LIVRET DES MODAL

X2024

2025 – 2026

ÉCOLE POLYTECHNIQUE

IP PARIS

LIVRET DES MODAL X2024

Année 2025 – 2026

SOMMAIRE

4 Modal module appliqué en laboratoire

6 Liste des modules appliqués en laboratoire (MODAL) par département

8 Tableau récapitulatifdes modal par département et par période

13 Département de biologie

25 Département de chimie

31 Département d'économie

37 Département d'humanités et sciences sociales

41 Département d'informatique

61 Département management de l'innovation et entrepreneuriat

65 Département de mathématiques

71 Département de mathématiques appliquées

87 Département de mécanique

95 Département de physique

133 Département de physique électronique

143 Département de physique et mécanique

MODAL
MODULE APPLIQUÉ EN LABORATOIRE

Objectifs

MODule Appliqué en Laboratoire est un module obligatoire pour tous les élèves parmi les enseignements diversifiés.

Selon les domaines, afin de découvrir ou d'approfondir un domaine dans le cadre d'une approche scientifique concrète.

Se confronter pratiquement à certains problèmes (souvent difficiles à résoudre) réalistes ou proches du monde « réel » pour découvrir, maîtriser un outil/instrument d'analyse ou d'observation, un modèle ou une simulation du réel lié à la discipline Mettre en œuvre personnellement le cercle vertueux : Hypothèse-modélisation-vérification-amélioration.

La méthodologie et la pédagogie sont donc adaptées à cette acquisition en plusieurs phases :

- Approche concrète du domaine scientifique
  a. mise en place des outils d'analyse et de développement dans la thématique concernée
  b. acquisition des savoirs pratiques (expérimentaux notamment).

- Développement de la démarche complète « personnelle » sur un sujet/projet ouvert et flexible
  a. pré-analyse d'un sujet
  b. structuration de la démarche scientifique sur une des orientations possibles (à préciser dans la pré-analyse)
  c. processus d'analyse scientifique et obtention de résultats
  d. validation et corrélation entre résultats obtenus et théorie sous-jacente
  e. propositions

Selon les domaines, l'accent sera mis soit sur la découverte d'un domaine scientifique nouveau sur un mode inductif (de l'expérience vers la théorie et non l'inverse !), soit sur la définition et la résolution d'un problème concret par une démarche d'ingénierie en passant par la maîtrise d'outils conceptuels et pratiques nouveaux.

Ainsi, chaque élève pourra selon le cas aborder l'un des axes suivants :

- Maîtrise de techniques et instruments permettant l'observation de phénomènes naturels ou provoqués et confrontation avec les théories et modélisations.
- Acquisition d'outils (algorithmique, code, gestion de l'information…) et développement effectif sur un projet applicatif.
- Acquisition de connaissances basiques dans le domaine, suivie d'une étude personnelle de cas ou de points particuliers à

développer qui garantisse l'apprentissage dans l'action et dans la création.

Ce module d'enseignement est constitué de 10 séances qui pourront par exemple être réparties de la façon suivante entre environ 3-4 séances d'acquisition (théorique et/ou pratique) et 5-6 séances de mise en œuvre effective, le plus souvent en binôme, avec un encadrement « rapproché » régulier (hebdomadaire).

Un aspect important et formateur des Modal est lié à la mise en forme des résultats et à leur restitution sous forme d'un rapport écrit et d'une soutenance orale, avec éventuellement une démonstration du fonctionnement du dispositif ou du logiciel mis au point.

Le travail et l'investissement attendus des élèves correspondent à 85 heures dont environ 60 heures de séances programmées et incluent incluant le bilan de chaque séance, l'analyse bibliographique, la synthèse écrite de fin de module, la préparation de la présentation orale des résultats et de l'analyse critique.



LISTE DES MODULES APPLIQUÉS EN LABORATOIRE (MODAL)

Biologie

Attention : On ne peut garantir à un élève l'inscription pour un thème précis. La répartition des élèves se fait en fonction de l'offre et de la demande.

- A Bioluminescence
- A Imagerie intracellulaire
- A Clonage
- A Biologie synthétique

Chimie

- A Synthèse organique et interfaces biologiques
- A Chimie pour l'énergie et le développement durable
- A Matériaux innovants
- B Tournoi Français des Chimistes

Économie

- A Research Project on Economic Behavior: Designing experiments to inform economic theory
- B Macroeconomic Policy Lab
- A Economic Analysis of the US Endangered Species Program

Humanités et Sciences Sociales

- A Sciences et sociétés : approches philosophiques, historiques et sociologiques sur les évolutions des sciences et des techniques

Informatique

- B Bioinformatics
- C Connected Objects and the Internet of Things (IoT)
- J Conception et développement d'un Jeu vidéo
- S Algorithms and Advanced Programming
- T Tablettes et smartphones
- W Applications Web
- D Distributed applications
- R Robots et drones
- A Introduction to Intensive Programming in C++
- G Exploration et apprentissage sur les Graphes du Web
- V Deep Learning in Computer Vision
- X Cybersecurity – the hacking Xperience

Mathématiques

- A Combinatoire et géométrie
- C Algèbre et géométrie

Mathématiques Appliquées

- A Problem solving en mathématiques appliquées
- A Modélisation mathématique par la démarche expérimentale
- B Optimisation, Contrôle et Recherche Opérationnelle
- D Simulation numérique aléatoire (SNA) autour des événements rares

Mécanique

Attention : Les thèmes affichés sont des exemples des années précédentes et changent d'une année sur l'autre. On ne peut garantir à un élève l'inscription pour un thème précis dans les thèmes ouverts.

A/B/C

« Aérodynamique »
ou « Acoustique/vibrations »
ou « Génie civil »
ou « Ecoulements naturels/Géophysique »
ou « Gouttes et bulles »
ou « Biomécanique »
ou « Ruine de structure »
ou « Robotique »
ou « Physique du Sport »

Management de l'Innovation et Entrepreneuriat

A Analyse de phénomènes de management

Physique

Physique

A Physique des plasmas et des particules élémentaires
B Physique des lasers et applications
C Physique de la matière condensée

Électronique

Toutes les thématiques ne sont pas systématiquement ouvertes chaque année en fonction, d'une part des disponibilités des enseignants et, d'autre part, de la prévision du nombre d'élèves basée sur l'année précédente.

O Électronique pour l'Imagerie Atomique
P IOT & Robot mobile autonome
R Circuits logiques programmables (FPGA) et Traitement du signal

Physique/Mécanique

A Tournoi international de Physique (IPT)

TABLEAU RECAPITULATIF DES MODAL

par département et par période

DÉPARTEMENT		THÈMES	CODE	PÉRIODE			Numerus clausus
				P1	P2	P3	
				41M	42M	43M	
BIOLOGIE*		**Attention : On ne peut garantir à un élève l'inscription pour un thème précis. La répartition des élèves se fait en fonction de l'offre et de la demande.**					
	A	« Bioluminescence » ou « Imagerie intracellulaire » ou « Clonage » ou « Biologie synthétique »	BIO_41M01_EP	1			18
			BIO_42M01_EP		2		24
			BIO_43M01_EP			3	24
CHIMIE							
	A	Chimie expérimentale	CHE_41M01_EP	1			12
			CHE_42M01_EP		2		12
	B	Tournoi Français des Chimistes	CHE_42M02_EP		2		6
ÉCONOMIE							
	A	Research Project on Economic Behavior: Designing experiments to inform economic theory	ECO_42M01_EP		2		12
	B	Macroeconomic Policy Lab	ECO_42M02_EP		2		12
	A	Economic Analysis of the US Endangered Species Program	ECO_43M01_EP			3	12

DÉPARTEMENT		THÈMES	CODE	PÉRIODE			Numerus clausus
				P1	P2	P3	
				41M	42M	43M	
HUMANITÉS ET SCIENCES SOCIALES							
	A	Sciences et sociétés : approches philosophiques, historiques et sociologiques sur les évolutions des sciences et des techniques	HSS_41M01_EP	1			25
			HSS_42M02_EP		2		25
INFORMATIQUE							
	B	**B**ioinformatics	MDC_41M02_EP	1			10
	C	**C**onnected Objects and the Internet of Things (IoT)	CSC_41M01_EP	1			24
	J	Conception et développement d'un **J**eu vidéo	CSC_41M05_EP	1			18
	S	Algorithms and Advanced Programming	CSC_41M02_EP	1			24
	T	**T**ablettes et smartphones	CSC_41M03_EP	1			24
	W	Applications **W**eb	CSC_42M03_EP		2		48
	D	**D**istributed applications	CSC_42M01_EP		2		24
	R	**R**obots et drones	CSC_42M02_EP		2		30
	A	Introduction to Intensive Programming in C++	CSC_43M01_EP			3	24
	G	Exploration et apprentissage sur les **G**raphes du Web	CSC_43M02_EP			3	18
	V	Deep Learning in Computer **V**ision	CSC_43M04_EP			3	30
	X	Cybersecurity – the hacking **X**perience	CSC_43M05_EP			3	48
MANAGEMENT DE L'INNOVATION ET ENTREPRENEURIAT							
	A	Analyse de phénomènes de management	IME_43M01_EP			3	14

DÉPARTEMENT		THÈMES	CODE	PÉRIODE			Numerus clausus
				P1	P2	P3	
				41M	42M	43M	
MATHÉMATIQUES							
	A	Combinatoire et géométrie	FMA_41M01_EP	1			25
	B	Algèbre et géométrie	FMA_42M01_EP		2		20
MATHEMATIQUES APPLIQUÉES							
	A	Problem solving en mathématiques appliquées	APM_41M01_EP	1			25
	A	Modélisation mathématique par la démarche expérimentale	APM_42M01_EP		2		20
	B	Optimisation, Contrôle et Recherche Opérationnelle	APM_43M01_EP			3	12
	D	Simulation numérique aléatoire (SNA) autour des événements rares	APM_43M02_EP			3	30
MECANIQUE		**Attention : on ne peut garantir à un élève l'inscription pour un thème précis. La répartition des élèves se fait en fonction de l'offre et de la demande. Les thèmes affichés sont des exemples des années précédentes.**					
	A	« Aérodynamique » ou « Acoustique/vibrations » ou « Génie civil » ou « Ecoulements naturels/Géophysique » ou « Gouttes et bulles » ou « Biomécanique » ou « Ruine de structure » ou « Robotique » ou « Physique du Sport »	MEC_41M01_EP	1			40
	B	« Aérodynamique » ou « Acoustique/vibrations » ou « Génie civil » ou « Ecoulements naturels/Géophysique » ou « Gouttes et bulles » ou « Biomécanique » ou « Ruine de structure » ou « Robotique » ou « Physique du Sport »	MEC_42M01_EP		2		40
	C	« Aérodynamique » ou « Acoustique/vibrations » ou « Génie civil » ou « Ecoulements naturels/Géophysique » ou « Gouttes et bulles » ou « Biomécanique » ou « Ruine de structure » ou « Robotique » ou « Physique du Sport »	MEC_43M01_EP			3	40

DÉPARTEMENT		THÈMES	CODE	PÉRIODE			Numerus clausus
				P1	P2	P3	
				41M	42M	43M	
PHYSIQUE		**Attention :** **On ne peut garantir à un élève l'inscription pour un thème précis.** **La répartition des élèves se fait en fonction de l'offre et de la demande.**					
Physique							
	PHY_4XM01_EP – 24 élèves maximum sur l'année 2025-2026						
	A	Physique des plasmas et des particules élémentaires	PHY_42M01_EP		2		6
			PHY_43M01_EP			3	18
	PHY_4XM02_EP – 18 élèves maximum sur l'année 2025-2026						
	B	Physique des lasers et applications	PHY_42M02_EP		2		12
			PHY_43M02_EP			3	14
	PHY_4XM03_EP – 34 élèves maximum sur l'année 2025-2026						
	C	Physique de la matière condensée	PHY_42M03_EP		2		16
			PHY_43M03_EP			3	18
Electronique							
	O	Électronique pour l'Imagerie Atomique	PHY_43M04_EP			3	8
	P	IOT & Robot mobile autonome	PHY_43M05_EP			3	10
	R	Circuits logiques programmables (FPGA) et traitement du signal	PHY_43M06_EP			3	8
Physique/mécanique							
	A	Tournoi International de Physique (IPT)	MDC_41M01_EP	1			6
			PHY_42M01_EP		2		6

Périodes :
P1 : du 25 août au 20 novembre 2025
P2 : du 21 novembre 2025 au 26 février 2026
P3 : du 27 février 2026 au 04 juin 2026



MODAL DE BIOLOGIE

Yves Méchulam ▸ *Laboratoire de biologie structurale de la cellule, BIOC*
yves.mechulam@polytechnique.edu

L'expérimentation est au centre des progrès de la biologie. Elle permet de mettre des hypothèses de travail à l'épreuve. Grâce à des cycles hypothèse-vérification-affinement, on aboutit à des modèles prédictifs, malgré la grande complexité des objets étudiés : les êtres vivants. L'enseignement proposé prépare le futur ingénieur à mieux apprécier le potentiel et les limites de l'expérimentation en biologie.

Ce module expérimental prolonge les cours de Biologie moléculaire et information génétique [**BIO_41052_EP** – P1] et Biologie cellulaire et développement [**BIO_42051_EP** – P2].

Il sert également d'illustration aux cours Écologie et de Biodiversité [**BIO_43031_EP** – P3] et de Pathologies et stratégies thérapeutiques [**BIO_43032_EP** – P3].

Période des modal de biologie*

(Module appliqué en laboratoire)
Trois sessions sont programmées au cours de l'année : (10 séances de 6 heures)

BIO_41M01_EP

- Période P1, fin août. Présentation du MODAL des différents sujets semaine de la rentrée.

BIO_42M01_EP

- Période P2, fin novembre.
  Présentation du MODAL des différents sujets fin octobre.

BIO_43M01_EP

- Période P3, début mars.
  Présentation du MODAL des différents Sujets début février.

Lieu d'enseignement

- Laboratoires de travaux expérimentaux de biologie (Centre TE de Biologie). Au croisement entre l'aile 2 et le bâtiment central des laboratoires de recherche au 2e étage.



			CODE	PÉRIODE			Numerus clausus
				P1	P2	P3	
				41M	42M	43M	
Sous réserve :		**Attention :** **On ne peut garantir à un élève l'inscription pour un thème précis. La répartition des élèves se fait en fonction de l'offre et de la demande à chaque période.**					
	A	« Bioluminescence » ou « Imagerie intracellulaire » ou « Clonage » ou « Biologie synthétique »	BIO_41M01_EP	1			18
			BIO_42M01_EP		2		24
			BIO_43M01_EP			3	24

Le modal **MDC_41M02_EP** en partenariat avec le département de Biologie est ouvert en P1, merci de vous inscrire auprès du département d'Informatique uniquement.

MODAL
BIOLUMINESCENCE

Roxane Lestini
roxane.lestini@polytechnique.edu

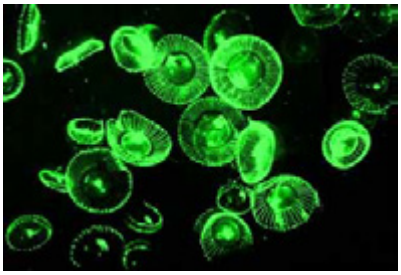
L'énergie chimique extraite des molécules organiques par les êtres vivants sert à de multiples fonctions. Elle peut être transformée en énergie thermique, en énergie mécanique, en énergie électrique, voire en énergie lumineuse.

Cette dernière propriété est plus répandue qu'on ne le pense en général puisqu'elle existe chez plusieurs centaines d'espèces vivantes aussi diverses que des bactéries, des champignons et des animaux.

Objectifs

Dans ce module expérimental, nous étudierons particulièrement la protéine verte fluorescente (GFP) de la méduse du pacifique *Aequorea victoria*. Nous utiliserons les outils de génie génétique, de biochimie et de biophysique pour comprendre l'origine de cette fluorescence et comment l'exploiter dans divers domaines biotechnologiques.

Les mécanismes de bioluminescence, qui permettent l'excitation de la GFP au sein de la méduse, seront également abordés.



Organisation

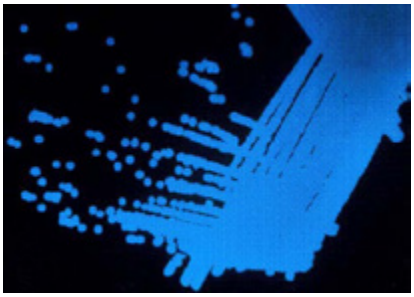
Les 10 séances du module Bioluminescence s'organisent autour de 3 thématiques :

- Bioingénierie des protéines : introduction aux techniques de biologie moléculaire et de microbiologie pour la construction d'un vecteur d'expression de la GFP, une mutagénèse dirigée du gène de la *gfp*, la transformation des plasmides chez la bactérie, et la purification de la GFP à partir des bactéries.
- Étude des caractéristiques biochimiques et optiques de la GFP et de ses mutants, analyse structure-fonction, et exemple d'application de la GFP dans l'imagerie cellulaire chez l'archée *Haloferax volcanii*.
- Introduction au système luciférine/luciférase des lucioles.

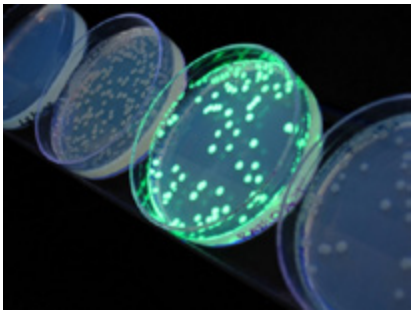
Aperçu



Nous allons étudier le système luciférine/luciférase des bactéries, et comprendre ainsi comment réguler la bioluminescence dans des bactéries.



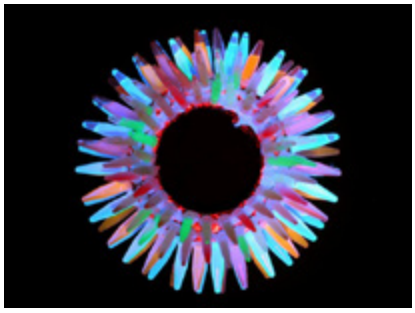
Nous nous intéressons ensuite à la GFP. En utilisant des techniques classiques de biologie moléculaire, nous introduisons le gène de la GFP dans un plasmide pour permettre sa surexpression chez la bactérie *Escherichia coli*.



Puis nous étudions les propriétés de fluorescence de la GFP. Nous introduisons des mutations au niveau du chromophore de la protéine et caractérisons leurs effets sur les propriétés de fluorescence. Deux mutants sont ainsi générés, l'un dont la fluorescence n'est plus verte mais bleu, l'autre dont le spectre d'excitation est modifié. A travers une analyse de la structure tridimensionnelle de la protéine, nous chercherons également à comprendre comment certains acides aminés influent sur les propriétés de la GFP sans directement faire parte du chromophore. Ce type d'approche a permis d'obtenir des protéines fluorescentes de nombreuses couleurs.

Différentes protéines GFP sont purifiées et leurs caractéristiques spectrales étudiées en mesurant leurs spectres d'absorption et d'émission.

Enfin, nous étudierons la localisation cellulaire d'une protéine clé de la réplication fusionnée à la GFP au sein de cellules vivantes de l'archée, *H. volcanii*, comme exemple de l'utilisation de la GFP comme outil en imagerie cellulaire.



MODAL
IMAGERIE INTRACELLULAIRE CLINIQUE

Cédric Bouzigues
cedric.bouzigues@polytechnique.edu

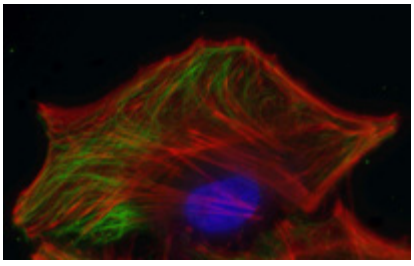
Anatole Chessel
anatole.chessel@polytechnique.edu

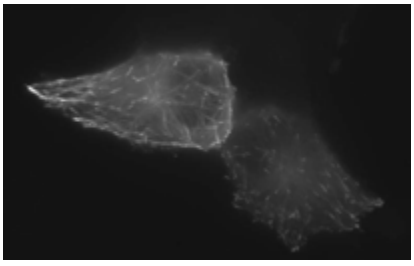
Objectifs

L'organisation et la dynamique du cytosquelette jouent un rôle essentiel dans de nombreux processus de la vie de la cellule eucaryotes, comme la migration, la division ou le transport intracellulaire. L'objectif de ce Modal est ainsi d'observer les différents composants du cytosquelette (microtubule et filaments d'actin Aperçu e) à l'intérieur de cellules humaines. Il est l'occasion d'introduire de multiples techniques en biologie cellulaire (culture de cellules humaines, immunocytochimie, transfection), en microscopie et en modélisation numérique.

Organisation

Les 10 journées de ce module s'organisent autour de quatre thématiques : introduction à la culture cellulaire, immunocytochimie et microscopie, expression et observation d'une protéine de fusion dans des cellules humaines, analyse d'image et modélisation numérique.





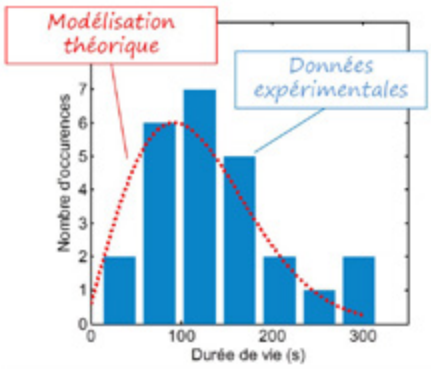
Aperçu

Le marquage de protéines choisies à l'aide d'anticorps spécifiques révélés par des fluorophores (immunocytochimie) permet de révéler leur organisation dans la cellule.

L'image ci-contre montre une cellule HeLa avec les microtubules (vert), les filaments d'actine (rouge) et le noyau (bleu) marqués.

L'expression d'une protéine de coiffe des microtubules (EB3) fusionnée à une GFP permet d'observer la dynamique des microtubules et de mesurer leurs vitesses de polymérisation et la durée de vie de leurs coiffes. Le film ci-contre montre deux cellules HeLa transfectées par un plasmide EB3: GFP et observée en microscopie de fluorescence. Les « comètes » sont les coiffes de microtubules individuels.

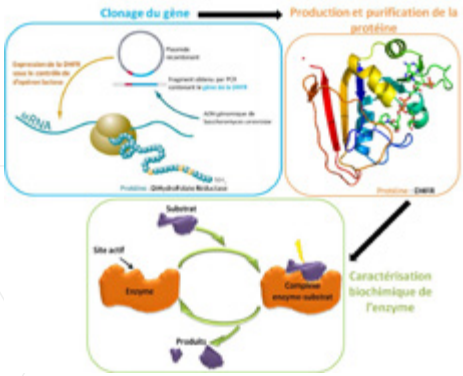
L'identification des processus moléculaires contrôlant la taille de la coiffe d'un microtubule permet de construire un système d'équations stochastiques déterminant son évolution. La figure ci-contre montre la comparaison des mesures expérimentales de la durée de vie des coiffes comparées à leur prédiction numérique.



MODAL
CLONAGE D'UN GÈNE EUCARYOTE DANS UNE BACTÉRIE, EXPRESSION, PURIFICATION

Roxane Lestini
roxane.lestini@polytechnique.edu

Ce modal permet aux étudiants de découvrir les outils et les techniques clés, utilisées au quotidien dans les laboratoires de biologie.



Objectifs

La dihydrofolate réductase (DHFR) de la levure *Saccharomyces cerevisiae* est une protéine essentielle conservée chez tous les eucaryotes. Grâce à son rôle clé dans la croissance cellulaire et dans le métabolisme, la DHFR a un intérêt pharmacologique. Elle est la cible des quelques médicaments qui sont utilisés pour le traitement d'un spectre large de maladies : des cancers, des infections, l'arthrite rhumatoïde, la sclérose multiple et le lupus.

Dans ce module expérimental, nous clonerons un gène eucaryote dans une bactérie, nous induirons son expression et purifierons la protéine ainsi produite. Enfin, un test enzymatique permettra de caractériser fonctionnellement la protéine purifiée.



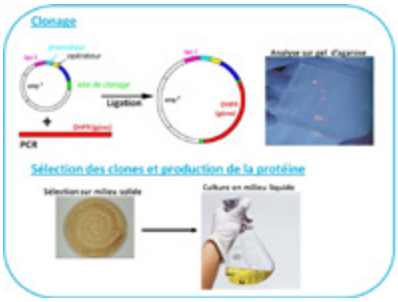
Organisation

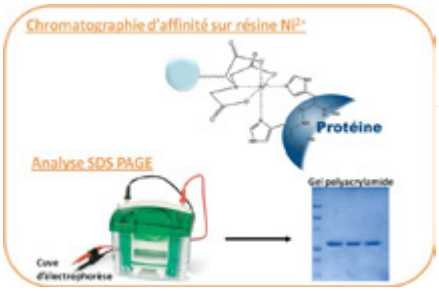
Les premières séances sont dédiées à la biologie moléculaire (clonage) et à la microbiologie (sélection des clones).

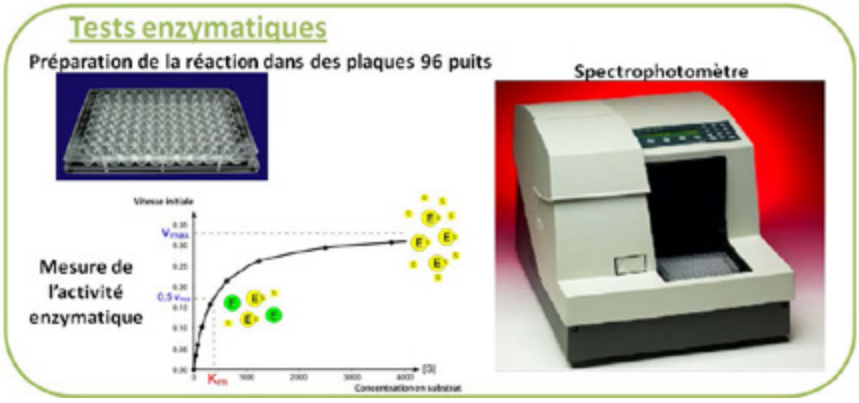
Les séances suivantes sont organisées autour de techniques de biochimie (purification de la protéine d'intérêt) et d'enzymologie (caractérisation de l'enzyme).

Aperçu

Les méthodes modernes de la biologie moléculaire et de la biochimie permettent de produire rapidement et en grande quantité des protéines d'intérêt pharmacologique. L'utilisation d'organismes à croissance rapide, les bactéries, et la construction de protéines de fusion seront appliquées pour la production de matériel nécessaire à la détermination des caractéristiques fonctionnelles d'une enzyme.







MODAL

BIOLOGIE SYNTHÉTIQUE : DESIGN ET CONSTRUCTION D'OSCILLATEURS GÉNÉTIQUES SYNTHÉTIQUES

Thomas Gaillard
thomas.gaillard@polytechnique.edu

Sébastien Ferreira-Cerca
sebastien.ferreira-cerca@polytechnique.edu

La biologie synthétique a pour but la conception et la construction de formes de vie artificielles réalisant une fonction donnée. Les réseaux de régulation de gènes sont des ensembles de gènes qui interagissent entre eux et avec d'autres molécules, via leurs produits d'expression, permettant un contrôle mutuel de leurs niveaux d'expression. Une approche possible de la biologie synthétique consiste à modifier des réseaux génétiques existants ou à en concevoir de nouveaux, ouvrant la voie au design de nouvelles fonctions biologiques. Les premiers succès ont été obtenus en 2000 avec la création d'un oscillateur cellulaire synthétique appelé le « répressilateur ». Parmi les autres réalisations, on peut citer un écosystème proie-prédateur, la génération de motifs multicellulaires, un capteur de lumière, un compteur, un filtre passe-bande, un dispositif à mémoire et un détecteur de contours. La biologie synthétique est un domaine de recherche très actif avec de nombreuses applications potentielles.

Objectifs

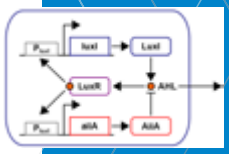
Le but de ce Modal est l'étude et la fabrication d'oscillateurs génétiques synthétiques, c'est à dire des réseaux de gènes non naturels ayant un comportement oscillant. Il fait appel aux méthodes et techniques suivantes: modélisation des réseaux de gènes, génie génétique, culture cellulaire, microscopie de fluorescence, analyse d'image.



Organisation

– Une partie des séances est consacrée à l'étude théorique et à la modélisation numérique des oscillateurs génétiques synthétiques.

