

N O T I C E

sur les

TITRES ET TRAVAUX SCIENTIFIQUES

de

Elena LEGA

Ingénieur de recherche 1ère Classe

à

L'OBSERVATOIRE DE LA CÔTE D'AZUR (NICE)

Decembre 2006

Contents

1	CURRICULUM VITAE	3
2	Enseignement	4
3	Encadrement	5
4	Organisation d'écoles	5
5	Résumé des travaux de recherche	6
5.1	Travail de thèse: analyse multi-échelle de la distribution des galaxies.	6
5.2	Aux confins de la mécanique céleste théorique: les calculs numériques poussés à l'extrême.	7
5.2.1	Mise au point d'indicateurs d'intégrabilité ainsi que de chaos.	8
5.2.2	Application de l'indicateur rapide de Lyapunov à l'étude du mouvement des petits corps du Système Solaire.	8
5.2.3	Stabilité et diffusion lente dans les systèmes hamiltoniens	9
5.2.4	Etude des systèmes faiblement dissipatifs: applications au mouvement d'attitude.	12
5.3	Travail en dynamique économique	12
6	Liste des ouvrages édités	13
7	Congrès	13
8	Ecoles	14
9	Liste de publications:	16

1 CURRICULUM VITAE

Nom de famille : Notari épouse Lega
Prénom : Elena.
Lieu de naissance : Turin, Italie.
Date de naissance : 5 novembre 1966.
Etat civil : Mariée, 3 enfants.
Nationalité : Italienne.
Adresse : Via C. Garnier 58, 18012 Bordighera, Italie.
Adresse professionnelle : Observatoire de la Côte d'Azur, BP 4229, 06304 Nice Cedex 4.
Telephone : -33-4 92 00 31 16.
Fax : -33-4 92 00 30 33.
E-mail : elena@obs-nice.fr
Diplôme : Thèse (de "Laurea") en physique soutenue le 22/3/1991, à l'Université de Milan (Italie), avec mention 110/110 avec félicitations.
Titre du mémoire : *"Mesure de la polarisation du fond cosmologique."*
Directeur de thèse : Giorgio Sironi, professeur à l'Université de Milan.
Diplôme : Thèse de doctorat en Sciences de l'Ingénieur soutenue à Nice le 9/9/1994 avec mention très honorable avec félicitations.
Titre de la thèse : *"Paramètres morphologiques associés à une analyse multi-échelle de la distribution des galaxies".*
Directeur de thèse : Albert Bijaoui, astronome à l' Observatoire de la Côte d'Azur, (Nice).
Diplôme : Thèse de doctorat en Sciences Economiques soutenue à Nice le 5/7/2001 avec mention très honorable avec félicitations.
Titre de la thèse : *"Analyse de la dynamique du modèle néo-autrichien de croissance. Etudes d'économies hors de l'équilibre"*
Directeurs de thèse : Jean Luc Gaffard, professeur à l'Université de Nice et Sophia Antipolis et Claude Froeschlé, astronome à l' Observatoire de la Côte d'Azur, (Nice).
Diplôme : Habilitation à diriger des recherches, soutenue à Nice le 2/12/2002.

Titre de la thèse : “*Systèmes dynamiques et modélisation: un but et un outil. Applications à la cosmologie, à la mécanique céleste et à la macro-économie*”.

- Position actuelle :**
- Octobre 1994 J’ai été recrutée sur un poste de IR2 (BAP I) au CNRS pour un travail de calcul scientifique à l’IDEFI (Institut de Droit et Economie de la Firme et de l’Industrie) à Sophia Antipolis.
 - 17 Avril 2000 affectation à l’Observatoire de la Côte d’Azur (dans l’équipe planétologie et systèmes dynamiques) suite à une AFIP.
 - Novembre 2003 promotion IR2 → IR1.

Compétences informatiques: Langages de programmation scientifique: FORTRAN 77/90, C.
Expérience avec les logiciels d’analyse et post-traitement: Mathematica, Matlab, Xmgr.
Formation en analyse numérique, analyse spectrale, analyse en ondelettes et analyse statistique des données.
Connaissance des systèmes d’exploitation UNIX/Linux et Windows.

Connaissance de langues: italien, français et anglais.

2 Enseignement

- 1989-91: travaux dirigés d’analyse mathématique et physique générale en D.E.U.G. Université de Milan.
- 1992-94: module de 20 heures de travaux pratiques en licence de Physique à la faculté de Nice.
- 1995-2000: cours magistraux (20 heures) avec Claude Froeschlé, *Introduction aux systèmes dynamiques et applications à la dynamique économique*, dans le cadre du DEA “Organisation Industrielle et Dynamique Economique”.
- 2001-2004: cours magistraux (20 heures) avec Claude Froeschlé,

Systèmes dynamiques et dynamiques Hamiltonienne dans le cadre du DEA “Dynamique non linéaire et applications”.

- 2002-2004: travaux dirigés de mathématique, Faculté de Droit, des Sciences Economiques et de Gestion, UNSA.

