

Systemes dynamiques pour la modélisation et la simulation des milieux réactifs multi-échelles

Cours 1 - Introduction

Marc Massot, Laurent Séries

Professeur, Ingénieur de recherche Calcul
Ecole Polytechnique

CMAP - Centre de Mathématiques Appliquées

Co-responsable de l'Initiative HPC@Maths
marc.massot@polytechnique.edu, laurent.series@polytechnique.edu
avec l'aide de **Taraneh Sayadi, Ruben Di Battista**



MAP 551



Plan du Cours

- 1 Présentation Enseignant - Introduction
- 2 Physique et enjeux de modélisation
 - Notion de milieu réactif multi-échelle
 - Notion de hiérarchie de modèles
- 3 Dynamique temporelle - Etats d'équilibre - Stabilité - Bifurcation

Parcours de l'enseignante - T. Sayadi

- **Ph.D.** “Numerical simulations of controlled transition to developed turbulence in a zero-pressure-gradient flat-plate boundary layer” (Stanford University, 2007-2012)
- **Post-doctoral fellow** (LadHyX, 2013-2014)
- **Adjunct assistant professor of Aerospace Engineering** (University of Illinois at Urbana-Champaign, 2014-present)
- **Research Associate** (Imperial College London, 2014-2015)
- **Research Group Leader** (RWTH-Aachen University, 2015-present)
- **Chargée de Recherche (CNRS)** (Institut Jean le Rond d'Alembert (Sorbonne University), 2018-present)

Parcours de l'enseignante - T. Sayadi

- **Ph.D.** “Numerical simulations of controlled transition to developed turbulence in a zero-pressure-gradient flat-plate boundary layer” (Stanford University, 2007-2012)
- **Post-doctoral fellow** (LadHyX, 2013-2014)
- **Adjunct assistant professor of Aerospace Engineering** (University of Illinois at Urbana-Champaign, 2014-present)
- **Research Associate** (Imperial College London, 2014-2015)
- **Research Group Leader** (RWTH-Aachen University, 2015-present)
- **Chargée de Recherche (CNRS)** (Institut Jean le Rond d'Alembert (Sorbonne University), 2018-present)



Parcours de l'enseignante - T. Sayadi

- **Ph.D.** “Numerical simulations of controlled transition to developed turbulence in a zero-pressure-gradient flat-plate boundary layer” (Stanford University, 2007-2012)
- **Post-doctoral fellow** (LadHyX, 2013-2014)
- **Adjunct assistant professor of Aerospace Engineering** (University of Illinois at Urbana-Champaign, 2014-present)
- **Research Associate** (Imperial College London, 2014-2015)
- **Research Group Leader** (RWTH-Aachen University, 2015-present)
- **Chargée de Recherche (CNRS)** (Institut Jean le Rond d'Alembert (Sorbonne University), 2018-present)



Parcours de l'enseignante - T. Sayadi

- **Ph.D.** “Numerical simulations of controlled transition to developed turbulence in a zero-pressure-gradient flat-plate boundary layer” (Stanford University, 2007-2012)
- **Post-doctoral fellow** (LadHyX, 2013-2014)
- **Adjunct assistant professor of Aerospace Engineering** (University of Illinois at Urbana-Champaign, 2014-present)
- **Research Associate** (Imperial College London, 2014-2015)
- **Research Group Leader** (RWTH-Aachen University, 2015-present)
- **Chargée de Recherche (CNRS)** (Institut Jean le Rond d'Alembert (Sorbonne University), 2018-present)

Parcours de l'enseignante - T. Sayadi

- **Ph.D.** “Numerical simulations of controlled transition to developed turbulence in a zero-pressure-gradient flat-plate boundary layer” (Stanford University, 2007-2012)
- **Post-doctoral fellow** (LadHyX, 2013-2014)
- **Adjunct assistant professor of Aerospace Engineering** (University of Illinois at Urbana-Champaign, 2014-present)
- **Research Associate** (Imperial College London, 2014-2015)
- **Research Group Leader** (RWTH-Aachen University, 2015-present)
- **Chargée de Recherche (CNRS)** (Institut Jean le Rond d'Alembert (Sorbonne University), 2018-present)



Parcours de l'enseignante - T. Sayadi

- **Ph.D.** “Numerical simulations of controlled transition to developed turbulence in a zero-pressure-gradient flat-plate boundary layer” (Stanford University, 2007-2012)
- **Post-doctoral fellow** (LadHyX, 2013-2014)
- **Adjunct assistant professor of Aerospace Engineering** (University of Illinois at Urbana-Champaign, 2014-present)
- **Research Associate** (Imperial College London, 2014-2015)
- **Research Group Leader** (RWTH-Aachen University, 2015-present)
- **Chargée de Recherche (CNRS)** (Institut Jean le Rond d'Alembert (Sorbonne University), 2018-present)

Parcours de l'enseignant - L. Séries

- **Doctorant** “Développement d'une méthode de décomposition de domaine. Application aux problèmes de contact entre solides déformables.” (ONERA, 2001-2004)
- **Ingénieur Conception d'Applications Scientifiques Parallèles** Expert Calcul Haute Performance (CS, 2005-2010)
 - au support applicatif du GCRT (Centre de Calcul Recherche et Technologie - CEA)
 - au sein d'une équipe dédiée au HPC sur la machine TERA 10 (CEA DAW)
- Ingénieur de recherche responsable technique du mésocentre de calcul de CentraleSupélec (MICS, CentraleSupélec, 2010-2018)
- Ingénieur de recherche en calcul scientifique (CMAP, Polytechnique, depuis 2018)
- Membre du Bureau du Groupe CALCUL <http://calcul.math.cnrs.fr>