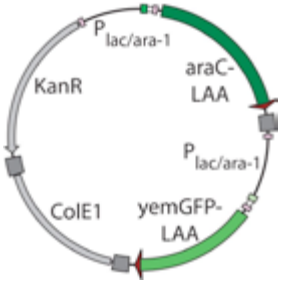
– Les autres séances sont consacrées à la réalisation expérimentale et à l'observation d'une souche bactérienne artificielle incluant un réseau génétique oscillant.

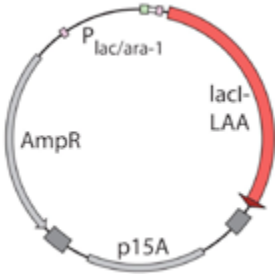


Aperçu

Une première étape sur ordinateur consistera en une introduction à la modélisation des réseaux génétiques et aux outils proposés reposant sur le langage informatique Python. Des oscillateurs génétiques de complexité croissante seront étudiés.

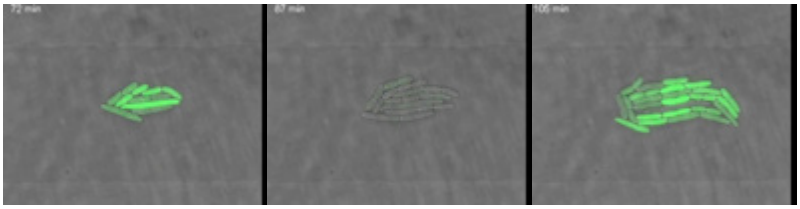
Le travail expérimental commencera par la conception des plasmides et des souches bactériennes permettant d'implémenter le circuit de l'oscillateur génétique. Ces plasmides seront construits par des techniques de génie génétique.



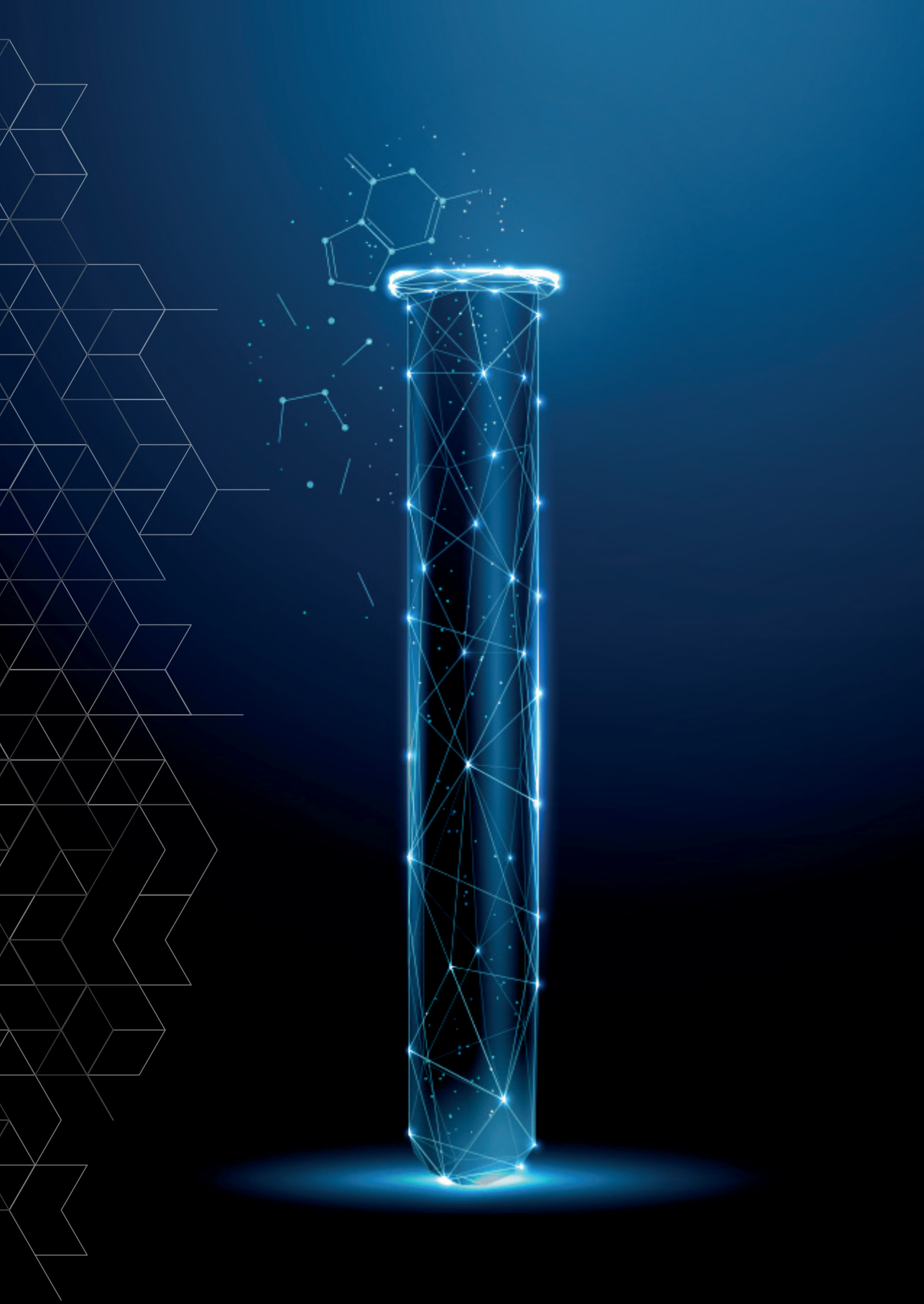


Les plasmides seront ensuite co-transformés dans une souche bactérienne.

Les cellules seront cultivées.



Les oscillateurs génétiques qui auront été construits par les élèves seront observés par vidéomicroscopie de fluorescence. Les données d'imagerie obtenues seront analysées et comparées aux prédictions des modèles computationnels établis pendant le MODAL.



MODAL DE CHIMIE

Alexis Archambeau ▸ *Laboratoire de Synthèse Organique*
alexis.archambeau@polytechnique.edu

			CODE	PÉRIODE			Numerus clausus
				P1	P2	P3	
				41M	42M	43M	
	A	Chimie expérimentale	CHE_41M01_EP	1			12
			CHE_42M01_EP		2		12
	B	Tournoi Français des Chimistes	CHE_42M02_EP		2		8

MODAL
DE CHIMIE

Alexis Archambeau ▸ *Laboratoire de Synthèse Organique*
alexis.archambeau@polytechnique.edu

CHE_41M01_EP

(Numerus Clausus : 12 élèves)

- **Période 1**, du 29 aout au 7 novembre 2025 (10 séances de 6 heures).
- Présentation des différents sujets mi-aout.

CHE_42M01_EP

(Numerus Clausus : 12 élèves)

- **Période 2**, du 21 novembre 2025 au 13 février 2026 (10 séances de 6 heures).
- Présentation des différents sujets en octobre-novembre.

Lieu d'enseignement

- Laboratoires des travaux expérimentaux de chimie (TREX) : Aile 5, 2e étage, bâtiment recherche.
- Certaines séances peuvent avoir lieu dans les laboratoires de recherche du département de chimie.

Déroulement

Les élèves choisissent leur projet de recherche lors de la séance de présentation des projets MODAL. Ils travaillent en groupes de 2 à 4 étudiants, sous l'encadrement d'un moniteur, durant 10 séances de 6 heures. Le travail donne lieu à la tenue d'un cahier de laboratoire, de la rédaction d'un rapport puis d'une soutenance orale commune par groupe avec questions.

Évaluation

La note finale prendra en compte le travail expérimental (40 %), le rapport écrit (20 %), la tenue du cahier de laboratoire (20 %) et la présentation orale (20 %).

Prérequis

Suivre au moins un des 4 cours de chimie proposés en 2e année (**CHE_41031_EP** « Orbitales, molécules et matériaux », **CHE_41021_EP** « Réactivité et synthèse moléculaire », **CHE_41051_EP** « Chimie des matériaux », **CHE_43052_EP** « Chemistry for future leaders »).

Contenu de l'enseignement

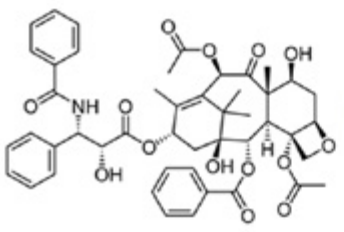
L'expérimentation joue un rôle crucial dans la recherche en chimie, car elle permet de valider et d'approfondir les théories élaborées en laboratoire. En manipulant des réactifs dans des conditions contrôlées, les chercheurs peuvent observer les résultats et comprendre les mécanismes moléculaires qui sous-tendent les réactions chimiques en validant

ou réfutant les hypothèses théoriques, contribuant ainsi à l'avancement de la science. L'expérimentation permet d'explorer de nouvelles voies de synthèse, d'optimiser les procédés chimiques existants et de découvrir de nouveaux matériaux aux propriétés uniques, avec des applications pratiques dans des domaines tels que la médecine, l'industrie pharmaceutique, l'énergie et l'environnement.

A travers des projets faisant écho à la recherche développée au sein de l'Ecole Polytechnique, les élèves mettront en pratique les connaissances théoriques vues en cours. Les projets proposés sont variés et concernent des domaines divers tels que la synthèse organique et ses interfaces avec la biologie, la chimie de coordination, ou bien l'élaboration de nouveaux matériaux.

Les différentes techniques de manipulation, méthodes d'analyse spectroscopiques et chromatographiques qui seront abordées durant ces MODAL pourront comprendre :

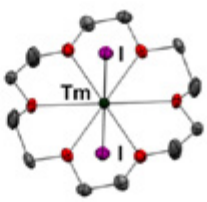
- Des réactions sous atmosphère inerte et leur suivi d'avancements
- Les techniques de séparation et de purification : extraction, purification par distillation, cristallisation, chromatographie sur colonne de gel de silice
- L'analyse structurale par résonance magnétique nucléaire, spectrométrie de masse, diffractométrie aux rayons X, spectroscopie infrarouge, UV et polarimétrie.
- La chromatographie analytique (en phase gazeuse ou liquide).
- Le travail sous atmosphère inerte sur ligne de Schlenk et en boite à gants
- Les techniques d'électrochimie.
- Mise en œuvre de caractérisations structurales (diffraction des rayons X, microscopie électronique à balayage ou en transmission)
- La synthèse de nanoparticules par chimie des colloïdes
- Mise en œuvre de caractérisations spectroscopiques (luminescence, absorption, diffusion…)
- Maîtrise des logiciels informatique ChemDraw et Mestrenova.
- Introduction aux outils de recherche bibliographique (SciFinder)

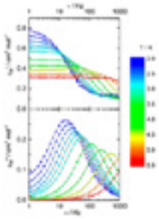












Vous trouverez ci-dessous un listing des projets abordés au cours de l'année précédente. Ces projets s'appuient sur des recherches actuelles au sein du département de Chimie, tout en laissant une relative prise d'initiative aux étudiants motivés. Cette liste est susceptible d'évoluer pour l'année 2025-2026 (attention, on ne peut garantir à un élève. L'inscription pour un thème précis. La répartition des élèves se fait en fonction de l'offre et de la demande).

- **Synthèse de molécules photoactivables pour l'étude de mécanisme biologiques**
  L'actine est une protéine impliquée dans l'architecture et la mobilité cellulaire. Ce MODAL propose de réaliser la synthèse de la molécule CK-666, un inhibiteur de l'actine, ainsi que des dérivés possédant une fonction photoactivable susceptible d'être utilisés comme outils d'étude des mécanismes biologiques associés à la polymérisation de l'actine.

- **Développement d'une méthodologie de synthèse d'hétérocycles utilisant un dérivé d'herbicide**
  Ce MODAL propose de préparer un dérivé d'herbicide de la famille des 5-vinyloxazolidine-2,4-diones et de l'utiliser par la suite en tant que produit de départ d'une transformation diastéréosélective et énantiosélective utilisant un complexe organométallique du palladium. Le projet balaiera les techniques de manipulation et d'analyse usuelles en synthèse organique et proposera également une ouverture à des problématiques de recherche académique actuelle.

- **Synthèse de complexes organométalliques à base de lanthanides**
  Ce MODAL propose de synthétiser des ligands carbonés de type cyclopentadiényle et de les complexer à des lanthanides. Ces composés sont très réactifs et permettent des réactivités intéressantes notamment sur l'activation de petites molécules tel que le CO, CO2, N2. De plus, ces molécules sont également intéressantes de par leurs propriétés optiques et de luminescence.

- **Production d'hydrogène par photocatalyse**
  Ce MODAL propose de fabriquer un système catalytique capable de produire de l'hydrogène à partir d'irradiation lumineuse. Pour se faire, il sera réalisé, tout d'abord, la synthèse de nanoparticules photosensible puis leur caractérisation pour ensuite l'appliquer dans des conditions catalytiques afin de produire de l'hydrogène.

MODAL
TOURNOI FRANÇAIS DES CHIMISTES

Simon Delacroix ▸ *Laboratoire de Physique de la Matière Condensée*
simon.delacroix@polytechnique.edu

CHE_42M02_EP

(Numerus Clausus : 8 élèves)

- **Période 2**, du 21 novembre 2025 au 13 février 2026 (10 séances de 6 heures).
- Ce MODAL se fait nécessairement en parallèle du PSC « Tournoi Français des Chimistes ».
- Les candidatures sont à envoyer à Simon Delacroix (simon.delacroix@polytechnique.edu).

Ce Modal s'adresse aux élèves sélectionnés qui participeront à la 6e édition du Tournoi Français des Chimistes qui se déroulera en 2026 à Sorbonne Université.

Le Tournoi Français des Chimistes a été créé en 2020 par plusieurs établissements de l'enseignement supérieur avec le souhait de donner l'opportunité à nos étudiants de se rencontrer pour discuter de science et de recherche autour de problèmes d'actualité.

Les étudiants travailleront pendant plusieurs mois (PSC + MODAL **CHE_42M02_EP** sur des problèmes ouverts de chimie auxquels il faut trouver des solutions expérimentales concrètes. Ensuite, au mois de mars, des rencontres ont lieu entre les différentes équipes pour discuter des solutions proposées par le biais de joutes oratoires.

Cet exercice permet d'acquérir plusieurs compétences qui sont nécessaires après pour intégrer le monde professionnel : comment mener un projet dans un temps défini, travailler en groupe, savoir communiquer, être critique et accepter la critique des autres… C'est aussi un moment de convivialité et de partage de la science, très apprécié par les étudiants et aussi par les encadrants et les membres du jury.

Plus d'informations sur le site web du Tournoi :
www.tfchim.fr/





MODAL D'ÉCONOMIE

			CODE	PÉRIODE			Numerus clausus
				P1	P2	P3	
				41M	42M	43M	
	A	Research Project on Economic Behavior: Designing experiments to inform economic theory	ECO_42M01_EP		2		12
	B	Macroeconomic Policy Lab	ECO_42M02_EP		2		12
	A	Economic Analysis of the US Endangered Species Program	ECO_43M01_EP			3	12

MODAL

RESEARCH PROJECT ON ECONOMIC BEHAVIOR: DESIGNING EXPERIMENTS TO INFORM ECONOMIC THEORY

Yves Le Yaouanq
yves.le-yaouanq@polytechnique.edu

ECO_42M01_EP

Période 2

Laboratory experiments about human decision-making have gained increasing importance in economics. The list of phenomena uncovered by laboratory experiments includes, but is not limited to: bounded rationality (statistical fallacies, learning biases…), motivated beliefs (overconfidence, anticipatory utility…), reference-dependence, dynamic inconsistency… This project will focus on one particular behavioral bias, chosen as a function of students' interests. We will then review the theoretical and experimental literature on this specific phenomenon, and identify gaps in our knowledge. The project will culminate in an experiment designed and ran by the students to further advance our understanding of the relevance, importance and/or implications of the bias. The methodology will be based on a back-and-forth between microeconomic modeling (decision theory, game theory) and experimental economics.

Pre-requisites:
ECO_3X061_EP and **ECO_41031_EP**

References:

Falk A., & Heckman J. J. (2009). Lab experiments are a major source of knowledge in the social sciences. *science*, 326(5952), 535-538.

Levitt S. and J. A. List. (2007). Viewpoint: On the generalizability of lab behaviour to the field. *Canadian Journal of Economics* 40(2): 347-370.

Levitt S. and J. A. List. (2007). What do laboratory experiments measuring social preferences reveal about the real world. *Journal of Economic Perspectives* 21(2): 153-174.

Camerer C. (2011). The promise and success of lab-field generalizability in experimental economics: A critical reply to Levitt and List. *Working paper*.

MODAL MACROECONOMIC POLICY LAB

Giovanni Ricco
giovanni.ricco@polytechnique.edu

ECO_42M02_EP

Période 2

This applied macroeconomics lab course is designed for engineering students interested in the quantitative analysis of macroeconomic policies.

The aim is to bridge theoretical macroeconomic concepts with hands-on empirical research and empirical model-building. A strong emphasis is placed on the practical application of macroeconomic modelling and data analysis in a policy-relevant context.

Structure and Objectives

The course will begin with a series of introductory sessions covering core theoretical aspects of macroeconomic modelling, with a particular focus on fiscal sustainability or monetary policy analysis. Students will be introduced to key empirical methods used in applied macroeconomics.

Participants will then work in small groups on one of the two research projects outli-



ned below. The final deliverable will include both a technical report, a functioning code, and a presentation of findings.

Project Options

- **Fiscal Sustainability Simulator for European Countries**
  Students will contribute to the development of a macroeconomic simulator designed to assess fiscal sustainability across European countries. The simulator will incorporate both deterministic and stochastic modelling approaches.

  This project is developed in collaboration with the Observatoire Français des Conjonctures Économiques (OFCE), a leading independent economic research institute affiliated with the Fondation Nationale des Sciences Politiques (FNSP). The simulator is intended to support policy evaluation and fiscal scenario analysis in the European Union.

- **Identification of Monetary Policy Shocks**
  This project focuses on constructing a standardized dataset for the identification of monetary policy shocks across different economic areas.

  Students will compile high-frequency data on monetary policy announcements and measure market responses via asset price revisions. These revisions will be analysed using principal component techniques to summarize and explore their information content. The goal is to produce a standardised toolkit for the identification of monetary policy shocks for comparative analysis across countries.

Prerequisites
Basic knowledge of macroeconomics is recommended (**ECO3X061_EP**, and **ECO_42032_EP**). Programming experience (preferably in R or Python) is highly desirable.

MODAL
ECONOMIC ANALYSIS OF THE US ENDANGERED SPECIES PROGRAM

Agustin Perez-Barahona
agustinperezbarahona@gmail.com

ECO_43M01_EP

Période 3

Economic Analysis of the US Endangered Species Program

The Endangered Species Act (ESA) was signed on December 28, 1973 and provides for the conservation of species that are endangered or threatened throughout all or a significant portion of its range, and the conservation of the ecosystems on which they depend. The ESA replaced the Endangered Species Conservation Act of 1969; it has been amended several times. A "species" is considered endangered if it is in danger of extinction (throughout all or a significant portion of its range) and threatened if it is likely to become an endangered species within the foreseeable future. For each listed species the government is required to develop and fund a preservation plan that includes habitat restoration, species status surveys, public education and outreach, captive propagation and reintroduction, nesting surveys, genetic studies and development of management plans.



The purpose of this project is to analyze the allocation of funding across species and the success of this spending in terms of resulting in a delisting of the species. The tasks involved will entail background research on the ESA and its individual aspects in general and for specific species, gathering data on spending and listing/delisting of species. These data will be then be combined to statistically estimate the determinants of listing and the success of funding and program creation on delisting of species.





MODAL HUMANITÉS ET SCIENCES SOCIALES

Frédéric Brechenmacher
frederic.brechenmacher@polytechnique.edu

			CODE	PÉRIODE			Numerus clausus
				P1	P2	P3	
				41M	42M	43M	
	A	Sciences et sociétés : approches philosophiques, historiques et sociologiques sur les évolutions des sciences et des techniques	HSS_41M01_EP	1			25
			HSS_42M02_EP		2		25

HSS

Ce MODAL sera mené au LinX : Laboratoire interdiscipline de l'X : recherches en humanités et sciences sociales. Fondé en 2014, ce laboratoire analyse les relations entre sciences, technologies et sociétés en croisant les expertises de différents champs des sciences humaines et sociales.

Les interactions entre les sciences et les sociétés contemporaines relèvent plus souvent d'enjeux transversaux qu'elles ne font l'objet d'une discipline bien délimitée. Les débats très vifs que suscitent aujourd'hui l'innovation, l'éthique, le développement durable ou encore la démocratie témoignent bien des limites du modèle disciplinaire qui a structuré l'organisation des savoirs au XX^{e} siècle. Afin de relever le défi que lance la conception de nouvelles configurations des savoirs à la mesure de ces enjeux, le LinX favorise le décentrement de questionnements provenant de champs aussi différents que les sciences et technologies, la démocratie contemporaine, les mondes des représentations littéraires et de l'art, les relations internationales, le droit, etc.

Comment créations et innovations émergent-elles ?

Dans quels espaces et quelles temporalités circulent-elles ?

Il n'est pas rare que les pratiques scientifiques et technologiques engendrent des temps et des espaces culturels spécifiques. Ce constat appelle à analyser avec une profondeur historique les rythmes du présent, la manière dont interfèrent temps social, temps technologique et temps de l'expérience. Quels sont, par exemple, les liens entre les phénomènes d'« accélération » et de modernité, de la découverte du principe d'inertie à l'informatisation des outils de la finance ? Quels sont les problèmes politiques posés par cette condensation du temps ? Quelles sont les nouvelles physionomies du lien social dans un réel qui bouscule les représentations classiques des frontières, entre disciplines comme entre sciences et sociétés ?

L'objectif de cet enseignement de MODAL est de faire pratiquer aux élèves un travail de recherche bien délimité en lien avec les travaux en cours dans le laboratoire LinX. Il s'agira donc d'un travail inédit sur les relations entre sciences, techniques et sociétés ; les sujets proposés changeront chaque année.

En fonction du sujet choisi, les élèves seront amenés à pratiquer une véritable démarche de recherche en humanités et sciences sociales : constitution de sources empiriques ainsi que d'un corpus de publica-

tions de recherche sur la question, analyse de ce matériau pour proposer des résultats originaux et étayés, lien entre la littérature existante et ces résultats. Les élèves seront notamment amenés à s'approprier des problématiques d'une ou plusieurs disciplines telles que l'histoire, la philosophie et la sociologie.

Les élèves pourront travailler par binôme et seront guidés par un chercheur, un doctorant ou un post-doctorant du laboratoire.

Thématiques envisagées :

- Philosophie.
- Histoire des sciences et des techniques (XVIII^{e}-XXI^{e} siècles). Pour cette thématiques, les travaux pourront s'appuyer sur les très riches collections historiques de l'École polytechnique (manuscrits, ouvrages, périodiques, films, photographies, instruments anciens etc.).
- Histoire politique et culturelle.
- Sciences et arts (arts plastiques, cinéma etc.).
- Géopolitique et analyse de conflits.
- Sciences cognitives.
- Architecture, urbanisme et développement durable.
- Sociologie de l'énergie et du développement durable.
- Organisations et cultures.



MODAL D'INFORMATIQUE

Juan-Antonio Cordero-Fuertes
juan-antonio.cordero-fuertes@polytechnique.edu

		CODE	PÉRIODE			Numerus clausus
			P1	P2	P3	
			41M	42M	43M	
B	**B**ioinformatics	MDC_41M02_EP	1			10
C	**C**onnected Objects and the Internet of Things (IoT)	CSC_41M01_EP	1			24
J	Conception et développement d'un **J**eu vidéo	CSC_41M05_EP	1			18
S	Algorithms and Advanced Programming	CSC_41M02_EP	1			24
T	**T**ablettes et smartphones	CSC_41M03_EP	1			24
W	Applications **W**eb	CSC_42M03_EP		2		48
D	**D**istributed applications	CSC_42M01_EP		2		24
R	**R**obots et drones	CSC_42M02_EP		2		30
A	Introduction to Intensive Programming in C++	CSC_43M01_EP			3	24
G	Exploration et apprentissage sur les **G**raphes du Web	CSC_43M02_EP			3	18
V	Deep Learning in Computer **V**ision	CSC_43M04_EP			3	30
X	Cybersecurity – the hacking **X**perience	CSC_43M05_EP			3	48

De notre smartphone à un robot, en passant par des objets connectés et la bioinformatique; des images à la manipulation de graphes, le traitement et l'analyse des observations biologiques avec méthodes computationnelles, ou la maîtrise des réseaux; du web aux jeux vidéo, les applications modernes de l'informatique exigent des algorithmes efficaces et aussi des programmes bien adaptés.

Dans le cadre restreint du modal, vous devrez choisir un sujet particulier que vous approfondirez par la réalisation d'un projet de programmation, de préférence en binôme.

Dans tous les cas, les compétences que vous allez acquérir seront similaires: approche expérimentale dans la modélisation d'un problème issu du réel, acquisition de compléments théoriques, apprentissage de technologies complexes, rigueur et précision indispensables pour aboutir à une réalisation.

Votre choix se fera en deux étapes. Dans un premier temps, vous devez choisir une thématique. La définition précise d'un sujet, se fera ensuite lors des premières semaines du modal, en accord avec la thématique choisie et les exigences pédagogiques, après avoir pris la mesure de quelques problèmes intéressants et des difficultés auxquelles vous attendre.

L'offre de thématiques pour 2024-2025 est la suivante:

Période 1

MDC_41M02_EP – **B**ioinformatics
CSC_41M01_EP – **C**onnected Objects and the Internet of Things (IoT).
CSC_41M05_EP – Conception et développement d'un **J**eu vidéo
CSC_41M02_EP – Algorithms and Advanced Programming.
CSC_41M03_EP – **T**ablettes et smartphones.

Période 2

CSC_42M03_EP – Applications **W**eb.
CSC_42M01_EP – **D**istributed applications.
CSC_42M02_EP – **R**obots et Drones

Période 3

CSC_43M01_EP – Introduction to Intensive Programming in C++
CSC_43M02_EP – Exploration et apprentissage sur les **G**raphes du Web
CSC_43M04_EP – Deep Learning in Computer **V**ision.
CSC_43M05_EP – Cybersecurity – the hacking **X**perience.

Les pages qui suivent vous donneront un aperçu des sujets abordés dans chacune de ces thématiques. Faites attention, sauf en ce qui concerne la thématique Web qui est proposée aux périodes 1 et 2, toutes les autres thématiques ne sont proposées que sur une seule période.

Si vous hésitez encore, voici quelques bonnes raisons pour placer les thématiques du modal informatique en tête de vos choix :

- appliquer et consolider, dans un cadre expérimental, les connaissances acquises aux trimestres précédents,
- découvrir les richesses d'un domaine par simple curiosité intellectuelle ou pour mieux préparer votre projet de 3A et 4A,
- profiter d'un encadrement conséquent pour réaliser le projet de programmation qui est un prérequis pour le PA Informatique,
- traiter, peut être pour la première fois, un problème non scolaire,
- comprendre comment fonctionnent les outils que chacun croise tous les jours,
- préparer un projet de création de startup à court terme, les exemples existent.

MODAL
BIOINFORMATICS

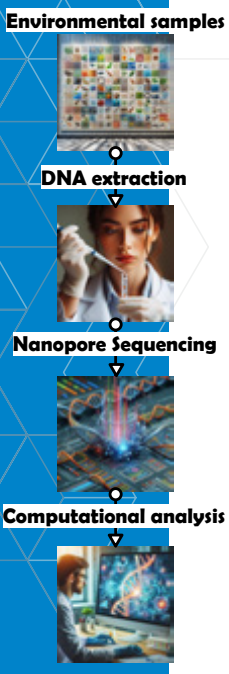
Sebastian Will (LIX)
Sébastien Ferreira-Cerca (BIOC)

Sarah Berkemer (LIX)
berkemer@lix.polytechnique.fr

MDC_41M02_EP

Période 1

Sequence your sample!
Analysis of your own environmental sample using Nanopore sequencing and bioinformatics methods.



Description

You will collect your own environmental sample and study the diversity of its microorganism population. For this purpose, you are going to apply Oxford Nanopore sequencing in the wet lab and then analyse the results with computational methods of Bioinformatics.

By DNA preparation and sequencing, you will gain "first-contact" wet lab experience. In the larger part of this modal, you will analyse the generated data in depth using state-of-the-art Bioinformatic tools e.g. genome assembly, gene prediction, analysis of species diversity, and comparison of data sets. Thus, this modal provides an all-in-one combination of molecular-biology experiments and computational analysis. It introduces you to practical work in modern molecular biological research as well as motivates the exploration of bioinformatics methods from concrete analysis demands.

After this modal you will be able to select and leverage current computational methods to analyse sequencing data. Hence, this course is designed for theoretically-inclined computer science students who want to get some insight into the applied side of bioinformatics and as well biologists who want to know about computational analysis.

Note that the course may be adapted to materials and wet lab availabilities.