3 Encadrement

- J’ai participé à l’encadrement (sur le plan de l’initiation informatique) de la thèse de Mlle Maria Gabriella Della Penna ([24]); la thèse a été soutenue le 5 février 2001.
- J’ai encadré, avec Claude Froeschlé, Mlle Marina Cosentino, qui a préparé sa thèse de Laurea (équival. au DEA) en mathématique. Titre du mémoire: “ Les méthodes modernes d’analyse du chaos”. La thèse a été soutenue le 8 Juillet 2002.
- J’encadre avec Claude Froeschlé la thèse de Mme Marina Cosentino qui sera soutenue en 2007.

4 Organisation d’écoles

Mon travail dans l’organisation d’écoles thématiques du CNRS s’est exercé dans trois domaines d’activités:

1. Dans le cadre du travail inter-disciplinaire avec les économistes j’ai co-organisé avec Claude Froeschlé et des collègues économistes deux écoles (de macro-économie et d’histoire).
2. Dans le cadre des systèmes dynamiques j’ai co-organisé une école à Porquerolles (septembre 2001) sur les systèmes dynamiques et analyse de Fourier ainsi qu’une école sur la “Diffusion dans les systèmes dynamiques” qui a eu lieu à Pralognan en mars 2002.
3. Enfin dans le cadre d’une expérience pilote soutenue par la Formation Permanente de la DR20, j’ai coorganisé 7 écoles (1999, 2001-2006) pour la formation culturelle en astronomie des administratifs, techniciens et ingénieurs de la profession. Le programme et les transparents des cours

de 2004 à 2006 peuvent être visionnées à la page web <http://www.obs-nice.fr/elena>.

5 Résumé des travaux de recherche

Mon travail de recherche peut se décomposer en 3 domaines:

1. Travail de thèse: analyse multi-échelle de la distribution des galaxies.
2. Aux confins de la mécanique céleste théorique: les calculs numériques poussés à l'extrême.
 - Mise au point d'indicateurs d'intégrabilité ainsi que de chaos.
 - Application de l'indicateur rapide de Lyapunov (IRL) à l'étude du mouvement des petits corps du Système Solaire.
 - Stabilité et diffusion lente dans les systèmes hamiltoniens.
 - Etude des systèmes faiblement dissipatifs: applications au mouvement d'attitude
3. Travail en dynamique économique.

5.1 Travail de thèse: analyse multi-échelle de la distribution des galaxies.

Le problème de la formation des grandes structures de l'Univers est une des questions fondamentales de la cosmologie moderne.

Plusieurs modèles ont été développés pour pouvoir reproduire la distribution observée des galaxies. Parmi les différents scénarios théoriques de formation des grandes structures, on a traité en particulier les scénarios dominés par la matière froide, "cold dark matter" (CDM), par la matière chaude, "hot dark matter" (HDM), et pour les scénarios mixtes, "mixed dark matter" (MDM).

Pour reproduire ces scénarios, des simulations numériques N-corps ont été utilisées pour l'étude de la phase non-linéaire de l'instabilité gravitationnelle. Le code numérique utilisé avait été mis en œuvre sur une machine massivement parallèle.

Le manque d'une définition précise des structures a conduit à introduire une méthode de détection des structures objective et indépendante des propriétés globales du scénario ou des catalogues observationnels qu'on analyse. Pour cela l'application de la transformation en ondelettes s'est révélée un outil bien adapté. A partir de la transformée obtenue avec cet algorithme, on extrait l'information statistiquement significative dans une image (observée ou théorique). L'identification des structures a été réalisée ensuite à l'aide d'une procédure de segmentation.

Nous avons mis en œuvre ces outils sur une machine massivement parallèle obtenant un code très rapide de détection des structures adaptable aux problèmes de reconnaissance des formes. Nous avons introduit une méthode statistique d'analyse des structures du type morphologique basée sur un paramètre d'écart des formes à la sphéricité ([3]). Après avoir testé la méthode sur les scénarios HDM et CDM qui favorisent respectivement les structures filamentaires et en amas, nous avons appliqué la méthode au catalogue de galaxies du Center for Astrophysics (CfA). Nous avons considéré des catalogues simulés ayant les mêmes caractéristiques que celles du catalogue du CfA. Nous avons comparé les propriétés morphologiques des scénarios HDM, CDM et MDM. Pour les scénarios CDM et MDM, qui satisfont à la plupart des tests observationnels, nous avons introduit les effets d'observation (transformation dans l'espace des "*redshifts*" et application des effets de sélection) et nous avons discuté les implications morphologiques de ces effets. Une première comparaison avec le catalogue du CfA a été réalisée ([5]).

5.2 Aux confins de la mécanique céleste théorique: les calculs numériques poussés à l'extrême.

Un des théorèmes fondateurs pour la mécanique céleste est le théorème KAM (Kolmogorov, Arnold et Moser 1967). Ce théorème prouve l'existence de courbes invariantes mais les domaines de validité vont bien au-delà des résultats donnés par la démonstration. Par exemple pour le théorème KAM la stabilité du système Terre-Jupiter-Soleil est prouvée pour un Jupiter ayant la masse d'un proton. Il est donc intéressant de pouvoir visualiser et explorer les domaines de validité de théorèmes comme le théorème KAM par des méthodes numériques. C'est dans cet esprit que les deux articles parus dans *Physica D* ([6] et [23]) ont montré la décroissance exponentielle de régions

chaotiques autour de tores avec fréquence de rotation Diophantine. Nous avons exploré de façon très détaillée la stabilité des orbites qui dépend de deux paramètres cruciaux: l'intensité de la perturbation (la masse du corps perturbateur) et le caractère plus au moins irrationnel des fréquences fondamentales caractérisant les orbites.

