiants. Travailler dans un milieu si riche, si agréable est un trésor inestimable pour le péripète d'une thèse.
- L'équipe du projet SOLEIL et spécialement Jean-Louis LACLARE toujours disponible pour la discussion.
- Le Service d'Etude des Accélérateurs, en particulier Alban MOSNIER et Jacques PAYET.
- Le groupe de l'ESRF, spécialement A. ROBERT
- Le groupe théorie de Super-ACO avec tout particulièrement Marie-Paule LEVEL, Pascale BRUNELLE et Henri ZYNGIER. Je suis conscient de la chance que j'ai eue de pouvoir « jouer » avec un accélérateur et de la confiance qu'il a été accordé à mon travail. Les discussions nombreuses et fructueuses m'ont permis d'approfondir ma connaissance expérimentale et théorique des accélérateurs.
- Le groupe Dynamique Faisceau de l'ALS et tout particulièrement Christoph STEIER qui a toujours pris le temps de répondre à mes nombreux et très long courriers électroniques. Ses conseils m'ont aidé bien plus qu'il ne le pense.

Je voudrais remercier spécialement Alexandre CORREIA d'avoir partagé mon chemin durant bientôt quatre années. Le seul point qui nous sépare vraiment est le titre de notre thèse. Alors que j'étudie la dynamique des accélérateurs, Alexandre se consacre à celle des planètes du Système Solaire.

Mes pensées vont enfin à ma famille qui a toujours été convaincue que je mènerais ce travail à son terme.

Table des matières

Introduction	vii
I Accélérateurs : Théorie et simulations	1
1 Dynamique d'un accélérateur circulaire	3
1.1 Présentation	3
1.1.1 Introduction	3
1.1.2 Description générale	3
1.2 Hamiltonien	6
1.2.1 Lagrangien relativiste	6
1.2.2 Hamiltonien relativiste	7
1.2.2.1 Moments canoniques	7
1.2.2.2 Définition des coordonnées de l'accélérateur	8
1.2.2.3 Changement de variable indépendante	10
1.2.2.4 Changement d'échelle	11
1.2.2.5 Expression finale du Hamiltonien à trois degrés de liberté	11
1.2.2.6 Approximations	12
1.2.3 Potentiel vecteur	13
1.3 Dynamique transverse	16
1.3.1 Dynamique linéaire	16
1.3.1.1 Particule <i>on momentum</i>	17
1.3.1.2 Particule <i>off momentum</i>	19
1.3.2 Dynamique nonlinéaire	20
1.4 Définitions complémentaires	22
1.4.1 Résonances	22
1.4.2 Acceptances et ouvertures	23
1.4.2.1 Définitions	23
1.4.2.2 Un schéma d'optimisation de l'ouverture dynamique	24
2 Méthodes et outils	25
2.1 Réalisation d'un intégrateur symplectique	26
2.1.1 Introduction	26
2.1.2 Ancienne approche	27
2.1.3 Approche moderne	28

