

Master Mathématiques et Applications

Sorbonne Université

2025 – 2026



Table des matières

1	Master 1	7
1.1	Objectifs	7
1.2	Choix des unités d'enseignement du M1	7
1.3	Informations pratiques	8
1.4	Orientation et insertion professionnelle (OIP)	8
1.4.1	Directrices et directeurs d'études (DE)	8
1.4.2	UE obligatoire UM4MAOIP (3 ECTS)	9
1.4.3	Stages et TER industriels	9
1.5	Liste des UE	9
1.6	Règle ABCD et incompatibilités	13
1.7	Description des UE du S1	14
1.8	Description des UE du S2	20
2	Master 2, Parcours Mathématiques fondamentales	39
2.1	Objectifs et descriptions	39
2.2	Débouchés professionnels	39
2.3	Organisation	39
2.4	Publics visés, prérequis	40
2.5	Description des UE	40
2.6	Responsables et site	49
3	Master 2, Parcours Probabilités et modèles aléatoires	51
3.1	Objectifs et descriptions	51
3.2	Débouchés professionnels	51
3.3	Organisation	51
3.4	Publics visés, prérequis	52
3.5	Description des UE	53
3.6	Responsable et site	57
4	Master 2, Parcours Probabilités et Finance	59
4.1	Objectifs et descriptions	59
4.2	Débouchés professionnels	59
4.3	Organisation	59
4.4	Publics visés, prérequis	60
4.5	Liste des UE	60
4.6	Responsable et site	66

5	Master 2, Parcours Mathématiques de la modélisation	67
5.1	Objectifs et descriptions	67
5.2	Débouchés professionnels	68
5.3	Organisation (hors EDProba)	68
5.4	Publics visés, prérequis	69
5.5	Description des Majeures (hors EDProba)	70
5.6	Description des UE	73
5.6.1	Bloc 1 (12 ECTS)	73
5.6.2	Bloc 2 (18 ECTS)	74
5.6.3	Bloc 3 (12 ECTS)	74
5.7	UE proposées par majeure	76
5.7.1	UE proposées pour la Majeure ANEDP	76
5.7.2	UE proposées pour la Majeure COCV	76
5.7.3	UE proposées pour la Majeure HPC	77
5.7.4	UE proposées pour la Majeure SDEDP	77
5.7.5	UE proposées pour la Majeure MBIO	77
5.7.6	UE proposées pour la Majeure MEM	78
5.8	Majeure EDProba	78
5.8.1	Bloc 1 : analyse des EDP	79
5.8.2	Bloc 2 : probabilités	79
5.8.3	Bloc 3 : EDP et Probalilités	79
5.8.4	Bloc 4 : Stage	79
6	Master 2, Parcours Ingénierie mathématique	81
6.1	Objectifs et descriptions	81
6.2	Débouchés professionnels	82
6.3	Organisation	82
6.4	Publics visés, prérequis	84
6.5	Description des UE	85
6.6	Responsables et sites	96
7	Master 2, Parcours Statistique, Apprentissage et Algorithmes	97
7.1	Objectifs et description	97
7.2	Débouchés professionnels	97
7.3	Publics visés, prérequis	98
7.4	Organisation	98
7.4.1	Pré-rentrée	98
7.4.2	Premier semestre	99
7.4.3	Second semestre	99
7.5	Description des UE	100
7.5.1	Pré-rentrée	100
7.5.2	Premier semestre (tronc commun)	101
7.5.3	Premier semestre (spécialisation)	103
7.5.4	Premier semestre (label intensif maths-info – ex-M2A)	104
7.5.5	Second semestre (cours d’ouverture)	107
7.5.6	Second semestre (stage)	114
7.6	Responsables et site	114

8	Master 2, Parcours Agrégation de Mathématiques	115
8.1	Objectifs	115
8.2	Débouchés professionnels	115
8.3	Organisation	116
8.4	Publics visés, prérequis	116
8.5	Liste et description des UE du parcours	117
8.6	Déroulement du concours	117
8.7	Responsables et site	118
9	Parcours Sciences des données (SCDA et SCDI)	119
9.1	Objectifs et description	119
9.2	Débouchés professionnels	119
9.3	Organisation	119
9.4	M1 Sciences des données avancées (SCDA)	120
9.4.1	Publics visés, prérequis	120
9.4.2	Liste des UE	120
9.5	M1 Sciences des données pour l'ingénieur·e (SCDI)	121
9.5.1	Publics visés, prérequis	121
9.5.2	Liste des UE	122
9.5.3	Annexe : description des UE spécifiques à l'ISUP	122
9.6	Responsables et sites	124
10	Mobilité internationale pour le Master	125
10.1	Objectifs et descriptions	125
10.2	Quelques conseils supplémentaires	125
10.3	Les programmes Erasmus	126
10.4	Les doubles diplômes	126
10.4.1	Politecnico di Milano	126
10.5	Responsables et sites	127
11	Renseignements administratifs	129
11.1	Scolarité	129
11.2	Inscriptions	129
11.3	Calendrier du master	130

Chapitre 1

Master 1

1.1 Objectifs

Le Master 1 est la première année du master au cours de laquelle les étudiants doivent d'abord acquérir ou revoir des éléments fondamentaux pour la poursuite d'un cursus mathématique de haut niveau. Un choix assez large d'UE (unités d'enseignement) dites *fondamentales*, enseignées au premier semestre, doit permettre ce type d'acquisition. Par ailleurs, des UE *d'orientation*, enseignées au second semestre, permettent aux étudiants de faire un choix d'orientation en préparation de la seconde année du master, et du choix de l'une des sept spécialités du Master 2, la seconde année du master.

1.2 Choix des unités d'enseignement du M1

Au premier semestre (S1), chaque étudiant-e doit choisir plusieurs UE fondamentales, trois UE de 9 ECTS, ou une UE de 9 ECTS et trois UE de 6 ECTS. Les 3 ECTS restants pour faire un semestre de 30 ECTS sont constitués comme suit :

- pour les étudiant-e-s suivant l'enseignement en présence, une UE de langue, à choisir parmi anglais¹, allemand, chinois, espagnol, russe² et français langue étrangère³ (FLE) de 3 ECTS,
- pour les étudiant-e-s inscrit-e-s en enseignement à distance, une UE d'anglais de 3 ECTS.

Attention, tout choix de langue différent de l'anglais impliquera des démarches complémentaires auprès du département des langues⁴, de la part de chaque étudiant-e. Les renseignements sont disponibles auprès des gestionnaires pédagogiques du M1.

Au second semestre (S2), l'UE d'Orientation et insertion professionnelle (OIP) de 3 ECTS est obligatoire en présence comme à distance. Pour compléter à 30 ECTS, chaque étudiant-e peut choisir

- trois UE de 9 ECTS,

1. <https://sciences.sorbonne-universite.fr/formation-sciences/offre-de-formation/enseignement-des-langues/anglais-en-master>

2. <https://sciences.sorbonne-universite.fr/formation-sciences/offre-de-formation/enseignement-des-langues/autres-langues-que-langlais-allemand>

3. <https://sciences.sorbonne-universite.fr/formation-sciences/offre-de-formation/enseignement-des-langues/francais-langue-etrangere-fle>

4. <https://sciences.sorbonne-universite.fr/formation-sciences/offre-de-formation/enseignement-des-langues>

- deux UE de 9 ECTS, une UE de 6 ECTS et une UE de 3 ECTS,
- une UE de 9 ECTS et trois UE de 6 ECTS,
- quatre UE de 6 ECTS et une UE de 3 ECTS (sauf décision des responsables pédagogiques).