Language: English

MODAL
CONNECTED OBJECTS AND THE INTERNET OF THINGS

Juan-Antonio Cordero-Fuertes
juan-antonio.cordero-fuertes@polytechnique.edu

Thomas Clausen
Thomas.Clausen@Polytechnique.edu

CSC_41M01_EP

Période 1

In the 21th century, a company developing a product (or, a polytechnique student, doing a PSC…) either:

- has a strategy for rendering the product (or, the PSC) somehow connected; or
- is as disconnected from reality, as was the guy installing the bike-rack on the picture to the left.



If you are, or want to be, in the first category, then this MODAL is for you – regardless of your previous experience.
Whether you are a novice, or a seasoned programmer, this tutorial-based MODAL will bring you to having developed a complete connected object (system), and in the process taught you things such as:

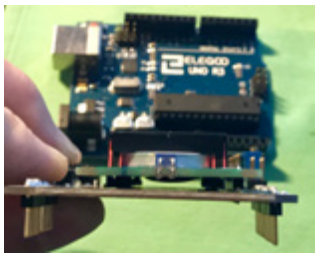
- How a micro controller works, and how to build intelligent objects with it?
- How to (efficiently) use WiFi, Bluetooth, Bluetooth/LE, IEEE 802.15.4, and other "IoT Interconnect" to connect your intelligent object to the Internet
- How to "communicate to the cloud" from your connected object – in passing, understand things such as CoAp, and REST.

A set of tutorials will be proposed through this MODAL, training you in the key, technologies – and, in the process guiding you through developing (with your buddy) connected object systems, such as:

- A connected, multi-site, weather station
- A home automation system
- A Twitter button
- …

You are highly encouraged to bring your own project ideas, which your instructors will work with you to fit in to the tutorials. For this reason, this MODAL is limited to 24 students.





MODAL

CONCEPTION ET DÉVELOPPEMENT D'UN JEU VIDÉO

Raphael Granier de Cassagnac
raphael@sciencexgames.fr

Damien Rohmer
damien.rohmer@polytechnique.edu

CSC_41M05_EP

Période 1

Objectif

Ce modal propose une initiation au domaine professionnel du jeu vidéo, et permet, en particulier, d'acquérir les notions fondamentales permettant la conception et de développement informatique d'un jeu vidéo en 2D et 3D. Les notions théoriques vues en cours seront mises en pratique par le biais de projets de développement encadrés d'un jeu vidéo complet.

Projets

Les jeux vidéo sont développés, par petits groupes d'étudiants, sur la plateforme Godot 4.4, un moteur open source similaire à Unity, dans un langage de programmation proche du Python.



Encadrement

Les interventions en cours sont réalisées par plusieurs professionnels expérimentés dans le développement du jeu vidéo, en fonction des thèmes des séances, et font intervenir, en fin de modal, une personalité marquante de l'industrie. Les travaux dirigés sont également encadrés par des professionels.



Thèmes abordés

game design ; moteur 2D/3D et programmation ; graphisme et son ; expérience et test utilisateur…

Prérequis : Programmation orientée objet (ex. **CSC_41011_EP** ou **CSC_3X071_EP**.

MODAL
ALGORITHMS AND ADVANCED PROGRAMMING

Jill-Jênn Vie
jill-jenn.vie@inria.fr

Hang Zhou
hzhou@ lix.polytechnique.fr

CSC_41M02_EP

Période 1

The International Collegiate Programming Contest (ICPC) is the most prominent international programming competition at university level. It has been around since 1977 and welcomes 70,000 students from all around the world every year.

The first chapter is Southwestern Europe Regional Contest (SWERC), organized this year in Lyon on November 21-23, 2025, where people compete in teams of 3 students. They must solve as many algorithmic problems as possible as fast as possible within 5 hours. The strongest teams will advance to the European Championship (EUC) then ICPC World Finals (WF).

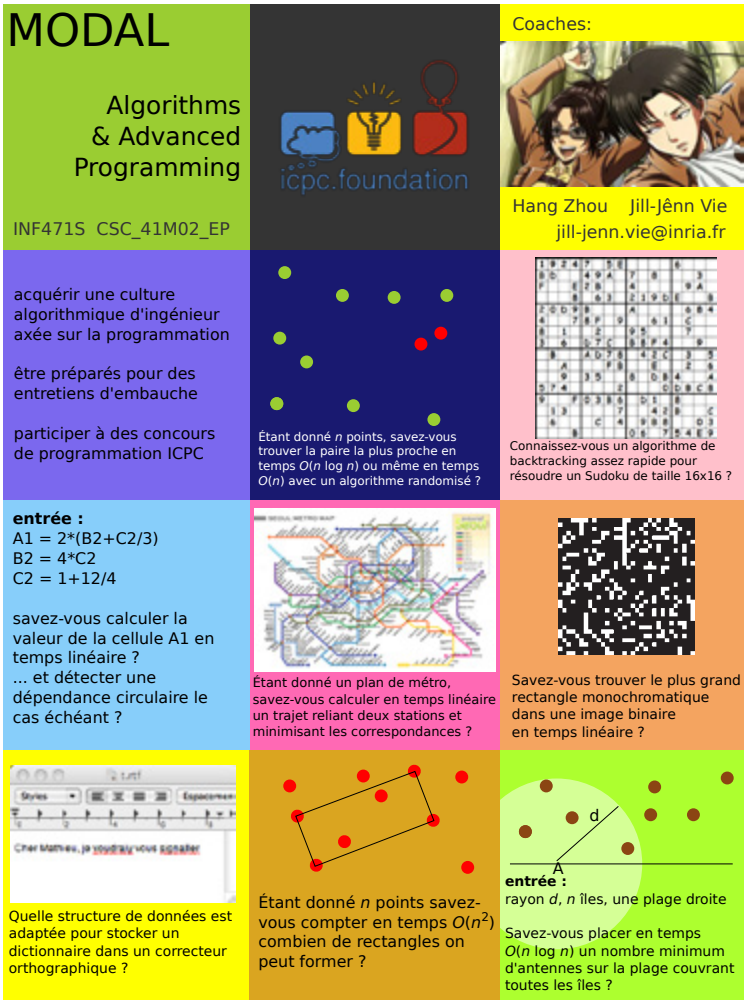
This course is tailored for motivated students who are already familiar with competitive programming and are eager to learn to solve challenging problems with world champions. As you may know, the level is really high already at Ecole polytechnique (#1 at SWERC in 2019; #3 #4 in 2023; #1 #3 in 2024): https://swerc.eu/2024/

The exam of this MODAL is a "XCPC" qualification contest for ICPC. Students will compete as teams of 3 (except one team if modulo is not zero). The best 2 or 3 teams will advance to SWERC, where they will compete against around 150 teams from ENS, ETH, UPC, EPFL, etc.



The curriculum covers a wide range of topics, including using VSCode efficiently, dynamic programming, segment trees, matching and flows, etc. We are focusing on C++ but it is okay to code in Python even though you may be frustrated at times that your solution is too slow.

To learn more, check https://tryalgo.org/icpc/polytechnique/ or contact jill-jenn.vie@inria.fr. Students having participated in International Olympiad in Informatics (IOI) or International Mathematical Olympiad (IMO) are especially encouraged to apply.



Courtoisie de Christoph Dürr. Toutes droites réservées. Envoyez des cœurs.

MODAL
TABLETTE ET SMARTPHONE

Pascal Vanier
pascal.vanier@unicaen.fr

CSC_41M03_EP

Période 1

Applications mobiles smartphone

Comment réaliser des applications pour mobile ?

L'émergence de nouvel les technologies nous permet de réaliser de telles applications comme une page Web. C'est ce concept que reprendra ce modal qui vous permettra de créer votre propre application.





Déroulement du Modal

Découverte en 5 séances des principaux concepts et mise en œuvre en TD.
Développement d'un projet en binôme sur les 4 dernières séances.
Attention, ce modal n'aborde pas les applications dites natives.

Idées de projet

Les projets sont libres de choix tout en respectant certaines contraintes liées au contenu. Géolocalisation, utilisation de l'appareil photo, du GPS, de l'accéléromètre, du carnet d'adresse toutes les fonctionnalités du téléphone sont accessibles.



MODAL WEB

Olivier Serre
olivier.serre@polytechnique.edu

CSC_42M03_EP

Période 2

En 2014, le nombre de sites Web dépassait le milliard alors qu'il n'en existait que 50 millions en 2004. De plus, ces sites proposent de plus en plus de services personnalisés suivant l'utilisateur: agrégateurs, espaces de travail partagé, sites communautaires ou encore blogs en sont des parfaits exemples. Cette nouvelle donne a vu se développer en parallèle des technologies adaptées pour le développement de tels sites ou devrait-on dire actuellement de telles applications.

Ce cours a pour objectif d'aborder d'un point de vue pratique et concret les problèmes liés au développement de ces applications. Les techniques abordées seront les suivantes: programmation objet en PHP, introduction aux bases de données à travers MySQL, sécurité des applications, cartes et géolocalisation, Javascript, Ajax…



Dans ce modal, les 4 premières séances sont consacrées à la construction de briques de base utilisées ensuite dans un projet développé en binôme sur un sujet qui vous tiens à cœur.

Le choix de celui-ci est libre et toutes les idées sont les bienvenues!

Rejoignez CSC_42M03_EP
en période 2
pour développer votre application web!













MODAL
DISTRIBUTED APPLICATIONS

Thomas Clausen
Thomas.Clausen@Polytechnique.edu

Kevin Jiokeng
kevin.jiokeng@polytechnique.edu

CSC_42M01_EP

Période 2

Virtually every time we interact with a computer program – on our computer, on our tablet, on our smartphones… on our SmartTVs, or our refrigerators… or, on our for some reason also connected toaster ovens – we're in reality interacting with a distributed application.

The device we hold in our hands for sending an email (or, into which we slide our sliced toast…) will, at the very least, communicate with a server, somewhere out there in "*the cloud*" – and, most often, communicate with a whole host of servers, and computers… and does so across this thing called "*The Internet*".

A corollary to this is, that every relevant modern application is a distributed application, which uses the Internet and the cloud – and, in a nutshell, the purpose of this MODAL is to teach you how to competently develop those applications.

Specifically, we will give a high-level view of "how the Internet works": what is routing, and DNS? What is TCP/UDP/IP? What's a proxy? A switch? A router? What is an IP address? And what's this thing called IPv6? With this baggage, we will work through a set of tutorials, introducing the (language) primitives for distributed systems developments – including interactions with (for example) web-servers, and with Twitter, as well as development of your own server applications… in fact, we will in one of those tutorials develop a on-line, multi-player, game.



We will offer these tutorials in C, as an example of (professional) programming language.





Once you've worked through the tutorials, you'll be teaming up with your best buddy, and together put what you've learned to good use: you'll work together on a project of your choosing – either, one defined by yourself, or one from among a catalogue proposed by your teachers. This may include topics such as collaborative software, multi-player games, a "social media aggregator" – or maybe even a network of annoying Twitter-bots, which will retweet and/or debunk the regurgitations of your favorite politicians… your imagination is (literally) the only limit…







MODAL
ROBOTS ET DRONES

David Filliat
david.filliat@ensta-paristech.fr

Eric Goubault
eric.goubault@polytechnique.edu

Sylvie Putot
sylvie.putot@polytechnique.edu

CSC_42M02_EP

Période 2



Crazyflie 2.0



F1tenth



Turtlebot

Les robots et les drones sont des objets académiques et industriels très actuels, amenés à de forts développements et recherches, de par leurs nombreuses applications, mais aussi par le développement de l'IA, très importante en robotique. L'objectif de ce modal est de donner une introduction théorique et pratique de la mise en oeuvre de ces systèmes complexes comportant des capteurs variés (lidars, caméras, accéléromètres, GPS, magnétomètre…), des actionneurs (plans de vol, roues, pattes…), contrôlés par de nombreux algorithmes permettant de relier les uns aux autres afin d'interpréter l'environnement, de le modéliser, et de planifier des déplacements.

Développer des logiciels pour ces systèmes est donc difficile et des approches permettant de s'abstraire d'un matériel spécifique ou de réutiliser des composants existants sont développées pour simplifier cette tâche. Le middleware ROS (« Robot Operating System »), que nous utiliserons tout au long de ce module, constitue une de ces abstractions. Les algorithmes et leurs preuves de bon fonctionnement, en présence des nombreuses incertitudes dues aux capteurs et aux actionneurs sont aussi un enjeu majeur.

Dans ce modal, nous traiterons des aspects suivants:

- La programmation en python (ou C++) utilisant ROS (« Robot Operating System ») avec une mise en pratique variée. Nous disposons à cet effet au LIX de drones terrestres Turtlebot 3 (Burger et Waffle), Turtlebot 4, F1tenth, et de drones aériens avec systèmes de localisation indoor crazyflies, dans une salle dédiée,
- La simulation de systèmes robotiques sous ROS/gazebo,
- Des algorithmes classiques de contrôle (PID), cartographie et localisation (filtre particulaire, SLAM, etc.) planification et suivi de trajectoire avec une mise en pratique très poussée pour amener à effectuer des courses de voitures autonomes F1 à l'échelle 1/10e (F1tenth). Les F1tenth sont une plateforme utilisée internationalement, avec des tutoriels disponibles et des compétitions internationales régulières (https://roboracer.ai/)

Des extensions possibles à la validation de programmes de contrôle, à des méthodes d'IA etc. Le modal est organisé avec 4 cours de 2h et le reste, de programmation, simulation et expérimentation pratiques.

MODAL
INTRODUCTION TO INTENSIVE PROGRAMMING IN C++

Elias Tsigaridas
elias.tsigaridas@inria.fr

Gleb Pogudin
gleb.pogudin@polytechnique.edu

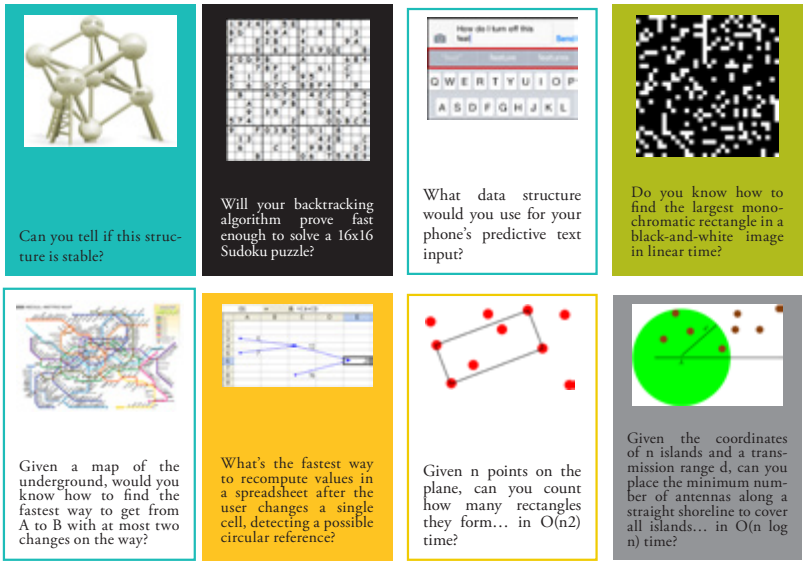
CSC_43M01_EP

Période 3

The primary goal of the MODAL is to present a variety of tools and methods to design algorithms for various problems and to demonstrate programming techniques for their efficient implementation. We focus on problems commonly appearing in programming contests and in technical job interviews. The course covers, among others, algorithms for arithmetic operations, greedy algorithms, dynamic programming, (basic) graph algorithms, (exhaustive) search, and string manipulation.

We focus on the C++ language, no prior knowledge is assumed. The secondary goal of the MODAL is the mastering of some of the fundamental aspects of the language. The MODAL terminates with some programming exercises and possible a programming project.

Prerequisites:
CSC_41011_EP or **CSC_42021_EP**



MODAL

EXPLORATION ET APPRENTISSAGE SUR LES GRAPHES DU WEB

Oana Balalau
oana.balalau@polytechnique.edu

CSC_43M02_EP

Période 3

De nos jours, nous avons accès à de vastes ensembles de données, dont beaucoup sont créés et publiés par les gouvernements. Par exemple, ici en France, nous avons le portail data.gouv.fr.

Nous étudierons différentes manières de représenter ces jeux de données, et notamment le pouvoir expressif des graphes. Ces ensembles de données offrent un excellent aperçu de nos sociétés et peuvent aider à repérer les tendances sociales ou les problèmes sociaux.

Au cours des années précédentes, les étudiants ont étudié les tendances de vote des lois au Parlement européen, les tendances dans la collaboration entre les pays, la manière dont le changement climatique est discuté sur les réseaux sociaux, et bien d'autres sujets intéressants!

Au cours de ce modal, vous vous familiariserez avec les notions et les outils d'exploration des données. Nous discuterons d'articles de recherche qui utilisent des méthodes informatiques pour découvrir des problèmes sociaux.

Ce cours présente également les différentes étapes importantes qu'un ingénieur en science des données doit connaître pour extraire des connaissances à partir de grands volumes de données.

Ce que vous apprendrez :

1. Comment représenter les données : le pouvoir expressif des différentes représentations
2. Réseaux sociaux : notions avancées sur la détection de communauté
3. Correspondance des entités entre differentes ensembles de données
4. Traitement du langage naturel pour extraire et classer des informations à partir de sources textuelles
5. Une introduction aux statistiques dans la recherche sociale

Les cinq premières séances sont consacrées à la présentation de concepts et d'outils, tandis que dans les séances suivantes, vous réaliserez des projets en binôme avec l'aide du tuteur. Vous aurez toute liberté pour choisir le sujet de votre projet.

Prérequis: Python

Langue: Le matériel est en anglais, mais le cours peut être en anglais ou en français, selon les étudiants.



data.gouv.fr

NetworkX
Network Analysis in Python

spaCy

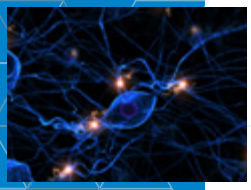
MODAL
DEEP LEARNING IN COMPUTER VISION

Vicky Kalogeiton
vicky.kalogeiton@polytechnique.edu

Pascal Vanier
pascal.vanier@unicaen.fr

CSC_43M04_EP

Période 3



Ce modal a pour le but d'introduire les élèves aux méthodes récentes pour l'analyse et le traitement des images, basées sur avec les réseaux de neurones artificiels et plus particulièrement les réseaux neuronaux convolutifs (Convolutional Neural Networks, ou des CNNs). Ces méthodes ont vu une croissance extraordinaire au cours des dernières années et ont contribué largement à des avancés dans la résolution des problèmes aussi diverses que : classification, segmentation et comparaison des images, détection et reconnaissance des objets et des personnes (par ex. visages), analyse des vidéos, détection des anomalies, super-résolution et analyse de style dans les images, parmi d'innombrables autres.

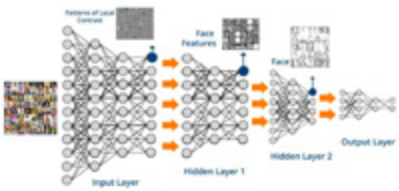
Le modal va introduire les concepts principaux utilisés dans ces méthodes, et se concentrer sur les aspects pratiques de leur mis en œuvre, y compris :

1. Le choix de l'architecture pour les CNNs
2. Les aspects d'entrainement tel que le back-propagation et stochastic gradient descent.
3. L'entrainement des CNNs sur les cartes graphiques
4. L'exploitation efficace des modèles entrainés.



Le but final est d'élaborer un projet dans un groupe de 2-3 élèves, dans lequel les connaissances acquises pendant les cours et les TDs seront utilisées pour résoudre un problème pratique à moyenne ou grande échelle. Les idées des projets possibles sont : colorisation automatique des images, reconnaissance des émotions dans les photos, motion tracking dans les vidéos, etc.

Note : La plupart des cours (amphis) seront en anglais.





MODAL
CYBERSECURITY
THE HACKER EXPERIENCE

~~Thomas Clausen~~
anonymous@master-acn.fr

~~Kevin Jiokeng~~
kevin.jiokeng@polytechnique.edu

CSC_43M05_EP



Période 3

As anybody, familiar with 1970s sitcoms would know, Mel, the cook on Alice used to say: "the best defense is a good offense".



In cybersecurity, this translates into the realization that the best network/systems/security administrator is someone, who's (i) well versed as a hacker and (ii) has somehow managed to stay out of jail.

This MODAL will initiate you to the first: exercising your skills as a hacker.

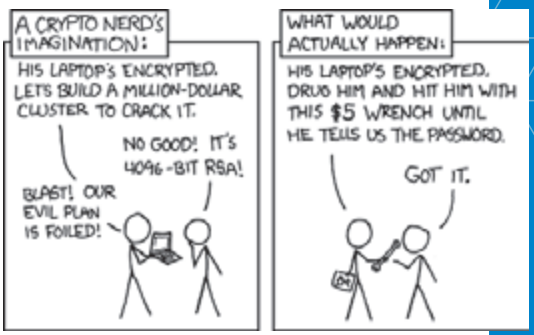
This tutorial-based, and very hands-on, MODAL is individualized, able to accommodate you regardless of your previous experiences: whether you are a novice, a seasoned programmer, or Chief Resident Hacker from the BR, this MODAL will be for you.

In this MODAL, each student will, with help from the teaching team, select tutorials that "fits" her or his level of experience, and will, in working through them, **attack real, professional-grade IT Systems**.

From among the attacks that can be studied and exercised in this MODAL are:

- DNS Hi-jacking
- DNS Cache Poisoning
- TCP Connection hi-jacking and redirection
- SQL Injection Attacks
- Infrastructure Degradation ("How to transform a switch")
- DHCP Deformation
- …







MODAL MANAGEMENT DE L'INNOVATION ET ENTREPRENEURIAT

Florence Charue-Duboc
florence.duboc@polytechnique.edu

			CODE	PÉRIODE			Numerus clausus
				P1	P2	P3	
				41M	42M	43M	
	A	Analyse de phénomènes de management	IME_43M01_EP			3	14

IME_43M01_EP

Période 3

L'objectif est de vous faire découvrir la recherche en gestion en vous faisant pratiquer un mini-travail de recherche dans ce domaine.

Vous travaillerez en binôme avec un autre étudiant et serez guidés par un doctorant, un post-doctorant ou un enseignant-chercheur du laboratoire, expert du sujet. Vous serez amenés à recueillir et manipuler des données sur un phénomène de management et à proposer des interprétations et des résultats en lien avec la problématique approfondie et les lectures proposées. Ainsi, vous serez confrontés à des questions typiques d'un travail de recherche : *Comment constituer un matériau empirique ? Comment analyser ce matériau pour proposer des résultats originaux et étayés ? Comment lier la littérature existante et les résultats obtenus ?*

Ce MODAL est mené au Centre de Recherche en Gestion (i3-CRG) de l'X, équipe de l'Institut Interdisciplinaire de l'Innovation (unité mixte de recherche CNRS), qui étudie des problématiques de management dans différents contextes et secteurs.

Les sujets proposés sont liés à des recherches en cours et peuvent aussi bien porter sur des entreprises privées (grandes entreprises ou start-ups) que sur des organismes publics ou associatifs. Ils changent tous les ans!

Plusieurs des sujets proposés seront en relation avec le développement durable, ce MODAL peut donc participer à la validation du certificat développement durable

Des thèmes variés de management et de stratégie sont abordés, comme:

- Les stratégies de management de la R & D et de l'innovation: nouveaux business models, développement international, enjeux environnementaux…
- Transition écologique, management des catastrophes naturelles et gestion des risques…
- Le management des industries créatives: jeux vidéo, art du vivant, parfum, haute cuisine & foodtech…
- Les nouvelles façons de travailler et de consommer: économie collaborative, développement durable, innovation ouverte, intrapreneuriat, entreprise libérée, espace de coworking, fab lab…

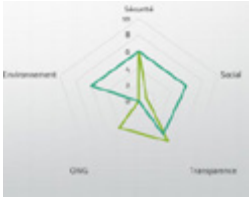
Et ils se situent à différents niveaux:

- au niveau individuel: consommateur,
- au niveau d'une équipe: dans un service/département donné de l'entreprise, ou autour d'un projet par exemple;
- au niveau d'une entreprise: étude de ses stratégies d'alliances par exemple;
- coordination intra-organisationnelle: entre différents départements ou branches de l'entreprise (ex: ingénierie-marketing, implantation en Europe & en Asie);
- coordination inter-organisationnelle: la réglementation sur les émissions CO_2 ou la régulation sur le marché de l'énergie par exemple.

A titre illustratif, vous trouverez ci-dessous quelques sujets approfondis les années passées:

Comparaison des stratégies des entreprises du secteur pétrolier en réponse aux enjeux du développement durable





Utilisation du logiciel d'analyse textuelle R-TeMiS pour analyser le discours de 5 firmes pétrolières entre 2002 et 2012 via leurs rapports annuels de développement durable

Coopétition dans les transports aérien et ferroviaire



Comment manager ces nouvelles stratégies entre coopération et concurrence?

Le renouveau de la natation française

(Comment) la Fédération Française de Natation est-elle parvenue à créer les conditions d'un progrès permanent et d'un renouvellement spontané? La réussite de la natation française est-elle le fruit d'une somme d'individualités exceptionnelles ou d'une émulation collective?



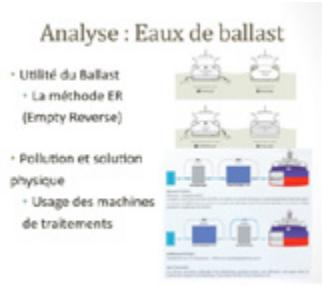
Impact de l'espace sur les entrepreneurs et leurs activités





Coworking, fab labs, hacker spaces, accélérateurs… Pourquoi de plus en plus d'entrepreneurs choisissent-ils de s'installer dans ces nouveaux espaces de travail collaboratif. Qu'en retirent-ils?

La pollution des océans: un problème de gestion



Que sait-on des effets du bruit marin d'origine anthropique sur la faune, depuis les baleines jusqu'aux calamars géants en passant par les ***poissons et autres animaux marins?***



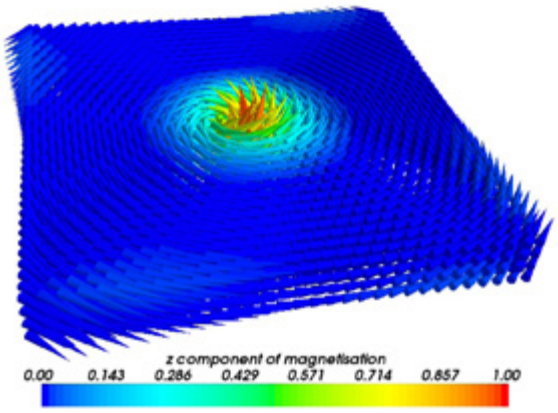
MODAL MATHÉMATIQUES

Omid Amini
omid.amini@polytechnique.edu

Romain Tessera
romain.tessera@imj-prg.fr

DÉPARTEMENT		THÈMES	CODE	PÉRIODE			Numerus clausus
				P1	P2	P3	
				41M	42M	43M	
	A	Combinatoire et géométrie	FMA_41M01_EP	1			25
	B	Algèbre et géométrie	FMA_42M01_EP		2		20

FMA_41M01_EP – FMA_42M01_EP



L'objectif du Modal de mathématiques est d'initier les élèves à certains thèmes des mathématiques contemporaines (algèbre & géométrie, analyse & géométrie) sur la base d'une méthodologie collaborative. C'est une démarche similaire à celle employée par la plupart des mathématiciens professionnels pour faire avancer leurs recherches et acquérir de nouvelles connaissances.

Dans chacun des sujets qui seront proposés, l'enseignant présentera tout d'abord le problème posé et les bases du domaine considéré. Avec l'aide de l'enseignant, les élèves devront ensuite approfondir ces connaissances via des recherches personnelles, et les exposer au reste du groupe.

Si le problème s'y prête, les élèves seront également invités à réaliser des simulations informatiques. Ce sera l'occasion d'illustrer de manière originale le contenu des autres cours de mathématiques.

Voici à titre indicatif une liste de sujets qui ont été proposés les années précédentes :

Algèbre & géométrie

- Le théorème d'uniformisation de Koebe-Poincaré (Charles Favre),
- Nœuds aléatoires (Julien Marché),
- Empilements appoloniens, groupes discrets et pavages (Gilles Courtois),
- Groupes Kleiniens : autour du livre Indra's Pearls (Romain Dujardin),
- La surface de Klein et les formes modulaires (Charles Favre),
- Courbes algébriques réelles (Erwan Brugallé),
- Théorie des nœuds (Erwan Brugallé).
- Combinatoire et géométrie (Omid Amini).
- Mélanges de cartes et représentations des groupes symétriques (Romain Tessera)
- Log-concavité en combinatoire à l'interface entre la géométrie, l'algèbre et les probabilités (Omid Amini)
- Spectre du laplacien, formules des traces et géométrie (Omid Amini)

Analyse & géométrie

- Équations de Navier-Stokes et fluides tournants (Daniel Han-Kwan),
- Equations aux dérivées partielles elliptiques (Philippe Gravejat)

Théorie des nombres

- Petits écarts entre nombres premiers (Javier Fresan)

Nous donnons ci-dessous une description plus approfondie des sujets mis en place cette année. Ces sujets sont susceptibles d'être modifiés d'une année sur l'autre. Nous renvoyons au site du département de mathématiques pour de plus amples détails sur le programme de l'année en cours.