5.2.1 Mise au point d'indicateurs d'intégrabilité ainsi que de chaos.

J'ai travaillé sur 4 indicateurs d'intégrabilité et de chaos:

1. Analyse en fréquence ([3], [7]).
2. Analyse de l'extremum supérieur de l'action ([8],[9]).
3. Analyse de la moyenne des angles formés par deux vecteurs tangents successifs: "twist angle" ([19]).
4. Indicateur Rapide de Lyapunov (IRL) ([14], [15]).

On a comparé sur des modèles simples, mais riches de toute la complexité des systèmes Hamiltoniens non intégrables, les performances de ces indicateurs dont le dernier apparaît de loin comme le plus sensible et le plus aisé à mettre en œuvre, apparaissant aussi comme un bon compétiteur de l'analyse en fréquences utilisée par Laskar. L'IRL s'est aussi révélé un outil très puissant pour l'étude des orbites périodiques ([30], [33]). Un modèle simple nous a permis de revisiter les résultats obtenus en [6] et de les généraliser pour d'autres courbes invariantes.

5.2.2 Application de l'indicateur rapide de Lyapunov à l'étude du mouvement des petits corps du Système Solaire.

L'IRL a été utilisé pour une exploration systématique de la stochasticité des orbites d'astéroïdes de la ceinture principale ([12], [22]). Un catalogue donnant la valeur de l'indicateur de Lyapunov a été mis sur le réseau. Signalons que les astéroïdes faiblement chaotiques ainsi détectés ont tous été mis en relation avec des résonances à 3 corps, i.e. astéroïde-Jupiter-Saturne par Nesvorny et Morbidelli.

En vue de l'application de la méthode de l'IRL au Système Solaire nous avons été amenés à adapter cet indicateur à différentes modifications du modèle standard (système hamiltonien faiblement perturbé). Les

théorèmes classiques de stabilité (KAM et Nekhoroshev) supposent la non-dégénérescence. Or notre système planétaire est dégénéré. Ceci nous avait amenés à mettre au point et à utiliser en 2002 l'ILR orthonormal [34]. Une autre variante du modèle standard inclut les forces non gravitationnelles dissipatives. Ici encore l'ILR a été modifié principalement pour tenir compte du fait de l'existence d'attracteurs qui généralement ont leur fréquence propre dans leur bassin d'attraction ou encore montrent un comportement chaotique sur ce qui est appelé, depuis le travail fondateur de M. Hénon, un attracteur étrange. Un article dans lequel la méthode est décrite vient d'être publié [43]. En outre la méthode de l'IRL semble très prometteuse en vue de l'étude de la structure fine des composantes chaotiques des résonances simples et doubles et notamment pour le lien entre la topologie de l'homoclinic tangle et les mécanismes de diffusion. Des premiers résultats ont été obtenus.

5.2.3 Stabilité et diffusion lente dans les systèmes hamiltoniens

En outre, toujours aux confins des mathématiques pures, l'IRL apparaît comme un excellent outil pour mettre en évidence la toile d'Arnold, c'est-à-dire la distribution des lignes résonnantes qui structurent un système Hamiltonien ainsi que l'évolution de ce réseau quand on passe du régime Nekhoroshev au régime Chirikov ([28], [29]). Le premier, bien que n'excluant pas l'existence d'orbites chaotiques, les confine sur des temps exponentiellement longs et assure ainsi la stabilité du système. Une perturbation plus importante détruit les barrières protectrices et permet ainsi la diffusion des orbites (régime Chirikov). Récemment nous avons déterminé la transition entre les deux régimes [32] grâce à l'application de l'IRL et d'une méthode introduite par Guzzo et Benettin, méthode appelée AFFA (Analytically Filtered Fourier Analysis). Ce problème est assez délicat car la transition du régime Nekhoroshev au régime de Chirikov a lieu de manière continue et "douce". En revanche la différence est nette sur la stabilité à long terme du système, mais une mesure directe sur les actions et en général hors de la portée de l'intégration numérique. Les résultats obtenus sur un système hamiltonien à 3 degrés de liberté concernant la transition entre le régime de diffusion de Nekhoroshev et celui rapide de Chirikov nous ont ouvert une voie d'exploration numérique du célèbre problème de la diffusion d'Arnold. Cette dernière, proposée par Arnold en 1964 sur un modèle ad hoc, peut paraître relever de la simple curiosité mathématique, car il s'agit d'un processus très particulier et de plus exponentiellement lent. En réalité, si on révisite le

phénomène la lumière du théorème de Nekhoroshev, on y voit tout son intérêt physique, notamment en ce qui concerne les mécanismes de diffusion dans le Système Solaire. En effet, le théorème de Nekhoroshev prévoit une diffusion exponentiellement lente le long des résonances quand elles sont bien séparées les unes des autres. Mais, quand on est proche de la transition entre les deux régimes Nekhoroshev et Chirikov, le phénomène peut jouer un rôle important parmi les mécanismes du transport (l'argument de l'exponentielle devient proche de l'unité). Le premier enjeu était donc de pouvoir mettre en évidence une telle diffusion sur un modèle hamiltonien simple. Nous avons détecté la diffusion d'Arnold proche de la transition au régime de diffusion rapide mais aussi pour des valeurs du paramètre perturbateur allant jusqu'à $1/30$ du paramètre de transition. La mesure du coefficient de diffusion, dans l'hypothèse d'un mouvement brownien nous a permis de vérifier l'accord entre les résultats obtenus et les prévisions théoriques [35],[36]. Plus récemment, nous avons pu montrer, grâce à l'utilisation d'un mapping issu de l'hamiltonien précédemment utilisé, que ce phénomène peut être à l'origine non seulement d'une diffusion locale mais aussi d'une diffusion globale dans le système. Deux articles sont parus en 2005 [41],[42].