Parcours de l'enseignant - L. Séries

- **Doctorant** “Développement d'une méthode de décomposition de domaine. Application aux problèmes de contact entre solides déformables.” (ONERA, 2001-2004)
- **Ingénieur Conception d'Applications Scientifiques Parallèles** Expert Calcul Haute Performance (CS, 2005-2010)
 - au support applicatif du CCRT (Centre de Calcul Recherche et Technologie - CEA)
 - au sein d'une équipe dédiée au HPC sur la machine TERA 10 (CEA DAM)
- **Ingénieur de recherche** responsable technique du mésocentre de calcul de CentraleSupélec (MICS, CentraleSupélec, 2010-2018)
- **Ingénieur de recherche en calcul scientifique** (CMAP, Polytechnique, depuis 2018)
- **Membre du Bureau du Groupe CALCUL** <http://calcul.math.cnrs.fr>



Parcours de l'enseignant - L. Séries

- **Doctorant** “Développement d'une méthode de décomposition de domaine. Application aux problèmes de contact entre solides déformables.” (ONERA, 2001-2004)
- **Ingénieur Conception d'Applications Scientifiques Parallèles** Expert Calcul Haute Performance (CS, 2005-2010)
 - au support applicatif du CCRT (Centre de Calcul Recherche et Technologie - CEA)
 - au sein d'une équipe dédiée au HPC sur la machine TERA 10 (CEA DAM)
- **Ingénieur de recherche** responsable technique du mésocentre de calcul de CentraleSupélec (MICS, CentraleSupélec, 2010-2018)
- **Ingénieur de recherche en calcul scientifique** (CMAP, Polytechnique, depuis 2018)
- **Membre du Bureau du Groupe CALCUL** <http://calcul.math.cnrs.fr>



Parcours de l'enseignant - L. Séries

- **Doctorant** “Développement d'une méthode de décomposition de domaine. Application aux problèmes de contact entre solides déformables.” (ONERA, 2001-2004)
- **Ingénieur Conception d'Applications Scientifiques Parallèles** Expert Calcul Haute Performance (CS, 2005-2010)
 - au support applicatif du CCRT (Centre de Calcul Recherche et Technologie - CEA)
 - au sein d'une équipe dédiée au HPC sur la machine TERA 10 (CEA DAM)
- **Ingénieur de recherche** responsable technique du mésocentre de calcul de CentraleSupélec (MICS, CentraleSupélec, 2010-2018)
- **Ingénieur de recherche en calcul scientifique** (CMAP, Polytechnique, depuis 2018)
- **Membre du Bureau du Groupe CALCUL** <http://calcul.math.cnrs.fr>



Parcours de l'enseignant - L. Séries

- **Doctorant** “Développement d'une méthode de décomposition de domaine. Application aux problèmes de contact entre solides déformables.” (ONERA, 2001-2004)
- **Ingénieur Conception d'Applications Scientifiques Parallèles** Expert Calcul Haute Performance (CS, 2005-2010)
 - au support applicatif du CCRT (Centre de Calcul Recherche et Technologie - CEA)
 - au sein d'une équipe dédiée au HPC sur la machine TERA 10 (CEA DAM)
- **Ingénieur de recherche** responsable technique du mésocentre de calcul de CentraleSupélec (MICS, CentraleSupélec, 2010-2018)
- **Ingénieur de recherche en calcul scientifique** (CMAP, Polytechnique, depuis 2018)
- **Membre du Bureau du Groupe CALCUL** <http://calcul.math.cnrs.fr>



Parcours de l'enseignant - L. Séries

- **Doctorant** “Développement d'une méthode de décomposition de domaine. Application aux problèmes de contact entre solides déformables.” (ONERA, 2001-2004)
- **Ingénieur Conception d'Applications Scientifiques Parallèles** Expert Calcul Haute Performance (CS, 2005-2010)
 - au support applicatif du CCRT (Centre de Calcul Recherche et Technologie - CEA)
 - au sein d'une équipe dédiée au HPC sur la machine TERA 10 (CEA DAM)
- **Ingénieur de recherche** responsable technique du mésocentre de calcul de CentraleSupélec (MICS, CentraleSupélec, 2010-2018)
- **Ingénieur de recherche en calcul scientifique** (CMAP, Polytechnique, depuis 2018)
- **Membre du Bureau du Groupe CALCUL** <http://calcul.math.cnrs.fr>



Parcours de l'enseignant - L. Séries

- **Doctorant** “Développement d'une méthode de décomposition de domaine. Application aux problèmes de contact entre solides déformables.” (ONERA, 2001-2004)
- **Ingénieur Conception d'Applications Scientifiques Parallèles** Expert Calcul Haute Performance (CS, 2005-2010)
 - au support applicatif du CCRT (Centre de Calcul Recherche et Technologie - CEA)
 - au sein d'une équipe dédiée au HPC sur la machine TERA 10 (CEA DAM)
- **Ingénieur de recherche** responsable technique du mésocentre de calcul de CentraleSupélec (MICS, CentraleSupélec, 2010-2018)
- **Ingénieur de recherche en calcul scientifique** (CMAP, Polytechnique, depuis 2018)
- **Membre du Bureau du Groupe CALCUL** <http://calcul.math.cnrs.fr>



Parcours de l'enseignant - M. Massot

- **Doctorat** "Modélisation mathématique et numérique de la combustion des mélanges gazeux" (96 - CMAP X)
- **Année postdoctorale** - "Modélisation numérique de la combustion des brouillards de gouttes"
(96 - 97, Yale University - Center for Combustion Studies)
- **Chargé de Recherche CNRS**
(MAPLY - Université Claude Bernard, Lyon 1 oct. 97)
- **Habilitation à Diriger des Recherches** "Modélisation des Milieux Réactifs : analyse mathématique, analyse numérique et calcul scientifique", juin 2003
- **Professeur en Mathématiques Appliquées, Mécanique des Fluides et Energétique, Laboratoire EM2C-ECP, janv. 2005**