Le choix des UE de M1 doit se faire en fonction des goûts, des acquis antérieurs, et bien entendu en cohérence avec les souhaits d'orientation en M2. Nous ne proposons pas de parcours-types, et chaque étudiant-e est libre de composer son contrat pédagogique, en accord avec sa directrice ou son directeur d'études (voir plus loin) et les responsables pédagogiques du M1, et modulo les contraintes d'organisation (compatibilités d'emplois du temps, par exemple).

Néanmoins, afin d'éviter des parcours pédagogiques thématiquement trop étroits, cette liberté dans la composition du contrat pédagogique est encadrée par quelques restrictions qui seront détaillées au paragraphe 1.6.

1.3 Informations pratiques

Laurent Boudin⁵ et Vincent Humilière⁶ sont les responsables du Master 1. Ils en coordonnent l'organisation et dirigent l'équipe pédagogique chargée de la mise en place des enseignements.

Sur le site web du Master⁷, on trouvera des pages dédiées à chacun des quatre parcours du M1 : général, Calcul haute performance (HPC), Sciences des données avancé (SCDA), Sciences des données pour l'ingénieur-e (SCDI). Des informations importantes sont également communiquées par le biais du site de vie du M1 sur Moodle 2025⁸ (le site n'est actif qu'en fin de l'année universitaire précédente), et accessible uniquement au public inscrit administrativement en première année de master.

Des renseignements pratiques sur les inscriptions et le calendrier (page 131) du Master 1 sont disponibles au chapitre 11.

1.4 Orientation et insertion professionnelle (OIP)

L'orientation et l'insertion professionnelle des étudiants de master font l'objet d'une attention particulière à Sorbonne Université. Le responsable de l'OIP au sein du département du master de mathématiques est Bruno Després⁹.

1.4.1 Directrices et directeurs d'études (DE)

Dès son inscription pédagogique, chaque étudiant-e de M1 doit choisir un-e DE parmi une quinzaine d'enseignants-chercheurs (UE virtuelle mais obligatoire UM4MAODE). Chaque DE est en charge d'un groupe d'une quinzaine d'étudiants de M1 qu'il suit individuellement tout au long de l'année. Après une prise de contact en septembre, le DE échange régulièrement avec les étudiants de son groupe, qui lui communiquent leurs

5. laurent.boudin@sorbonne-universite.fr

6. vincent.humilieri@imj-prg.fr

7. <https://sciences.sorbonne-universite.fr/formation-sciences/offre-de-formation/masters/master-maths-applications>

8. <https://moodle-sciences-25.sorbonne-universite.fr/>

9. bruno.despres@sorbonne-universite.fr

résultats, lui font part de leur progression et de leurs difficultés éventuelles. Le DE conseille les étudiants pour leurs choix de cours au début de chaque semestre, ainsi que pour leur choix de M2, afin qu'ils empruntent le parcours le plus adapté à leur projet professionnel. À ce titre, le DE est aussi le responsable de son groupe pour l'UE UM4MAOIP pour les étudiant-e-s qui doivent la passer au second semestre.

Remarque : les redoublants ayant déjà validé l'UE d'OIP bénéficient d'un-e DE et doivent donc aussi faire un choix dans l'UE virtuelle UM4MAODE.

1.4.2 UE obligatoire UM4MAOIP (3 ECTS)

Tous les étudiants doivent obligatoirement s'inscrire à l'UE d'Orientation et insertion professionnelle UM4MAOIP (3 ECTS), au **second** semestre, si elle n'a pas déjà été précédemment validée. Tout au long du **premier** semestre, ils sont invités à réfléchir à leur orientation et à leur projet professionnel à l'occasion de différentes rencontres avec le milieu professionnel (conférences métiers, Forum Entreprises & Mathématiques, Atrium des métiers). Leur participation active à ces événements les aidera à réaliser les deux exposés-dossiers nécessaires pour valider l'UE d'OIP. Ces travaux seront évalués par les DE.

Remarque : Les étudiants suivant un parcours atypique (par exemple, reprenant leurs études après avoir exercé une activité professionnelle) peuvent faire une demande de dispense de l'UE d'OIP avant la fin du premier semestre. Cette demande doit être motivée par écrit auprès de leur DE, et des responsables de l'UE d'OIP et du M1.

1.4.3 Stages et TER industriels

Les étudiants de M1 sont vivement encouragés à établir un premier contact avec le monde de l'entreprise avant l'année décisive de M2. Pour ce faire, ils peuvent

- effectuer un stage, en dehors des semaines de cours. Cependant, il faut au préalable faire une demande de convention de stage auprès du responsable OIP du master. Avec leur accord, les formulaires de convention de stage sont ensuite délivrés par le secrétariat du M1. Les modalités sont détaillées sur le site web du master.
- effectuer un Travail d'Étude et de Recherche (TER) industriel, au cours du second semestre, sur un sujet proposé par un partenaire industriel et encadré par une enseignante-chercheuse ou un enseignant-chercheur de Sorbonne Université.

1.5 Liste des UE

TABLE 1.1 – Liste des UE enseignées au premier semestre (par code)
*Les enseignements marqués d'un astérisque * peuvent être suivis à distance.*

INTITULÉ	SEM.	ECTS	UM4MA...
Géométrie affine et projective *	1er	6	201
Algèbre linéaire effective *	1er	6	204
Espaces métriques, de Banach, de Hilbert *	1er	6	205
Analyse complexe et applications *	1er	6	208
Algèbre commutative, introduction à la géométrie algébrique *	1er	9	303
Bases d'analyse fonctionnelle *	1er	9	305
Fondements des méthodes numériques *	1er	9	306
Analyse complexe avancée *	1er	9	308
Probabilités approfondies *	1er	9	311
Statistique *	1er	9	315
Algorithmes et structures de données pour la programmation	1er	9	316
Géométrie différentielle *	1er	9	322
Topologie algébrique *	1er	9	359

Chaque UE a un fonctionnement propre construit sur le modèle suivant, dépendant du nombre d'ECTS qui lui est attribué.

Une UE de 9 ECTS : 84 heures d'enseignement pour les étudiants, soit 36 heures de cours (en alternance chaque semaine, 2 ou 4 heures, pendant 12 semaines), 48 heures de TD ou TP (4 heures hebdomadaires pendant 12 semaines).

Une UE de 6 ECTS : 60 heures d'enseignement pour les étudiants, soit 24 heures de cours (2 heures hebdomadaires pendant 12 semaines), 36 heures de TD/TP (en alternance chaque semaine, 2 ou 4 heures, pendant 12 semaines), sauf pour deux UE ayant un fonctionnement d'UE de 9 ECTS pendant 8 à 9 semaines.