MODAL
COMBINATOIRE ET GÉOMÉTRIE THÉORIE DE HODGE ET GÉOMÉTRIES EXOTIQUES

Omid Amini
omid.amini@polytechnique.edu

FMA_41M01_EP

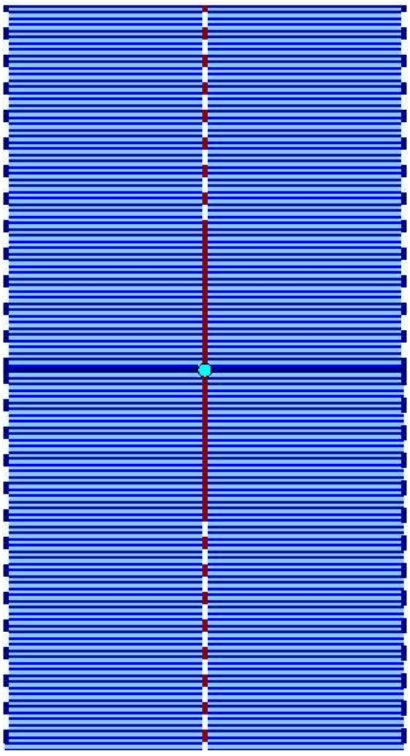
Période 1

Depuis Poincaré, on étudie les propriétés mathématiques des espaces topologiques en leur associant des invariants algébriques.

Quand l'espace topologique est muni d'une métrique convenable, il est possible d'utiliser l'analyse pour représenter ces invariants algébriques par des solutions d'une équation de Laplace sur l'espace géométrique considéré, c'est l'objet d'une théorie mathématique qui porte le nom du mathématicien écossais William Hodge.

Que se passe-t-il quand la structure géométrique dégénère et l'espace devient singulier ? Question centrale avec de multiples liens avec la physique de par sa nature.

Le but de ce cours est d'explorer cette question de recherche en mettant en lumière l'émergence de nouvelles géométries et de leurs mathématiques intéressantes, qui mélangent plusieurs disciplines mathématiques, la combinatoire, l'algèbre, la géométrie, la topologie et l'analyse.



Un polydisque dans un espace vectoriel normé de rang supérieur

MODAL
ALGÈBRE & GÉOMÉTRIE
PAVAGES DU PLAN

Romain Tessera
romain.tessera@imj-prg.fr

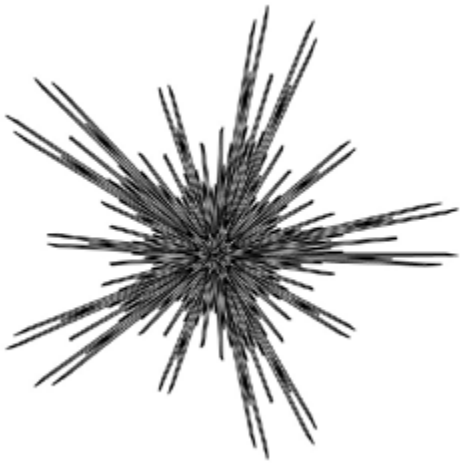
FMA_42M01_EP

Période 2

Dans ce modal, nous explorons la notion de pavages, et à travers elle celle de groupes et d'actions de groupes. Nous aborderons les résultats classiques de Bieberbach sur les pavages réguliers du plans, les fameux pavages apériodiques de Penrose, et les pavages affines du plan.

Références :

Pavage du plan, notes d'un mini cours donné à l'École polytechnique
http://www.math.polytechnique.fr/xups/xups01.01.pdf



Un pavage affine apériodique du plan par des pentagones réguliers



MODAL DE MATHÉMATIQUES APPLIQUÉES

DÉPARTEMENT		THÈMES	CODE	PÉRIODE			Numerus clausus
				P1	P2	P3	
				41M	42M	43M	
	A	Problem solving en mathématiques appliquées	APM_41M01_EP	1			25
	A	Modélisation mathématique par la démarche expérimentale	APM_42M01_EP		2		20
	B	Optimisation, Contrôle et Recherche Opérationnelle	APM_43M01_EP			3	12
	D	Simulation numérique aléatoire (SNA) autour des événements rares	APM_43M02_EP			3	30

MODAL
PROBLEM SOLVING

Lucas Gerin
lucas.gerin@polytechnique.edu

Teddy Pichard
teddy.pichard@polytechnique.edu

Nicole Spillane
nicole.spillane@cmap.polytechnique.fr

APM_41M01_EP

Période 1

L'objectif de ce Modal est d'apprendre à développer une approche expérimentale pour un large spectre de méthodes numériques en Mathématiques Appliquées à visée industrielle ou de recherche.

Ceci est tout à fait complémentaire des contenus théoriques des cours de 2A.

Nous allons typiquement nous poser ce genre de questions :

- comment illustrer ce résultat théorique de convergence ?
- quels sont les paramètres critiques pour ce problème d'optimisation ?
- que se passe-t-il pour n « petit » dans ce théorème ?
- pourquoi cet algorithme est-il inutilisable en pratique ?

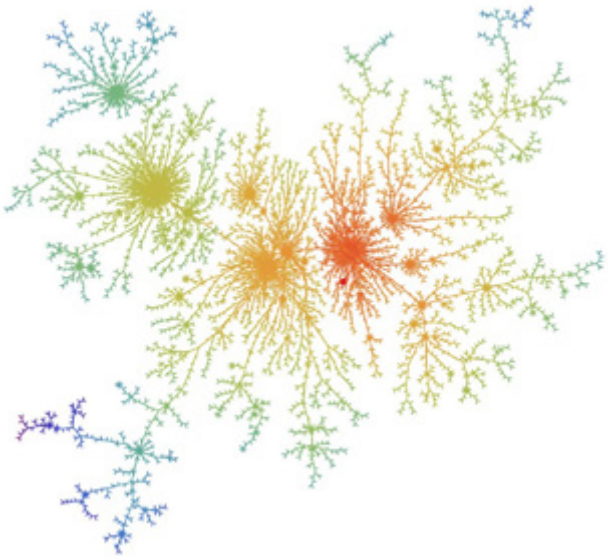
Le cours consistera en des séances indépendantes autour de thématiques diverses :

- Algorithmes randomisés
- Optimisation
- Discrétisation d'équations différentielles
- Algèbre linéaire numérique efficace
- Exploration markovienne pour des problèmes complexes
- Apprentissage par renforcement
- Détection de communautés
- …

Pour chacun de ces thèmes, un socle théorique minimal sera donné aux élèves afin de se lancer le plus vite possible dans l'implémentation et l'expérimentation numérique.

Les séances se feront intégralement sur machine (en python). Il est important de noter que l'emploi du temps du vendredi sera aménagé de façon à pouvoir suivre à la fois **APM_41M01_EP** et le cours de Statistiques **APM_41033_EP**.

Numerus clausus : 25



MODAL
MODÉLISATION MATHÉMATIQUE PAR LA DÉMARCHE EXPÉRIMENTALE

Beniamin Bogosel
beniamin.bogosel@polytechnique.edu

APM_42M01_EP

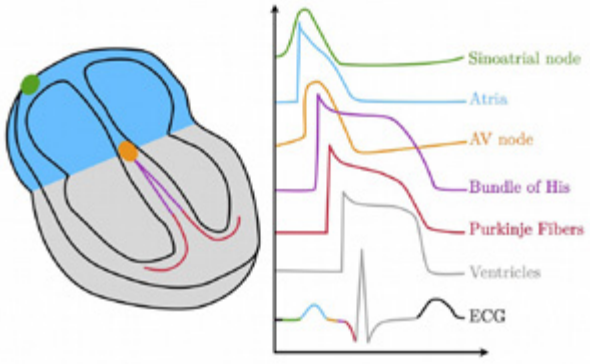
Période 2

Le but de ce module, qui ne requiert aucun prérequis, est de mettre en œuvre les outils mathématiques et des méthodes numériques pour modéliser divers phénomènes réels.
Les élèves, travaillant en binôme, devront mettre en place une démarche de résolution d'un problème complexe en utilisant des outils de mathématiques appliquées.

Voici quelques exemples de sujets proposés les années précédentes.

- **Des équations différentielles pour simuler l'activité électrique du cœur**

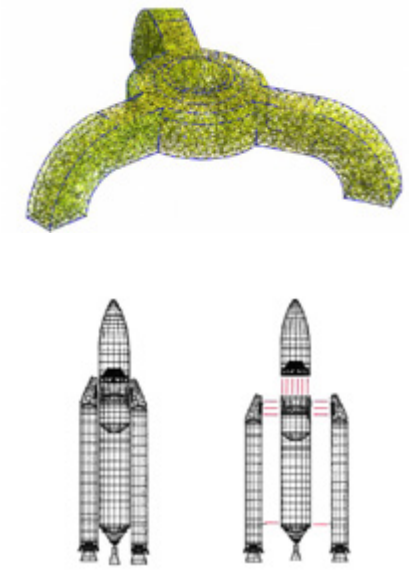
  La contraction cardiaque est provoquée par un potentiel électrique qui se propage dans le coeur. Ce potentiel, qu'on mesure avec l'électrocardiogramme, est créé par des courants ioniques à travers la membrane des cellules. Nous étudierons dans un premier temps la modélisation de ce phénomène biophysique à l'aide de systèmes d'équations différentielles ordinaires (EDO) non linéaires. Le projet sera l'occasion d'aborder des questions d'analyse qualitative des EDO et des méthodes numériques pour leur simulation. Dans un second temps, on pourra s'intéresser à une équation aux dérivées partielles (EDP), construite à partir du système d'EDO précédent, pour modéliser les phénomènes de propagation, et simuler par exemple des mécanismes à l'origine d'arythmies cardiaques. On confrontera les résultats des simulations numériques avec des résultats théoriques, et avec ce qui est attendu d'un point de vue physiologique.



Potentiel électrique en divers endroits du cœur et électrocardiogramme (ECG)

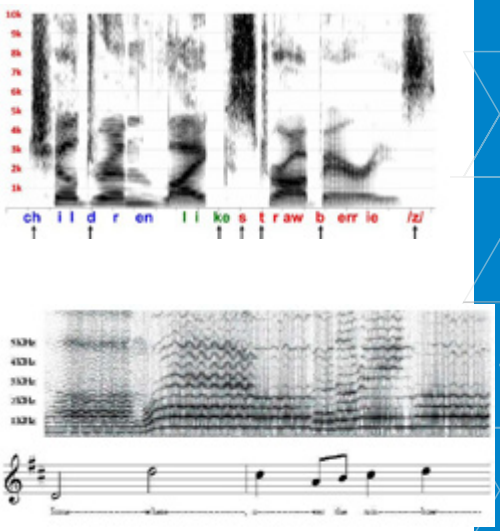
Algorithmes de calcul parallèles pour la simulation de structures élastiques

Pour simuler un objet réel il est devenu presque indispensable d'avoir recours au calcul parallèle. On parvient ainsi à augmenter le nombre maximal de degrés de liberté ou encore à accélérer un calcul donné. Ceci demande des algorithmes conçus sur mesure. Les méthodes de décomposition de domaine proposent de découper le domaine de simulation en sous-domaines afin d'effectuer les calculs les plus coûteux simultanément dans tous les sous-domaines. Des conditions de transmission sont alors nécessaires pour que la solution globale soit celle du problème initial.



Décomposition de domaine : géométries

L'objectif de ce projet est de se familiariser avec les problématiques du calcul haute performance et de les appliquer à des simulations en calcul des structures. Les parts respectives de programmation et d'étude théorique pourront s'adapter selon les préférences des étudiants.



Représentations temps-fréquence de signaux sonores

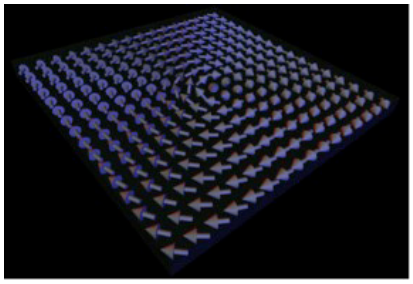
Arranger un enregistrement dans lequel un chanteur chante faux ou dans lequel un musicien prend de trop grandes libertés rythmiques, changer en temps réel la prosodie d'une voix parlée, synthétiser de nouveaux sons par transformations de sons

existants… Autant d'applications que nous vous proposons d'aborder dans ce projet.

Nombreuses transformations de signaux sonores se basent sur la technique dite de « phase vocoder ». Cette technique consiste à réaliser une décomposition tempsfréquence (généralement redondante) du signal sonore à l'aide de transformations de Fourier « localisées » en temps. Les modifications se font directement sur les coefficients de cette décomposition. Les difficultés résident alors essentiellement sur la construction de la décomposition la plus adaptée à un signal donné et la manière (non linéaire) d'intervenir sur les coefficients.

Description de la dynamique de l'aimantation dans les matériaux ferromagnétiques.

Les matériaux ferromagnétiques ont la particularité de posséder une aimantation spontanée. On s'en sert couramment en stockage magnétique dans les disques durs par exemple. Toutefois, l'évolution de l'aimantation suit l'équation de Landau-Lifschitz qui est une équation aux dérivées partielles non linéaire. La compréhension de cette dynamique est au cœur d'applications de haute technologie de stockage et nécessite des algorithmes numériques originaux de façon à préserver les invariants de cette équation. "



Simulation numérique d'un vortex magnétique.

Optimisation de la jonction entre deux fibres optiques.

Les fibres optiques sont utilisées dans de nombreux domaines, comme les télécommunications, les capteurs, l'imagerie, etc. Leur principe est de transmettre des informations par le biais de signaux lumineux qui se propagent dans leur cœur. Lorsque l'on cherche à joindre deux fibres optiques de diamètres différents, il faut prendre soin de concevoir la forme de la jonction de façon à éviter au maximum les artefacts qu'elle peut engendrer. Le but de cette étude a donc consisté à mettre au point une forme de jonction permettant de transmettre le maximum de l'énergie pour une longueur d'onde donnée, et donc de minimiser les réflexions parasites.

Prérequis : Aucun

MODAL
OPTIMISATION, CONTRÔLE ET RECHERCHE OPÉRATIONNELLE

Frédéric Meunier
frederic.meunier@enpc.fr

Eric Gourdin
eric.gourdin@ polytechnique.edu

APM_43M01_EP

Période 3

Dans ce Modal, on s'intéresse à des problèmes d'optimisation issus de contextes industriels (production, télécom…). Dans les différents sujets proposés, il faudra, soit analyser un article de la littérature, soit comprendre ou tenter d'étendre un résultat, soit encore proposer des modèles d'optimisation, des approches algorithmiques, et les tester, voire une combinaison de tout cela.

A titre d'illustration, les derniers sujets proposés sont les suivant:

Hiver 2024

Sujet 1

Frédéric Meunier

Étude de la gestion temps réel des « puzzle-based storage systems ». En logistique d'entrepôt, les systèmes de stockage « puzzle-based » permettent d'atteindre des densités de stockage bien supérieures aux systèmes traditionnels. Cependant, les opérations de stockage et de récupération sont plus complexes, et ressemblent à des problèmes à un « jeu de taquin ». Alors que la littérature s'est essentiellement intéressée à ces systèmes dans un contexte « hors-ligne », avec l'ensemble des requêtes supposées connues (voir par exemple Bukchin–Raviv 2022), dans la pratique, c'est plutôt le contexte temps réel qui est pertinent. L'objet de ce projet est de formaliser proprement le problème mathématique associé à la gestion temps réel de ces systèmes, de proposer des méthodes heuristiques pour le résoudre et d'utiliser la simulation à événements discrets pour les tester.

Sujet 2

Frédéric Meunier

Lignes de bus auto-coordonnées. En 2012, Bartholdi et Eisenstein (2012) ont proposé une façon très simple d'éviter les phénomènes d'agglutination sur une ligne de bus, façon qui consiste à simplement retarder un peu le départ des bus à un certain point de contrôle. Nulle grille horaire n'est requise. Les expérimentations et les simulations ont démontré l'efficacité de l'approche. L'objet du projet est d'étudier cette approche en généralisant le modèle considéré dans le travail original, à savoir celui d'une route circulaire, à un seul point de contrôle, et avec une demande uniforme.

Sujet 3

Eric Gourdin

Multiflots et multicoupes. Dans un graphe modélisant un réseau, chaque arête est munie de plusieurs « métriques », comme, en particulier une capacité représentant le débit maximum qui peut être écoulé sur cette arête. On dispose également d'un ensemble de couple de sources et de puits (s_k,t_k) (ou origine/destination) entre lesquelles du trafic doit être écoulé. Un problème très étudié consiste à évaluée la quantité maximale de trafic (dans un sens qu'il faudra préciser) qu'on peut écouler dans le graphe entre les sources et puits des différents couples. Le résultat varie en fonction de règles qu'on peut préciser sur la façon d'écouler le trafic, mais dans la plupart des cas, les problèmes associés peuvent se modéliser comme des problèmes d'optimisation en variables continues ou entières. Comme le fameux théorème max-flow/min-cut nous le suggère, il y a également, pour ces problèmes, un problème dual associé qui consiste à déterminer une coupe ou une multi-coupe dans le graphe de capacité minimale. Dans ce modal, on s'intéressera à certains de ces problèmes, qu'on cherchera à modéliser et à résoudre de la manière la plus efficace possible.

Sujet 4

Eric Gourdin

Simulation et optimisation du routage dans un réseau IP/MPLS. on s'intéresse au routage dans les réseaux Internet, que l'on cherchera, dans un premier temps à simuler, puis, dans un deuxième temps, à optimiser. Le réseau est modélisé par un graphe dont les liens (arêtes/arcs) sont munis de capacités. On dispose également d'un ensemble de demandes, chaque demande étant définie par un nœud source, un nœud destination et un volume de trafic à écouler. On suppose que le réseau utilise un protocole de routage basé sur les plus-court-chemins : une valeur de métrique administrative (supposée donnée) est associée à chaque lien et le trafic entre le nœud source et le nœud destination est écoulé sur les plus-court-chemins (au sens de ces métriques administratives). S'il y a plusieurs plus-court-chemin, le trafic est réparti sur les chemins conformément au protocole ECMP. La charge d'un lien est le ratio entre le trafic écoulé et la capacité. On mesure la « qualité » du routage en calculant la charge du lien le plus chargé. On s'intéressera à une évolution des protocoles de routage appelé « Segment Routing » où une demande peut être routée sur une suite de segments, le routage au sein de chaque segment étant lui-même régi par les plus-court-chemins.

MODAL

SIMULATION NUMÉRIQUE ALÉATOIRE (SNA) AUTOUR DES ÉVÈNEMENTS RARES

Random simulation and rare events

Gersende Fort
gersende.fort@polytechnique.edu

APM_43M02_EP

Période 3

Les modèles aléatoires sont devenus incontournables tant d'un point de vue théorique que pratique. Les applications concernent la physique, la biologie, la finance et les sciences de l'ingénieur. Après quelques séances sur les techniques de simulation aléatoire, nous approfondirons les méthodes pour l'analyse des évènements rares. Des projets de modélisation et simulation seront proposés, en lien par exemple avec la dynamique des populations, les risques en finance, la sureté aérienne, les risques naturels ou les réseaux sociaux. Les codes de simulation seront écrits en Python, une introduction à Python sera assurée au début du MODAL.

Introduction. Nowadays the random models are essential both from theoretical and practical points of view. Their applications concern physics, biology, finance and engineering sciences. After a few sessions on stochastic simulation techniques, we will deeper investigate the methods for the rare event analysis. A wide variety of modeling and simulation projects will be proposed, for instance regarding population dynamics, risks in finance, air safety, natural risks or social networks. The simulation codes will be written in Python, an introduction to Python will be given at the beginning of the MODAL.

Prérequis. Les élèves qui désirent suivre ce parcours doivent avoir suivi soit le module **APM_41033_EP** (Statistiques), soit le module **APM_42032_EP** (Modélisation de phénomènes aléatoires). Le nombre d'étudiants en SNA est limité à 30.

Prerequisite. Students wanting to pursue this line of study must also have taken either the course **APM_41033_EP** *(Statistics), either the course* **APM_42032_EP** *(Modeling random phenomena). The number of students in SNA is limited to 30.*

Evénement rare. Un évènement A est dit rare si sa probabilité est inférieure à 10^{-4}. Simuler efficacement un tel évènement est un vrai challenge de modélisation et de calcul :

- d'une part, les résultats sont très sensibles au modèle aléatoire choisi et à ses paramètres ;



- d'autre part, une simulation naïve ne conduit que très peu fréquemment à une réalisation intéressante : typiquement si $P(A) = 10^{-4}$, en moyenne 1 simulation sur 10000 réalise l'évènement A. Cela induit un grand gâchis de simulations et un temps calcul extrêmement long.

Pourtant, simuler un évènement rare est essentiel

- pour quantifier sa fréquence dans des systèmes complexes (épidémie, faillite économique, catastrophe…)
- pour calculer des statistiques lorsque A se produit (calculs conditionnellement à A),
- générer des réalisations typiques de A (pour analyser les circonstances ou la cascade d'évènements improbables ayant conduit à l'évènement rare).

C'est à la base d'outils d'aide à la décision pour mieux commander le système aléatoire et l'améliorer. Les applications sont nombreuses et importantes.



Objectif

Il s'agit :

1. d'étudier les méthodes de simulation et les différents modes de convergence sous-jacents (via les cours magistraux) ;
2. de se sensibiliser aux aspects numériques et développer un savoir-faire dans ce domaine (via les TPs) ;
3. d'approfondir ces techniques dans le cas de l'étude des évènements rares (via les projets).

Ci-après quelques exemples de projet.

1. Dynamique de population

La dynamique des populations étudie la répartition et le développement quantitatif de populations d'individus. Elle s'intéresse aux mécanismes d'auto-régulation des populations, au problème de l'extinction ou de croissance d'une population ou à l'existence d'un éventuel état stationnaire ou quasi-stationnaire.

Dans ce projet, pour simplifier nous considérons une seule population d'individus semblables, n'étant pas en compétition pour les ressources, sans interaction entre eux (pas de proie ni prédateur), sans processus de migration additionnel. Par la simulation, nous cherchons à analyser quels sont les facteurs qui influencent la survie de l'espèce ou son extinction, sa croissance…

2. Risques extrêmes en finance

Les produits dérivés sont des *produits financiers*, définis à partir d'un autre produit financier plus simple comme par exemple une action, un indice, une devise… Dans les années 1970, les marchés financiers se sont organisés pour échanger de tels produits, les banques endossant par exemple les risques de fluctuation des taux de change à la place d'entreprises internationales.

Depuis une quinzaine d'années, sous l'impulsion du Comité de Bâle, se développe une vision globale des risques au niveau bancaire, via par exemple la Value At Risk, indicateur de risque mesurant le seuil de *pertes potentielles* à un horizon donné et pour un quantile donné (typiquement 99 % à horizon 10 jours). Cet indicateur réglementaire est relié au montant de fonds propres à immobiliser en regard des risques endossés, pour faire face à des pertes a priori rares. Ce projet se concentre sur l'évaluation des pertes extrêmes sous l'angle fréquence, sévérité et scénario les engendrant.

3. Dimensionnement d'une mémoire tampon

Considérons l'émetteur d'un réseau de télécommunication fonctionnant de la façon suivante : des paquets (les messages) lui arrivent à des instant aléatoires, ils sont alors acheminés dans leur ordre d'arrivée. Le temps nécessaire à l'acheminement de chaque paquet est non négligeable. Il est donc possible qu'un paquet arrive sans pouvoir être traité tout de suite : avant d'être envoyés, les paquets sont alors stockés dans une mémoire, appelée mémoire tampon de l'émetteur. La *mémoire tampon* n'est pas de taille infinie, elle doit être dimensionnée de façon à ce que sa saturation soit très rare (sous peine de perte d'information). Ce projet étudie ces phénomènes de congestion.

4. Sûreté aérienne

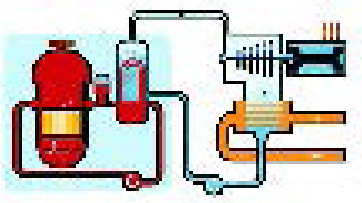
D'après le code de navigabilité international réglementant les avions civils à turbine, la probabilité d'une défaillance conduisant à une catastrophe doit être inférieure à 10^{-9} par heure de vol. Les défaillances peuvent être d'origine multiples et nous nous concentrons seulement sur la probabilité de collision entre plusieurs avions, que nous souhaitons être très faible pour atteindre un objectif de sécurité raisonnable en adéquation avec la règlementation.

Dans le projet, il s'agit d'orienter les avions sur des routes qui restent assez distantes les unes des autres, sous contrainte de temps de parcours. Néanmoins, les trajectoires des avions ne sont pas déterministes car elles sont soumises à des aléas météorologiques (vent), à des perturbations de pilotage, à des erreurs de mesure, qui hélas rendent la collision possible, mais heureusement rare.



5. Sûreté d'un réacteur nucléaire

Le milieu du xx^{e} siècle a marqué le début du développement du nucléaire aux États-Unis, en URSS, en France… En dehors des applications militaires, les applications civiles concernent surtout la production d'électricité via les centrales nucléaires, fonctionnant essentiellement sur le principe de fission.



D'après http://www.cea.fr/content/download/4687/27890/file/livret-reacteur.pdf

La catastrophe de Fukushima en 2011 a relancé le débat sur l'évaluation des risques extrêmes. Dans une centrale nucléaire, le danger le plus important provient d'un défaut de refroidissement du coeur du réacteur (avec pour conséquences un risque de fusion libérant les éléments très radioactifs). La prise en compte de tous les facteurs est complexe et nous étudions un modèle simplifié, cherchant à évaluer la capacité des barres de commande à absorber les neutrons (arrêt d'urgence de la réaction), dans un contexte où les réflecteurs entourant le coeur sont endommagés (fissure, dégradation des propriétés réfléchissantes).

6. Risque systémique

La crise financière que nous traversons depuis 2008 est un évènement d'une rare ampleur, lourd de conséquences. Elle est qualifiée de systémique car elle s'est manifestée à l'échelle du système bancaire mondiale. Le risque systémique est le risque d'effondrement d'un système suite à un choc sur certaines institutions financières qui entrainent par un effet domino la dégradation brutale ou la faillite de beaucoup d'autres.

Ce n'est que très récemment que les institutions financières se sont intéressées à la modélisation mathématique de ces épisodes de contagion par défaut où un choc économique causant des pertes initiales et le défaut de quelques institutions sont amplifiés en raison de liens financiers complexes et conduisent à des faillites à plus grande échelle. Ce projet étudie ces phénomènes de contagion dans des graphes modélisant les réseaux financiers.

7. Risques en assurance

L'assurance est un contrat de transfert de risques entre deux parties : l'assureur prend à son compte un risque (sinistres, dommages à la personne…) en échange d'une cotisation versée par l'assuré. Les sociétés d'assurance s'appuient sur un grand nombre d'assurés pour mutualiser les risques.

L'évaluation de la solvabilité d'une société d'assurance est une question cruciale et complexe, comme le montre le renflouement en 2008 du groupe américain AIG par la Réserve Fédérale Américaine. En Europe, la réforme réglementaire Solvabilité impose de mieux mesurer les expositions aux risques, en évaluant par exemple les probabilités d'insolvabilité et de ruine.



Dans ce projet, nous quantifions ces probabilités, dans un modèle simplifié où la compagnie d'assurance perçoit régulièrement des cotisations de ses clients, et les indemnise en cas de sinistres. Nous prenons en compte les différentes branches d'activité (santé, assurance habitation, assurance automobile…) et les dépendances entre elles. L'analyse est effectuée en fonction de la fréquence des sinistres et de leur sévérité.

8. Messages twitter

Twitter est une plateforme de microblogage, permettant d'envoyer rapidement de brefs messages (tweets) sur internet. Cette plateforme, très populaire, a atteint les 500 millions d'utilisateurs en février 2012. Certains messages forment des conversations, d'autres sont des messages décrivant un événement venant d'arriver dans le monde.

Le nombre très élevé d'utilisateurs de twitter en fait une source d'information en temps réel très intéressante.