TABLE DES MATIÈRES

2.1.3.1	Présentation	28
2.1.3.2	Le flot d'un système	29
2.1.3.3	Intégrateur symplectique <i>ab ovo</i>	30
2.1.3.4	Méthodes de construction	31
2.1.4	Intégrateurs utilisés	34
2.1.5	Intégration des éléments parfaits	36
2.1.5.1	Section droite	37
2.1.5.2	Aimant de courbure parfait	38
2.1.5.3	Quadripôle droit	42
2.1.5.4	Hexapôle parfait droit	43
2.1.6	Etude comparative	44
2.1.6.1	Introduction	44
2.1.6.2	Propriétés	44
2.2	Analyse en Fréquence	48
2.2.1	Introduction	48
2.2.2	Application fréquence	48
2.2.3	Propriétés de l'application fréquence numérique	51
2.2.4	Applications préliminaires	52
2.2.4.1	Le pendule	52
2.2.4.2	L'application d'Hénon	54
2.2.5	Accélérateurs : carte en fréquence	58
2.2.5.1	Application fréquence	58
2.2.5.2	Principe de construction	59
3	Analyse en Fréquence et Sources de Lumière	61
	Introduction	61
3.1	Le Projet SOLEIL	65
3.1.1	Optique	65
3.1.2	Dynamique	65
3.1.2.1	Optique faible émittance numéro 1	66
3.1.2.2	Optique faible émittance numéro 1 modifiée	70
3.1.2.3	Optique faible émittance numéro 2	71
3.1.2.4	Conclusion sur les optiques de SOLEIL	72
3.2	Super-ACO	74
3.2.1	Introduction	74
3.2.2	Description d'une maille	74
3.2.3	Choix du logiciel de <i>tracking</i>	76
3.2.3.1	Symplecticité et champ de fuite avec le code BETA	76
3.2.3.2	Symplecticité et faible rayon de courbure	77
3.2.3.3	Notes sur l'ordre <i>scaling</i> de BETA	78
3.2.4	Machine idéale	79
3.2.4.1	Optique	79
3.2.4.2	Dynamique	81
3.2.4.3	Défauts de gradients des quadripôles droits	84
3.2.5	Machine nominale	85

	3.2.5.1	Optique	85
	3.2.5.2	Dynamique	86
	3.2.6	Premières conclusions	86
3.3	L'ESRF		89
	3.3.1	Optique	89
	3.3.2	Premier jeu hexapolaire	89
		3.3.2.1 Dynamique <i>on momentum</i>	89
		3.3.2.2 Dynamique <i>off momentum</i>	92
		3.3.2.3 Conclusion préliminaire	94
		3.3.2.4 Durée de vie Touschek	94
	3.3.3	Second jeu hexapolaire	97
		3.3.3.1 Dynamique <i>on momentum</i>	97
		3.3.3.2 Dynamique <i>off momentum</i>	99
		3.3.3.3 Conclusion préliminaire	102
		3.3.3.4 Durée de vie Touschek	102
	3.3.4	Conclusions sur les deux réglages nominaux	103
3.4	L'ALS		105
	3.4.1	Optique	105
	3.4.2	Dynamique	105
	3.4.3	Vers un modèle plus réaliste (I)	106
	3.4.4	Vers un modèle plus réaliste (II)	108
	3.4.5	Dynamique <i>off momentum</i>	109
	3.4.6	Conclusion	111

II Résultats expérimentaux 113

4	ALS : Premières cartes en fréquence expérimentales	115	
4.1	Introduction	115	
4.2	Etapas préparatoires	116	
	4.2.1 Conditions expérimentales	117	
4.3	La décohérence <i>ab ovo</i>	118	
	4.3.1 Décohérence due à la chromaticité	119	
		4.3.1.1 Déphase chromatique induit	119
		4.3.1.2 Densité de probabilité longitudinale	120
		4.3.1.3 Expression finale	121
	4.3.2 Décohérence 1D due à la dispersion des nombres d'ondes	122	
		4.3.2.1 Densité de probabilité transverse	122
		4.3.2.2 Expression finale	123
	4.3.3 Décohérence 2D due à la dispersion des nombres d'ondes	124	
	4.3.4 Résumé	124	
4.4	Prétraitement des données	125	
4.5	Premières cartes en fréquence mesurées	126	
	4.5.1 Première expérience	126	
	4.5.2 Deuxième expérience	127	