Une UE de 3 ECTS : 30 heures d'enseignement pour les étudiants, soit 12 heures de cours, 18 heures de TD ou TP, le fonctionnement par semaine dépendant de chaque UE.

Hormis les UE à 3 ECTS, considérées comme des UE de culture générale, et non comme des UE de spécialisation, les UE du second semestre doivent être choisies en fonction des spécialités envisagées en M2. Le tableau suivant indique les choix recommandés. Les sept parcours de M2 proposés sont :

agr Agrégation	mod Mathématiques de la modélisation
fin Probabilités et finance	pro Probabilités et modèles aléatoires
ing Ingénierie mathématique	sta Statistique, apprentissage et algorithmes
maf Mathématiques fondamentales	

Pour le parcours *Agrégation*, il est recommandé de faire dans l'année au moins un cours à dominante analyse, et un cours à dominante algèbre. À ce titre, pour le S1, on peut recommander de choisir entre

- UM4MA305+UM4MA201+UM4MA204+UM4MA208,
- UM4MA308+UM4MA201+UM4MA204+UM4MA205.

TABLE 1.2 – Liste des UE enseignées au second semestre (par code)

*Les enseignements marqués d'un astérisque * peuvent être suivis à distance.*

INTITULÉ	SEM.	ECTS	UM4MA...
Mouvement brownien	2nd	3	181
Introduction aux catégories	2nd	3	182
Analyse de Fourier discrète, appl. en théorie du signal et en image *	2nd	3	183
Théorie de Galois *	2nd	6	220
Analyse fonctionnelle approfondie et calcul des variations *	2nd	6	225
Théorie analytique des nombres *	2nd	6	233
Théorie algébrique des nombres *	2nd	6	234
Cryptologie, cryptographie algébrique *	2nd	6	235
Processus de sauts *	2nd	6	236
Histoire d'un objet mathématique *	2nd	6	239
Géométrie algébrique effective *	2nd	6	243
TER (Travail d'étude et de recherche)	2nd	6	245
Systèmes dynamiques *	2nd	6	248
Calcul scientifique pour les grands systèmes linéaires *	2nd	6	253
Stage en entreprise pour mathématicien-ne-s	2nd	6	255
Programmation en C++	2nd	6	256
Analyse convexe *	2nd	6	257
Introduction à la théorie du contrôle en dimension finie	2nd	6	258
Introduction aux surfaces de Riemann *	2nd	6	260
Modèles mathématiques en neurosciences	2nd	6	261
Optimisation numérique et science des données *	2nd	6	266
Statistique avancée, grande dimension et données massives *	2nd	6	273
Bases de l'analyse de données	2nd	6	277
Probabilités numériques	2nd	6	278
Martingales et contrôle stochastique	2nd	6	280
Groupes et algèbres de Lie *	2nd	9	324
Approximation des EDP elliptiques et simulation numérique *	2nd	9	329
Théorie des distributions *	2nd	9	330
Modèles stochastiques pour la finance *	2nd	9	365
Bases de l'apprentissage statistique	2nd	9	376
Statistique computationnelle et <i>machine learning</i>	2nd	9	379
Méthodes classiques pour les EDP, modélisation *	2nd	9	384

TABLE 1.3 – UE du second semestre et parcours de M2

INTITULÉ	fin	ing	maf	mod	pro	sta	agr	ECTS	N°
Mouvement brownien		•	•	•		•	•	3	181
Introduction aux catégories	•	•	•	•	•	•	•	3	182
Analyse de Fourier discrète	•	•	•		•	•	•	3	182
Théorie de Galois			•					6	220
Analyse fonctionnelle approfondie et calcul des variations				•			•	6	225
Théorie analytique des nombres			•				•	6	233
Théorie algébrique des nombres			•					6	234
Cryptologie, cryptographie algébrique			•				•	6	235
Processus de sauts	•	•			•	•		6	236
Histoire d'un objet mathématique			•				•	6	239
Géométrie algébrique effective			•				•	6	243
TER (Travail d'étude et de recherche)	•	•	•	•	•	•		6	245
Systèmes dynamiques			•	•			•	6	248
Calcul scientifique pour les grands systèmes linéaires		•		•				6	253
Stage en entreprise pour mathématiciens	•	•		•	•	•		6	255
Programmation en C++	•	•		•	•	•		6	256
Analyse convexe	•			•		•	•	6	257
Introduction à la théorie du contrôle en dimension finie				•			•	6	258
Introduction aux surfaces de Riemann			•					6	260
Modèles mathématiques en neurosciences				•	•			6	261
Optimisation numérique et science des données		•		•		•	•	6	266
Statistique avancée, grande dimension et données massives	•	•			•	•		6	273
Bases de l'analyse de données	•	•		•	•	•		6	277
Probabilités numériques	•	•			•	•	•	6	278
Martingales et contrôle stochastique	•	•			•			6	280
Groupes et algèbres de Lie			•				•	9	324
Approximation des EDP elliptiques et simulation numérique	•	•		•	•		•	9	329
Théorie des distributions			•	•			•	9	330
Modèles stochastiques pour la finance	•	•			•	•		9	365
Bases de l'apprentissage statistique		•				•		9	376
Statistique computationnelle et <i>machine learning</i>	•	•			•	•	•	9	379
Méthodes classiques pour les EDP, modélisation			•	•			•	9	384

1.6 Règle ABCD et incompatibilités

La règle ABCD vise à éviter des choix de cours thématiquement trop étroits.

Des points ont été attribués à un certain nombre de cours dans quatre catégories : A, B, C et D. Ces catégories correspondent aux thématiques suivantes : A=aléatoire, B=analyse, C=algèbre, D=informatique. La table 1.4 ci-dessous donne le détail du nombre de points de chaque cours dans chaque catégorie. Les cours qui ne figurent pas dans cette table n'entrent pas en ligne de compte dans la règle.

TABLE 1.4 – Points attribués aux cours dans les catégories A, B, C et D.

INTITULÉ	N°	A	B	C	D
Algèbre linéaire effective	204			3	
Espaces métriques, de Banach et de Hilbert	205		6		
Théorie de Galois	220			6	
Analyse fonctionnelle approfondie et calcul des variations	225		6		
Théorie analytique des nombres	233			6	
Théorie algébrique des nombres	234			6	
Cryptologie, cryptographie algébrique	235			6	
Processus de sauts	236	6			
Géométrie algébrique effective	243			3	
Calcul scientifique pour les grands systèmes linéaires	253				6
Programmation en C++	256				6
Introduction à la théorie du contrôle en dimension finie	258		6		
Modèles mathématiques en neurosciences	261	3	3		
Statistique avancée, grande dimension et données massives	273	6			
Bases de l'analyse de données	277	6			
Probabilités numériques	278	3			3
Martingales et contrôle stochastique	280	6			
Algèbre commutative, introduction à la géométrie algébrique	303			9	
Bases d'analyse fonctionnelle	305		9		
Fondements des méthodes numériques	306		6		3
Probabilités approfondies	311	9			
Statistique	315	9			
Algorithmes et structures de données pour la programmation	316				9
Approximation des EDP elliptiques et simulation numérique	329		3		6
Théorie des distributions	330		9		
Modèles stochastiques pour la finance	365	9			
Bases de l'apprentissage statistique	376	3			6
Statistique computationnelle et <i>machine learning</i>	379	3			6
Méthodes classiques pour les EDP, modélisation	384		9		

Règle 1. Dans chacune des catégories A, B, C, la somme des points des cours choisis ne doit pas dépasser 33.