La plupart des tweets sont envoyés suite à un événement observé dans le monde, sans lien avec d'autres tweets. A contrario, un

tweet peut générer des nouveaux tweets, car il contient une information suscitant beaucoup de réactions, on observe alors un phénomène d'« autoexcitation ». Dans ce projet, nous modélisons ce phénomène, en intégrant le fait qu'un tweet a un impact sur le flux qui diffère selon son contenu. Les effets de persistance, de désexcitation rapide, twitpocalypse, de lien entre tweets et « features » (mots ou combinaison) sont étudiés.

9. Barrages et risques d'inondation



Le risque d'inondation est classé premier risque naturel en France par le Ministère de l'Écologie et du Développement durable. Il concerne 13.300 communes, dont 300 grandes agglomérations, et 5-6 millions de personnes. Dans le mécanisme de contrôle des risques d'inondation, un rôle est joué par les bassins artificiels, qui ont une fonction de régulation des crues (en plus de la production d'énergie hydroélectrique).



En même temps, lorsqu'un bassin artificiel est alimenté par un volume d'eau trop important, pour éviter que le barrage qui le retient ne cède, on est obligé d'ouvrir les vannes d'évacuation de façon importante, ce qui entraîne un fort débit d'eau dans la vallée sous-jacente: ainsi un risque d'inondation est toujours présent. Ce projet a pour but de quantifier les risques d'inondation sur plusieurs vallées, avec en présence en amont de plusieurs lacs artificiels avec barrage, dont les remplissages sont dépendants.

10. Réaction chimique

La simulation aléatoire occupe un grand rôle en chimie (ou biochimie) où elle est couramment utilisée notamment pour explorer des conformations de moindre énergie (comme par exemple le repliement des protéines).

Ce projet s'intéresse à la modélisation au niveau microscopique du taux d'une réaction chimique, en particulier en étudiant les différents états d'une molécule en fonction de l'énergie potentielle de sa configuration.



Les transitions d'un état à l'autre traduisent la stabilité de la réaction, qui varie en fonction des conditions expérimentales : certains configurations rares sont à éviter (instabilité chimique). Ce projet permet de quantifier ces phénomènes par la simulation aléatoire.



MODAL DE MÉCANIQUE

Caroline Cohen
caroline.cohen@polytechnique.edu

DÉPARTEMENT		THÈMES	CODE	PÉRIODE			Numerus clausus
				P1	P2	P3	
				41M	42M	43M	
		Attention : on ne peut garantir à un élève l'inscription pour un thème précis. La répartition des élèves se fait en fonction de l'offre et de la demande. Les thèmes affichés sont des exemples des années précédentes.					
	A	« Aérodynamique » ou « Acoustique/vibrations » ou « Génie civil » ou « Ecoulements naturels/Géophysique » ou « Gouttes et bulles » ou « Biomécanique » ou « Ruine de structure » ou « Robotique » ou « Physique du Sport »	MEC_41M01_EP	1			40
	B	« Aérodynamique » ou « Acoustique/vibrations » ou « Génie civil » ou « Ecoulements naturels/Géophysique » ou « Gouttes et bulles » ou « Biomécanique » ou « Ruine de structure » ou « Robotique » ou « Physique du Sport »	MEC_42M01_EP		2		40
	C	« Aérodynamique » ou « Acoustique/vibrations » ou « Génie civil » ou « Ecoulements naturels/Géophysique » ou « Gouttes et bulles » ou « Biomécanique » ou « Ruine de structure » ou « Robotique » ou « Physique du Sport »	MEC_43M01_EP			3	40

Le MODAL de Mécanique est un enseignement expérimental par projet qui vise à faire découvrir aux étudiants une branche de la Mécanique (aérodynamique, acoustique, ruine de structure, robotique…). Les étudiants découvrent et appréhendent les concepts de base d'un domaine de la Mécanique au travers d'expériences concrètes tels que: la portance d'une aile, la résistance d'une poutre, la dynamique d'un front de brise, la propagation d'une fissure, une avalanche de grains, la déformation d'une cellule biologique… Les étudiants doivent ensuite réaliser un projet ou une étude spécifique sur un problème complexe de leur choix. Lors de cette phase de projet, ils apprennent à poser un problème, à confronter l'observation aux théories les plus simples, à raffiner ces dernières et préciser leurs conditions d'application et leurs limites. Quelques exemples des thèmes proposés et des projets d'élèves sont donnés dans les pages qui suivent.

Thèmes et planning

Trois sessions du MODAL de Mécanique ont lieu durant l'année. Tous les thèmes proposés ne sont pas ouverts à chaque session: cela dépend du nombre d'élèves inscrits.

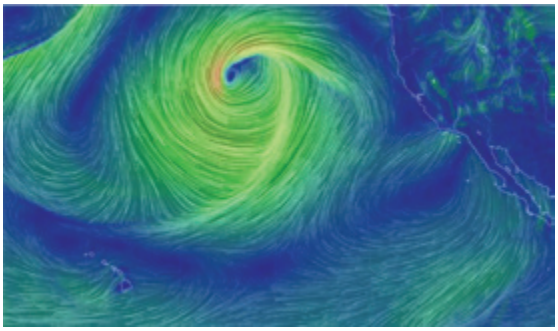
Le tableau en page précedente donne un exemple de répartition possible, inspirée des années précédentes (en grisé).

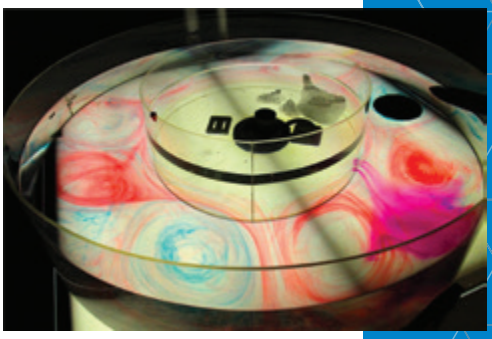
ÉCOULEMENTS NATURELS & GÉOPHYSIQUE

Bruno Deremble

Tempêtes dans une bassine

Exemple de projet: Mise à l'échelle de la dynamique atmosphérique, expériences sur une table tournante





ACOUSTIQUE & VIBRATIONS

Des sons aux vibrations

Exemple de projet: l'anti-vibrateur de la raquette de tennis



AÉRODYNAMIQUE & INTERACTIONS FLUIDE-STRUCTURE

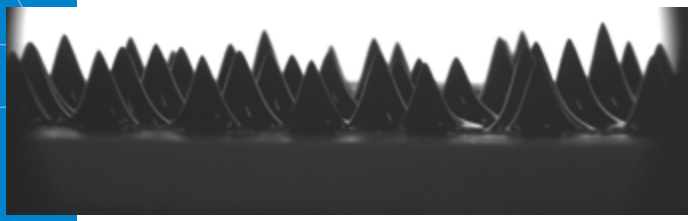
Benjamin Thiria

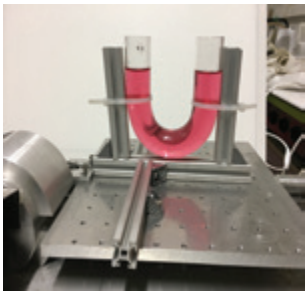


STRUCTURES ACTIVES

Des structures intelligentes?

Exemple de projet: comment se comporte un ferrofluide dans un champ magnétique? Peut-on récupérer de l'énergie en oscillant un ferrofluide aimanté?



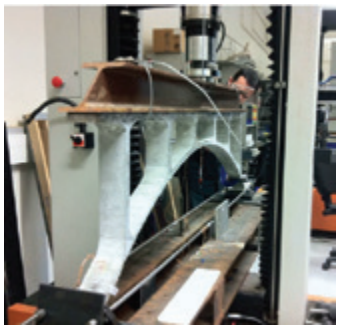


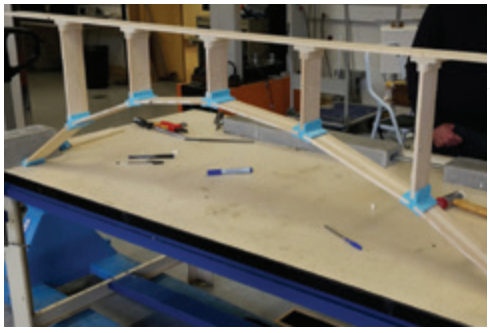
GÉNIE CIVIL

Anders Thorin

Comprendre le cheminement des forces

Exemples de projet : Réalisation d'une maquette de pont en béton, conception d'une arche.





RUINE DES STRUCTURES & MATÉRIAUX

Ruine des structures & matériaux

Exemple de projet : Étude de la fragmentation des glaçons plongés dans un liquide.

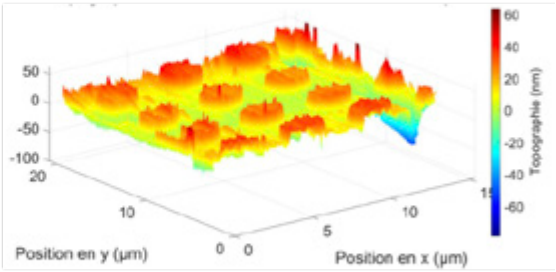




NANOMÉCANIQUE ET NANOFLUIDIQUE

Observer, manipuler, mesurer quand on ne peut plus voir…
Exemples de projet : Construction d'un microscope à force atomique, couplage transport d'ions/ transport de liquide et récupération d'énergie.

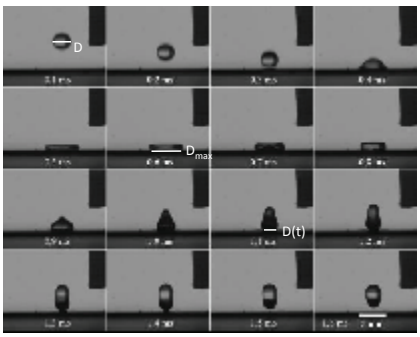




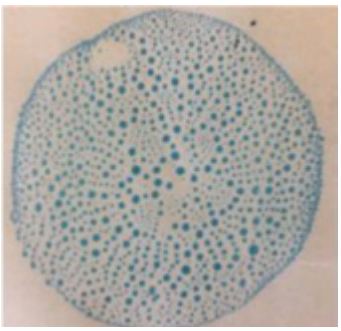
GOUTTES & BULLES

Gabriel Amselem

La dynamique des interfaces
Exemple de projet : rebonds d'une goutte, instabilité lors de l'étalement d'une goutte de mélange.



H = 6,1 cm, surface de suie, mélange eau (18%) glycérol (82%)



ROBOTIQUE

Florent Souvestre

Ramper sans (trop) frotter !

Exemple de projet : Conception, réalisation et optimisation d'un système poly-articulé pour avancer comme une chenille avec un minium d'énergie !

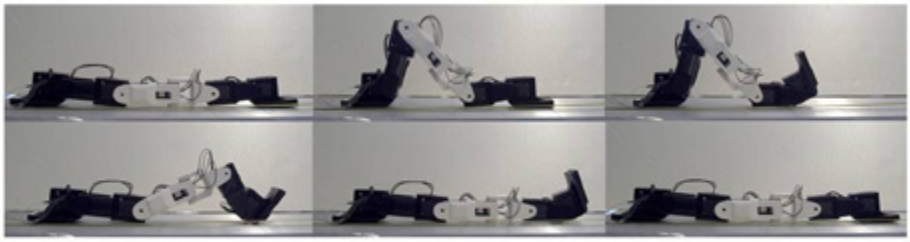
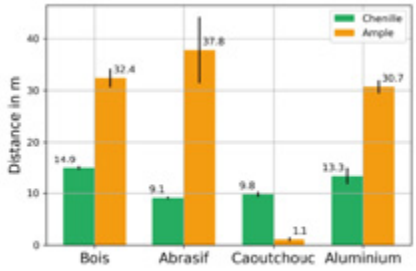


FIGURE 7 – *Décomposition du cycle du mode* chenille *sur le robot.*





'IGURE 13 – *Distance totale parcourue par le robot équipé avec des patins caoutchouc sur \ifférents sols et une énergie totale de 9Wh.*



MODAL DE PHYSIQUE

Gaël Grissonnanche
gael.grissonnanche@polytechnique.edu

Alexandre Zabi
alexandre.zabi@polytechnique.edu

Guilhem Gallot
guilhem.gallot@polytechnique.edu

DÉPARTEMENT		THÈMES	CODE	PÉRIODE			Numerus clausus
				P1	P2	P3	
				41M	42M	43M	
PHYSIQUE		Attention : On ne peut garantir à un élève l'inscription pour un thème précis. La répartition des élèves se fait en fonction de l'offre et de la demande.					
Physique							
	PHY_4XM01_EP – 24 élèves maximum sur l'année 2025-2026						
	A	Physique des plasmas et des particules élémentaires	PHY_42M01_EP		2		6
			PHY_43M01_EP			3	18
	PHY_4XM02_EP – 18 élèves maximum sur l'année 2025-2026						
	B	Physique des lasers et applications	PHY_42M02_EP		2		12
			PHY_43M02_EP			3	14
	PHY_4XM03_EP – 34 élèves maximum sur l'année 2025-2026						
	C	Physique de la matière condensée	PHY_42M03_EP		2		16
			PHY_43M03_EP			3	18
Electronique							
	O	Électronique pour l'Imagerie Atomique	PHY_43M04_EP			3	8
	P	IOT & Robot mobile autonome	PHY_43M05_EP			3	10
	R	Circuits logiques programmables (FPGA) et traitement du signal	PHY_43M06_EP			3	8

MODAL
PHYSIQUE DES PLASMAS ET DES PARTICULES ÉLÉMENTAIRES

PHY_42M01_EP, PHY_43M01_EP

Les trois états les plus connus de la matière sont l'état solide, l'état liquide et l'état gazeux. Il y en a cependant un quatrième qui n'en est pas moins important : le plasma. La plupart de la matière dans l'univers se présente sous forme de plasma. On obtient un plasma lorsque les électrons se dissocient des noyaux atomiques comme cela est le cas au sein des étoiles (exemple d'un plasma dense) ou dans le vent solaire dans l'espace interplanétaire (exemple d'un plasma dilué). La longue portée de l'interaction coulombienne confère à ces milieux des propriétés originales.

De son côté, la physique des particules (ou subatomique, corpusculaire, des hautes énergies suivant les époques) a pour but de dégager une vision unifiée de l'ensemble des forces de la nature : électromagnétique, nucléaire faible, nucléaire forte et ultimement gravitation.

Le MODAL « Physique des plasmas et des particules élémentaires » donne la possibilité de se familiariser avec ces deux domaines de la physique. Trois Options (regroupant entre 4 et 8 élèves) sont proposées :

(a) l'Option « **Plasmas créés par laser** » où les élèves créent un plasma sur une cible solide ou gazeuse à l'aide d'un laser et, grâce à différentes techniques optiques, étudient son évolution et ses caractéristiques ;

(b) l'Option « **Spectroscopie de plasmas froids** » où les élèves étudient et interprètent la lumière émise par un plasma créé par une décharge électrique en termes des transitions atomiques ou moléculaires ;

(c) l'Option « **Interactions fondamentales** » qui regroupe quatre expériences, toutes dédiées à l'étude des particules élémentaires :
- l'expérience « *Diffusion Compton* » où les élèves étudient la diffusion d'un photon de haute énergie sur un électron ;
- l'expérience « *Annihilation matière-antimatière* » où les élèves étudient l'annihilation des positrons avec des électrons, en vue de son exploitation par l'imagerie médicale ;
- l'expérience « *Imagerie Béta* » où les élèves étudient les mécanismes de diffusion et d'absorption des rayonnements Béta à l'aide des cartes 2D de la radioactivité Béta dans un échantillon ;

– l'expérience « *Étude de rayonnement cosmique* » où les élèves étudient les muons d'origine cosmique et mettent en évidence des effets relativistes.

Seulement une Option peut être suivie dans une période donnée. Les descriptions détaillées des trois Options de ce MODAL peuvent être consultées sur les pages suivantes.

Informations valables pour toutes les trois MODAL de Physique (PHY47xA & PHY47xB & PHY47xC (x = 2, 3) :

Tous les trois MODAL de Physique (« Physique des plasmas et des particules élémentaires », « Physique des lasers et applications » et « Physique de la matière condensée ») seront ouverts en P2 et P3. Cependant, toutes les Options des ces trois MODAL ne seront pas forcement proposées à chaque période. La répartition des Options sur les trois périodes dépendra du nombre d'élèves inscrits, des préférences des élèves inscrits et des disponibilités des enseignants.

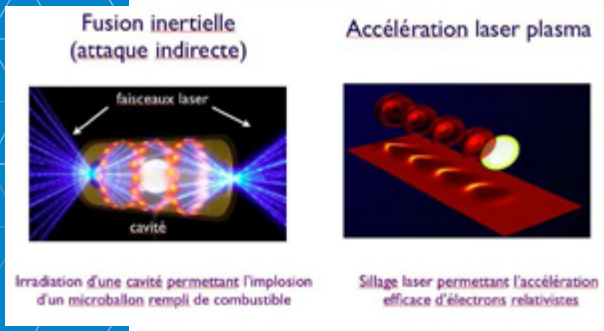
La démarche adoptée dans les trois MODAL de Physique sera proche d'un travail de recherche et visera la compréhension des phénomènes fondamentaux à partir de leur manifestation expérimentale. Pour la plupart de ces thèmes, les premières séances consisteront en une familiarisation expérimentale en observant des phénomènes simples dans des conditions bien caractérisées. Leur interprétation s'effectuera en faisant appel à un aller-retour entre expérimentation et modélisation théorique, en s'appuyant sur des cours et/ou des documents écrits.

La majeure partie du module sera ensuite consacrée à un projet sur un sujet proche de ceux étudiés en laboratoire de recherche. Dans cette phase, les élèves disposent en général d'un grand degré de liberté pour mener le travail, qui peut être orienté selon leur choix.

Durant tout le module, la méthode de travail de recherche requerra entre autres d'utiliser son sens physique, de se questionner sur la pertinence et sur les limites des mesures effectuées et de faire preuve de sens critique vis-à-vis de son propre travail. Le module se terminera par une présentation orale individuelle du chaque élève et par un rapport rédigé en binôme.

OPTION
PLASMAS CRÉÉS PAR LASER

Ce modal permet aux étudiants de découvrir par une approche scientifique « par la recherche » la physique des plasmas créés par laser. Les outils et les techniques innovantes, utilisés au quotidien dans les laboratoires de physique des plasmas font l'objet des trois premières séances, les autres séances étant réservées aux expériences d'interaction laser plasma.



Les plasmas, quatrième état de la matière, constitués d'électrons libres et d'atomes (ions) peu ou totalement ionisés, sont globalement neutres. La longue portée de l'interaction coulombienne leurs confèrent des propriétés originales. Les plasmas créés par laser font l'objet de recherche fondamentale : la fusion par confinement inertielle pour la simulation d'armes ou pour la production d'énergie, l'astrophysique de laboratoire ou encore l'accélération de particules. Ce module expérimental vous permettra de créer votre premier plasma et de le caractériser par les techniques les plus récentes qui révèleront sa constitution, sa température et sa densité.

Les 3 premières séances sont dédiées à la découverte de l'environnement expérimental avec une séance sur le laser et son fonctionnement, et deux séances sur les techniques optiques: imagerie passive et active, réfractométrie, Schlieren, spectroscopie et interférométrie appliquée à l'écoulement de jet de gaz.

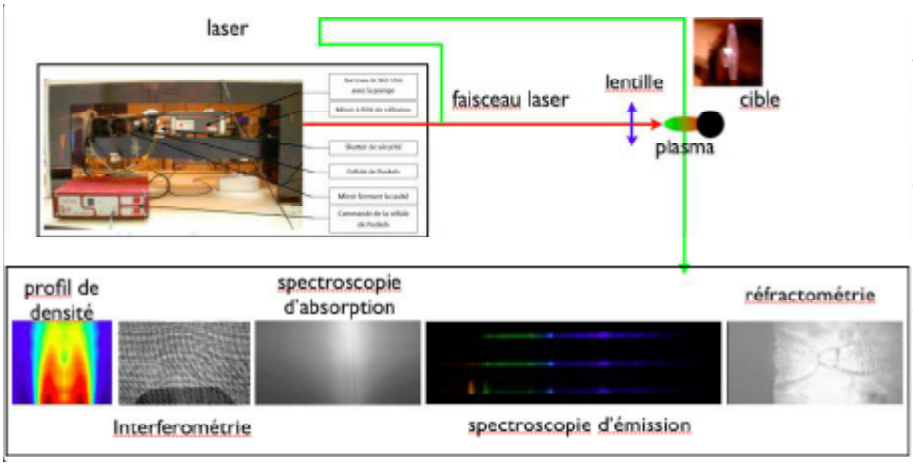
Les séances suivantes mettent à profit la maîtrise des techniques vues aux cours des trois premières séances. Les élèves réalisent l'expérience d'interaction laser plasma en focalisant le laser de puissance sur une cible solide ou gazeuse.

Ils caractériseront ce plasma éphémère en prélevant par exemple une partie du faisceau laser créant le plasma pour sonder de façon optique le plasma et de suivre avec une résolution temporelle de la dizaine de nanosecondes la dynamique du plasma et

par la suite d'en estimer sa température. Les spectres d'émission ou d'absorption obtenus permettent de plus de connaître la constitution du plasma, et l'interférométrie d'en estimer sa densité.

Des expériences complémentaires sont couramment suggérées par les élèves, leur permettant de développer ainsi leur esprit d'initiative et d'exercer leurs talents de jeunes chercheurs.

Une visite des laboratoires LULI et LOA ainsi que trois cours (état de l'art des lasers de puissance, de la fusion inertielle, et de l'interaction relativiste) d'environ une heure viennent étoffer cette enseignement expérimental.



OPTION SPECTROSCOPIE DE PLASMAS FROIDS

Svetlana Starikovskaia
www.lpp.fr

Laboratory for Plasma Physics (LPP) École polytechnique

Project "Spectroscopy as a diagnostic tool in low-temperature plasma"

Spectroscopy, as a diagnostic technique, represents a broad class of methods based on the internal structure of atoms and molecules. In physics and chemistry, atoms and molecules in the object of study are subjected to changes which lead to modification of their absorption/emission spectra. Registration of the emission in UV-visible-IR range gives detailed information about the properties of the object. More comprehensive laser methods, such as laser induced fluorescence (LIF), two-photon absorption laser induced fluorescence (TALIF) use a selective laser excitation of atoms/molecules with subsequent registration of the spectra of fluorescence.

Low-temperature nonequilibrium plasma of gas discharges is naturally connected with spectroscopy: emission spectra, observed in gas discharges, are due to excitation of internal states of atoms and molecules. The examples of excitation of internal levels of atoms/molecules with the subsequent emission in UV-visible range of the spectrum can be found in nature. They are, for example, aurora borealis, high-altitude lightning (so-called blue jets and red sprites) and so on.

During the Project, the students will make a review of spectroscopy techniques used to measure gas parameters in different domains (plasma, combustion, chemistry) and will apply their knowledge to measure, by emission spectroscopy, a temperature of gas in discharge in synthetic air (N_2:O_2=4:1 mixture). Students will measure, using a spectrometer and ICCD camera, the emission spectra, will identify the transitions, will learn how to link the spectra with internal parameters of the gas and will write a code to treat the experimental data.

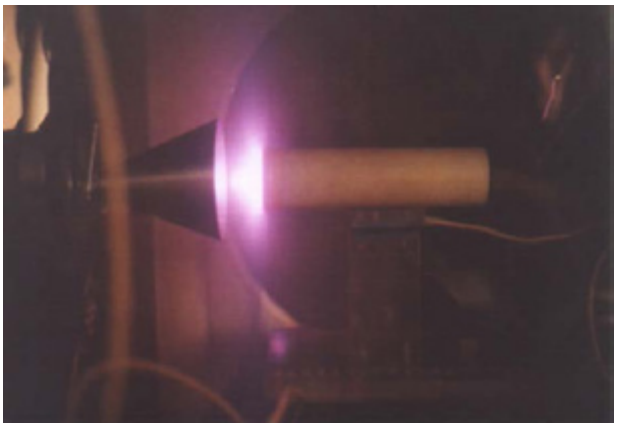


Fig. 1.
Laboratory plasma: glow discharge in supersonic air flow.

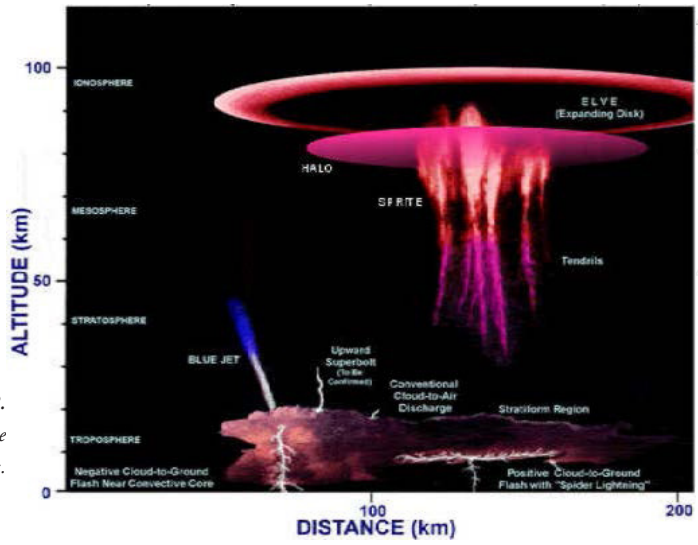


Fig. 2.
Plasma in nature: scheme of high-altitude discharges.

OPTION
INTERACTIONS FONDAMENTALES

Alexandre Zabi
Alexandre.Zabi@llr.in2p3.fr

Objectifs

La physique des particules (ou subatomique, corpusculaire, des hautes énergies suivant les époques) a pour but de dégager une vision unifiée de l'ensemble des forces de la nature : électromagnétique, nucléaire faible, nucléaire forte et ultimement gravitation. Si la récente découverte au CERN du boson de Higgs du Modèle Standard (le 4 Juillet 2012) a nécessité des installations conséquentes, il est possible sur paillasse de se familiariser avec les concepts expérimentaux de base et en particulier le principe de détection des particules à l'aide des rayons cosmiques ou de sources radioactives.

Organisation

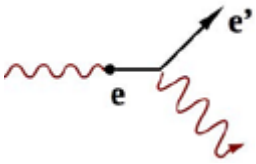
Le modal d'interaction fondamentale offre la possibilité à 4 binôme de travailler sur l'une des thématiques suivantes : rayons cosmiques et temps de vie du muon ; diffusion Compton, et mise en évidence de la relativité restreinte ; annihilation matière-antimatière ; radio-activité et imagerie Béta.

Sur l'ensemble des séances, la première est consacré à une courte introduction théorique, revue des règles de sécurité et découverte du matériel ; les 3 ou 4 suivantes laissent le temps de comprendre le matériel à partir des principes fondamentaux et d'en régler les paramètres ; un oral d'« entrainement » individuel permet d'échanger avec les autres binômes (et de corriger les incompréhensions résiduelles) ; le reste des séances sert aux mesures. Un maximum de liberté d'opération est laissé aux binômes sur les objectifs (mesures, test d'hypothèse), ainsi que sur les moyens (analyses, calculs, simulations).

Les binômes sont encouragés à modéliser les processus prenant place au sein des détecteurs pour amener à une meilleure interprétation des résultats ainsi qu'une meilleure compréhension des phénomènes physiques.

Aperçu

1. Diffusion Compton



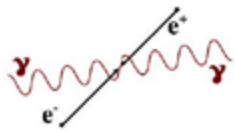


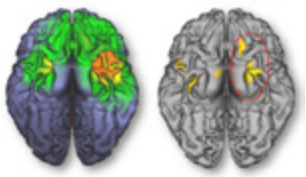
Dessin 1. *Modèle pour la simulation GEANT4 du dispositif.*

La diffusion élémentaire d'un photon de haute énergie (~MeV) sur un électron individuel a été découverte par Arthur Compton en 1923. Dans cette réaction l'électron peut acquérir une vitesse relativiste, ce qui peut être mis en évidence par l'étude de la cinématique de la réaction et la mesure de l'angle et de l'énergie du photon diffusé par spectrométrie gamma (Crystal de NaI).

Inversement, la masse de l'électron peut-être relativement bien mesurée, une fois les biais systématiques déterminés, soit par calcul soit par simulation détaillée (par le logiciel Geant4). Cette étude ouvre la voie à la mesure de la section efficace de Klein-Nishina, pour ceux qui aiment les défis.