4.5.3	Expériences avec Wigglers fermés	128
4.6	Conclusions	129
5	Super-ACO	133
5.1	Acquisition des matrices-réponse	134
5.1.1	Description du programme LOCO	134
5.1.1.1	Perturbation de l'orbite fermée par un <i>kick</i> dipolaire	134
5.1.1.2	Matrice-réponse	135
5.1.2	Application à Super-ACO	136
5.1.2.1	Procédure adoptée	137
5.1.3	Etude préliminaire	137
5.1.3.1	Conditions du test	137
5.1.3.2	Résultats	138
5.1.3.3	Test complet du modèle	138
5.1.4	Etapes préliminaires à l'analyse des matrices-réponse	139
5.1.4.1	Bruit moyen des BPM	139
5.1.4.2	Mesure de la fonction dispersion dans les BPM	140
5.1.5	Matrice-réponse hexapôles éteints et onduleurs ouverts	141
5.1.5.1	Introduction	141
5.1.5.2	Conditions expérimentales	142
5.1.5.3	Dispersion mesurée dans les BPM	143
5.1.5.4	Résultats obtenus avec LOCO	144
5.1.6	Matrice-réponse hexapôles allumés et onduleurs ouverts	152
5.1.6.1	Influence des hexapôles	152
5.1.6.2	Conditions expérimentales	152
5.1.6.3	Dispersion mesurée dans les BPM	153
5.1.6.4	Résultats obtenus avec LOCO	155
5.1.7	Matrice-réponse hexapôles allumés et onduleurs fermés	160
5.1.7.1	Conditions expérimentales	160
5.1.7.2	Dispersion mesurée dans les BPM	161
5.1.7.3	Résultats obtenus avec LOCO	162
5.2	Glissements expérimentaux des nombres d'ondes	167
5.2.1	Etalonnage de l'électrode à 45 degrés	167
5.2.2	Point de fonctionnement nominal	168
5.2.2.1	<i>Kick</i> avec le perturbateur P4	168
5.2.2.2	<i>Kick</i> avec le perturbateur P6	174
5.2.2.3	Utilisation de l'électrode à 45 degrés : familles H1 et H2 éteintes	176
5.2.3	Vers un nouveau modèle de Super-ACO	179
5.2.3.1	Observations	179
5.2.3.2	Champs de fuite des quadripôles	180
5.2.3.3	Conséquences sur la dynamique globale	183
5.3	Espace des Phases et glissement des nombres d'ondes	187
5.3.1	Etalonnage des BPM	187
5.3.1.1	Conditions expérimentales	187
5.3.1.2	Notes sur le BPM4	188

5.3.1.3	Notes sur le BPM12	190
5.3.2	Point de routine avec minimum de couplage	190
5.3.2.1	Conditions expérimentales	190
5.3.2.2	Espace des phases	191
5.3.2.3	Courbe en fréquence	192
5.3.3	Point de routine avec couplage fort	195
5.3.3.1	Conditions expérimentales	195
5.3.3.2	Espace des phases	196
5.3.3.3	Courbes en fréquence	196
5.3.4	Familles H1 et H2 éteintes avec minimum de couplage	198
5.3.4.1	Conditions expérimentales	198
5.3.4.2	Espace des phases	198
5.3.4.3	Courbe en fréquence	198
5.3.5	Familles H1 et H2 éteintes sans minimum de couplage	200
5.3.5.1	Conditions expérimentales	200
5.3.5.2	Espace des phases	201
5.3.5.3	Courbes en fréquence	201
5.3.6	Brève conclusion	203
5.4	Bilan et conclusion sur l'optique de Super-ACO	203
Conclusions et perspectives		207
Bibliographie		209
Annexes		217
A Compléments sur les intégrateurs		217
A.1	Intégration exacte d'une section droite	217
A.2	Intégration d'un dipôle	218
A.2.1	Aimant secteur exact	218
A.2.2	Aimant dipolaire en coordonnées rectangulaires	220
A.2.3	Coin dipolaire	221
A.2.4	Dipôle combiné sans terme petite machine	221
A.2.5	Dipôle droit en coordonnées rectangulaires	223
A.2.6	Dipôle avec terme petite machine	223
A.2.6.1	Intégration de A	224
A.2.6.2	Intégration de B	225
A.2.6.3	Calcul du correcteur	225
A.3	Déplacements et rotations d'un élément	226
B Figures en couleur		229
Introduction		229
B.1	Le projet SOLEIL	230
B.2	Super-ACO	231
B.2.1	Simulations : différents modèles de Super-ACO.	231

TABLE DES MATIÈRES

B.2.2	Expérience : prise en compte des champs de fuite quadripolaires.	233
B.3	L'ESRF : point de fonctionnement nominal	235
B.4	L'ALS	237