Règle 2. En catégorie D, la somme des points des cours choisis ne doit pas dépasser 18. Cette limite peut être étendue exceptionnellement à 24, après avis favorable concerté entre DE et responsables pédagogiques du M1, suivant le projet d'orientation de l'étudiant-e.

À la règle ABCD s'ajoutent les deux incompatibilités suivantes :

- UM4MA305 Bases d'analyse fonctionnelle et UM4MA205 Espaces métriques, de Banach et de Hilbert,
- UM4MA308 Analyse complexe avancée et UM4MA208 Analyse complexe et applications.

1.7 Description des UE du premier semestre

UM 4MA 201 Géométrie affine et projective (6 ECTS)

Responsable : Ilia Itenberg

mél : ilia.itenberg@imj-prg.fr

url : <https://webusers.imj-prg.fr/~ilia.itenberg/>

Objectifs de l'UE : Ce cours, de nature généraliste, ouvre à la fois aux thèmes "Algèbre et géométrie" du M2 et à ceux de l'agrégation. On y étudiera les liens entre les géométries affine, projective et euclidienne, en mettant l'accent sur les différents groupes de transformations qui caractérisent chacune de ces géométries. De plus, nous utiliserons des outils élémentaires de géométrie différentielle (espaces tangents, position par rapport à l'espace tangent). Le cours offrira aussi une ouverture vers la géométrie algébrique.

Prérequis : Connaissance en algèbre et géométrie du niveau licence.

Thèmes abordés : Géométrie affine : applications affines, barycentres, groupe affine. Géométrie projective : complété projectif d'un espace affine, repères projectifs, coordonnées homogènes, homographies, groupe projectif, birapport. Formes bilinéaires et formes quadratiques. Géométrie euclidienne : le groupe des isométries affines et le groupe des déplacements. Géométrie différentielle : sous-variétés données par des équations polynomiales, espaces tangents.

UM 4MA 204 Algèbre linéaire effective et polynômes d'endomorphismes (6 ECTS)

Responsables : Antonin Guilloux, Elias Tsigaridas

mél : antonin.guilloux@sorbonne-universite.fr

Objectifs de l'UE : Nous revisiterons des notions d'arithmétique et d'algèbre linéaire de Licence, avec un point de vue effectif : quels sont les objets algébriques calculables, comment les calculer et à quel coût ? Le but est de renforcer et approfondir les connaissances en algèbre linéaire, tout en introduisant l'approche effective ; nous ne chercherons pas une programmation optimale des algorithmes et le cours est accessible sans aucun bagage informatique. Cette approche permet d'illustrer concrètement les objets fondamentaux de l'algèbre.

Ce cours constitue notamment une bonne préparation à l'Agrégation externe de Mathématiques et en particulier une introduction à l'option "Algèbre effective et calcul formel". Il pourra utilement être complété par des cours du second semestre (en particulier "Géométrie algébrique effective", mais aussi "Théorie des nombres" ou "Cryptographie"). Il permet aussi d'envisager par la suite un Master de Mathématiques fondamentales ou des débouchés en Mathématiques-Informatique : cryptologie, robotique, traitement du signal...

Prérequis : Connaissances générales en algèbre de niveau L3.

Thèmes abordés :

1. **Rudiments de complexité**

Nombre d'opérations dans \mathbb{Z} ou un corps fini (complexité arithmétique), nombre d'opérations machine (cas simples), taille (espace mémoire) des objets calculés.

2. **Algorithme d'Euclide et applications**

Rappels sur l'algorithme d'Euclide étendu : calculs du pgcd, des coefficients de Bézout. Applications et extensions : théorème chinois; Algorithme de Berlekamp-Massey et recherche de récurrences linéaires; Suites de Sturm.

3. **Calcul matriciel et théorie des \mathbb{Z} -modules**

échelonnement effectif des matrices à coefficients dans un corps ou un anneau factoriel. Forme normale d'Hermite, de Smith. Applications et extensions : théorème des facteurs invariants, \mathbb{Z} -modules de type fini.

4. **Polynômes d'endomorphismes et invariants en algèbre linéaire** Calcul des éléments caractéristiques d'un endomorphisme : polynôme annulateur, polynôme caractéristique, polynôme minimal. Décompositions (Frobenius, Jordan, Jordan-Chevalley et Dunford). Applications et extensions : matrices compagnons et formes quadratiques d'Hermite.

5. **Autres applications**

Nous illustrerons ce cours par des applications dans des domaines divers : théorie des nombres, théorie du contrôle, optimisation, études des racines réelles de polynômes...

UM 4MA 205 **Espaces métriques, de Banach et de Hilbert (6 ECTS)**

Responsable : Ayman Moussa
 mél : ayman.moussa@sorbonne-universite.fr
 url : <http://www.ljll.fr/moussa>

Ce cours est la première partie de l'UE 4MA305 décrite ci-dessous (jusqu'aux espaces de Hilbert inclus).

Ce cours est ouvert aux étudiants à distance ou en présence uniquement avec l'accord préalable des responsables pédagogiques.

UM 4MA 208 **Analyse complexe et applications (6 ECTS)**

Responsable : Vincent Michel
 mél : vincent.michel@imj-prg.fr

Objectifs de l'UE : Ce cours propose de contribuer avec l'analyse complexe à l'élaboration d'un socle pour l'analyse utile aussi bien aux agrégatifs qu'aux étudiants se destinant à la recherche. L'accent sera mis autant sur l'utilisation et la consolidation de la compréhension des grands théorèmes d'analyse vu en L3 que l'acquisition de nouvelles connaissances.

Prérequis : Calcul différentiel, intégration de Lebesgue (intégrale à paramètre, théorème de Fubini) et analyse complexe de licence.

Thèmes abordés :

Fonctions harmoniques : introduites comme celles de classe C^2 annulant le Laplacien, ce sont aussi les fonctions continues vérifiant la propriété de la moyenne ou encore, pour celles à valeurs réelles, celles qui sont localement des parties réelles de fonctions holomorphes. Seront abordés, entre autres, les principes du maximum, les formules de Poisson, de Schwarz et de Jensen ainsi que le problème de Dirichlet.

Complément d'analyse complexe : il s'agit d'étudier les séries de fonctions méromorphes et les produits infinis. Ces notions sont nécessaires pour l'étude des fonctions fondamentales que sont les fonctions Gamma et Zêta.

La fonction Gamma d'Euler : définition par produit eulérien et par intégrale, formule de dédoublement de Legendre, formule de Stirling.