Parcours de l'enseignant - M. Massot

- **Doctorat** "Modélisation mathématique et numérique de la combustion des mélanges gazeux" (96 - CMAP X)
- **Année postdoctorale** - "Modélisation numérique de la combustion des brouillards de gouttes"
(96 - 97, Yale University - Center for Combustion Studies)
- **Chargé de Recherche CNRS**
(MAPLY - Université Claude Bernard, Lyon 1 oct. 97)
- **Habilitation à Diriger des Recherches** "Modélisation des Milieux Réactifs : analyse mathématique, analyse numérique et calcul scientifique", juin 2003
- **Professeur en Mathématiques Appliquées, Mécanique des Fluides et Energétique**, Laboratoire EM2C-ECP, janv. 2005



Parcours de l'enseignant - M. Massot

- **Doctorat** “Modélisation mathématique et numérique de la combustion des mélanges gazeux” (96 - CMAP X)
- **Année postdoctorale** - “Modélisation numérique de la combustion des brouillards de gouttes” (96 - 97, Yale University - Center for Combustion Studies)
- **Chargé de Recherche CNRS** (MAPLY - Université Claude Bernard, Lyon 1 oct. 97)
- **Habilitation à Diriger des Recherches** “Modélisation des Milieux Réactifs : analyse mathématique, analyse numérique et calcul scientifique”, juin 2003
- **Professeur en Mathématiques Appliquées, Mécanique des Fluides et Energétique**, Laboratoire EM2C-ECP, janv. 2005



Parcours de l'enseignant - M. Massot

- **Doctorat** “Modélisation mathématique et numérique de la combustion des mélanges gazeux” (96 - CMAP X)
- **Année postdoctorale** - “Modélisation numérique de la combustion des brouillards de gouttes” (96 - 97, Yale University - Center for Combustion Studies)
- **Chargé de Recherche CNRS** (MAPLY - Université Claude Bernard, Lyon 1 oct. 97)
- **Habilitation à Diriger des Recherches** “Modélisation des Milieux Réactifs : analyse mathématique, analyse numérique et calcul scientifique”, juin 2003
- **Professeur en Mathématiques Appliquées, Mécanique des Fluides et Energétique**, Laboratoire EM2C-ECP, janv. 2005



Parcours de l'enseignant - M. Massot

- **Doctorat** “Modélisation mathématique et numérique de la combustion des mélanges gazeux” (96 - CMAP X)
- **Année postdoctorale** - “Modélisation numérique de la combustion des brouillards de gouttes” (96 - 97, Yale University - Center for Combustion Studies)
- **Chargé de Recherche CNRS** (MAPLY - Université Claude Bernard, Lyon 1 oct. 97)
- **Habilitation à Diriger des Recherches** “Modélisation des Milieux Réactifs : analyse mathématique, analyse numérique et calcul scientifique”, juin 2003
- **Professeur en Mathématiques Appliquées, Mécanique des Fluides et Energétique**, Laboratoire EM2C-ECP, janv. 2005



Parcours de l'enseignant - M. Massot

- **Chargé de Mission** “Calcul Scientifique”, INSMI, Institut des Sciences Mathématiques et leurs Interactions du CNRS de 2008 à fin 2010.
- Participation à la création du **Méso-centre de calcul de l'ECP**, Membre bureau et comité technique 2009-2016
- **Année Sabbatique** “Center for Turbulence Research”, Stanford University et ICME, Visiting Professor 2011-12
(Institute for Comp. and Math. Engineering - Dpt Mech. Eng.)
- **Directeur** - “Fédération de Mathématiques de l'Ecole Centrale Paris”, FR CNRS 3487
(Création janvier 2013 - rassemblement des mathématiciens - 2016)



Parcours de l'enseignant - M. Massot

- **Chargé de Mission** “Calcul Scientifique”, INSMI, Institut des Sciences Mathématiques et leurs Interactions du CNRS de 2008 à fin 2010.
- Participation à la création du **Méso-centre de calcul de l'ECP**, Membre bureau et comité technique 2009-2016
- **Année Sabbatique** “Center for Turbulence Research”, Stanford University et ICME, Visiting Professor 2011-12
(Institute for Comp. and Math. Engineering - Dpt Mech. Eng.)
- **Directeur** - “Fédération de Mathématiques de l'Ecole Centrale Paris”, FR CNRS 3487
(Création janvier 2013 - rassemblement des mathématiciens - 2016)



Parcours de l'enseignant - M. Massot

- **Chargé de Mission** “Calcul Scientifique”, INSMI, Institut des Sciences Mathématiques et leurs Interactions du CNRS de 2008 à fin 2010.
- Participation à la création du **Méso-centre de calcul de l'ECP**, Membre bureau et comité technique 2009-2016
- **Année Sabbatique** “Center for Turbulence Research”, Stanford University et ICME, Visiting Professor 2011-12
(Institute for Comp. and Math. Engineering - Dpt Mech. Eng.)
- **Directeur** - “Fédération de Mathématiques de l'Ecole Centrale Paris”, FR CNRS 3487
(Création janvier 2013 - rassemblement des mathématiciens - 2016)



Parcours de l'enseignant - M. Massot

- **Chargé de Mission** “Calcul Scientifique”, INSMI, Institut des Sciences Mathématiques et leurs Interactions du CNRS de 2008 à fin 2010.
- Participation à la création du **Méso-centre de calcul de l'ECP**, Membre bureau et comité technique 2009-2016
- **Année Sabbatique** “Center for Turbulence Research”, Stanford University et ICME, Visiting Professor 2011-12
(Institute for Comp. and Math. Engineering - Dpt Mech. Eng.)
- **Directeur** - “Fédération de Mathématiques de l'Ecole Centrale Paris”, FR CNRS 3487
(Création janvier 2013 - rassemblement des mathématiciens - 2016)