Introduction

La physique des accélérateurs a connu de profonds bouleversements ces dernières années. L'augmentation des performances des machines en termes d'énergie, de durée de vie, de taille de faisceau s'est accompagnée de l'utilisation de champs magnétiques de plus en plus intenses et complexes (wigglers, onduleurs, solénoïdes, aimants supraconducteurs). Aujourd'hui, le régime de fonctionnement d'un accélérateur est fortement marqué par des phénomènes non-linéaires (résonances, chaos). De nombreux effets aussi bien individuels que collectifs doivent être désormais compris pour obtenir de hautes performances. Parallèlement, les méthodes d'investigation se sont développées ; beaucoup proviennent d'ailleurs de la Mécanique Céleste, « berceau » de l'étude des systèmes dynamiques (méthodes de perturbation, d'intégration, stabilité à long terme). A cela, il faut ajouter l'essor de l'informatique, un précieux outil du physicien des accélérateurs.

Le contenu de cette thèse est un exemple de ce lien entre la Physique des Accélérateurs et la Mécanique Céleste, puisque nous y appliquons une méthode récente, l'Analyse en Fréquence, qui a été initialement développée pour étudier la dynamique et la stabilité du Système Solaire sur plusieurs millions d'années (Laskar, 1990). En l'espace d'une seconde, une particule effectue environ 10 000 révolutions dans le collisionneur électron-positron de 27 km de circonférence du CERN (LEP). L'échelle de temps change mais pas les outils d'investigation.

Le travail ici-présenté est consacré à l'étude de la dynamique transverse des machines de rayonnement synchrotron. Il s'articule autour de deux grandes parties. Une première, théorique, présente les outils utilisés (Hamiltonien, intégrateurs symplectiques, Analyse en Fréquence) ; des simulations numériques ont été effectuées pour quatre machines : l'ALS (Berkeley), l'ESRF (Grenoble), SOLEIL (Saclay) et Super-ACO (Orsay). La seconde partie est dédiée à l'analyse d'expériences réalisées sur deux sources de lumière : l'ALS et Super-ACO.

Les machines de rayonnement synchrotron de troisième génération sont construites sur des optiques à forte focalisation afin d'atteindre de performances toujours plus extrêmes : les petites émittances créées permettent d'obtenir les hautes brillances recherchées. Cependant, de telles contraintes impliquent l'utilisation de champs magnétiques de forte intensité qui eux-mêmes vont exciter de nombreuses résonances et risquent ainsi de détériorer la dynamique globale du faisceau et de conduire à une faible ouverture dynamique et une faible acceptance en énergie. Il en résulte une injection lente et une faible durée de vie. Ces effets indésirables doivent être minimisés tout en conservant une haute brillance.

La dynamique des particules individuelles est une des causes principales de la limitation des performances actuelles des sources de lumière. Si les orbites sont instables aux grandes amplitudes, alors les électrons diffusés à ces grandes amplitudes lors de collisions avec les atomes du gaz résiduel (durée de vie liée au vide) ou avec d'autres électrons (durée de vie

Touschek) vont être perdus par le faisceau. Il en sera de même pour les particules injectées à grande amplitude (optimisation de l'injection).

Une des tâches principales du physicien des accélérateurs consiste d'abord à déterminer la meilleure optique possible de la machine, ensuite à définir une modélisation aussi proche que possible de la réalité et enfin, à développer des méthodes susceptibles d'améliorer la stabilité de la dynamique du faisceau.

La première étape consiste à modéliser chacun des éléments magnétiques d'un anneau de stockage. L'approche que nous avons retenue (chapitre 1) est une approche hamiltonienne locale : chaque élément magnétique (dipôle, quadripôle, multipôle) est modélisé par un Hamiltonien local à trois degrés de liberté, exprimé en coordonnées rectilignes ou curvilignes suivant la géométrie de l'élément. Dans chacun des cas, les approximations choisies sont explicitées. Le champ magnétique est toujours exprimé en considérant un profil magnétique longitudinal rectangulaire. Suivant le type d'élément et le rayon de l'accélérateur, les approximations des petits angles et des grandes machines seront ou non prises en compte.