2. Annihilation matière-antimatière





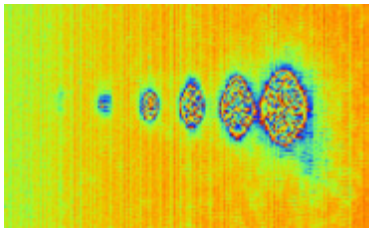
Dessin 2. *Imagerie fonctionnelle du cerveau par la TEP.*

De l'antimatière est produite autour de nous à chaque instant : dans les rayons cosmiques, ou dans le processus de désintégration radioactive ß+ (pour les noyaux présentant un excès de protons). Dans ce dernier cas, ce sont des positrons qui sont produits, et vont rapidement s'annihiler avec un des électrons de la matière en une paire de photons de 511 keV. Il est proposé ici de jouer au physicien et de mettre en évidence ce « nouveau » phénomène, et de le distinguer par exemple d'un effet de physique nucléaire classique, par l'étude de la cinétique de la réaction en spectrométrie gamma en coïncidence.

Alternativement, ce mécanisme est utilisé en médecine par l'imagerie par tomographie par émission de positrons (TEP) ; le dispositif expérimental minimum au MODAL permet néanmoins d'étudier les performances et limites de cette technique d'imagerie médicale.

Ce même dispositif peut également être utilisé pour se familiariser à spectroscopie nucléaire (par ex. cascades de désintégration de l'^{152}Eu).

3. Imagerie Béta.



Dessin 3 : Image moyenne de 6 sources de 14C (ici en saturation pour l'étude du bruit).

Le MODAL dispose d'un imageur Béta permettant de faire des cartes 2D de la radioactivités ß dans un échantillon plan. Grâce à une amplification gazeuse importante (~106), suivant le principe qui est utilisé dans les chambres à fils et les compteurs Geiger-Müller, chaque désintégration laissant une trace dans l'imageur sera visible sous la forme d'une étincelle. Elles sont enregistrées par une

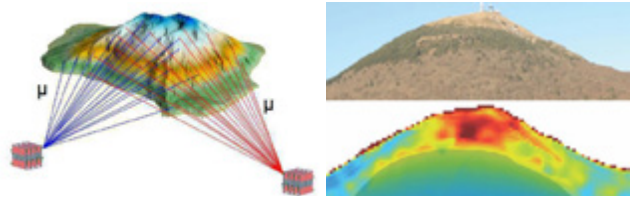
caméra CDD, et l'image moyenne analysée et corrigée.

Après réglage de l'appareil et étalonnage, l'étude des mécanismes de diffusion et absorption fine des rayonnement ß est proposée à l'aide de sources de différentes énergies.

4. Étude du rayonnement cosmique

Nous sommes baignés en permanence par un flux de particules d'origine cosmique, à raison d'une particule par seconde et par surface de main (en ignorant les neutrinos), essentiellement des muons. À l'aide d'un appareillage extrêmement simple il est possible de mesurer leur distribution angulaire. Celle-ci est liée à la distribution en énergie du rayonnement primaire heurtant la haute atmosphère via le temps de vie du muon, augmentée par les effets relativistes.

L'utilisation des cosmiques commence à avoir des applications pratiques de « muongraphie » d'objets (très) lourds : volcans, pyramide…



Dessin 4. *Principe (gauche) et mesure (droite) de la densimétrie par muongraphie du Puy de Dôme, laissant apparaitre la chambre magmatique.*

MODAL
PHYSIQUE DES LASERS ET APPLICATIONS

PHY_42M02_EP, PHY_43M02_EP

Le laser est à ce jour un outil incontournable dans des domaines très variés, que ce soit en recherche ou en milieu industriel. En plus, il présente également un grand intérêt du point de vue fondamental.

Le Modal « Physique des lasers et applications » permet de se familiariser avec la physique du laser et de plusieurs de ses applications. Quatre Options (regroupant entre 2 et 4 élèves) sont proposées :

(a) l'Option « **Imagerie polarimétrique : des matériaux complexes à la biologie** » où les élèves se familiarisent l'imagerie polarimétrique. La polarimétrie consiste à étudier les modifications de polarisation de la lumière après réflexion ou transmission par un objet, permettant ainsi d'analyser ses propriétés. Des imageurs polarimétriques seront conçus pour étudier matériaux de plus en plus complexe, jusqu'au milieux biologiques.

(b) l'Option « **Interaction laser-matière et lumière lente** » où les élèves travaillent sur l'interaction laser-matière, qui regroupe des concepts d'électromagnétisme et de physique quantique et utilisent des dispositifs expérimentaux pour mettre en évidence des concepts théoriques tels que la transparence induite électromagnétiquement, la lumière lente ou la spectroscopie par absorption saturée ;

(c) l'Option « **Holographie** » où les élèves apprennent les bases de l'optique de Fourier et les appliquent à des montages expérimentaux d'holographie analogique et numérique qui leur permettent d'étudier des déformations mécaniques, thermiques, ou vibratoires d'objets sous contrainte ainsi que les propriétés des faisceauwx de lumière modulés spatialement ;

(d) l'Option « **Physique des lasers** » où les élèves se familiarisent avec la physique fondamentale des lasers et étudient les propriétés de différents types de laser : le laser Hélium-Néon, la diode laser ou encore le laser à colorant.

(e) l'Option « **Optique non-linéaire** » où les élèves étudient les propriétés non-linéaires de la lumière. Ces propriétés sont à la base d'effets étonnants, comme l'obtention d'un photon vert à partir de deux photons infrarouges ou la modulation de l'intensité lumineuse et de la phase par un champ électrique ;

(f) l'Option « **Gyromètre à fibre optique** » où les élèves se familiarisent avec la physique de la propagation de la lumière dans les guides d'onde et construisent un gyromètre à fibre qui permet de mesurer des vitesses angulaires avec une haute précision.

(g) l'Option « **Photons intriqués et inégalités de Bell** » où les élèves utilisent une source de photons uniques afin d'observer des franges d'interférence et de mettre en défaut les inégalités de Bell.

Seulement une Option peut être suivie dans une période donnée. Les descriptions détaillées des cinq Options de ce MODAL peuvent être consultées sur les pages suivantes.

Informations valables pour toutes les trois MODAL de Physique (PHY47xA & PHY47xB & PHY47xC (x = 2, 3) :
Tous les trois MODAL de Physique (« Physique des plasmas et des particules élémentaires », « Physique des lasers et applications » et « Physique de la matière condensée ») seront ouverts en P2 et P3. Cependant, toutes les Options des ces trois MODAL ne seront pas forcement proposées à chaque période. La répartition des Options sur les trois périodes dépendra du nombre d'élèves inscrits, des préférences des élèves inscrits et des disponibilités des enseignants.

La démarche adoptée dans les trois MODAL de Physique sera proche d'un travail de recherche et visera la compréhension des phénomènes fondamentaux à partir de leur manifestation expérimentale. Pour la plupart de ces thèmes, les premières séances consisteront en une familiarisation expérimentale en observant des phénomènes simples dans des conditions bien caractérisées. Leur interprétation s'effectuera en faisant appel à un aller-retour entre expérimentation et modélisation théorique, en s'appuyant sur des cours et/ou des documents écrits.

La majeure partie du module sera ensuite consacrée à un projet sur un sujet proche de ceux étudiés en laboratoire de recherche. Dans cette phase, les élèves disposent en général d'un grand degré de liberté pour mener le travail, qui peut être orienté selon leur choix.

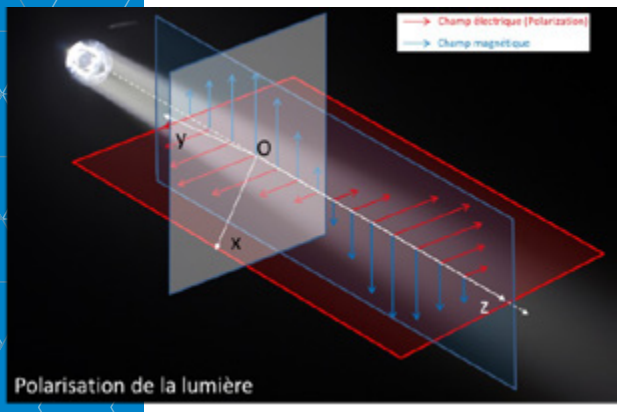
Durant tout le module, la méthode de travail de recherche requerra entre autres d'utiliser son sens physique, de se questionner sur la pertinence et sur les limites des mesures effectuées et de faire preuve de sens critique vis-à-vis de son propre travail. Le module se terminera par une présentation orale individuelle du chaque élève et par un rapport rédigé en binôme.

OPTION

IMAGERIE POLARIMÉTRIQUE : DES MATÉRIAUX COMPLEXES À LA BIOLOGIE

Angelo Pierangelo
angelo.pierangelo@polytechnique.edu

La théorie de l'électromagnétisme explique que la lumière est constituée d'un champ électrique et d'un champ magnétique fortement interconnectés qui oscillent dans l'espace et le temps. Cette interconnexion est décrite par les équations de Maxwell. La polarisation correspond alors à la trajectoire spatio-temporelle du champ électrique.



Polarisation de la lumière

La lumière polarisée trouve actuellement un large éventail d'applications, notamment dans les domaines de la télédétection, de la caractérisation des couches minces, de l'industrie des semi-conducteurs et de la biomédecine. La polarimétrie consiste à utiliser la lumière polarisée pour explorer la microstructure d'un matériau par la détermination de ses propriétés polarimétriques principales, telles que la retardance, la diatténuation et la dépolarisation, liées respectivement à l'anisotropie optique, à l'anisotropie d'absorption et à la diffusion de la lumière.

Au cours de la dernière décennie, la polarimétrie a produit des résultats surprenants dans l'imagerie des tissus biologiques, qui sont des systèmes aux propriétés optiques très complexes où les différents effets polarimétriques sont souvent présents simultanément. En effet, elle est capable de produire des images avec des contrastes accrus qui peuvent améliorer considérablement la détection des zones pathologiques, même à un stade précoce.

L'objectif principal du modal proposé est de permettre aux élèves de se familiariser avec l'imagerie polarimétrique pour l'étude de matériaux complexes tels que les tissus biologiques.

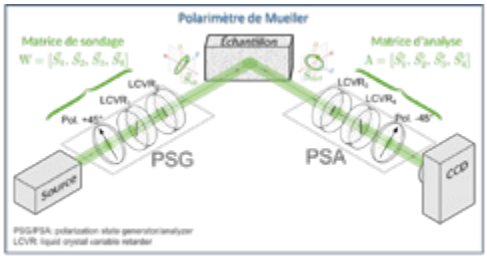
Au tout début, les élèves seront initiés aux concepts de base de la polarisation. Ils apprendront à générer et à analyser différents états de polarisation, puis à mener des expériences sur des échantillons ad hoc avec des propriétés polarimétriques bien contrôlées. Au cours de cette première étape, les élèves pourront étudier comment

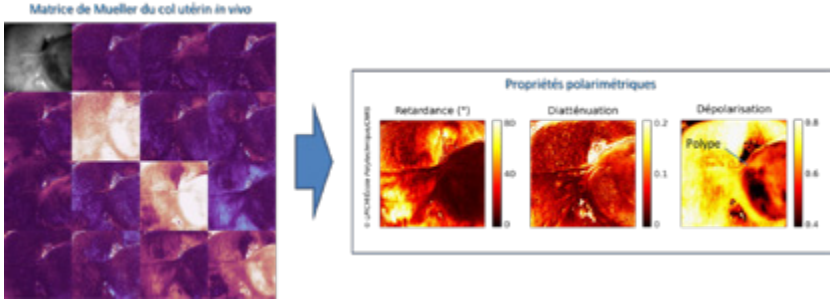
la polarisation de la lumière change après interaction avec un échantillon, en apprenant à évaluer ce changement de manière quantitative.

Dans une deuxième étape ils devront concevoir eux-mêmes différents types d'imageurs polarimétriques. Tout d'abord, ils construiront un imageur polarimétrique basé sur l'utilisation d'états de polarisation orthogonaux linéaires et/ou circulaires pour caractériser le degré de dépolarisation d'un échantillon. Ensuite, ils travailleront à la mise en place d'un imageur polarimétrique de Stokes capable de caractériser en détail la polarisation de la lumière, qu'elle soit totalement polarisée, partiellement polarisée ou totalement dépolarisée.

Enfin, les élèves seront initiés à l'imagerie polarimétrique de Mueller qui permet la caractérisation polarimétrique complète d'un échantillon. En effet, elle est la seule technique capable de donner accès simultanément à ses propriétés de retardance, diattenuation et dépolarisation. Pour cette partie, les différents imageurs polarimétriques de Mueller développés au Laboratoire de Physique des Interfaces et des Couches Minces (LPICM) seront mis à disposition des élèves qui pourront ainsi se former à l'utilisation de véritables outils de recherche.

Les élèves utiliseront les différentes techniques d'imagerie polarimétrique avec lesquelles ils se seront familiarisés pendant le cours pour étudier des échantillons aux propriétés polarimétriques complexes, y compris des tissus biologiques.





OPTION
INTERACTION LASER-MATIÈRE ET LUMIÈRE LENTE

Cet enseignement propose un certain nombre de manipulations expérimentales en lien avec la physique atomique et l'interaction laser-matière. Il a pour but de permettre aux étudiants intéressés par les enseignements de physique quantique et d'électromagnétisme d'avoir un premier contact expérimental avec des concepts qui leur sont enseignés sur le plan théorique tels que la transparence induite électromagnétiquement, la lumière lente ou la spectroscopie par absorption saturée.

Plus précisément, le dispositif expérimental est construit autour d'une cellule contenant des atomes de rubidium sous forme gazeuse et d'un laser fin accordable atour de 780nm permettant d'adresser certaines raies d'absorption du rubidium. Grâce à des modulateurs électro-optiques et acousto-optiques nous verrons comment il est possible de contrôler la fréquence et l'intensité d'un ou plusieurs faisceaux issus du même laser, et d'utiliser ces faisceaux pour mettre en œuvre expérimentalement différents protocoles d'interaction laser-matière.

En particulier, nous nous intéresserons au protocole de transparence induite électromagnétiquement, dans lequel un faisceau adressant une transition atomique vient modifier fortement l'absorption d'un autre faisceau adressant une seconde transition via un phénomène d'interférence quantique destructive entre différentes amplitudes de probabilité. Il en résulte l'ouverture d'une très fine fenêtre de transparence pour le deuxième faisceau, à laquelle est associée une très forte dispersion induisant une réduction de la vitesse de groupe.

Si l'objectif final de ce travail est d'observer un ralentissement de la lumière comme décrit ci-dessus, il sera aussi l'occasion de se familiariser avec un certain nombre de techniques expérimentales importantes que l'on retrouve dans la plupart des expériences d'optique quantique ou d'optique atomique : mise en œuvre d'un laser fin et accordable en fréquence, d'un modulateur électro-optique, d'un modulateur acousto-optique, d'un détecteur rapide, injection d'une fibre optique à l'aide d'un collimateur…

En fonction de l'avancement des manipulations, le dispositif pourra être reconfiguré pour explorer d'autres phénomènes importants de l'interaction lumière matière, comme par exemple la spectroscopie d'absorption saturée, qui permet d'observer la position des raies d'absorption atomiques avec une précision bien meilleure que celle habituellement imposées par l'effet Doppler dans un gaz à température ambiante.

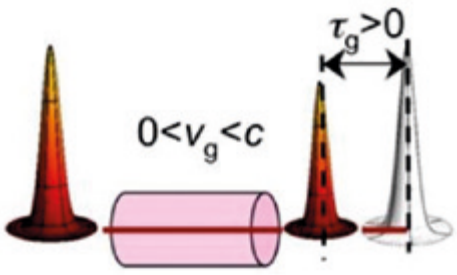


Figure ci-dessus.
Illustration du principe de ralentissement de la lumière, tirée de T Lauprêtre et al. *2012 New J. Phys.* ***14*** *043012*

OPTION
HOLOGRAPHIE

La lumière possède des propriétés physiques étonnantes. Dans cet enseignement nous allons explorer plus précisément ses propriétés de cohérence, qui permettent d'aller au-delà de la simple information d'intensité (celle que nous utilisons dans notre quotidien). Nous utiliserons le laser comme source de lumière cohérente et l'exploiterons pour la réalisation d'hologrammes. Après un apprentissage des techniques d'holographie analogique, numérique et interférométrique, les élèves sont incités à proposer un sujet d'étude pertinent, le plus souvent en fonction de leurs centres d'intérêt. Pour cela plusieurs outils seront à leur disposition : des plaques photographiques pour l'enregistrement des hologrammes, une caméra CCD haute-résolution pour l'holographie numérique, une matrice de micro-miroirs pour la modulation spatiale de la lumière. Les sujets

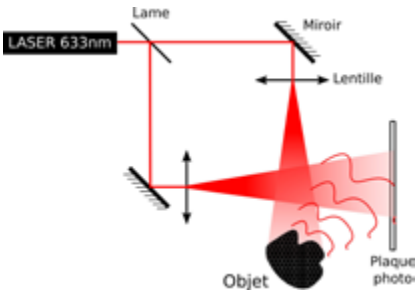


Figure 1. Montage dit « de Gabor » pour un hologramme observable en transmission.

d'études sont multiples : déformations d'un cristal piézoélectrique, vibrations d'un verre qui chante, cartographie 3D d'un objet, réduction des aberrations sur un faisceau laser et bien d'autres encore.

Cet enseignement propose une approche de type « projet » sur un support. Il s'agit d'un véritable apprentissage de la méthodologie du chercheur : se poser un problème,

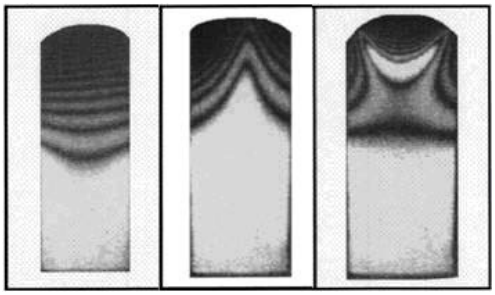


Figure 2.
Franges d'interférence créées lors de la vibration d'une anche de clarinette à différentes fréquences d'excitation.

déterminer si la technique expérimentale est adaptée à la mesure, faire des recherches bibliographiques, mettre au point un montage expérimental adapté et enfin exploiter les résultats (et éventuellement analyser les échecs).

Au cours de ce Modal, il sera possible de réaliser des montages d'holographie avec trois déclinaisons principales : l'holographie interférométrique, l'holographie numérique, la modulation spatiale de la lumière.

Pour la première, on entend l'usage de l'holographie pour la détection de déformations mécaniques ou thermiques à l'échelle du micron. Cette technique est très utilisée en industrie aéronautique pour la détection non destructive de micro-fissures.

Pour la deuxième, on entend l'usage d'une caméra CCD pour enregistrer les hologrammes. La reconstruction est alors numérique, on simule la propagation du champ électromagnétique par les lois de la diffraction. Cette méthode offre la possibilité d'appliquer des traitements numériques pour améliorer la qualité de l'image de l'objet reconstruit, compenser les aberrations du système ou encore changer la position du plan de reconstruction. Elle offre aussi l'avantage de permettre la reconstruction de l'interférogramme holographique en temps réel, et l'exploitation des résultats est donc immédiate. C'est d'ailleurs pourquoi la technique d'interférométrie holographique connaît un regain d'intérêt en milieu industriel.

Enfin pour la dernière, on entend l'usage d'une matrice de micro-miroirs pour la modulation spatiale et temporelle d'un faisceau lumineux. Grâce à cet instrument (qu'on trouve dans la dernière génération de vidéo-projecteurs) et l'optique de Fourier, il est possible de compenser les aberrations d'un système optique, de réaliser des motifs à deux dimensions à la demande ou encore d'étudier la transformation de Fourier sur des motifs non triviaux. Les élèves sont ainsi confrontés à des dispositifs expérimentaux différents, chacun avec ses propres limitations, qu'il est essentiel de comprendre et maîtriser pour mener à bien l'étude.

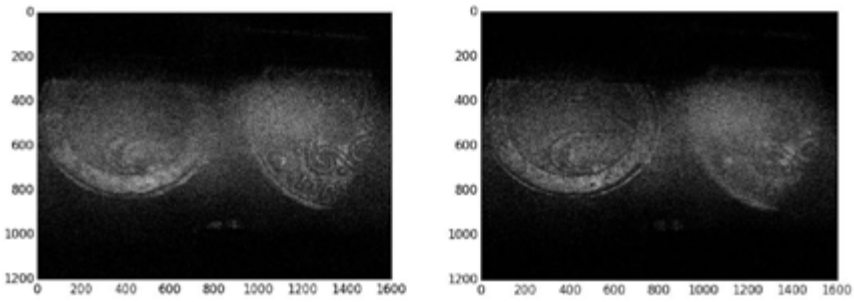


Figure 3.
Reconstruction numérique d'un hologramme constitué de deux pièces à des distances différentes.

OPTION
PHYSIQUE DES LASERS

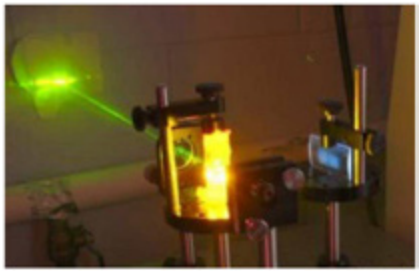
Le but de cet enseignement est de faire découvrir la physique fondamentale des lasers. En partant des principes constitutifs des milieux amplificateurs et des cavités laser, divers ateliers sont successivement présentés aux élèves : laser He-Ne, Diode laser, laser à colorant et mesure de front d'onde par méthode interférométrique.

Le principe du laser est analysé à l'aide d'une cavité laser He-Ne ouverte, qui permet une grande liberté d'étude. Tous les éléments peuvent être agencés librement. Le gain du milieu amplificateur est mesuré, la cavité alignée. De nombreuses études sont possibles, comme l'influence de la position des miroirs dans la cavité laser et encore l'étude des modes transverses et longitudinaux.

La diode laser est un remarquable exemple d'intégration opto-électronique. Elle est présente dans tous les lecteurs de DVD ou de Blu-ray. Bien que le principe laser soit le même, la diode laser possède des qualités uniques : principe de fonctionnement, comportement suivant l'intensité et la température, étude spectroscopique de la compétition entre mode.

Le laser à colorant est un laser spectaculaire par son caractère accordable, passant ainsi du vert à l'orange en passant par le jaune. Autour d'un laser de pompe nanoseconde, une séance lui est entièrement consacrée et elle permet de comprendre tous les principes permettant la sélection d'une couleur et donc l'accordabilité.

Enfin, on caractérisera entièrement les propriétés géométriques du laser, à l'aide d'une expérience interférométrique de mesure du front d'onde. Cette expérience délicate, basée sur un interféromètre de Mach-Zender, permet de mesurer le profil spatial en intensité et en phase du faisceau laser.‹



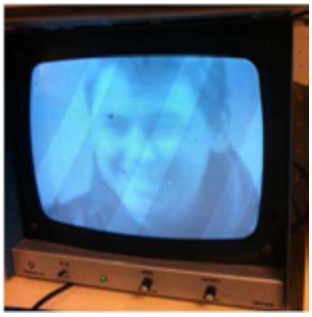
Laser à colorant

OPTION
OPTIQUE NON LINÉAIRE

Le module d'Optique non linéaire permet de se familiariser avec les propriétés non linéaires de la lumière. Contrairement à l'optique géométrique habituelle où le comportement des matériaux est linéaire, l'optique non linéaire permet d'obtenir des effets étonnants, comme par exemple la génération de lumière verte à partir d'une source infrarouge, ou bien encore la modulation de l'intensité lumineuse ou de la phase par un champ électrique. L'optique non linéaire est utilisée massivement dans les trois principaux laboratoires d'optique de l'école : au LULI, LOA et LOB. Ses applications vont de la génération de rayonnement ultra bref et ultra intense dans l'ensemble de la gamme électromagnétique, à la réalisation de microscopes de dernière génération.

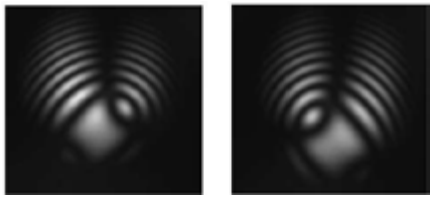
Le module est composé de la manière suivante : après une première séance orientée sur les concepts de base : biréfringence, symétrie cristalline, optique non linéaire, 4 séances sont consacrées à la génération de second harmonique, et 4 autres ensuite aux effets Pockels et Kerr.

De la lumière verte (532nm) est obtenue par focalisation d'un faisceau infrarouge de longueur d'onde double dans un cristal non linéaire de KDP. On observe dans quelles conditions le doublage de fréquence est observé : angle d'accord de phase, angle azimutale, intensité de la pompe, accord de phase non colinéaire, accord de phase de type I et II. Le cristal de KDP est placé dans un bain d'indice et peut donc être orienté dans toutes les directions.



Transmission d'un signal vidéo sans fil par modulation Pockels.

La modulation de la lumière d'un laser est réalisée à partir d'une cellule de Pockels.
Un champ électrique statique est appliqué sur un cristal de KD*P, avec pour conséquence une modification de la biréfringence du cristal. Cette cellule permet ainsi que réaliser une modulation de la phase et de l'intensité d'un laser la traversant. La physique des cellules de Pockels longitudinales et transverses sera étudiée, ainsi également qu'une cellule Kerr.
Ces principes seront appliqués à la réalisation d'une expérience permettant de transmettre un signal audio et vidéo à distance.



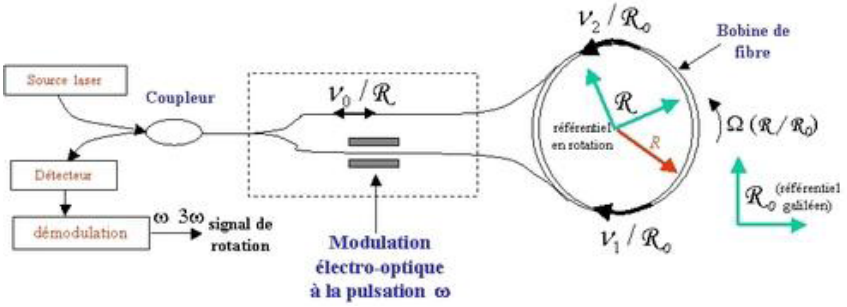
Variation des franges d'interférence d'une cellule de Pockels, suivant une tension positive ou négative.

OPTION
LE GYROMÈTRE À FIBRE OPTIQUE

Les performances des fibres optiques pour propager un signal sur de longues distances en font une technologie essentielle des télécommunications aujourd'hui. La propagation guidée de la lumière donne lieu à une grande richesse de phénomènes – propagations de modes discrets, biréfringence, couplage de modes, polariseur à fibre, interféromètre à fibre - que nous allons explorer lors de ce modal. Nous introduirons la physique de la propagation de la lumière dans un guide d'onde pour permettre aux étudiants de comprendre l'ensemble des expériences qu'ils réaliseront.

Ce sera aussi l'occasion de mettre en pratique vos connaissances sur les lasers, sur le traitement du signal, et de réaliser un montage optique d'envergure. Nous nous attaquerons à la réalisation d'un gyromètre à fibre, capable de mesurer les vitesses angulaires grâce à un effet relativiste, appelé l'effet Sagnac. Cette technologie est relativement récente, mais les gyromètres à fibre sont déjà présents dans toute l'industrie, particulièrement en aéronautique. Ce modal est une occasion parfaite pour marier la compréhension physique d'un objet de haute technologie, son étude expérimentale, jusqu'à son application industrielle.



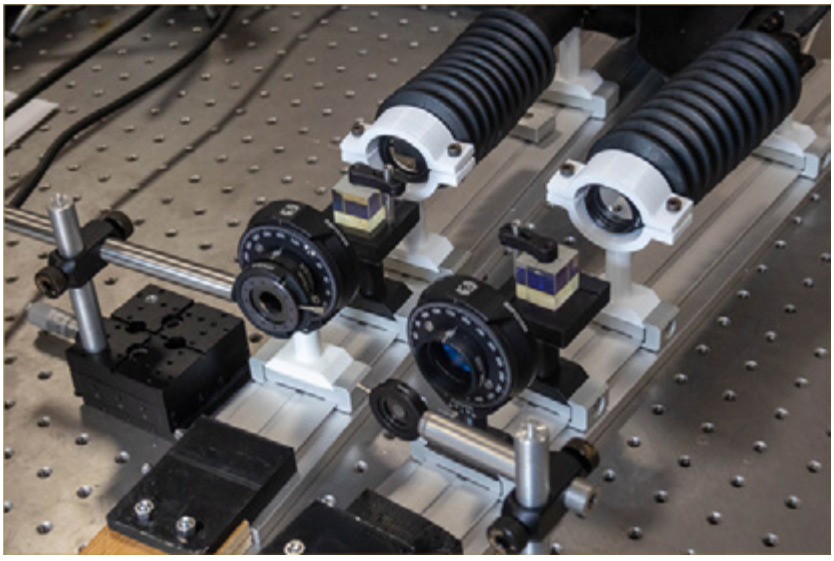


OPTION
PHOTON INTRIQUÉS ET INÉGALITÉS DE BELL

Cet enseignement met en œuvre une source paramétrique de paires de photons afin d'explorer le monde de l'optique quantique au niveau du photon individuel.