La fonction Zêta de Riemann : formule d'Euler pour Zêta, valeurs de Zêta sur \mathbb{Z} , équation fonctionnelle de Zêta, la bande critique.

Équations différentielles complexes : Éléments sur les fonctions holomorphes de plusieurs variables, problèmes de Cauchy holomorphes, équations différentielles générales, équations et fonctions de Bessel.

Si le temps le permet, l'un des thèmes suivant sera exposé : solutions élémentaires du Laplacien, transcendance différentielle de Gamma ou le théorème des nombres premiers.

UM
4MA

303 Algèbre commutative et introduction à la géométrie algébrique (9 ECTS)

Responsable : Jean-François Dat

mél : jean-francois.dat@imj-prg.fr

url : <https://webusers.imj-prg.fr/~jean-francois.dat/>

Objectifs de l'UE : Fournir les outils fondamentaux d'algèbre commutative qui sont indispensables pour la géométrie algébrique et la théorie des nombres du M2 de maths fonda. On présentera aussi quelques concepts de base de la géométrie algébrique.

Prérequis : Connaissances en algèbre du niveau licence.

Thèmes abordés : Anneaux, idéaux, modules, constructions universelles (produits, algèbres de polynômes, sommes directes, localisation, produit tensoriel), conditions de finitude, anneaux euclidiens, principaux, factoriels, théorème de structures des modules sur les anneaux principaux et applications. Géométrie algébrique : motivations historiques, Nullstellensatz, topologie de Zariski, variétés algébriques.

UM
4MA

305 Bases d'analyse fonctionnelle (9 ECTS)

Responsable : Ayman Moussa

mél : ayman.moussa@sorbonne-universite.fr

url : <http://www.ljll.fr/moussa>

Objectifs de l'UE : Le but du cours est l'acquisition de bases solides en analyse fonctionnelle et leur mise en application à travers de nouveaux concepts, pour certains issus de l'étude des équations aux dérivées partielles. La première partie du cours (les trois premiers chapitres) aura pour but de dégager des structures (métrique, normé, banachique, hilbertienne) fondamentales dans l'étude des espaces de fonctions de dimension infinie, en fournissant notamment de nombreux exemples d'étude parmi ceux-ci (espaces de régularité, espaces d'intégrabilité). La seconde partie cherchera à changer de point de vue sur les fonctions, en ne les considérant plus uniquement via leurs évaluations ponctuelles mais plutôt par l'intermédiaire de leur action sur d'autres classes de fonctions. Le concept de dualité jouera alors un rôle central, que l'on visitera notamment par le prisme de la théorie des distributions.

Prérequis : L'algèbre linéaire, la topologie de L^3 et la théorie de la mesure et de l'intégration de Lebesgue sont impératifs. Un bagage d'analyse fonctionnelle de niveau L^3 sera aussi le bienvenu.

Thèmes abordés : Espaces métriques, espaces normés, espaces de Banach, espaces de Hilbert, dualité, convergences faibles, distributions, espaces de Sobolev.

UM
4MA

306 Fondements des méthodes numériques : différences et éléments finis (9 ECTS)

Responsable : Albert Cohen

mél : albert.cohen@sorbonne-universite.fr

url : <https://www.ljll.fr/cohen/>

Objectifs de l'UE : Étudier les grandes familles de méthodes numériques utilisées pour la discrétisation et l'approximation des fonctions solutions d'équations aux dérivées partielles (EDP). Après une introduction à la modélisation par les EDP, le cours aborde les méthodes de différences finies pour les problèmes aux limites et d'évolution, ainsi que leur analyse de convergence fondée sur des techniques d'algèbre matricielle et d'approximation numérique (stabilité et consistance). La seconde partie du cours aborde les méthodes d'éléments finis, et leur fondements théorique utilisant les formulations variationnelles dans les espaces de Sobolev construits à partir de l'espace L^2 .

Prérequis : Des connaissances de base en calcul différentiel, équations différentielles ordinaires, intégration, algèbre linéaire numérique du niveau licence. Il est préférable d'avoir suivi un enseignement de niveau licence contenant des TP avec programmation en Python.

Thèmes abordés : Modélisation par les EDP ; Méthode des différences finies ; Applications à l'équation de transport, à l'équation de la chaleur et aux problèmes aux limites ; Analyse numérique des méthodes : stabilité, consistance, ordre, convergence, estimation d'erreur ; Approximation variationnelle des problèmes aux limites ; Analyse hilbertienne, théorie de Lax-Milgram, espaces de Sobolev ; méthode des éléments finis, exemple des éléments de Lagrange et de Hermite ; Mise en œuvre des méthodes lors des séances de TP.

Remarques :

— Le cours donne lieu à un projet TP, qui sera à réaliser pendant les dernières séances de TP et qui comportera notamment une courte soutenance individuelle lors de la semaine des examens.

— Ce cours est enseigné en anglais.

UM
4MA

308 Analyse complexe avancée (9 ECTS)

Responsable : Vincent Michel

mél : vincent.michel@imj-prg.fr

Objectifs de l'UE : Ce cours, qui inclut l'UE UM4MA208 à 6 ECTS, propose d'aborder, dans ses 3 ECTS additionnels, dans le cadre d'une variable, des sujets plus spécifiquement d'analyse complexe qui ont un intérêt pour ceux qui souhaitent faire un M2 orienté vers la recherche en mathématiques fondamentales.

Prérequis : Calcul différentiel, topologie ; intégration de Lebesgue (intégrale à paramètre, théorème de Fubini) et analyse complexe de licence.

Thèmes abordés (par ordre chronologique) :

Partitions C^∞ de l'unité et formule de Stokes : outils classiques et indispensables de l'analyste. Dans ce cours, la formule de Stokes est exposée en dimension réelle 2 (il s'agit alors de la formule de Green-Riemann) dans le cadre des compact lisses de \mathbb{C} qu'on peut voir comme des variétés à bord plongées dans \mathbb{C} . La formule de Green-Riemann permet d'obtenir la formule de Cauchy-Pompeiu utilisée dans la suite du cours.

Théorèmes de Runge : ces théorèmes concernent l'approximation uniforme de fonctions holomorphes au voisinage d'un compact donné par des fonctions holomorphes ou rationnelles sur un ouvert plus grand. Comme souvent en analyse complexe, les considérations topologiques et analytiques sont intimement liées.

Équation de Cauchy-Riemann non homogène. Il s'agit de résoudre une équation du type $\frac{\partial f}{\partial \bar{z}} d\bar{z} \stackrel{\text{déf}}{=} \bar{\partial}f = g$ où f est l'inconnue où g est une $(0, 1)$ -forme donnée c'est-à-dire une forme différentielle du type $c dz$, c étant une fonction. Cette équation intervient de façon récurrente en analyse complexe, qu'elle soit à une ou plusieurs variables, lorsqu'on veut construire des objets holomorphes. Dans ce cours, cette équation est résolue avec un produit de convolution et un théorème de Runge,

Problèmes de Cousin : la version en une variable de ce cours peut illustrer certains des thèmes ou techniques qu'on rencontre en topologie algébrique et en théorie des faisceaux. Ce cours propose une résolution de ce problème via une équation de Cauchy-Riemann non homogène.