Cette diffusion montre l'importance de la persistance des tores KAM pour le confinement des orbites. C'est l'objet d'une étude qui concerne l'application aux astéroïdes Victoria, Iris et Rentia [39]. En outre, en collaboration avec M. Guzzo de l'université de Padoue nous continuons à travailler toujours sur des modèles simples pour ensuite étudier des problèmes de transport dans le Système Solaire. Pour cela, nous rappelons que les résultats mathématiques sur lesquels on peut s'appuyer pour l'étude de la diffusion sont extrêmement restrictifs. Nous avons exploré les effets de la non-convexité et obtenu des résultats surprenants sur la stabilité de tels systèmes. Contrairement à ce que nous pensions la non-convexité induit une diffusion rapide seulement dans des cas très particuliers. Un article sur le sujet vient d'être publié sur *Nonlinearity* [45]. Nous avons maintenant des idées plus claires sur les phénomènes de diffusion ainsi que sur un certain nombre des corrélations entre les différentes variables clés. La recherche des mécanismes reste d'actualité et les travaux se poursuivent plus lentement étant donné la difficulté des investissements intellectuels nécessaires en mathématique.

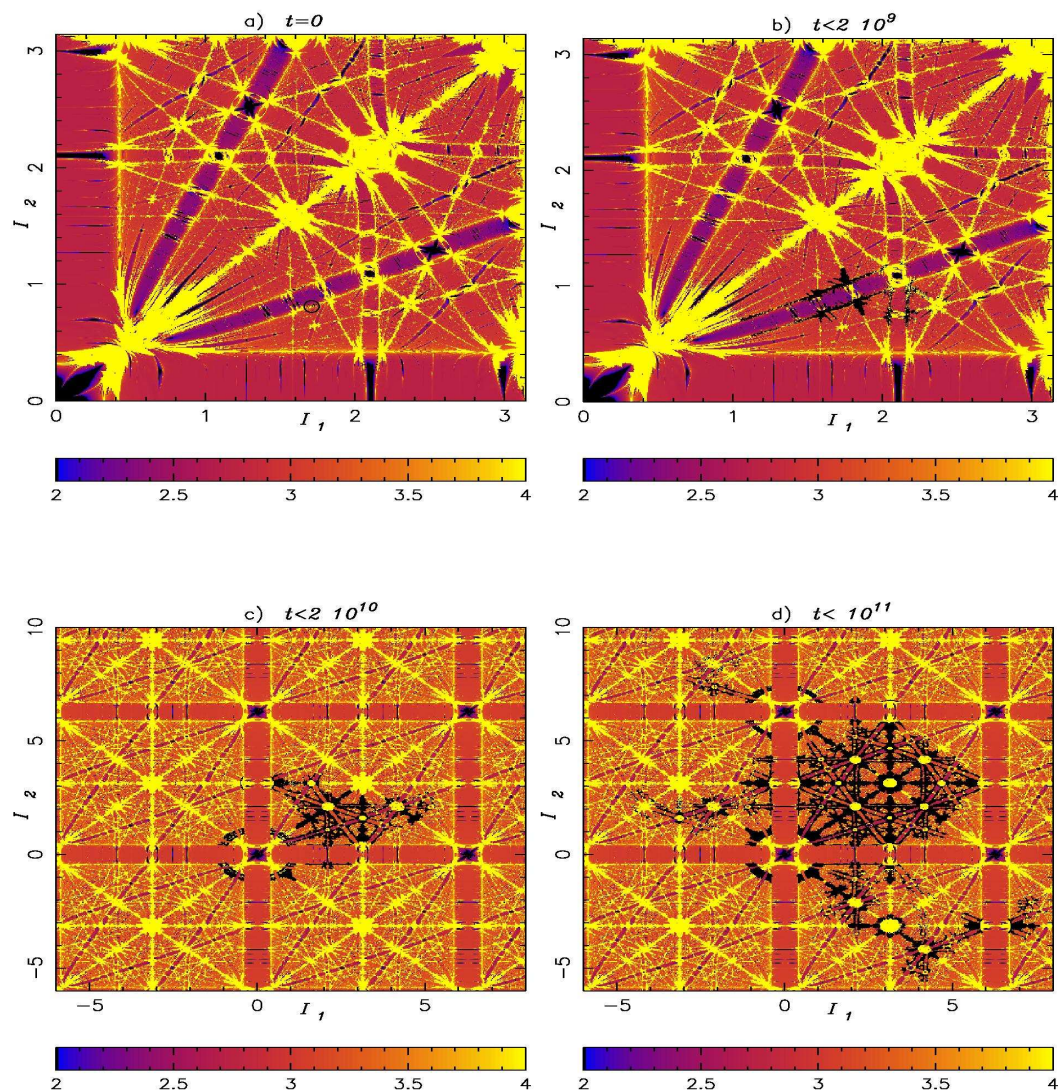


Figure 1: Cartes obtenues avec l'IRL. Analyse du plan des actions (I_1, I_2) pour un mapping symplectique 4-dimensionnel. Les angles initiaux (ϕ_1, ϕ_2) sont fixés à zéro. Les zones plus claires correspondent à la partie chaotique du réseau d'Arnold. Dans la partie en haut à gauche de la figure le cercle indique la position de 20 conditions initiales. Dans les autres parties (b,c,d) les points noirs correspondent aux points de 20 orbites qui intersectent la section $S = \{(I_1, I_2, \phi_1, \phi_2), |\phi_1| \leq 0.05, |\phi_2| \leq 0.05\}$ après respectivement: $2 \cdot 10^9$ iterations (b), $2 \cdot 10^{10}$ iterations (c), 10^{11} iterations (d). Publication [41]

5.2.4 Etude des systèmes faiblement dissipatifs: applications au mouvement d'attitude.

Un des problèmes les plus fascinants de la mécanique céleste concerne le comportement des satellites et des planètes soumis à une interaction spin-orbite. Plus précisément on considère le couplage entre la révolution d'un satellite autour d'un corps principale et sa rotation autour d'un axe interne dite de spin. En effet la plupart des corps du système Solaire, y compris la lune, sont piégés dans la résonance 1:1, c'est-à-dire ils montrent toujours la même face au corps principale. Mercure constitue la seule exception à ce schéma, étant piégé dans la résonance 3:2. Nous avons étudié en collaboration avec A.Celletti (Univ. de Rome) une telle dynamique dans différents contextes (cas conservatif et cas dissipatif) à l'aide de l'analyse en fréquence et de l'IRL. La différence en excentricité entre Mercure et la Lune semble être à l'origine des différentes résonances en jeu. Un papier vient d'être accepté sur Planetary and Space Science [47]. L'extension de cette étude sur un modèle à 3 degrés de liberté est en cours.