Parcours de l'enseignant - M. Massot

- **Conseiller Scientifique ONERA - DEFA - DMPE** - Palaiseau PRS / PRL
2013-2019
- Collaborateur extérieur à la Maison de la Simulation - GT Transverse UPSay
'Modélisation et Simulation, Calcul Intensif'
- Recrutement Professeur temps plein Ecole Polytechnique - 2017 Co-porteur de
l'initiative HPC@Maths avec François Alouges - Ecole Polytechnique
- Mise en place d'un mésocentre de calcul à l'Ecole polytechnique (PhyMath)
Organisation de la Journée Jupyter - mars 2018 - Ecole polytechnique



Parcours de l'enseignant - M. Massot

- **Conseiller Scientifique ONERA - DEFA - DMPE** - Palaiseau PRS / PRL
2013-2019
- **Collaborateur extérieur à la Maison de la Simulation** - GT Transverse UPSay
'Modélisation et Simulation, Calcul Intensif'
- **Recrutement Professeur temps plein Ecole Polytechnique - 2017** Co-porteur de
l'initiative HPC@Maths avec François Alouges - Ecole Polytechnique
- Mise en place d'un mésocentre de calcul à l'Ecole polytechnique (PhyMath)
Organisation de la Journée Jupyter - mars 2018 - Ecole polytechnique



Parcours de l'enseignant - M. Massot

- **Conseiller Scientifique ONERA - DEFA - DMPE** - Palaiseau PRS / PRL
2013-2019
- **Collaborateur extérieur à la Maison de la Simulation** - GT Transverse UPSay
'Modélisation et Simulation, Calcul Intensif'
- **Recrutement Professeur temps plein Ecole Polytechnique - 2017** Co-porteur de
l'initiative HPC@Maths avec François Alouges - Ecole Polytechnique
- Mise en place d'un mésocentre de calcul à l'Ecole polytechnique (PhyMath)
Organisation de la Journée Jupyter - mars 2018 - Ecole polytechnique



Parcours de l'enseignant - M. Massot

- **Conseiller Scientifique ONERA - DEFA - DMPE** - Palaiseau PRS / PRL
2013-2019
- **Collaborateur extérieur à la Maison de la Simulation** - GT Transverse UPSay
'Modélisation et Simulation, Calcul Intensif'
- **Recrutement Professeur temps plein Ecole Polytechnique - 2017** Co-porteur de
l'initiative HPC@Maths avec François Alouges - Ecole Polytechnique
- **Mise en place d'un mésocentre de calcul à l'Ecole polytechnique (PhyMath)**
Organisation de la Journée Jupyter - mars 2018 - Ecole polytechnique



Démarche Scientifique

- **Faire le lien entre des outils mathématiques et numériques fondamentaux et les applications** pour apporter des éléments de solution sur des points durs
- **Transfert** tant vers les autres sciences que vers des applications technologiques sur la base de projets financés (ANR, Projets Européen, Contrats,...) en utilisant le calcul scientifique et le calcul intensif
- Collaboration forte Laboratoires ingénierie - Industrie
- **Suggère en retour des problèmes de mathématiques novateurs - Bi-latéral**
- Réseau de partenaires dans le domaine des Mathématiques, dans le domaine des Sciences de l'ingénieur
- Mise en place du lien avec des industriels et des institutions de recherche (SAFRAN, ONERA, IFPEen, CEA Saclay - DAM, MdlS, TOTAL, JAXA, ICME, NASA, SpaceX).



Démarche Scientifique

- **Faire le lien entre des outils mathématiques et numériques fondamentaux et les applications** pour apporter des éléments de solution sur des points durs
- **Transfert** tant vers les autres sciences que vers des applications technologiques sur la base de projets financés (ANR, Projets Européen, Contrats,...) en utilisant le calcul scientifique et le calcul intensif
- Collaboration forte Laboratoires ingénierie - Industrie
- **Suggère en retour des problèmes de mathématiques novateurs - Bi-latéral**
- Réseau de partenaires dans le domaine des Mathématiques, dans le domaine des Sciences de l'ingénieur
- Mise en place du lien avec des industriels et des institutions de recherche (SAFRAN, ONERA, IFPEen, CEA Saclay - DAM, MdlS, TOTAL, JAXA, ICME, NASA, SpaceX).



Démarche Scientifique

- **Faire le lien entre des outils mathématiques et numériques fondamentaux et les applications** pour apporter des éléments de solution sur des points durs
- **Transfert** tant vers les autres sciences que vers des applications technologiques sur la base de projets financés (ANR, Projets Européen, Contrats,...) en utilisant le calcul scientifique et le calcul intensif
- Collaboration forte Laboratoires ingénierie - Industrie
- **Suggère en retour des problèmes de mathématiques novateurs - Bi-latéral**
- Réseau de partenaires dans le domaine des Mathématiques, dans le domaine des Sciences de l'ingénieur
- Mise en place du lien avec des industriels et des institutions de recherche (SAFRAN, ONERA, IFPEen, CEA Saclay - DAM, MdlS, TOTAL, JAXA, ICME, NASA, SpaceX).