Théorème de factorisation de Weierstrass et théorème de Mittag-Leffler : Une fonction méromorphe est-elle le quotient de deux fonctions holomorphes ? La réponse dépend de la possibilité de résoudre le premier problème de Cousin. Peut-on prescrire les zéros d'une fonction holomorphe ? Peut-on prescrire les zéros et pôles d'une fonction méromorphe ? Ces questions et leurs conséquences pour l'arithmétique de l'anneau des fonctions sur un domaine seront abordées dans la mesure du temps disponible.

UM 4MA **311** Probabilités approfondies (9 ECTS)

Responsable : Thierry Lévy

mél : thierry.levy@sorbonne-universite.fr

url : <https://www.lpsm.paris/users/levyt/index>

Objectifs de l'UE : Le cours commencera par une étude détaillée de la notion d'espérance conditionnelle, puis présentera les deux principaux modèles de suites de variables aléatoires dépendantes, à savoir les martingales et les chaînes de Markov (à espace d'états dénombrable). Ces notions sont centrales aussi bien d'un point de vue théorique que pour les applications : les chaînes de Markov sont au cœur des techniques de simulation aléatoire et les martingales à temps discret jouent un rôle essentiel dans l'étude des systèmes dynamiques aléatoires. Ce cours prépare à un M2 en probabilités, en statistique, et/ou à l'agrégation de mathématiques.

Prérequis : Un cours de théorie de la mesure et d'intégration assez général, et un cours de probabilités de niveau L3 incluant les notions suivantes : indépendance, convergence presque sûre, en probabilité, L^p , loi des grands nombres, convergence en loi et théorème central limite.

Thèmes abordés : Espérance conditionnelle. Martingales à temps discret : filtrations, temps d'arrêt, convergence presque sûre, théorèmes d'arrêt, martingales de carré intégrable. Chaînes de Markov à espace d'états dénombrable : propriété de Markov faible et forte, récurrence et transience, mesures invariantes, théorème ergodique, périodicité, convergence vers la loi stationnaire.

UM 4MA **315** Statistique (9 ECTS)

Responsables : Arnaud Guyader, Anna Ben-Hamou

mél : arnaud.guyader@upmc.fr

anna.ben-hamou@upmc.fr

<https://perso.lpsm.paris/~aguyader/>

<https://www.lpsm.paris/users/abenhamou/>

Objectifs de l'UE : Donner aux étudiants les fondements de la statistique mathématique. La première partie du cours explique les bases théoriques de la modélisation et de l'inférence statistique dans un cadre fréquentiste. La seconde présente l'approche bayésienne.

Prérequis : Il n’y a aucun prérequis en statistique, mais des connaissances solides en probabilités sont indispensables.

Thèmes abordés :

- Introduction aux problèmes statistiques (brefs rappels de probabilités, notion d’expérience statistique, problèmes statistiques classiques)
- Modèles paramétriques unidimensionnels (méthode des moments, maximum de vraisemblance, information de Fisher)
- L’approche bayésienne (loi a priori, loi a posteriori)
- Bayésien et théorie de la décision (estimateurs de Bayes, estimateurs minimax, minoration de Le Cam, tests bayésiens)
- Convergence de lois a posteriori (consistance de la loi a posteriori, théorème de Bernstein–von Mises)

UM 4MA 316 Algorithmes et structures de données (9 ECTS)

Responsable : Didier Smets, Ani Miraçi
 mél : didier.smets@sorbonne-universite.fr
 ani.miraci@sorbonne-universite.fr

Objectifs de l’UE : Le cours a deux objectifs principaux qui se complètent.

Le premier objectif est l’étude d’algorithmes qui ont historiquement montré leur efficacité et leur adaptabilité à résoudre des problèmes de natures diverses, où ils interviennent souvent comme briques de base : tri, recherche, plus proches voisins, chemins optimaux, etc. Un aspect important est la notion de complexité algorithmique, sous ses diverses formes. Le passage à 9 ECTS en 2025-2026 sera l’occasion d’analyser également des versions parallèles de ces algorithmes, dans le cadre des modèles de calcul les plus simples (Work-Depth / PRAM, donc sans se soucier des questions de communications).

Le deuxième objectif est leur implémentation pratique, à travers notamment des séances de TP, via la programmation. Un aspect important ici est la question de la représentation de notions mathématiques (suites, ensembles, fonctions clés valeurs, matrices creuses, maillages, nombres aléatoires, etc) par des structures de données concrètes (tables de hachage, arbres binaires de recherche, graphes, etc) et la bonne compréhension de leurs avantages/performances et limitations.

Les TP se feront dans un langage compilé (C/C++), ces derniers permettant plus de flexibilité et une meilleure compréhension des écueils de l’implémentation. Pour autant, une familiarité avec ce type de langage n’est pas un prérequis, et en plus des TP, 3 ou 4 parmi les 18 séances de CM seront (facultatives et) uniquement dévolues à introduire les rudiments de programmation C/C++ et des outils de développement associés (utilisation d’un compilateur, gestion de code source avec CMake et Git).

Note : This course is also part of EUMaster4HPC and is taught in English (students may interact in French if they feel more comfortable so).

UM 4MA 322 Géométrie différentielle (9 ECTS)

Responsable : Hélène Eynard-Bontemps
 mél : eynard@imj-prg.fr

Objectifs de l’UE : Introduire les notions de base de géométrie différentielle à travers des exemples.

Prérequis : Connaissances en topologie, calcul différentiel et calcul intégral du niveau licence.

Thèmes abordés : Rappels de topologie générale et calcul différentiel.
 La notion de variété différentielle. Immersions, submersions, difféomorphismes. Exemples.
 Calcul différentiel dans les variétés.
 Partitions de l'unité. Plongements dans l'espace euclidien.
 Champs de vecteurs, flots. Construction de difféomorphismes.
 Formes différentielles, intégration, théorème de Stokes. Applications topologiques.

UM 4MA **359** **Topologie algébrique (9 ECTS)**

Responsable : Jean-Baptiste Teyssier
 mél : jean-baptiste.teyssier@imj-prg.fr
 url : <http://jbteyssier.com/>

Objectifs de l'UE : Dans ce cours, nous introduisons la théorie des revêtements, en lien avec la notion d'homotopie. Nous définirons le groupe fondamental d'un espace topologique, et nous apprendrons à le calculer sur des exemples, notamment à l'aide du théorème de van Kampen. Enfin, nous introduirons l'homologie et la cohomologie des espaces topologiques.

Prérequis : Connaissances en topologie et calcul différentiel du niveau licence.

Thèmes abordés : Revêtements, homotopie, groupe fondamental, homologie, cohomologie.