La formulation hamiltonienne est particulièrement adaptée pour étudier la dynamique nonlinéaire et pour construire un intégrateur numérique des équations du mouvement. Bien que de nombreux codes dits de *tracking* existent déjà actuellement (*e.g.* les codes BETA, DESPOT, MAD et TRACY), ils ne sont pas optimisés et ne permettent pas de modéliser la dynamique à long terme aussi bien des petites et des grandes machines. Les spécificités recherchées sont d'obtenir un code numérique dédié exclusivement au *tracking*. Il doit pouvoir permettre d'intégrer en un temps optimum la trajectoire d'une particule (chargée) sur plusieurs millions de tours, et ceci pour de très nombreuses conditions initiales, de contrôler la précision et les approximations réalisées. Le but consiste à caractériser de manière quasi-exhaustive la dynamique du faisceau circulant dans un accélérateur. Pour toutes ces raisons, les approches matricielles, les approches fondées sur le calcul de l'application de premier retour de l'accélérateur ou permettant de calculer des formes normales n'ont pas été retenues.

La méthode d'intégration numérique que nous présentons est symplectique et repose sur l'utilisation de l'algèbre de Lie (chapitre 2). Ces nouvelles méthodes sont déjà très répandues aux Etats-Unis, elles ont plus de mal à s'établir en Europe. L'intégrateur le plus utilisé aujourd'hui pour les machines à électrons repose sur le travail de Forest et Ruth (1990) : c'est un intégrateur d'ordre 4. Nous présentons une nouvelle classe d'intégrateurs à pas d'intégration tous positifs (Laskar et Robutel, 2000). Ce sont des intégrateurs particulièrement adaptés à des Hamiltoniens H décomposables en deux parties A et B complètement intégrables où B joue le rôle d'un terme de perturbation : $H = A + \epsilon B$. Il est possible de construire des intégrateurs d'ordre n de reste $\mathcal{O}(s^n \epsilon + s^2 \epsilon^2)$ où s est le pas d'intégration. Il est souvent possible d'adjoindre un correcteur pour que le reste devienne un $\mathcal{O}(s^n \epsilon + s^4 \epsilon^2)$. L'intégrateur que nous avons retenu est plus précis que celui de Forest et Ruth d'un ordre de grandeur pour un nombre constant d'évaluations.

Les équations du mouvement intégrées, la dynamique des différentes machines de rayonnement synchrotron est étudiée au moyen de l'Analyse en Fréquence. C'est un outil extrêmement puissant reposant sur une technique de Fourier raffinée et permettant d'obtenir la décomposition complète d'un signal quasi-périodique. Nous commençons par l'appliquer à deux systèmes dynamiques simples : le pendule et l'application d'Hénon. Le pendule permet de décrire la

dynamique au voisinage d'une résonance. L'application d'Hénon permet de modéliser les perturbations introduites par un hexapôle dans une maille.

L'Analyse en Fréquence est une méthode particulièrement adaptée à la description de la dynamique d'un système à trois degrés de liberté comme celle d'un accélérateur et permet de manière assez intuitive et pratique d'identifier des résonances et d'estimer leur amplitude. Cette méthode est appliquée à la description théorique de quatre sources de lumière (chapitre 3) : l'ALS, l'ESRF, le projet SOLEIL et Super-ACO. Pour chacune de ces machines, nous calculons une carte en fréquence ainsi que l'ouverture dynamique associée pour différentes configurations (chromaticités, points de fonctionnement, énergie de la particule, défauts du champ magnétique). Une carte en fréquence décrit la variation des nombres d'ondes avec les amplitudes d'oscillation horizontale et verticale. Nous montrons la grande sensibilité de la dynamique aux réglages magnétiques et définissons un indice de stabilité corrélé à la variation temporelle des nombres d'ondes (diffusion des orbites). L'ensemble des résultats ne prend en compte que la dynamique transverse en négligeant le mouvement longitudinal. Les cartes en fréquence mettent en évidence clairement les principales résonances, en particulier les résonances couplées non vues ni étudiées dans les processus traditionnels d'optimisation de l'optique d'une machine. L'utilisation de la diffusion des orbites permet également d'identifier les résonances dans l'espace des configurations (l'ouverture dynamique).