Dans une première série d'expériences, un interféromètre de Mach-Zehnder sera monté et aligné afin d'observer des franges d'interférence en fonction du retard optique. L'un des photons de la paire de photons sera alors utilisé pour annoncer l'arrivée de l'autre photon dans l'interféromètre. On pourra ainsi observer la construction des franges d'interférence photon par photon, ce qui constitue une illustration directe de la dualité onde-corpuscule.

Dans une seconde série d'expériences, on mesurera les corrélations entre les polarisations de deux photons préparés dans un état intriqué afin de mettre en défaut les inégalités de Bell. Ce résultat scientifique majeur a permis d'exclure les théories à variables cachées locales et a donné lieu au prix Nobel de physique 2022 décerné à Alain Aspect, John Clauser et Anton Zeilinger.



MODAL
PHYSIQUE DE LA MATIÈRE CONDENSÉE

PHY_42M03_EP, PHY_43M03_EP

La physique de la matière condensée étudie les propriétés de la matière de forte densité atomique, comme les solides et les liquides… mais aussi des matériaux intermédiaires entre les deux (*e.g.* les cristaux liquides). Il s'agit d'un domaine de la physique très riche en phénomènes, et qui fait partie des domaines les plus actifs d'aujourd'hui. Le MODAL « Physique de la matière condensée » permet de se familiariser avec quelques uns de ses aspects proches de la recherche actuelle. Sept Options (regroupant entre 2 et 4 élèves) sont proposées :

(a) l'Option « **Supraconductivité** » où les élèves produisent leurs propres supraconducteurs et mettent en évidence leurs propriétés, telles que la perte de résistance électrique, l'expulsion du champ magnétique ou encore la lévitation magnétique.

(b) l'Option « **Semi-conducteurs** » où les élèves se familiarisent avec la physique des semi-conducteurs, et où ils produisent et caractérisent leurs propres cellules solaires.

(c) l'Option « **Matériaux Quantiques** » où les élèves étudient les technologies quantiques de demain. L'interaction complexe entre un grand nombre d'électrons dans des solides peut engendrer des propriétés extraordinaires. Le cours met un accent particulier sur la synthèse, la compréhension théorique des matériaux ainsi que leurs mesures dans des conditions extrêmes de température et de champ magnétique, soulignant l'importance des techniques expérimentales et théoriques pour dévoiler les mystères des états quantiques de la matière.

(d) l'Option « **Instabilité et phénomènes non linéaires en hydrodynamique** » qui regroupe deux expériences, toutes les deux dédiées à l'étude des instabilités hydrodynamiques à la frontière entre l'ordre (régime laminaire) et le chaos (régime turbulent) :

– l'expérience « *Étude de réseaux de tourbillons (uni- ou bi-dimensionnels)* » où les élèves étudient la frontière entre l'ordre et le chaos à travers la dynamique des tourbillons créés grâce à la force de Laplace ;
– l'expérience « *Gouttes rebondissantes* » où les élèves étudient la frontière entre l'ordre et le chaos et la dualité onde-particule à travers la dynamique de

gouttes rebondissantes sur la surface d'un liquide qui oscille à haute fréquence.

(e) l'Option « **Matière molle** » où les élèves conduisent un réel projet de recherche dans le domaine des liquides ou des matériaux à la frontière entre les liquides et les solides (*e.g.* cristaux liquides, gels, mousses…), par exemple la caléfaction des gouttes sur une surface chaude, les mouvements des gouttes sur des fibres, ou encore des éclatements des bulles résolus en temps.

(f) l'Option « **Plasmons de surface** » où les élèves explorent les oscillations collectives des électrons de conduction dans les métaux (entre autres responsables pour des couleurs des nanoparticules et des verres colorés) et étudient comment leurs propriétés peuvent être exploités dans la production des capteurs sensibles aux indices optiques des matériaux ainsi que dans la création des gradients thermiques bien contrôlés.

Seulement une Option peut être suivie dans une période donnée. Les descriptions détaillées des six Options de ce MODAL peuvent être consultées sur les pages suivantes.

Informations valables pour toutes les trois MODAL de Physique (PHY47xA & PHY47xB & PHY47xC (x = 2, 3) :
Tous les trois MODAL de Physique (« Physique des plasmas et des particules élémentaires », « Physique des lasers et applications » et « Physique de la matière condensée ») seront ouverts en P2 et P3. Cependant, toutes les Options des ces trois MODAL ne seront pas forcement proposées à chaque période. La répartition des Options dans chaque MODAL sur les trois périodes dépendra du nombre d'élèves inscrits, des préférences des élèves inscrits et des disponibilités des enseignants.

La démarche adoptée dans les trois MODAL de Physique sera proche d'un travail de recherche et visera la compréhension des phénomènes fondamentaux à partir de leur manifestation expérimentale. Pour la plupart de ces thèmes, les premières séances consisteront en une familiarisation expérimentale en observant des phénomènes simples dans des conditions bien caractérisées. Leur interprétation s'effectuera en faisant appel à un aller-retour entre expérimentation et modélisation théorique, en s'appuyant sur des cours et/ou des documents écrits.

La majeure partie du module sera ensuite consacrée à un projet sur un sujet proche de ceux étudiés en laboratoire de recherche. Dans cette phase, les élèves disposent en général d'un grand degré de liberté pour mener le travail, qui peut être orienté selon leur choix.

Durant tout le module, la méthode de travail de recherche requerra entre autres d'utiliser son sens physique, de se questionner sur la pertinence et sur les limites des mesures effectuées et de faire preuve de sens critique vis-à-vis de son propre travail. Le module se terminera par une présentation orale individuelle du chaque élève et par un rapport rédigé en binôme.

OPTION
SUPRACONDUCTIVITÉ

La supraconductivité est le phénomène par lequel un matériau, habituellement un métal, perd toute résistivité électrique en dessous d'une certaine « température critique », T_c. En même temps, le supraconducteur exclura tout champ électromagnétique de son intérieur, mis à part une fine couche surfacique, un phénomène appelé *effet Meissner*. On distingue les supraconducteurs de première espèce, dans lesquels la disparition de l'effet Meissner signale le retour à l'état métallique normal, des supraconducteurs de type II, dans lesquels l'état sans champ électromagnétique (l'état Meissner) est séparé de l'état normal par une phase mixte, dans lequel le supraconducteurs est traversé par des lignes de flux magnétique quantifié, ou *vortex*.

La température critique est, pour de nombreux supraconducteurs, peu élevée, de l'ordre de quelques Kelvin. Or, dans les oxydes à base de cuivre, les *cuprates*, la température critique peut atteindre jusqu'à 135 K.

Si la supraconductivité en tant que phénomène est déjà plus que centenaire, de nouveaux matériaux supraconducteurs sont découverts tous les ans. De même, si la théorie de la supraconductivité, établie en 1957 par Bardeen, Cooper, et Schrieffer, décrit la supraconductivité des éléments et de nombreux composés binaires de manière remarquable, et dans absolument tous les détails, la supraconductivité à haute température critique dans les cuprates reste énigmatique.

La supraconductivité reste donc un terrain de recherche passionnant et fructueux. Le module expérimental « Supraconductivité » propose de découvrir sa phénoménologie. Les élèves préparent leurs propres cuprates supraconducteurs, dont ils étudient ensuite l'effet Meissner et l'effet de lévitation magnétique. On propose ensuite d'effectuer la mesure de T_c par des mesures magnétiques. Le Module expérimental comprend donc une part importante de manipulations à basses températures.

En prenant une approche qui est résolument celle de la science des matériaux, le module expérimental donne en même temps l'occasion de découvrir des techniques importantes de caractérisation tel que la diffraction des rayons X et la microscopie électronique à balayage. Les élèves apprennent à utiliser ces méthodes en les appliquant à la caractérisation des matériaux qu'ils ont eux-mêmes préparé. Ils apprennent également l'influence de la morphologie des matériaux (monocristallin, polycristallin, couche mince) sur les propriété physiques.

Le Module expérimental est habituellement clos par une série de quatre séances plus personnalisées. Dans ces séances, on pourra étudier la pénétration du champ magnétique dans les supraconducteurs de deuxième type en appliquant la méthode magnéto-optique de visualisation. Selon le choix des élèves, on étudiera le courant critique, c'est-à-dire, le courant électrique maximal que le supraconducteur peut porter avant l'apparition de dissipation par effet Joule, ou encore la disparition de la résistivité. Il est également possible d'étudier d'autres systèmes supraconducteurs, tels que les supraconducteurs à base de fer découverts récemment, ou des nouvelles phases de cuprates.

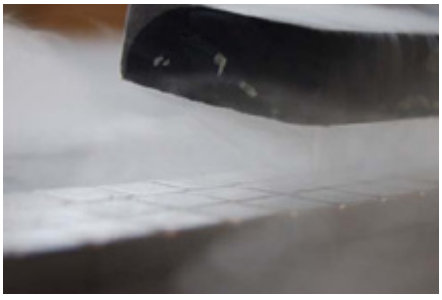


Figure 1.
Lévitation d'un bloc d'$YBa_2Cu_3O_7$ supraconducteur au dessus d'une piste 'aimants $NdFe_{14}B$.

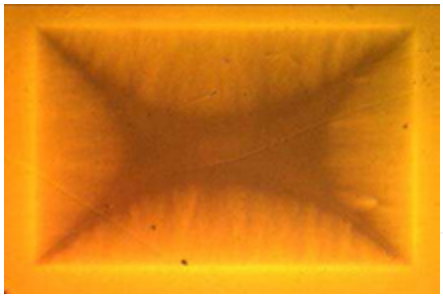


Figure 3.
Pénétration du flux magnétique dans une couche mince d'YBa2Cu3O7, tel qu'observée en utilisant la méthode magneto-optique de visualisation.

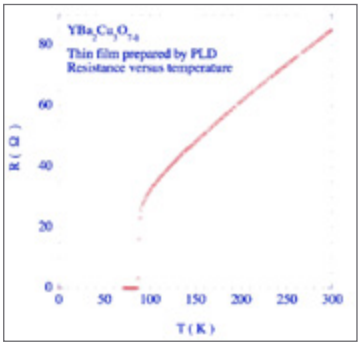


Figure 2.
Disparition de la résistance (en ordonnée) d'une couche mince d'$YBa_2Cu_3O_7$ à la température critique T_c.

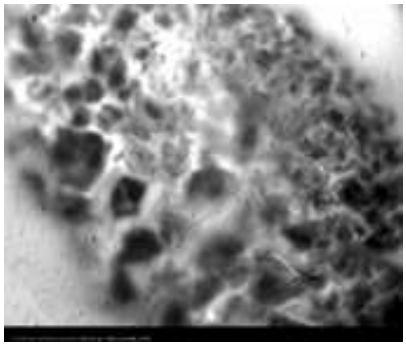


Figure 4.
Étude d'une céramique d'YBa2Cu3O7 par la méthode magneto-optique de visualisation.

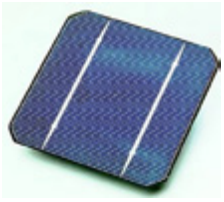
OPTION
SEMI-CONDUCTEURS

Les semi-conducteurs, comme le Silicium ou le Germanium, sont des matériaux qui à l'état pur ne sont ni des bons isolants ni de bons conducteurs d'électricité. On peut néanmoins faire varier par plusieurs ordres de grandeurs la conductivité d'un semi-conducteur par des faibles perturbations (incorporation d'une faible quantité d'impuretés, application d'une tension électrique, éclairage avec de la lumière), et cette flexibilité fait de ces matériaux la brique de base de la micro et opto-électronique permettant de fabriquer des dispositifs tels que des transistors, des diodes électroluminescentes (LEDs), des lasers à semi-conducteurs, des capteurs CCD ou encore des cellules solaires.

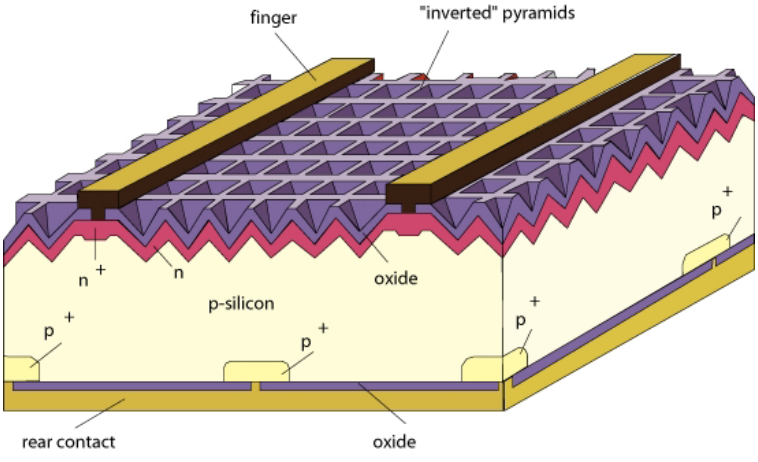
De ce fait, ces matériaux sont d'une importance primordiale dans l'économie d'aujourd'hui, notamment pour l'industrie de la microélectronique et du photovoltaïque. Malgré le poids de ces industries, les semi-conducteurs ont encore de nombreux mystères à révéler, et restent un sujet de recherche extrêmement actif. Le LPICM est un laboratoire de pointe dans l'étude des semi-conducteurs couches minces pour utilisation sous forme de cellules photovoltaïques.

Pendant le module expérimental, les étudiants bénéficieront d'une introduction théorique et pratique aux semi-conducteurs, qui leur permettra de découvrir les propriétés de ces matériaux, ainsi que les modes de fabrication. Ils seront tout particulièrement sensibilisés aux procédés plasmas, incontournables dans l'univers des semi-conducteurs. Ils seront également amenés à fabriquer eux-mêmes des cellules photovoltaïques, dont la caractérisation permettra de mieux appréhender les propriétés des matériaux mis en jeux.

A la fin du module, les étudiants seront à même de comprendre les dispositifs à base de semi-conducteurs, ainsi que les enjeux majeurs de l'industrie photovoltaïque.






finger
"inverted" pyramids
n +
n
oxide
p-silicon
p +
p +
p +
p +
rear contact
oxide

OPTION
MATÉRIAUX QUANTIQUES

Les matériaux quantiques représentent le socle du développement des technologies quantiques de demain, de l'informatique quantique au transport, stockage et production de l'énergie. Au cœur de ces nouveaux matériaux, des interactions fortes entre un très grand nombre d'électrons émergent des propriétés exotiques nouvelles telles que la supraconductivité non-conventionnelle, les métaux étranges ou les liquides spins quantiques, qui sont autant de sujets de recherche de pointe étudiés à l'École Polytechnique.

Ce Modal est conçu pour immerger les étudiants dans le concept d'émergence en physique quantique. En étudiant comment des interactions complexes entre un grand nombre d'électrons dans des solides peuvent engendrer des propriétés extraordinaires, les étudiants découvriront des aspects fascinants de la matière condensée. Le cours met un accent particulier sur la synthèse, la compréhension théorique des matériaux ainsi que leurs mesures dans des conditions extrêmes de température et de champ magnétique, soulignant l'importance des techniques expérimentales et théoriques pour dévoiler les mystères des états quantiques de la matière.

Le cours est structuré en trois phases progressives, chacune enrichie par une combinaison d'expérimentation en laboratoire et d'étude théorique :

1. **Le cuivre, un simple métal sans phénomène émergent :**

– Les étudiants débuteront par l'étude du cuivre, un métal conventionnel, dont les propriétés électroniques peuvent être sondées directement par la mesure d'oscillations quantiques à basse température à travers la nanofabrication de couches minces et l'analyse de ses états électroniques sous conditions extrêmes. Dans la partie théorique qui accompagnera cette étape, les étudiants se familiariserons avec le calcul des propriétés électroniques ab initio (DFT) du cuivre pour les comparer avec les résultats des oscillations quantiques. Cette étape permettra aux étudiants de se familiariser avec les outils de nanofabrication industrielle et les bases de la matière condensée.

2. **Les oxides de cuivre, un isolant électrique fortement corrélé :**

– Les étudiants découvriront ensuite qu'en ajoutant du lanthane et de l'oxygène, le cuivre peut devenir un matériau quantique antiferromagnétique et isolant électrique : La2CuO4. Les étudiants observeront comment les propriétés du

cuivre évoluent radicalement en changeant son environnement atomique. Des expériences électriques à basse température ainsi que des mesures d'aimantation permettront de mettre en lumière ces propriétés émergentes. Dans la partie théorique qui accompagnera cette étape, les étudiants tenteront de prédire par le calcul les propriétés de La2CuO4 et échoueront. Cette partie mettra en lumière les limites des prédictions théoriques simples à cause des interactions électroniques fortes dans ce composé et l'importance de l'expérience directe.

3. **Les oxides de cuivre, aussi des supraconducteurs à haute température critique :**

– Avec l'ajout d'oxygène à La2CuO4+x (x est l'excès d'oxygène), les étudiants découvriront que ce matériau quantique passe d'un isolant électrique à un supraconducteur à haute température critique. Les étudiants caractériseront ce matériau en mesurant la résistivité et l'aimantation à basse température. Des discussions sur les applications pratiques des supraconducteurs et leurs implications technologiques futures clôtureront ce module.

Ce Modal est une aventure intellectuelle et pratique dans le monde fascinant des matériaux quantiques, offrant aux étudiants les outils et les connaissances pour appréhender l'origine de la prochaine vague d'innovations technologiques.



Figure 1. Image d'oxides de cuivre supraconducteurs.

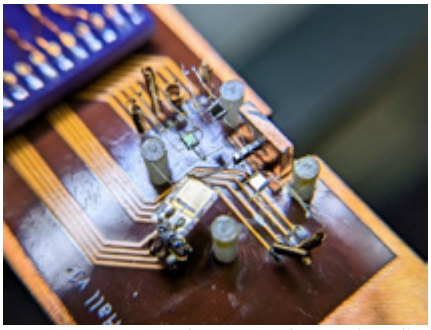


Figure 2. Mesure thermique d'un échantillon d'oxide de cuivre supraconducteur (École Polytechnique - Gaël Grissonnanche).

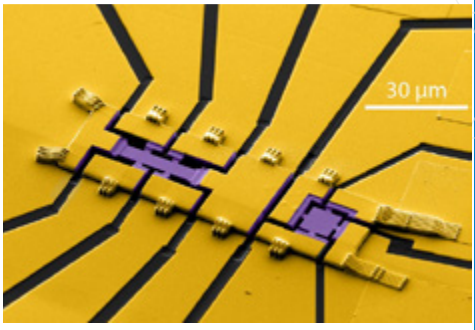


Figure 3. Microstructure d'un matériau quantique WP2 (EPFL, Philip Moll).

OPTION

INSTABILITÉ ET PHÉNOMÈNES NON LINÉAIRES EN HYDRODYNAMIQUE

Contexte et Objectifs

La transition d'un écoulement en régime laminaire vers un régime chaotique ou turbulent se fait via plusieurs instabilités hydrodynamiques conduisant à des régimes d'écoulements intermédiaires. Les instabilités hydrodynamique sont un sujet très riche aux frontières entre divers domaines scientifiques (mécanique, physique, chimie…).

Dans ce modal, nous proposons d'étudier avec le regard de physiciens des systèmes hydrodynamiques simples en se plaçant soit dans un régime dit laminaire et d'en étudier l'évolution, soit en régime de turbulence déjà établi. Nous proposons plusieurs systèmes expérimentaux qui serviront de base pour le modal.

Organisation

Les 3 ou 4 premières séances seront consacrées à la prise en main des systèmes expérimentaux ainsi qu'à l'apprentissage des méthodes d'analyse des phénomènes observés. A l'issus de ces séances, les élèves détermineront le sujet qu'ils souhaiteront étudier de manière approfondie. A mi-parcours, il est proposé aux élèves de faire un exposé de l'état d'avancement de leurs travaux ainsi que leur perspective, ceci à pour but de préparer l'oral à la fin du MODAL.

Les bases nécessaires pour la compréhension du modal sont introduites en cours de séance.

Aperçu
(2 exemples de systèmes proposés.)

Étude de réseaux de tourbillons (uni ou bi-dimensionnels).
Deux systèmes expérimentaux sont proposés : une ligne de tourbillons (corotatifs ou contrarotatifs) ou un réseau bidimensionnel de tourbillons. Les écoulements sont générés grâce aux forces de Laplace. Le fluide est ionique (eau salé) et le forçage est fait en disposant un réseau d'aimants sous la cellule couplé à un courant électrique dans le liquide.

Selon la puissance électrique injectée, on obtient des écoulements plus ou moins ordonnés. Dans le cas de la ligne de tourbillons, on pourra étudier l'apparition de régimes oscillants et en particulier l'effet des interactions courtes ou moyennes distances entre tourbillons. Dans le cas du réseau 2D, on peut s'intéresser à la dynamique de tourbillons.

Ces systèmes ouvrent sur une grande variété de projets : transition vers le chaos, diffusion de colorant dans des régimes plus ou moins turbulent, dynamique de tourbillons (appariements, collisions, comportements collectifs…), régimes turbulents.

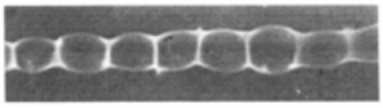
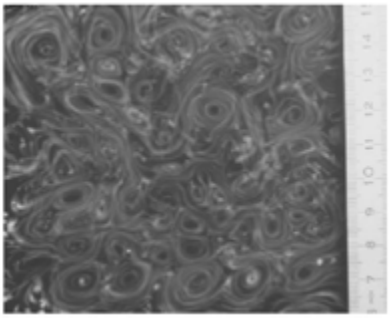


FIG. 4. Shadowgraph image of a system of 15 corotating vortices, produced by 30 magnets, with a fluid thickness of 3 mm.



Gouttes rebondissantes

Des expériences récentes ont montré la possibilité qu'ont des gouttes d'un fluide de rebondir sur un bain de ce même fluide, lorsque ce dernier oscille verticalement. Les oscillations du bain de fluide empêchent la coalescence de la goutte en effet, elles permettent de renouveler à chaque rebond le film d'air se trouvant entre la goutte et le bain.

Une fois en état de rebond, la goutte déforme le milieu : des ondes amorties apparaissent et perturbent la surface du bain. La goutte va pouvoir adopter différents types de comportements, en terme de périodicité du rebond, de marche spontanée en ligne droite à la surface du liquide. On peut montrer que le comportement des gouttes peut être discuté dans certains régimes en terme d'onde-particule. Dans un premier temps, les différents régimes seront identifiés avant de se focaliser vers un approfondissement choisi par les élèves. (en photo : le système expérimental et une photo de goutte rebondissant à la surface du liquide).



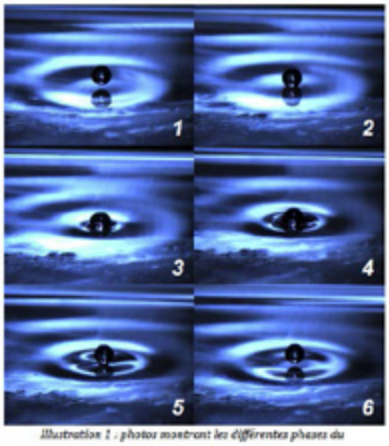


Illustration 1 : photos montrant les différentes phases du rebond d'une goutte pendant une période de forçage.

OPTION
MATIÈRE MOLLE

Des polymères aux solutions de tensioactifs, en passant par les élastomères, les gels, les cristaux liquides, les suspensions de particules et les mousses, la matière molle désigne tous les matériaux qui répondent fortement à une sollicitation externe, en particulier du point de vue mécanique. C'est un domaine de recherche très fortement connecté aux applications, à l'industrie, à la matière vivante et à la vie de tous les jours. Comment concevoir un bon adhésif ? Qu'est-ce qui stabilise une mousse au chocolat ? Comment contrôler la taille des gouttes dans un aérosol ? Comment le savon nous aide-t-il à faire la vaisselle ? Comment une cellule vivante se déplace-t-elle sur une paroi ? Ces questions et bien d'autres sont du ressort de la matière molle.

Le Modal de « Matière molle » s'attachera à explorer au laboratoire des phénomènes physiques en lien avec l'hydrodynamique des interfaces en travaillant sur des systèmes modèles avec un faible nombre de paramètres. Ceux-ci rendent ainsi possible la compréhension des mécanismes élémentaires à l'œuvre dans des systèmes plus complexes.

Nous proposons à des étudiants très motivés de contribuer à de réels projets de recherche au laboratoire. Les étudiants mettront au point les expériences, enregistreront des mesures à l'aide de photographie ou de vidéo ultra-rapide, et développeront des modèles en loi d'échelle permettant d'extraire les phénomènes physiques essentiels à la compréhension des expériences. Le projet se déroulera au sein de l'équipe « Hydrodynamique aux interfaces » du laboratoire LadHyX.

Nous mettrons également particulièrement l'accent sur la transmission des résultats obtenus. Une présentation orale des résultats obtenus sera organisée en cours de Modal.

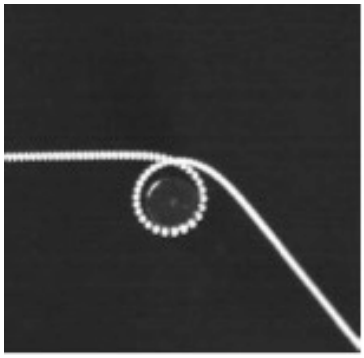


Fig. 1. *Vue du dessus de la trajectoire d'une goutte d'oxygène liquide en caléfaction, en orbite autour d'un aimant (photo Keyvan Piroird).*

Nous proposerons des sujets autour de l'hydrodynamique des interfaces. Ces dernières années, les étudiants s'étaient par exemple penchés sur :

- la manipulation magnétique de gouttes d'oxygène liquide en caléfaction.
- les mouvements de goutte en caléfaction sur des surfaces texturées.
- l'auto-propulsion, les rebonds, l'éclatement de gouttes induits par des gradients de confinement.
- la détergence dans un milieu confiné.
- mouvements de gouttes sur des fibres.

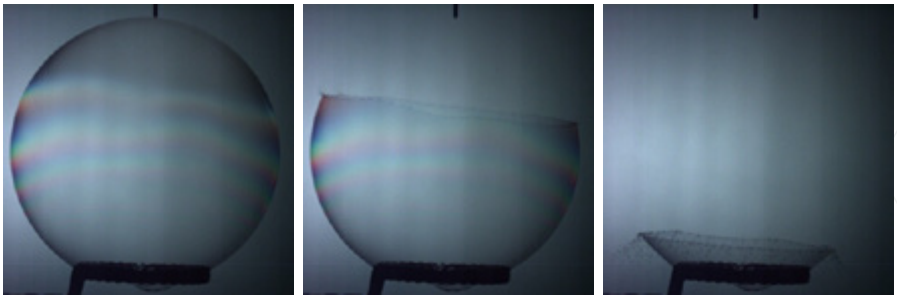


Fig. 2.

Quelques étapes de l'éclatement d'une bulle de savon de 5 cm de diamètre. La durée totale de l'ouverture est de l'ordre de quelques ms.

OPTION
PLASMONS DE SURFACE

Contexte et Objectifs

L'objectif de cet enseignement est de faire découvrir le phénomène de résonance de plasmons de surface [1]. Les applications de ce phénomène sont nombreuses, du développement de capteurs biologiques à la création de circuits photoniques miniatures. Deux expériences seront proposées aux étudiants. Le but de la première est d'étudier par spectroscopie la résonance de plasmons de surface.

La seconde expérience vise à utiliser la désexcitation de plasmons de surface pour créer un gradient de tension de surface et déplacer des gouttelettes par effet Marangoni. Ces deux expériences seront menées avec une grande autonomie en s'appuyant sur la bibliographie existante.

Spectroscopie de plasmons de surface

Cette expérience permet d'étudier le phénomène de résonance de plasmons de surface et d'appréhender comment il peut être exploité pour réaliser des capteurs. Une première expérience simple permettra de voir qu'une couche nanométrique d'or déposée sur un prisme peut apparaitre rouge, orange ou bleue selon l'angle d'incidence d'observation et l'épaisseur de la couche d'or.

Il faudra ensuite réaliser un montage plus complexe permettant de mesurer l'angle de résonance dans un large spectre. La figure 4 montre le type d'image qui devrait être obtenu ; la ligne sombre correspond à la courbe de dispersion des plasmons de surface. Ce montage sera ensuite utilisé pour réaliser des capteurs simples. On étudiera notamment l'influence sur la résonance de la température ambiante ou du dépôt de différents liquides sur la couche d'or.