5.3 Travail en dynamique économique

Ayant été recrutée sur un poste d'ingénieur de recherche dans un département d'économie, j'ai effectué un certain nombre de travaux de modélisation. Il s'agissait surtout de mettre en évidence les conséquences du progrès technique dans des modèles d'évolution temporelle de la structure productive. En fait, les travaux sur les systèmes dynamiques que j'ai pu continuer à l'Observatoire de Nice en collaboration avec Claude Froeschlé dans le cadre d'une coopération interdisciplinaire entre l'O.C.A. et le département d'économie m'ont été extrêmement utiles pour ce type d'analyse. En particulier l'étude des séries issues des systèmes dynamiques [24] a été très utile pour l'analyse des propriétés dynamiques du modèle macro-économique que nous avons développé. Il s'agit, comme c'est souvent le cas en macro-économie, d'un modèle à plusieurs degrés de liberté. Nous avons mis en évidence que la dynamique est déterminée par un petit nombre de degrés de liberté qui sont en effet les variables considérées comme variables clés du modèle. Les articles concernant le travail en économie sont reportés dans les Publications en économie.

J'ai soutenu une thèse en Juillet 2001 sur l'ensemble de ces travaux. Depuis nous travaillons avec les économistes dans le cadre d'une "Action

Concertée Systèmes complexes en SHS” (2003-2006).

6 Liste des ouvrages edités

- **Hamiltonian Systems and Fourier analysis. New Prospects for gravitational Dynamics**”, D. Benest, C. Froeschlé and E. Lega (eds.), Cambridge Scientific Publishers, **2005**. (Ecole de Porquerolles, 9-15 Septembre 2001.)

7 Congrès

- International conference on “Observational Cosmology”, Milan , septembre 1992 (**poster [2]**).
- IMA conference on ”Multiscale Stochastic processes analysed using multifractals and wavelets”, Cambridge, mars 1993, (**presentation orale [3]**).
- Third SIAM conference on “Applications of Dynamical Systems”, Snowbird Utah, mai 1995, (**poster**).
- Fourth Humboldt Colloquium on Celestial Mechanics “The dynamical behaviour of our planetary system”, Ramsau, Austria, mars 1996, (**presentation orale [15]**).
- XI Workshop of the International School of Economic Research: “Cycle, growth and structural change”, Siena, Italy, juillet 1998 (**presentation orale**).
- Fifth Humboldt Colloquium on Celestial Mechanics “The dynamical behaviour of our planetary system”, BadHofGastein, Austria, mars 2000, (**presentation orale, [29]**).
- CELMEC III, “A meeting on celestial mechanics”, Roma, Italie, juin 2001, (**presentation orale, [33]**).
- “Celestial Mechanics 2002: Results and Prospects”, Institute of Applied Astronomy, St. Petersburg, 10-14 September 2002, (**presentation orale**).

- “DDA 2004 Meeting”, Cannes, 20-23 Avril 2004, (**presentation orale**)
- CELMEC IV, “A meeting on celestial mechanics”, Viterbo, Italie, septembre 2005, (**presentation orale**, [45]).