Thématiques Applicatives

- **Ecoulements diphasiques à phases dispersées et séparées (injection moteur automobile/aéronautique)**
- Dynamique de flammes en phase homogène et de flammes diphasiques
- Dynamique de front pour des systèmes de réaction-diffusion en chimie et biologie (dynamique chimique non-linéaire et domaine bio-médical)
- Plasmas hors équilibre thermique et chimique (rentrée atmosphérique, physique solaire)
- Décharges plasma répétitives pulsées - propulsion électrique
- Dynamique moléculaire en nanothermique



Thématiques Applicatives

- Ecoulements diphasiques à phases dispersées et séparées (injection moteur automobile/aéronautique)
- Dynamique de flammes en phase homogène et de flammes diphasiques
- Dynamique de front pour des systèmes de réaction-diffusion en chimie et biologie (dynamique chimique non-linéaire et domaine bio-médical)
- Plasmas hors équilibre thermique et chimique (rentrée atmosphérique, physique solaire)
- Décharges plasma répétitives pulsées - propulsion électrique
- Dynamique moléculaire en nanothermique



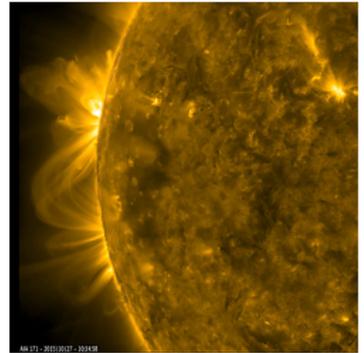
Thématiques Applicatives

- Ecoulements diphasiques à phases dispersées et séparées (injection moteur automobile/aéronautique)
- Dynamique de flammes en phase homogène et de flammes diphasiques
- Dynamique de front pour des systèmes de réaction-diffusion en chimie et biologie (dynamique chimique non-linéaire et domaine bio-médical)
- Plasmas hors équilibre thermique et chimique (rentrée atmosphérique, physique solaire)
- Décharges plasma répétitives pulsées - propulsion électrique
- Dynamique moléculaire en nanothermique



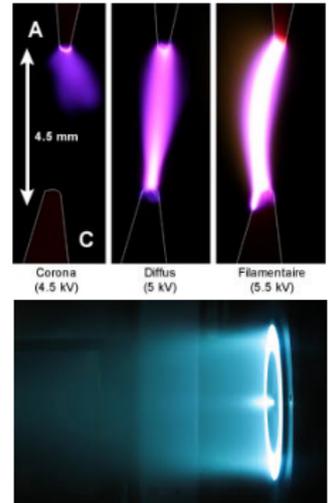
Thématiques Applicatives

- Ecoulements diphasiques à phases dispersées et séparées (injection moteur automobile/aéronautique)
- Dynamique de flammes en phase homogène et de flammes diphasiques
- Dynamique de front pour des systèmes de réaction-diffusion en chimie et biologie (dynamique chimique non-linéaire et domaine bio-médical)
- Plasmas hors équilibre thermique et chimique (rentrée atmosphérique, physique solaire)
- Décharges plasma répétitives pulsées - propulsion électrique
- Dynamique moléculaire en nanothermique



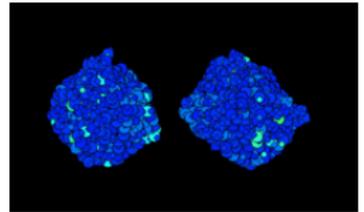
Thématiques Applicatives

- Ecoulements diphasiques à phases dispersées et séparées (injection moteur automobile/aéronautique)
- Dynamique de flammes en phase homogène et de flammes diphasiques
- Dynamique de front pour des systèmes de réaction-diffusion en chimie et biologie (dynamique chimique non-linéaire et domaine bio-médical)
- Plasmas hors équilibre thermique et chimique (rentrée atmosphérique, physique solaire)
- Décharges plasma répétitives pulsées - propulsion électrique
- Dynamique moléculaire en nanothermique



Thématiques Applicatives

- Ecoulements diphasiques à phases dispersées et séparées (injection moteur automobile/aéronautique)
- Dynamique de flammes en phase homogène et de flammes diphasiques
- Dynamique de front pour des systèmes de réaction-diffusion en chimie et biologie (dynamique chimique non-linéaire et domaine bio-médical)
- Plasmas hors équilibre thermique et chimique (rentrée atmosphérique, physique solaire)
- Décharges plasma répétitives pulsées - propulsion électrique
- Dynamique moléculaire en nanothermique



Thématiques Mathématiques

- **Modélisation mathématique** - Dérivation micro/macro - analyse asymptotique multi-échelles, modèles simplifiés
- **Analyse des EDP** symétrisation entropique des systèmes mixtes hyperbolique-parabolique, problème de Cauchy, stabilité asymptotique, ondes progressives, formation de singularité pour les problèmes faiblement hyperboliques
- **Analyse numérique** - méthodes de volumes finis - espace physique et espace des phases - méthodes de moments, méthodes d'intégration en temps par séparation d'opérateur pour les problèmes multi-échelles, analyse des méthodes d'intégration temporelles itératives associées à la parallélisation en temps, méthodes préservant l'asymptotique, méthode de type DG préservant des contraintes convexes pour les systèmes de lois de conservation
- **Systèmes dynamiques** - Analyse de bifurcation des systèmes de dimension finie et infinie, systèmes avec retard, analyse de spectres, analyse de cycles limites, analyse de stabilité non-modale, existence et stabilité d'ondes progressives, modèles d'ordre réduit, décomposition en modes dynamiques et bifurcation
- **Calcul scientifique - calcul intensif**



Plan du Cours

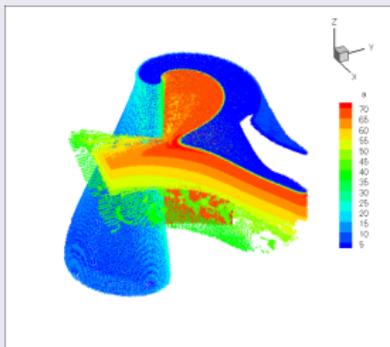
- 1 Présentation Enseignant - Introduction
- 2 Physique et enjeux de modélisation
 - Notion de milieu réactif multi-échelle
 - Notion de hiérarchie de modèles
- 3 Dynamique temporelle - Etats d'équilibre - Stabilité - Bifurcation