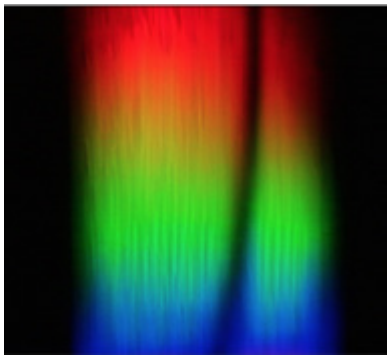


Fig. 1.
Observation de la résonance de plasmons de surface. L'abscisse correspond à l'angle d'incidence, l'ordonnée à la longueur d'onde. La raie sombre indique la résonance.

Effet Marangoni contrôlé par désexcitation de plasmons de surface

Cette seconde expérience permet d'étudier l'effet Marangoni induit par la diffusion de plasmons de surface. L'effet Marangoni décrit le transport de la matière le long d'un gradient de tension superficielle [12]. Ici, on exploite le fait que la tension superficielle dépend de la température et on utilise la diffusion de plasmons de surface pour créer un gradient de température (et donc de tension de surface) pour déplacer une gouttelette [17]. Le montage réalisé devrait permettre de déplacer de fusionner ou de scinder des gouttelettes, comme illustré sur la figure 2. Cette technique pourra également être utilisée pour trier des espèces chimiques ayant des tensions de surface différentes.

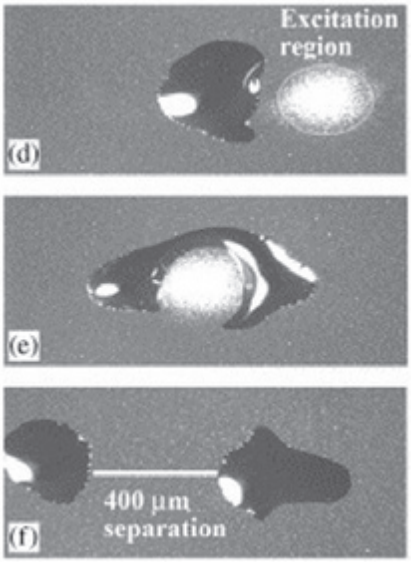
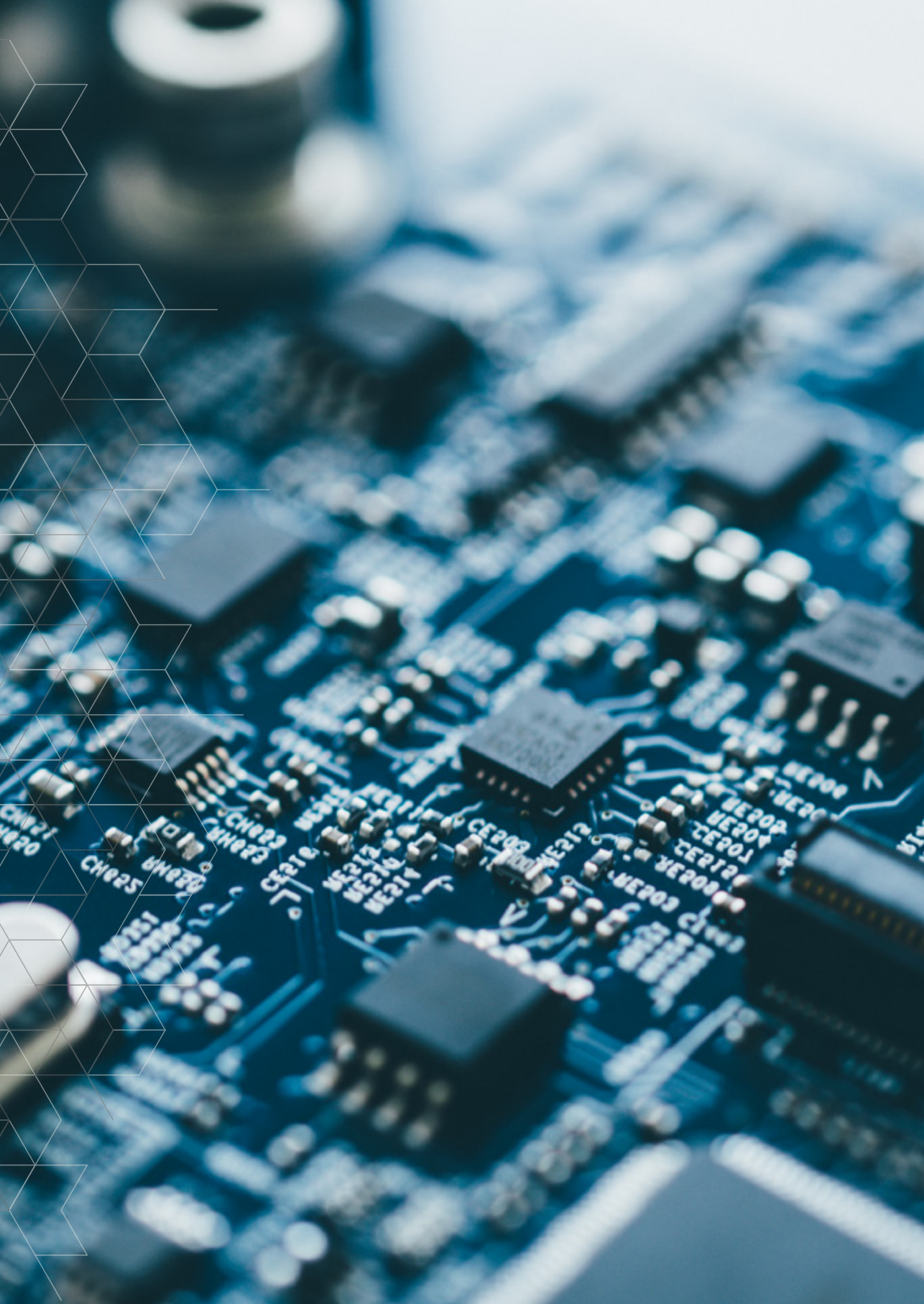


Fig. 2.
Exemple de manipulation de gouttelette. Une gouttelette est coupée en deux, puis une partie est déplacée. La tache lumineuse est produite par la diffusion des plasmons de surface.

[1] **R. H. Ritchie**. Plasma losses by fast electrons in thin films. Phys. Rev., 106 :874–881, Jun 1957.

[2] **L. E. Scriven and C. V. Sternling**. The marangoni effects. Nature,187(4733) :186–188, 07 1960.

[3] **R. H. Farahi, A. Passian, T. L. Ferrell, and T. Thundat**. Marangoni forces created by surface plasmon decay. Opt. Lett., 30(6) :616–618, Mar 2005.



MODAL DE PHYSIQUE/ ÉLECTRONIQUE

Jean-Charles Vanel
jean-charles.vanel@polytechnique.edu

Razvigor Ossikovski
razvigor.ossikovski@polytechnique.edu

Présentation des Thèmes expérimentaux proposés en 2025/2026

Le tableau suivant présente les thématiques proposées aux élèves en 2025/2026 suivant les différentes périodes. Il est important de noter que l'on ne peut garantir à un élève l'inscription dans une thématique précise. La répartition des élèves se fait en fonction de l'offre et de la demande et peut donc évoluer suivant le nombre d'élève inscrit puisque pour des raisons pratiques il faut au minimum 4 élèves sur un thème donné pour organiser l'enseignement correspondant. Enfin, vous trouverez dans la suite du document une description succincte ainsi qu'une plaquette pour chacune des thématiques proposées dans le cadre du MODAL « Electronique des signaux aux systèmes ».

DÉPARTEMENT		THÈMES	CODE	PÉRIODE			Numerus clausus
				P1	P2	P3	
				41M	42M	43M	
		Attention : On ne peut garantir à un élève l'inscription pour un thème précis. La répartition des élèves se fait en fonction de l'offre et de la demande.					
	O	Électronique pour l'Imagerie Atomique	PHY_43M04_EP			3	8
	P	IOT & Robot mobile autonome	PHY_43M05_EP			3	10
	R	Circuits logiques programmables (FPGA) et traitement du signal	PHY_43M06_EP			3	8

MODAL
ÉLECTRONIQUE DES SIGNAUX AUX SYSTÈMES

PHY_43M04_EP, PHY_43M05_EP, PHY_43M06_EP

Introduction et objectifs

Le Centre de travaux expérimentaux d'Electronique du Département de Physique organise un module d'enseignement expérimental (MODAL) sur :

L'électronique des signaux et systèmes
Cet enseignement a pour objectif de faire découvrir aux élèves un **domaine scientifique sous-jacent à un objet technologique** tout en privilégiant une orientation **projet** et une approche d'**ingénieur** basées sur un travail en laboratoire offrant un large espace de **créativité**. Il sera ainsi possible d'aborder expérimentalement la physique et les mathématiques cachées derrière des objets aussi usuels qu'un lecteur MP3, une tablette ou un smartphone.

Il s'agira plus précisément :

- de partir d'un problème d'ingénierie à résoudre (par exemple : transmission de données, reproduction du son, traitement de la parole ou d'images ou encore, comportement d'un robot) en se fixant un objectif et un cahier des charges,
- de dégager les concepts scientifiques et les outils opérationnels dans ce domaine, et de se les approprier en les appliquant dans le cadre du projet,
- de réfléchir au problème posé et de lui chercher des solutions argumentées (par vous-même, dans la littérature ou avec l'aide des enseignants),
- de déterminer la faisabilité de ces solutions et de les modéliser,
- de réaliser effectivement en laboratoire un système électronique opérationnel (de télécommunications, de traitement du signal ou encore de robotique…) et d'évaluer le résultat obtenu.

Tout au long de ce parcours, vous découvrirez par la pratique les questions les plus fondamentales de la physique, de l'électronique, du traitement du signal, de l'automatique et de la robotique. Le cursus proposé, d'une durée totale d'environ 60 heures

(10 séances), sera organisé en fonction du déroulement du projet en laboratoire qui en constituera le fil conducteur.

Organisation

Le travail en laboratoire, effectué en binôme, représentera la majeure partie du MODAL, et portera sur un thème à choisir parmi ceux qui seront spécifiquement ouverts lors de la série de MODAL « Electronique des signaux aux systèmes » que vous aurez choisie respectivement dans la période P3.

Pour ce travail, de type projet, vous disposerez d'une autonomie importante, en particulier dans la phase d'approfondissement, pour aboutir à la réalisation d'un système fonctionnel.

Le projet sera également l'occasion d'enrichir la vision du domaine, en faisant en laboratoire des digressions sur les à-côtés intéressants, et en ayant une approche expérimentale des divers aspects du thème d'application dans lequel s'insère le projet.

Vous finaliserez votre projet par un rapport écrit et une soutenance orale (effectués en binôme) comprenant une démonstration expérimentale de système fonctionnel.

Électronique pour l'Imagerie Atomique

PHY_43M04_EP

Ouverture en période P3, 4 binômes au maximum

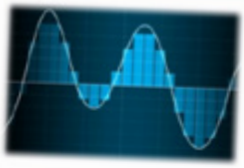
Ce travail comprend le développement et la mise en œuvre de circuits électroniques pour le pilotage d'un microscope à sonde locale de haute résolution spatiale. Au cours des travaux pratiques, les étudiants seront capables de mettre en œuvre leur projet, qui comprendra la manipulation des signaux analogiques (mesure, analyse, traitement et filtrage) et leur conversion (ADC et DAC). Cela impliquera l'utilisation d'amplificateurs opérationnels, de systèmes de rétroaction et des systèmes de motorisation à tubes piézoélectriques.

Ce travail comprendra également une programmation sous LabView et offrira la possibilité d'intégrer des cartes Arduino et FPGA. Les travaux pratiques seront accompagnés par des présentations d'introduction sur l'électronique de base et la manipulation des signaux analogiques pour une intégration plus facile des étudiants dans le projet. Ce modal a des visées applicatives en recherche et couvrira un large éventail de domaines différents de la physique, notamment l'électronique, la micro- et la nanoélectronique, la mécanique, l'optique et la mécanique quantique.

Modal électronique

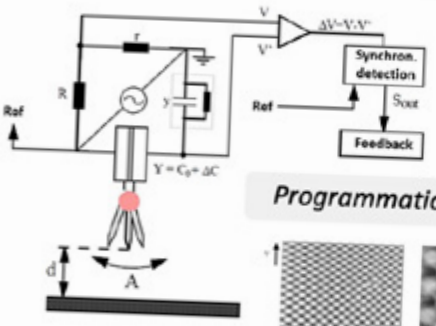
Électronique pour l'Imagerie Atomique

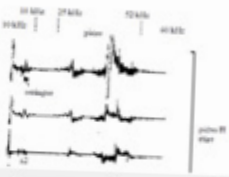
Traitement des signaux analogiques et numériques



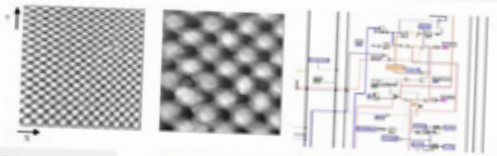
- Développement et mise en œuvre de circuits électroniques pour un microscope à sonde locale
- Amplification, filtrage, ADC ↔ DAC...

Amplificateurs et systèmes de rétroaction

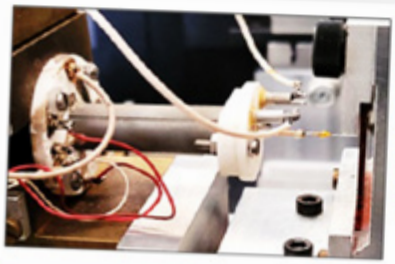




Programmation d'appareils avec LabView



Pilotage de moteurs piézoélectriques



Intégration Arduino et FPGA dans des appareils de mesure



IOT & Robot mobile autonome

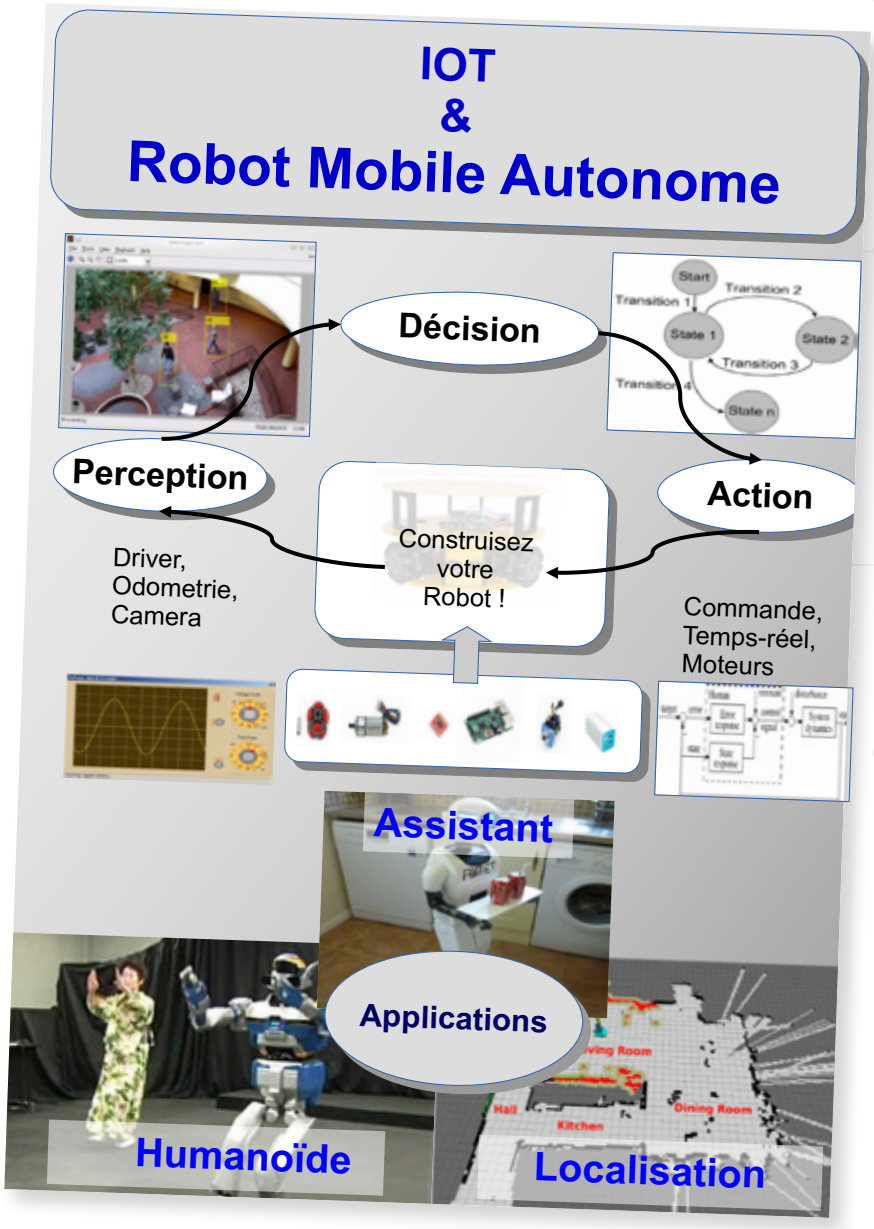
PHY_43M05_EP

Ouverture en période P3, 5 binômes au maximum

Dans cette thématique, on propose aux élèves de découvrir l'internet des objets et/ou de construire un robot mobile autonome. A travers la découverte du fonctionnement des cartes Arduino et/ou Raspberry Pi les projets choisis par les élèves pourrons être orienté plus vers les « IOT » ou vers la conception d'un robot mobile autonome capable de se déplacer par lui-même dans une pièce en tenant compte de son environnement à partir d'éléments mis à disposition.

Pour réaliser leur objectif les élèves obtiendront un système muni de capteurs variés (Infrarouge, Ultra-sons, Magnétiques, Optiques, Caméra) et devront étudier suivant les cas la perception de l'environnement, les systèmes d'exploitations embarqués afin d'élaborer une stratégie de commande, le système de motorisation (robot). Que vous soyez un novice ou déjà un utilisateur averti de ce type d'objet, ce MODAL basé sur un tutoriel vous permettra de développer un objet connecté complet et/ou un robot mobile autonome!

Les années précédentes, les projets ont permis de suivre un circuit, explorer un labyrinthe, poursuivre une cible mobile, etc. Il est tout à fait envisageable d'avoir un système capable de suivre une personne, obéir à une commande vocale ou transporter des éléments.

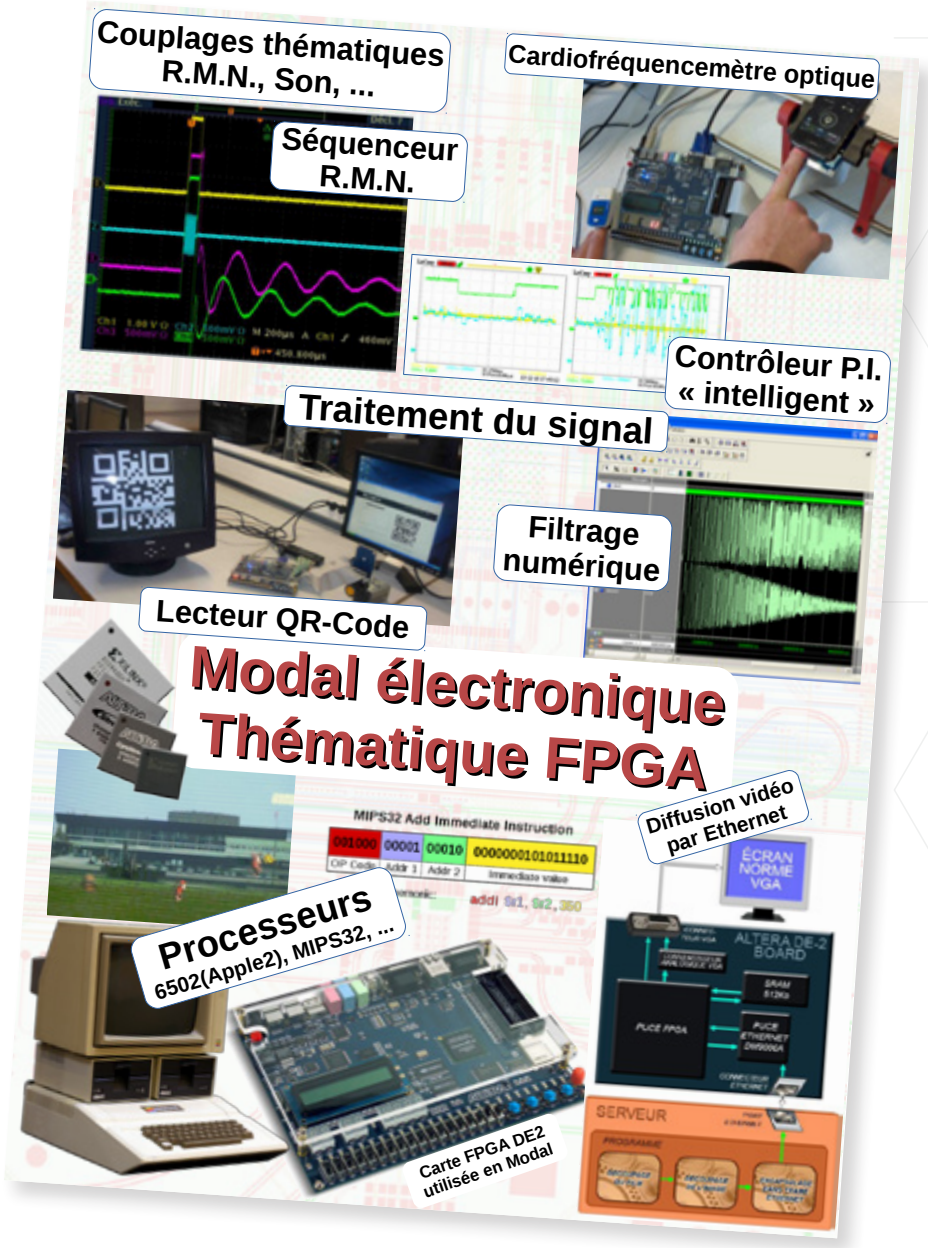

IOT
&
Robot Mobile Autonome
Décision
Perception
Action
Start
Transition 1
Transition 2
State 1
State 2
Transition 3
State n
Driver,
Odometrie,
Camera
Construisez
votre
Robot !
Commande,
Temps-réel,
Moteurs
Assistant
Applications
Humanoïde
Localisation
Living Room
Hall
Kitchen
Dining Room

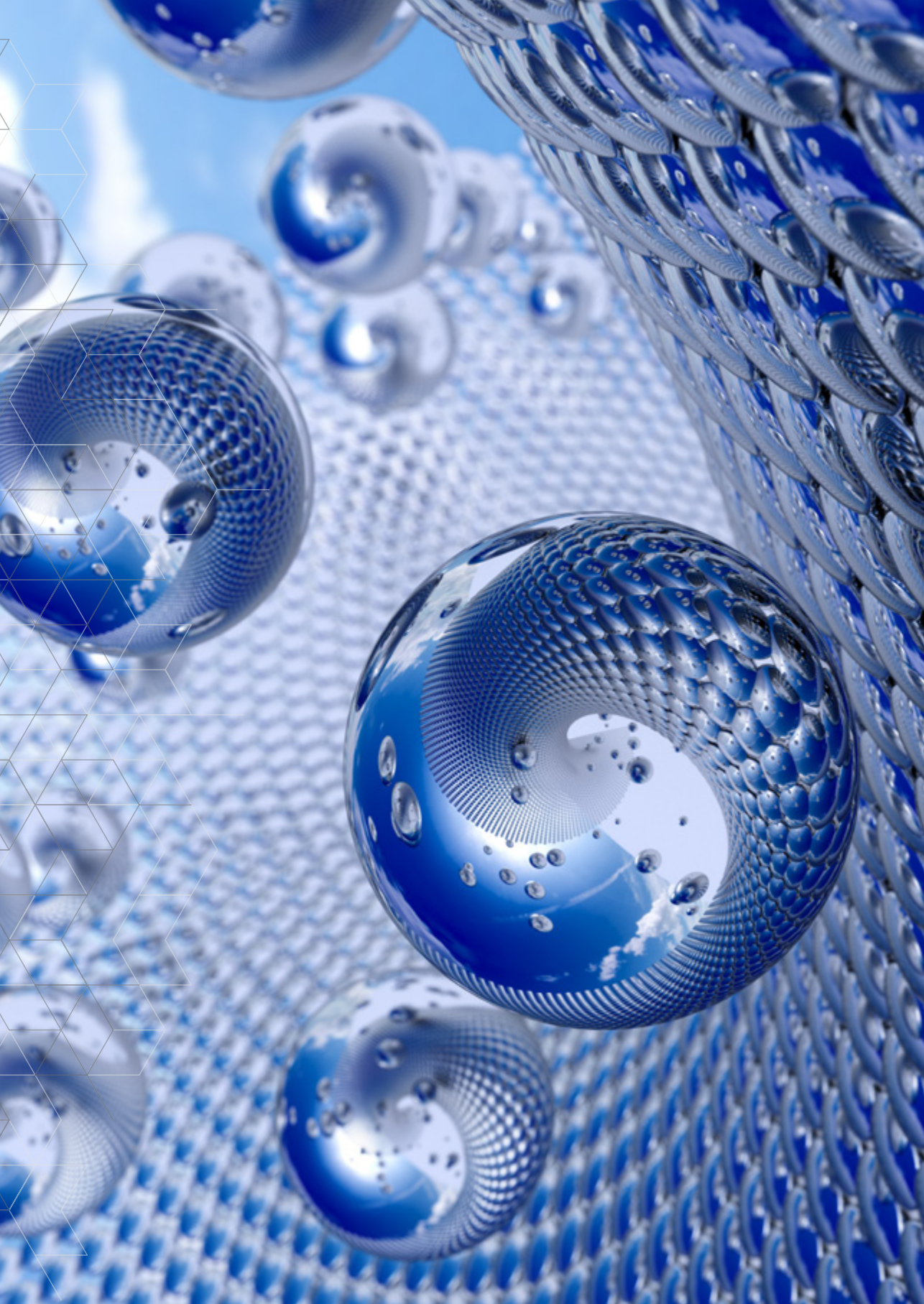
Circuits logiques programmables (FPGA) et traitement du signal

PHY_43M06_EP (PHY 473R)

Ouverture en période P3, 4 binômes au maximum

Le thème intitulé Circuits logiques programmables (FPGA) se propose de concevoir des circuits logiques complexes mettant en œuvre plusieurs milliers, voire centaines de milliers de transistors, en conservant des temps de développement raisonnables. A travers une chaîne complète de CAO (conception assistée par ordinateur) de circuits pré-diffusés programmables FPGA (Field Programmable Gate Array), les élèves réalisent et testent une application en vraie grandeur liée au traitement du signal : analyseur de spectre, égaliseur audio, jeu vidéo, etc.


Couplages thématiques
R.M.N., Son, ...
Séquenceur
R.M.N.
Cardiofréquencemètre optique
Contrôleur P.I.
« intelligent »
Traitement du signal
Filtrage
numérique
Lecteur QR-Code
Modal électronique
Thématique FPGA
MIPS32 Add Immediate Instruction
Diffusion vidéo
par Ethernet
ÉCRAN
NORME
VGA
ALTERA DE-2
BOARD
SERVEUR
Processeurs
6502(Apple2), MIPS32, ...
Carte FPGA DE2
utilisée en Modal



MODAL DE PHYSIQUE/ MÉCANIQUE

Guilhem Gallot
guilhem.gallot@polytechnique.edu

DÉPARTEMENT		THÈMES	CODE	PÉRIODE			Numerus clausus
				P1	P2	P3	
				41M	42M	43M	
	A	Tournoi International de Physique (IPT)	MEC_41M01_EP	1			6
			PHY_42M01_EP		2		6

MODAL
TOURNOI INTERNATIONAL DE PHYSIQUE

Numerus Clausus : 6 élèves

Ce Modal s'adresse aux élèves sélectionnés qui participeront au Tournoi International de Physique qui se déroulera en 2023.

L'École polytechnique, avec le soutien de la Société française de physique, participe à cette compétition pour la onzième année consécutive et a remporté le tournoi en 2014, 2019 et 2022.

Les séances de Modal seront consacrées à la résolution de plusieurs problèmes expérimentaux de physique.

Cette compétition se distingue d'un concours classique où les participants doivent donner « la bonne réponse », et s'apparente davantage à un travail de recherche. Ici, les étudiants réfléchissent à des problèmes « ouverts », c'est-à-dire des problèmes qui n'ont pas de solution exacte et pour lesquels plusieurs démarches de résolution sont possibles.

See more at :
http://www.polytechnique.edu/fr/content/lx-sur-le-podium-du-tournoi-international-des-jeunes-physiciens#sthash.mOqr8rkc.dpuf



Centre oly-media

Photos : Thinkstock 2018/Getty Images 2019



ÉCOLE POLYTECHNIQUE
91128 PALAISEAU CEDEX
www.polytechnique.edu