1.8 Description des UE du second semestre

UM 4MA **181** **Mouvement brownien (3 ECTS)**

Responsable : Anne-Laure Basdevant
 mél : anne-laure.basdevant@sorbonne-universite.fr
 url : <https://perso.lpsm.paris/>

Objectifs de l'UE : Présenter le mouvement brownien, objet central de la théorie moderne des probabilités, en illustrant les liens entre le discret et le continu en probabilités, entre les probabilités et l'analyse fonctionnelle, et entre les probabilités et l'analyse de certaines équations aux dérivées partielles. Ce cours est prioritairement conçu pour des étudiantes et étudiants qui ne prévoient pas de se spécialiser dans l'étude des probabilités en M2. Ce n'est en particulier pas une introduction à l'étude technique du mouvement brownien qui est faite dans les parcours de M2 Probabilités et modèles aléatoires et Probabilités et finance.

Prérequis : Le cours s'appuiera sur les notions de probabilités et d'analyse étudiées en licence.

Thèmes abordés :

- Marches aléatoires et leurs limites d'échelle
- Mesures gaussiennes en dimension infinie
- Le mouvement brownien comme fonction continue aléatoire
- Le mouvement brownien et l'équation de la chaleur

UM 4MA **182** **Introduction aux catégories (3 ECTS)**

Responsable : Antoine Ducros
 mél : antoine.ducros@imj-prg.fr
 url : <https://webusers.imj-prg.fr/~antoine.ducros/>

Objectifs de l'UE : La théorie des catégories propose un point de vue et un langage unificateurs en mathématiques : on s'y place dans un cadre abstrait très général où l'on dispose simplement d'« objets » et de « morphismes » satisfaisant des axiomes très simples, et l'on y étudie des notions, propriétés et constructions qui se déclinent ensuite dans les situations concrètes où l'on manipule de vrais objets et de vrais morphismes (par exemple des groupes et des morphismes de groupes, des espaces vectoriels et des applications linéaires, des espaces topologiques et des applications continues...). Le but de ce cours sera tout d'abord d'introduire les bases de ce langage, et d'illustrer abondamment tous les concepts présentés à l'aide d'exemples tirés le plus souvent de l'algèbre et de la topologie, qui permettront de revisiter un certain nombre de thèmes classiques (comme les quotients). Puis, dans un second temps, nous utiliserons le formalisme catégorique pour entamer l'étude d'une branche majeure de l'algèbre, très utilisée en topologie et en géométrie algébriques, l'*algèbre homologique*.

Prérequis : Le langage des catégories lui-même ne demande que des connaissances minimales. Mais les exemples sur lesquels nous nous appuierons demanderont une bonne aisance en algèbre commutative (groupes, anneaux, corps, espaces vectoriels, et éventuellement modules même si l'on fera les rappels nécessaires à leur sujet), et une connaissance des bases de la topologie générale.

Thèmes abordés : On indique simplement ici les notions catégoriques proprement dites qui seront vues en cours. Chacun des items ci-dessous sera illustré par de nombreux exemples issus de l'algèbre et de la topologie.

1. Notions de base : catégories, foncteurs, transformations naturelles, équivalences de catégories.
2. Foncteurs représentables et lemme de Yoneda.
3. Grandes classes d'objets définis par le foncteur qu'ils représentent : produits fibrés, sommes amalgamées, et plus généralement limites et colimites.
4. Foncteurs adjoints, et leurs effets sur les limites et colimites.
5. Catégories additives et abéliennes. Suites exactes, objets projectifs et injectifs.
6. Complexes, homotopies. Résolutions projectives et injectives.
7. Foncteurs dérivés.

UM
4MA

183 Analyse de Fourier discrète, applications en théorie du signal et en image

(3 ECTS)

Responsable : Fabrice Béthuel

mél : fabrice.bethuel@sorbonne-universite.fr

url : <https://www.ljll.fr/~bethuel/>

Objectifs de l'UE : Le but du cours est de fournir une introduction à la transformée de Fourier discrète (TFD ou DFT en anglais), et de présenter plusieurs applications, en particulier à la théorie du signal et de l'image, entre. On abordera ainsi le débruitage en présence de bruit blanc, la compression du signal (méthode JPEG), ...Le cours abordera aussi la transformée de Fourier rapide (FFT), qui est un algorithme particulièrement efficace pour calculer la DFT.

Prérequis : Programme d'analyse de Licence. Une connaissance préalable des séries de Fourier est souhaitable, sans être absolument indispensable.

Thèmes abordés :

- Echantillonnage et interpolation par polynômes trigonométriques. Définition de la TDF. Unitarité et égalité de Parseval discrète. Noyau de Dirichlet discret. Convolution discrètes.
- Relations entre coefficients de Fourier discrets et coefficients de Fourier continus. Lien avec la méthode des rectangles. Résultats de convergence des séries de Fourier discrètes, ordres de convergence et régularité. Convolution continue.
- La transformée en cosinus discrète (TCD), et méthode de compression et de décompression pour images (JPEG).
- Echantillon bruités, débruitage en présence de bruit blanc.
- Formule de Poisson, théorème de Shannon. Lien avec l'intégrale de Fourier.
- L'algorithme de la Transformée de Fourier Rapide (FFT en anglais).

Remarque : ce cours est enseigné en anglais.

UM
4MA **220**

Théorie de Galois (6 ECTS)

Responsable : Alexis Bouthier

mél : alexis.bouthier@imj-prg.fr

Objectifs de l'UE : présenter la théorie générale des extensions de corps et l'alternative algébrique/transcendant, puis prouver les principaux théorèmes de la théorie de Galois des extensions finies, et en donner quelques applications telles que : la caractérisation des polynômes résolubles "par radicaux", les propriétés des nombres complexes constructibles à la règle et au compas, ou la loi de réciprocité quadratique.

Prérequis : Il est nécessaire d'avoir suivi le cours "Algèbre commutative" du S1 ou d'en connaître le contenu, et il est fortement conseillé de connaître la théorie des groupes de niveau L3 (groupes abéliens finis, groupes symétriques, produits semi-directs).

Thèmes abordés : Extensions de corps, transcendance et algébricité (Nullstellensatz si le temps le permet), normalité et (in)séparabilité, corps de décomposition d'un polynôme, groupe de Galois d'un polynôme, résolubilité par radicaux, techniques de calcul d'un groupe de Galois, exemples et applications.

UM
4MA **225**

Analyse fonctionnelle approfondie, calcul des variations (6 ECTS)

Responsable : Hervé Le Dret

mél : herve.le_dret@sorbonne-universite.fr

url : <https://www.ljll.fr/~ledret/>

Objectifs de l'UE : Le cours vise à présenter les connaissances nécessaires pour aborder des problèmes de calcul de variations, c'est-à-dire l'optimisation dans des espaces de dimension infinie. Ceci nous amènera à faire un détour conséquent vers quelques aspects de l'analyse fonctionnelle à travers de notions abstraites et générales. Ces outils seront illustrés sur des problèmes « classiques » du calcul des variations. Le cours pourra intéresser en premier lieu les étudiant-e-s souhaitant se tourner vers les M2 Mathématiques de la modélisation et Ingénierie mathématique. Cette UE succède à une UE analogue plus étendue, dont le poly 2324-2025 reste accessible sur la page web indiquée plus haut. Un nouveau poly plus condensé sera mis à disposition sur le site Moodle du cours.

Prérequis : Le cours 4MA305 (Bases d'analyse fonctionnelle) est un prérequis.