Plan du Cours

- 1 Présentation Enseignant - Introduction
- 2 **Physique et enjeux de modélisation**
 - Notion de milieu réactif multi-échelle
 - Notion de hiérarchie de modèles
- 3 Dynamique temporelle - Etats d'équilibre - Stabilité - Bifurcation

Phénomène multi-échelles en temps et en espace

Diversité d'applications



source : Duarte *et al.* (2012)

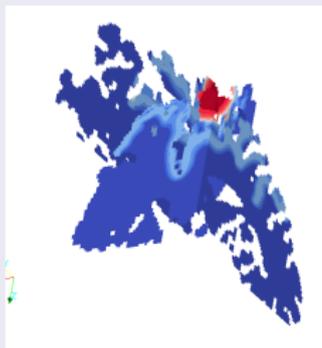
- **Dynamique chimique nonlinéaire**
(ondes spirales, milieux excitables)
- Génie Biomédical
(dynamique électrique cœur, AVC)
- Fronts de combustion
(prop./dynamique d'allumage/instabilités)
- Applications plasma
(décharges, sprites, propulsion électrique)

Large spectre d'échelles de temps et d'espace

- mécanismes physiques impliquant plusieurs temps
- champs spatiaux avec forts gradients

Phénomène multi-échelles en temps et en espace

Diversité d'applications



source : Dumont *et al.* (ICJ - Lyon Univ.)

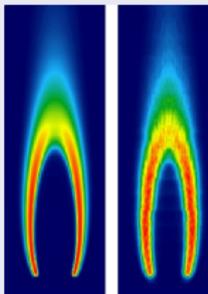
- Dynamique chimique nonlinéaire
(ondes spirales, milieux excitables)
- **Génie Biomédical**
(dynamique électrique cœur, AVC)
- Fronts de combustion
(prop./dynamique d'allumage/instabilités)
- Applications plasma
(décharges, sprites, propulsion électrique)

Large spectre d'échelles de temps et d'espace

- mécanismes physiques impliquant plusieurs temps
- champs spatiaux avec forts gradients

Phénomène multi-échelles en temps et en espace

Diversité d'applications



source : Smooke *et al.* (Yale Univ.)

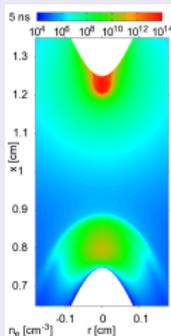
- Dynamique chimique nonlinéaire
(ondes spirales, milieux excitables)
- Génie Biomédical
(dynamique électrique cœur, AVC)
- **Fronts de combustion**
(prop./dynamique d'allumage/instabilités)
- Applications plasma
(décharges, sprites, propulsion électrique)

Large spectre d'échelles de temps et d'espace

- mécanismes physiques impliquant plusieurs temps
- champs spatiaux avec forts gradients

Phénomène multi-échelles en temps et en espace

Diversité d'applications



source : Bourdon *et al.* (LPP/X)

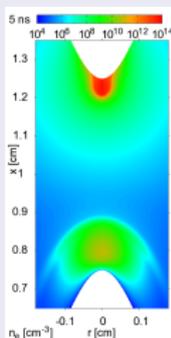
- Dynamique chimique nonlinéaire
(ondes spirales, milieux excitables)
- Génie Biomédical
(dynamique électrique cœur, AVC)
- Fronts de combustion
(prop./dynamique d'allumage/instabilités)
- Applications plasma
(décharges, sprites, propulsion électrique)

Large spectre d'échelles de temps et d'espace

- Ionisation - recombinaison $\rightarrow 10^{-14} - 10^{-12}$ s
- Décharge/onde ionization $\rightarrow 10^{-9} - 10^{-8}$ s

Phénomène multi-échelles en temps et en espace

Diversité d'applications



source : Bourdon *et al.* (LPP/X)

- Dynamique chimique nonlinéaire
(ondes spirales, milieux excitables)
- Génie Biomédical
(dynamique électrique cœur, AVC)
- Fronts de combustion
(prop./dynamique d'allumage/instabilités)
- Applications plasma
(décharges, sprites, propulsion électrique)

Large spectre d'échelles de temps et d'espace

- Longueur de Debye $\rightarrow 10^{-5} - 10^{-4} \text{ m}$
- iDistance inter-électrode $\rightarrow 10^{-2} - 10^{-1} \text{ m}$

Explication par l'exemple



Le cas de la propagation d'une flamme

Il existe plusieurs niveaux de modélisation :

- Niveau de modélisation fluide (Compressible/Faible Mach/incompressible)
- Niveau de modélisation de la thermochimie (Chimie simplifié/Chimie Complexe)
- Niveau de modélisation des phénomènes dissipatifs - diffusion massique et thermique

Cela introduit alors la notion de limite asymptotique et la présence potentielle de petits paramètres

- Soit on conserve l'ensemble des échelles
- Soit on passe à la limite - changement de la structure mathématique du système
- Cela aura une influence importante sur la structure des solutions et sur la résolution numérique

Simulation de phénomènes multi-échelles

Reproduction et prédiction de la physique

- **nombreux variables et paramètres** modélisation permettant de reproduire l'ensemble des échelles physiques
- d'une point de vue mathématique : Raideur

de grandes ressources de calcul

Plusieurs stratégies pour repousser les limites de calcul :

Simulation de phénomènes multi-échelles

Reproduction et prédiction de la physique

- nombreux variables et paramètres
- d'une point de vue mathématique : **Raideur**
⇒ cela demande des méthodes num. adaptées et

de grandes ressources de calcul

Plusieurs stratégies pour repousser les limites de calcul :

● exploitation de la puissance de calcul
simulations avec un grand niveau de détail

Simulation de phénomènes multi-échelles

Reproduction et prédiction de la physique

- nombreux variables et paramètres
- d'un point de vue mathématique : Raideur
⇒ cela demande des méthodes num. adaptées et

de grandes ressources de calcul

Plusieurs stratégies pour repousser les limites de calcul :