8 Ecoles

- 2ème et 4ème Atelier-Formation d’Hiver d’Astronomie et Astrophysique de Chamonix, février 1992 (**presentation orale**) et 1994.
- École d’été: “Les modèles cosmologiques”, Marseille, septembre 1993.
- École d’hiver: “Cosmologie théorique”, Gif Sur Yvette, Novembre 1993.
- 3rd International Summer school/Conference “Let’s face chaos through nonlinear dynamics”, University of Maribor, juillet 1996, (**presentation orale** [25],[26],[27]).
- Ecole thématique: “Analysis and modelling of discrete dynamical systems – with applications to dynamical astronomy”, Aussois, février 1996, (**presentation orale** [21]).
- Rencontres entre physiciens et économistes, Aussois, 1996,1997,1998, (**presentation orale**).
- Ecole thématique: “Histoire de la pensée économique”, Aussois, janvier 1999.
- Ecole d’Oléron: “Analyse des données en sciences de l’Univers”, Oléron, juin 1999.
- Ecole thématique: “Dynamique du marché du travail, chômage et politiques d’emploi”, Aussois, janvier 2000, (**presentation orale**).
- Ecole thématique: “Systèmes Hamiltoniens et analyse de Fourier, outils théoriques et numériques”, Porquerolles, 9-15 septembre 2001, (**cours 2h**).
- 3ème Rencontre d’Astronomie de Porquerolles, Porquerolles 1-5 octobre 2001, (**cours 2h**).

- Ecole thématique: “ Diffusion dans les systèmes dynamiques. Applications aux systèmes gravitationnels”, Pralognan, 10-15 mars 2002.
- Atelier d’Astronomie de Porquerolles, Le système Solaire Porquerolles 22-28 septembre 2002, (**cours 2h**).
- Atelier d’Astronomie de Porquerolles, Le monde des étoiles, Porquerolles 20-26 septembre 2003.
- Ecole thématique: “Chronologie de la formation du Système Solaire II. Des grains présolaires aux objets de Kuiper”, Aussois 2-6 février 2004.
- Atelier d’Astronomie de Porquerolles, Le monde des galaxies”, Porquerolles 19-24 septembre 2004.
- Atelier d’Astronomie de Porquerolles, Un panorama général de l’astronomie de l’antiquité à la nouvelle astrophysique, Porquerolles, 18-23 Septembre 2005.
- Atelier de Mécanique Céleste, Aussois, 12-16 mars 2006.
- Atelier d’Astronomie de Porquerolles, Un panorama général des techniques et des objectifs scientifiques de la Haute Résolution Angulaire Optique, Porquerolles, 17-23 Septembre 2006.

9 Liste de publications:

- *** Journaux avec Comité de lecture
- ** Colloques avec Comité de lecture

References

- [1] ** G. Simeis, G. Bonelli and **E. Lega**, "A 33 Ghz polarimeter for measurements of the CBR Residual Polarization", Proceedings of the 16th Symposium on Relativistic Astrophysics, Berkeley, (**1992**).
- [2] ** Slezak, E. and **Lega, E.** A First Study of the Shapley Supercluster using Wavelet Techniques, ASP Conf. Ser. 51: Observational Cosmology, 144, **1992**.
- [3] ** **E. Lega**, A. Bijaoui, J.M. Alimi, H. Scholl, P. Bury, "Multiscale processes of cosmological models using the wavelet transform", Proceedings of the IMA conference on "Multiscale Stochastic processes analysed using multifractals and wavelets", Cambridge, (**1993**).
- [4] *** **E. Lega**, H. Scholl, J.M. Alimi, A. Bijaoui, and P. Bury. A parallel algorithm for structure detection based on wavelet and segmentation analysis. *Parallel Computing*, **21**:265–285, (**1995**).
- [5] *** A. Bijaoui, E. Slezak, F. Rué, and **E. Lega**. Wavelets and the study of the distant univers. *Proceedings of the IEEE, Special Issue on Wavelets*, **84**:670–679, (**1996**).
- [6] *** **E. Lega**, A. Bijaoui, J.M. Alimi, and H. Scholl. A morphological indicator for comparing simulated cosmological scenarii with observations. *A&A*, **309**:23–29, (**1996**).
- [7] *** **E. Lega** and C. Froeschlé. Numerical investigations of the structure around an invariant KAM torus using the frequency map analysis. *Physica D*, **95**:97–106, (**1996**).
- [8] *** A. Celletti, C. Froeschlé, and **E. Lega**. Determination of the frequency vector in the four dimensional standard mapping. *Int. J. of Bifurcation and Chaos*, **6**, n.8:1579–1585, (**1996**).
- [9] ** C. Froeschlé, A. Giorgilli, **E. Lega**, and A. Morbidelli. *On the measure of the structure around an invariant KAM torus*. Proceedings of

the IAU symposium 172, Dynamics, Ephemerides and Astrometry of the Solar System, S. Ferraz Melloz et al. (eds), 293-298, (1996).