Dans un anneau de stockage, la périodicité interne permet d'améliorer la dynamique du faisceau en limitant le nombre de résonances pouvant être excitées ; cependant la présence de défauts quadripolaires est une des causes principales de brisure de cette symétrie et entraîne souvent une détérioration de la durée de vie et du taux d'injection *via* l'excitation de non-linéarités. Une connaissance précise des défauts magnétiques est donc nécessaire pour établir un modèle aussi réaliste que possible de la machine ; ce travail est délicat, si bien que souvent l'écart entre les performances escomptées et réelles pour une machine donnée peut atteindre plus d'un facteur deux. L'analyse en fréquence est ici utilisée pour réaliser ce lien entre théorie et expérience.

A ces fins, des expériences innovantes ont été menées à l'ALS et Super-ACO (deuxième partie). Pour obtenir une modélisation aussi réaliste que possible de l'ALS, les matrices réponses expérimentales sont analysées pour déduire les défauts de gradients droits et tournés. Ce travail essentiel (Robin, Safranek et Decking, 1999) a été obtenu en utilisant le programme LOCO (Safranek, 1997). L'étape suivante consistait à pouvoir comparer la dynamique simulée et réelle de l'accélérateur. Nous présentons au chapitre 4 la première carte en fréquence expérimentale d'un accélérateur (Robin, Steier, Laskar, Nadolski : 2000, « Global Dynamics of the Advanced Light Source Revealed through Experimental Frequency Map Analysis »). Sa réalisation a été possible grâce à l'utilisation conjointe de moniteurs de position tour par tour et de deux aimants rapides permettant de simuler les amplitudes initiales d'oscillations bêta-trons horizontales et verticales. Les cartes en fréquences mesurées et simulées sont en excellent accord. Les expériences ont été réalisées pour le point de fonctionnement nominal de l'anneau de stockage mais aussi pour des réglages magnétiques proches de nœuds de résonances. La diffusion des orbites y a été mesurée. Ces résultats permettent d'envisager l'utilisation de l'Analyse en Fréquence en tant qu'outil en ligne (diagnostic de la dynamique du faisceau) dans la salle de contrôle d'un accélérateur. L'Analyse en Fréquence peut aussi être utilisée indépendamment de tout modèle pour valider une modélisation. Ce point est fondamental

puisqu'il permet ensuite de faire des simulations fiables de l'impact de la modification de la structure de l'anneau.

Le dépouillement et l'analyse de l'ensemble des données expérimentales a nécessité de comprendre des effets connexes liés au fait que nous ne mesurons pas le signal d'une particule individuelle mais d'un faisceau d'environ 40 milliards d'électrons. Nous présentons une modélisation de la décohérence à une et deux dimensions.

Des expériences faites à Super-ACO (chapitre 5) nous ont permis d'améliorer notre compréhension de la dynamique linéaire et nonlinéaire. La première étape a nécessité d'adapter le programme LOCO pour déterminer le premier jeu de gradients mesurés de l'anneau. Trois matrices réponses ont été acquises et analysées pour trois configurations distinctes : hexapôles éteints, hexapôles allumés, hexapôles allumés et onduleurs fermés. Les défauts déduits sont compatibles avec les tolérances magnétiques. Pour comprendre les écarts importants de performances entre la théorie et la simulation, nous avons réalisé les premières mesures, à Super-ACO, du glissement des nombres d'ondes avec l'amplitude horizontale pour les trois configurations précédentes. Super-ACO ne disposant pas de moniteur de position tour par tour, nous avons utilisé le signal collecté sur une simple électrode. Utilisant l'Analyse en Fréquence, le principal résultat est la mise en évidence d'un fort pseudo-octupôle (non modélisé jusqu'à présent) issu des champs de fuite des quadripôles. Les implications sont importantes et permettent de mieux comprendre les performances actuelles de l'anneau.