- exploitation de la puissance de calcul
simulations avec un grand niveau de détail
- développement de technique de modélisation
réduire la raideur- reproduisant les phénom. principaux
- conception de nouvelles méthodes
schémas efficaces, troncatures et liens d'up-scaling

Simulation de phénomènes multi-échelles

Reproduction et prédiction de la physique

- nombreux variables et paramètres
- d'une point de vue mathématique : Raideur
⇒ cela demande des méthodes num. adaptées et

de grandes ressources de calcul

Plusieurs stratégies pour repousser les limites de calcul :



source : IDRIS, France

- exploitation de la **puissance de calcul**
simulations avec un grand niveau de détail
- développement de technique de modélisation
réduire la raideur- reproduisant les phénom. principaux
- conception de nouvelles méthodes
schémas efficaces théoriquement et dans l'implémentation

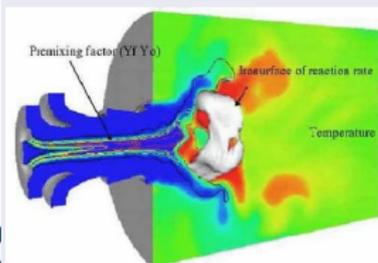
Simulation de phénomènes multi-échelles

Reproduction et prédiction de la physique

- nombreux variables et paramètres
- d'un point de vue mathématique : Raideur
⇒ cela demande des méthodes num. adaptées et

de grandes ressources de calcul

Plusieurs stratégies pour repousser les limites de calcul :



source : CERFACS

- exploitation de la puissance de calcul
simulations avec un grand niveau de détail
- développement de **technique de modélisation**
réduire la raideur- reproduisant les phénom. principaux
- conception de nouvelles méthodes
schémas efficaces théoriquement et dans l'implémentation

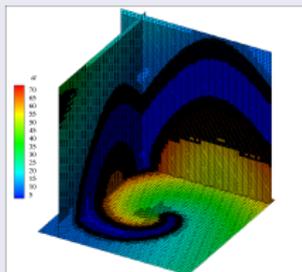
Simulation de phénomènes multi-échelles

Reproduction et prédiction de la physique

- nombreux variables et paramètres
- d'une point de vue mathématique : Raideur
⇒ cela demande des méthodes num. adaptées et

de grandes ressources de calcul

Plusieurs stratégies pour repousser les limites de calcul :



source : Duarte *et al.* (EM2C Lab.)

- exploitation de la puissance de calcul
simulations avec un grand niveau de détail
- développement de technique de modélisation
réduire la raideur- reproduisant les phénom. principaux
- conception de **nouvelles méthodes**
schémas efficaces théoriquement et dans l'implémentation

Plan du Cours

- 1 Présentation Enseignant - Introduction
- 2 Physique et enjeux de modélisation
 - Notion de milieu réactif multi-échelle
 - Notion de hiérarchie de modèles
- 3 Dynamique temporelle - Etats d'équilibre - Stabilité - Bifurcation

Plusieurs situations

- **Présence de changement de dynamique temporelle** - cf. PC1 - Explosion thermique - réactions en chaîne, emballement thermique - allumage d'une flamme
- **Présence d'un état d'équilibre du système vers lequel le système converge en temps long** - pendule avec frottement - propagation d'une flamme auto similaire - onde progressive - bille sur cerceau
- **Dynamique Oscillante** - pendule pesant - dynamique des populations (2 systèmes - différence entre le cas conservatif / dissipatif) - Belousov-Zhabotinsky (BZ)

Plusieurs situations

- **Présence de changement de dynamique temporelle** - cf. PC1 - Explosion thermique - réactions en chaîne, emballement thermique - allumage d'une flamme
- **Présence d'un état d'équilibre du système vers lequel le système converge en temps long** - pendule avec frottement - propagation d'une flamme auto similaire - onde progressive - bille sur cerceau
- **Dynamique Oscillante** - pendule pesant - dynamique des populations (2 systèmes - différence entre le cas conservatif / dissipatif) - Belousov-Zhabotinsky (BZ)

Plusieurs situations

- **Présence de changement de dynamique temporelle** - cf. PC1 - Explosion thermique - réactions en chaîne, emballement thermique - allumage d'une flamme
- **Présence d'un état d'équilibre du système vers lequel le système converge en temps long** - pendule avec frottement - propagation d'une flamme auto similaire - onde progressive - bille sur cerceau
- **Dynamique Oscillante** - pendule pesant - dynamique des populations (2 systèmes - différence entre le cas conservatif / dissipatif) - Belousov-Zhabotinsky (BZ)

Plusieurs situations

- **Bifurcation par rapport à un paramètre :**
 - Rayleigh-Bénard - Turing - bille sur cerceau (nouvel état d'équilibre avec brisure de symétrie)
 - Bifurcation de Hopf : création d'un cycle limite - cf PC1 / Explosion thermique, BZ, Dynamique des populations (Rosenzweig-McArthur) - instabilité de combustion ou thermoacoustique (expé)
 - Point limite - disparition d'un point d'équilibre au delà d'une valeur limite du paramètre (Explosion).
- Chaos déterministe : le système s'installe sur un attracteur étrange structurellement stable (systèmes dynamiques dissipatifs)

Plusieurs situations

- **Bifurcation par rapport à un paramètre :**
 - Rayleigh-Bénard - Turing - bille sur cerceau (nouvel état d'équilibre avec brisure de symétrie)
 - Bifurcation de Hopf : création d'un cycle limite - cf PC1 / Explosion thermique, BZ, Dynamique des populations (Rosenzweig-McArthur) - instabilité de combustion ou thermoacoustique (expé)
 - Point limite - disparition d'un point d'équilibre au delà d'une valeur limite du paramètre (Explosion).
- **Chaos déterministe :** le système s'installe sur un attracteur étrange structurellement stable (systèmes dynamiques dissipatifs)