- [10] *** C. Froeschlé and **E. Lega**. On the measure of the structure around the last KAM torus before and after its break-up. *Celest. Mech. and Dynamical Astron.*, **64**:21–31, (1996).
- [11] *** C. Froeschlé and **E. Lega**. Polynomial approximation of Poincaré maps for Hamiltonian systems. *Earth Moon and Planets*, **72**:51–56, (1996).
- [12] *** G. Contopoulos, N. Voglis, C. Efthymopoulos, C. Froeschlé, R. Gonczi, **E. Lega**, R. Dvorak, and E. Lohinger. Transition spectra of dynamical systems. *Celest. Mech. and Dynam. Astron.*, **67**:293–317, (1997).
- [13] *** C. Froeschlé, R. Gonczi, and **E. Lega**. The fast Lyapunov indicator: a simple tool to detect weak chaos. Application to the structure of the main asteroidal belt. *Planetary and space science*, **45**:881–886, (1997).
- [14] *** C. Froeschlé and **E. Lega**. Global symplectic polynomial approximation of area-preserving maps. *Journal of Difference Equations and Applications*, **3**:169–184, (1997).
- [15] *** C. Froeschlé, **E. Lega**, and R. Gonczi. Fast Lyapunov indicators. Application to asteroidal motion. *Celest. Mech. and Dynam. Astron.*, **67**:41–62, (1997).
- [16] ** **E. Lega** and C. Froeschlé. *Fast Lyapunov Indicators. Comparison with other chaos indicators. Application to two and four dimensional maps.* in The Dynamical Behaviour of our Planetary System., Kluwer academ. publ., J.Henrard and R.Dvorak eds., (1997).
- [17] ** C. Froeschlé, Lohinger E., and **E. Lega**. *On the relationship between Local Lyapunov Characteristic Numbers, largest eigenvalues and Maximum Stretching Parameters.* in the NATO/ASI series volume: The Dynamics of small bodies in the Solar system: a major key to Solar system studies, A.E.Roy (eds.), (1998).

- [18] ** C. Froeschlé and **E. Lega**. *Weak chaos and diffusion in Hamiltonian systems. From Nekhoroshev to Kirkwood.* in the NATO/ASI series volume: The Dynamics of small bodies in the Solar system: a major key to Solar system studies, A.E.Roy (eds.), (1998).
- [19] ** C. Froeschlé and **E. Lega**. *Topics on chaotic transport for Hamiltonian systems: modelling of diffusion processes for small bodies in the solar system.* D.Benest, C.Froeschlé (eds.), *Lectures Notes in Physics 505. Impact on Earth*, (1998).
- [20] *** C. Froeschlé and **E. Lega**. Twist angles: a fast method for distinguishing islands, tori and weak chaotic orbits. Comparison with other methods of analysis. *A&A*, **334**:355–362, (1998).
- [21] *** **E. Lega** and C. Froeschlé. Comparison of convergence towards invariant distributions for rotation angles, twist angles and local Lyapunov characteristic numbers. *Planetary and Space Science*, **46**:1525–1534, (1998).
- [22] ** C. Froeschlé and **E. Lega**. *Modeling mapping: an aim and a tool for the study of dynamical systems.* in Analysis and Modelling of discrete dynamical systems. D.Benest and C.Froeschlé (eds.), Gordon and Breach., (1998).
- [23] *** C. Froeschlé, R. Gonczi, **E. Lega**, and U. Locatelli. On the stochasticity of the asteroid belt. *Celest. Mech. and Dynam. Astron.*, **69**:235–254, (1998).
- [24] *** U. Locatelli, C. Froeschlé, **E. Lega**, and A. Morbidelli. On the relationship between the Bruno function and the breakdown of invariant tori. *Physica D*, **139**, 48-71, (2000).
- [25] *** **E. Lega**, A. Celletti, G. Della Penna, and C. Froeschlé. On the computation of Lyapunov exponents for discrete time series. applications to two dimensional symplectic and dissipative mappings. *Intern. J. of Bifurcation and Chaos*, **10**:12, 2791-2805, (2000).
- [26] ** C. Froeschlé and **E. Lega**. An example of interplay between theoretical results on the structure of dynamical systems and numerical experiments based on mapping modeling. *Nonlinear Phenomena in Complex Systems*, **3**:n.4:362-375, (2000)

- [27] ** C. Froeschlé, **E. Lega**, and E. Lohinger. Connectance and stability. Application to linear and non linear dynamical systems with increasing number of degrees of freedom. *Nonlinear Phenomena in Complex Systems*, **3**,n.3:247-252, (2000).
- [28] ** C. Froeschlé and **E. Lega**. Reestablishing equilibrium paths in a neo-austrian model: analysis of transitory regimes. *Nonlinear Phenomena in Complex Systems* , **3**:n.2, 153-170, (2000).
- [29] *** C. Froeschlé, Guzzo,M. and **E. Lega**. Graphical evolution of the Arnold's web: from order to chaos. *Science*, **289** N.5487, 2108-2110, (2000).
- [30] *** C. Froeschlé and **E. Lega**. On the structure of symplectic mappings. The Fast Lyapunov Indicator: a very sensitive tool. *Celest. Mech. and Dynam. Astron.*, **78**, 167-195(2000).
- [31] *** **E. Lega** and Claude Froeschlé. On the relationship between Fast Lyapunov Indicator and periodic orbits for symplectic mappings. *Celest. Mech. and Dynam. Astron.*, **81**, 129-147 (2001).
- [32] ** Froeschlé,C., Guzzo,M. and Lega,E. "The fast Lyapunov Indicator" in *The restless Universe*, B.A.Steves and A.J.Maciejewski eds. (2001).
- [33] *** Guzzo, M., **Lega E.** and Froeschlé C. On the numerical detection of the effective stability of chaotic motions in quasi-integrable systems. *Physica D*, **163**,1-25, (2002).
- [34] *** M. Fouchard, **E. Lega**, Ch. Froeschlé, C. Froeschlé On the relationship between Fast Lyapunov Indicator and periodic orbits for continuous flows. *Celest. Mech. and Dynam. Astron.*, **83**, 205-222, (2002).
- [35] *** **E. Lega**, Guzzo,M. Froeschlé C. Detection of Arnold diffusion in Hamiltonian systems. *Physica D*, **182**, 179-187 (2003).
- [36] *** Froeschlé C. and **Lega E.** On the diffusion along resonant lines in continuous and discrete dynamical systems. *Int. Journal of Modern Physics B*, **17**,3964-3976,(2003).
- [37] ** Celletti, A. and Froeschlé, C. and **Lega, E.** From regular to chaotic motion through the work of Kolmogorov. in *Lectures Notes in Physics*, **636**, R. Livi and A. Vulpiani (eds.), Springer,(2003).

- [38] ** Celletti, A. and Froeschlé, C. and **Lega, E.** Des mouvements réguliers aux mouvements chaotiques à travers le travail de Kolmogorov. *in L'héritage de Kolmogorov en physique*, R. Livi and A. Vulpiani (eds.), Belin, (2003).
- [39] *** Celletti, A. and Froeschlé, C. and **Lega, E.** Frequency analysis of the stability of asteroids in the framework of the restricted, three-body problem. *Cel. Mech and Dyn. Astron.*, **90**, 245-266, (2004).
- [40] ** Froeschlé, C. and **Lega, E.** “The Fast Lyapunov Indicator. Applications to the study of the fine structure of Hamiltonian Systems and to the Detection of Arnold’s diffusion.” *in “Hamiltonian Systems and Fourier analysis. New Prospects for gravitational Dynamics”*, D. Benest, C. Froeschlé and E. Lega (eds.), Cambridge Scientific Publishers **2005**.
- [41] *** Guzzo, M. and **Lega, E.** and Froeschlé, C., First numerical evidence of global Arnold diffusion in quasi-integrable systems. *Discrete and Continuous Dynamical Systems B*, **5**, 687-698 **2005**.
- [42] *** Froeschlé, C. and Guzzo, M. and **Lega, E.**, Local and global diffusion along resonant lines in discrete quasi-integrable dynamical systems, *Cel. Mech and Dynam. Astron.*, **92**, 243-255, **2005**.
- [43] *** Celletti A., Froeschlé C. and **Lega, E.** Dissipative and weakly dissipative regimes in nearly-integrable mappings, *Discrete and Continuous Dynamical Systems A*, **16**, 757-781, **2006**
- [44] ** Froeschlé, C. and **Lega, E.** The fine structure of Hamiltonian systems revealed using The Fast Lyapunov Indicator. *in Chaotic worlds: from order to disorder in gravitational N-body dynamical systems*, 131-165, B. Steves et al. (eds.), Springer (2006).
- [45] *** Guzzo, M. and **Lega, E.** and Froeschlé, C. Diffusion and stability in perturbed non-convex integrable systems. *Nonlinearity*, **19**, 1049-1067, **2006**
- [46] *** Froeschlé, C. **Lega, E.** Guzzo, M. Analysis of the chaotic behaviour of orbits diffusing along the Arnold’s web. *Cel. Mech. and Dynam. Astronomy*, **92**, 243-255, **2005**.

- [47] *** Celletti A., Froeschlé C. and **Lega, E.**. Dynamics of the conservative and dissipative spin-orbit problem. *Planetary and Space Science*, sous presse, **2006**.
- [48] ** **Lega E.**, Froeschlé C. and Guzzo M. Diffusion in Hamiltonian quasi-integrable systems. *Lecture Notes in Physics*, soumis. **2006**
- [49] ** M. Cosentino, D. Laveder, **E. Lega**, C. Froeschlé Connectance and Linear Stability of Dynamical Systems *Lecture Notes in Physics*, soumis. **2006**

Publications en économie

- [50] *** C. Froeschlé and **E. Lega**. From discrete to continuous dynamical systems and vice-versa. *Revue Economique*, **46**:1511–1526, (**1995**).
- [51] ** M. Amendola, C. Froeschlé, J.L. Gaffard, and **E. Lega**. *Cyclical growth and primary resource constraint*. in S. Faucheux, D. Pearce, J. Proops, *Models of sustainable development*, Edward Elgar, (**1996**).
- [52] ** M. Amendola, J.L. Gaffard, and **Lega E.** *Innovation, paradoxe de la productivité et chômage: les enseignements de l'approche néo-autrichienne*. in Jean Borlès éd. *La Rupture Technologique* ECONOMICA, (**1999**).
- [53] *** M. Amendola, J.L. Gaffard, Froeschlé C., and **Lega E.** Round-about production, co-ordination failure, technological change, and the wage-employment dilemma, *Journal Of Economic Behavior And Organization* *Journal of Economic Behaviour and Organization*, **46**, 1-22, (**2001**).