Plusieurs situations

- **Bifurcation par rapport à un paramètre** :
 - Rayleigh-Bénard - Turing - bille sur cerceau (nouvel état d'équilibre avec brisure de symétrie)
 - Bifurcation de Hopf : création d'un cycle limite - cf PC1 / Explosion thermique, BZ, Dynamique des populations (Rosenzweig-McArthur) - instabilité de combustion ou thermoacoustique (expé)
 - Point limite - disparition d'un point d'équilibre au delà d'une valeur limite du paramètre (Explosion).
- **Chaos déterministe** : le système s'installe sur un attracteur étrange structurellement stable (systèmes dynamiques dissipatifs)

Plusieurs situations

- **Bifurcation par rapport à un paramètre** :
 - Rayleigh-Bénard - Turing - bille sur cerceau (nouvel état d'équilibre avec brisure de symétrie)
 - Bifurcation de Hopf : création d'un cycle limite - cf PC1 / Explosion thermique, BZ, Dynamique des populations (Rosenzweig-McArthur) - instabilité de combustion ou thermoacoustique (expé)
 - Point limite - disparition d'un point d'équilibre au delà d'une valeur limite du paramètre (Explosion).
- **Chaos déterministe** : le système s'installe sur un attracteur étrange structurellement stable (systèmes dynamiques dissipatifs)

Plusieurs situations

- **Bifurcation par rapport à un paramètre** :
 - Rayleigh-Bénard - Turing - bille sur cerceau (nouvel état d'équilibre avec brisure de symétrie)
 - Bifurcation de Hopf : création d'un cycle limite - cf PC1 / Explosion thermique, BZ, Dynamique des populations (Rosenzweig-McArthur) - instabilité de combustion ou thermoacoustique (expé)
 - Point limite - disparition d'un point d'équilibre au delà d'une valeur limite du paramètre (Explosion).
- **Chaos déterministe** : le système s'installe sur un attracteur étrange structurellement stable (systèmes dynamiques dissipatifs)

Plan du cours

Le cours couvrira donc :

- 1 17 Septembre : Modélisation mathématique des systèmes dynamiques réactifs complexes multi-échelles. Hiérarchie de modèles et complexité. Revue d'un ensemble de cas d'application allant de la dynamique des populations en biologie, à la combustion et à la dynamique de flammes, en passant par les milieux excitable, la mécanique des fluides, la physique solaire, etc.. - [PC1 Explosion thermique](#).
- 2 24 Septembre : Rappels sur l'analyse mathématique des systèmes dynamiques (théorie d'existence et unicité, comportement au voisinage des points non singulier, redressement du flot) et leur classification. Identification précise des systèmes dissipatifs et conservatifs. Applications en dynamique des populations et mécanique. [PC2 Exercices sur la théorie et analyse de systèmes en dynamique des population et pendule pesant](#). [CRTP I - PC1/PC2](#).

Plan du cours

Le cours couvrira donc :

- ③ 01 Octobre : Approximation numérique des systèmes différentiels dissipatifs et applications. Schémas classiques dans le cas non raide, enjeux associés à la raideur des systèmes. Conditions d'ordre et notion de stabilité des schémas numériques (A-, L- et B-stabilité). Application sur des systèmes différentiels issus des champs applicatifs mentionnés précédemment. **PC3 - Analyse de l'intégration numérique sur divers systèmes dissipatifs et conservatifs.**
- ④ 15 Octobre : Méthodes de Runge-Kutta - explicite/implicites. **PC4 applications numérique - notion de raideur, pas de temps adaptatif. CRTP II - PC3/PC4.**
- ⑤ 22 Octobre : Méthodes numériques avancées pour l'intégration des systèmes d'équations différentiels ordinaires (séparation d'opérateur, ROCK4, RADAU5 ...). Analyse du comportement asymptotique des systèmes en présence de petits paramètres, perturbation singulière et système fortement oscillants. **PC5 mise en œuvre sur des systèmes raides issus des applications - équation de la chaleur - perturbation singulière. CRTP III - PC5.**



Plan du cours

Le cours couvrira donc :

- ⑥ 5 Novembre : Analyse des points singuliers hyperboliques et classification topologique de la dynamique au voisinage d'un point d'équilibre. Stabilité des points d'équilibre, détection des points de bifurcation et méthodes de continuation. **PC6 Application à des systèmes chimiques, physiques et mécaniques, techniques de continuation par longueur d'arc pour l'analyse des bifurcations. CRTP IV - PC6.** Distribution des mini-projets.
- ⑦ 12 Novembre : Cas des systèmes spatialement étendus, onde progressives, trajectoire hétéroclines et homoclines, structures de Turing. **PC7 : applications en biologie, chimie et combustion. CRTP V - PC7.**
- ⑧ 19 Novembre : Analyse et classification des bifurcations - Formes normales et symétrie. Applications en chimie, mécanique des fluides, dynamique des population, mécanique des fluides. **PC8 - Exercice sur la théorie des bifurcations.**



Plan du cours

Le cours couvrira donc :

- 9 26 Novembre : Méthodes numériques pour les systèmes dynamiques conservatifs, intégrateurs symplectiques. [PC9 - perle sur le cerceau, mécanique céleste, EDP - KdV](#). [CRTP VI - PC9](#). Choix des mini-projets.
- 10 17 Décembre : Ouverture sur le chaos - Conférence. [Aide pour les mini-projets](#).
- 11 Janvier - Soutenance des mini-projets.



Evaluation

Le cours sera évalué sur la base :

- 1 VI Comptes-rendus de Petite Classe (2/3 note)
- 2 Mini-projet avec soutenance finale en janvier et groupe de travail le 17 décembre