Thèmes abordés :

- Compacité, semi-continuité inférieure et minimisation dans un espace métrique.
- Analyse fonctionnelle abstraite : dualité, espaces réflexifs, théorèmes de Hahn-Banach, convergences faibles.

- Minimisation de fonctionnelles convexes continues et coercives sur des espaces réflexifs.
- Calcul différentiel en dimension infinie, conditions d'optimalité d'Euler-Lagrange, introduction aux EDP non-linéaires (en dimension 1).

UM 4MA **233** **Théorie analytique des nombres (6 ECTS)**

Responsable : Antoine Ducros

mél : antoine.ducros@imj-prg.fr

url : <https://webusers.imj-prg.fr/~antoine.ducros/>

Objectifs de l'UE : Ce cours propose une première introduction à la théorie analytique des nombres. Son objectif est de présenter deux grands résultats classiques concernant la distribution des nombres premiers :

- le *théorème des nombres premiers* de Hadamard et de la Vallée-Poussin, qui donne l'asymptotique quand X tend vers l'infini du nombre des premiers inférieurs à X ,
- le *théorème de la progression arithmétique* de Dirichlet, qui fournit l'existence d'une infinité de nombres premiers dans une classe de congruence donnée.

Prérequis : Il est indispensable d'avoir suivi un cours d'analyse complexe de niveau L3. Avoir quelques notions d'algèbre de niveau licence (bases de la théorie des groupes et des anneaux) est souhaitable, mais elles seront rappelées au fur et à mesure.

Table des matières :

1. Nombres premiers. Critères de primalité et de non-primalité.
2. La loi de réciprocité quadratique.
3. Caractères d'un groupe abélien fini.
4. Fonctions arithmétiques, produits eulériens, fonction zêta de Riemann, fonctions L de Dirichlet.
5. Non-annulation des fonctions L .
6. Le théorème de la progression arithmétique.
7. Le théorème des nombres premiers.
8. Quelques compléments éventuels si le temps le permet, par exemple autour du thème de l'équidistribution.

UM 4MA **234** **Théorie algébrique des nombres (6 ECTS)**

Responsable : Quentin Gazda

mél : quentin.gazda@imj-prg.fr

url : <https://quentin.gazda.fr/>

Objectifs de l'UE : Ce cours propose une première introduction à la théorie algébrique des nombres, son but étant de comprendre comment les propriétés de factorisation d'un entier en produit des nombres premiers se généralisent aux entiers algébriques (les racines des polynômes unitaires à coefficients entiers) de degré plus grand.

Prérequis : Les connaissances requises pour suivre ce cours sont les notions de groupe, anneaux et corps du niveau L. Avoir suivi le cours d'algèbre commutative est conseillé sans être indispensable. Ce cours se combine bien avec le cours de théorie de Galois.

Table des matières :

1. Nombres algébriques et entiers algébriques.
2. Corps des nombres et anneaux d'entiers : trace, norme, discriminant, plongements dans \mathbb{C} , *etc.*
3. Géométrie des nombres et théorème de Minkowski.
4. L'anneau des entiers est un réseau.
5. Le théorème des unités de Dirichlet.
6. Finitude du groupe des classes.
7. (Si le temps le permet) La formule du nombres des classes.

UM
4MA **235**

Cryptologie, Cryptographie algébrique (6 ECTS)

Responsable : Leonardo Zapponi

mél : Leonardo.zapponi@imj-prg.fr

url : <https://webusers.imj-prg.fr/~leonardo.zapponi/Web2/index.html>

Objectifs de l'UE : Ce cours est une introduction aux problématiques et aux techniques de la cryptographie algébrique. Son objectif principal est de développer, en les illustrant, des notions et résultats d'algèbre introduits tout au long du cursus de Licence. Les thèmes abordés et l'approche théorique font de cette UE une continuation naturelle du cours de structures algébriques (3MA262). Outre revisiter les fondements algébriques en arithmétique et théorie des corps finis, ce cours se veut également une invitation et une introduction à des techniques plus sophistiquées, esquissées par exemple dans le contexte des courbes elliptiques.

Prérequis : Connaissances en algèbre et arithmétique du niveau Licence.

Thèmes abordés :

- Arithmétique des entiers et arithmétique modulaire
 - Division euclidienne et algorithme d'Euclide étendu, factorisation unique, PGCD. Fonction indicatrice d'Euler, carrés et extraction de racines carrées dans $\mathbb{Z}/n\mathbb{Z}$, symbole de Legendre.
 - Complexité des opérations arithmétiques sur les entiers. Le problème de la factorisation.
 - Protocoles à clé publique basés sur le problème de de la factorisation : cryptosystèmes RSA, de Goldvasser-Micali et de Rabin.
- Corps finis et logarithme discret
 - Extensions de corps. Corps finis.
 - Le problème du logarithme discret.
 - Protocoles basés sur le problème du logarithme discret : cryptosystème El Gamal et échange de clé de Diffie-Hellman.
 - Protocoles de partage de secret : l'algorithme de Shamir.
- Introduction à la théorie des courbes elliptiques.
 - Courbes elliptiques. Loi des cordes-tangentes. Points rationnels. Théorie algébrique des courbes elliptiques affines. Courbes elliptiques sur les corps finis. Cardinal dans une extension finie, fonction zéta.
 - Le problème du logarithme discret elliptique.
 - Application au problème de la factorisation : un aperçu.

Débouchés : Ce cours constitue une bonne introduction à l'option « Algèbre effective et Calcul formel » de l'agrégation de Mathématiques. Il permet également d'envisager un Master en Mathématiques fondamentales. Il constitue une passerelle possible

pour les étudiants de Mathématiques vers des cours de Master 2 en Informatique ou en Mathématiques-Informatique.

Bibliographie : À titre indicatif, les ouvrages suivants peuvent constituer un complément du cours.

1. *D. Boneh, V. Shoup, A Graduate Course in Applied Cryptography*, Stanford University, 2023
2. *M. Demazure, Cours d'algèbre, primalité divisibilité codes*, Nouvelle bibliothèque mathématique, Cassini (2308).
3. *J. Katz, Y Lindell, Introduction to Modern Cryptography*, Chapman & Hall, 2315
4. *J. Kraft, L. Washington, An Introduction to Number Theory with Cryptography*, Taylor & Francis, 2018
5. *N. Koblitz, A Course in Number Theory and Cryptography, Second Edition*, Graduate Texts Mathematics, Springer **114** (1994).
6. *L. C. Washington, Elliptic Curves, Number Theory and Cryptography, Second Edition*, Discrete Mathematics and its Applications, CRC Press (2308).
7. *G. Zemor, Cours de Cryptographie*, Cassini (2000)

UM 4MA **236** **Processus de sauts (6 ECTS)**

Responsable : Nicolas Broutin

mél : nicolas.broutin@sorbonne-universite.fr

url : <https://perso.lpsm.paris/~broutinn/>

Objectifs de l'UE : Les processus markoviens de sauts sont les processus à temps continu les plus simples. Ils représentent cependant des outils de modélisation pertinents dans de nombreuses situations (files d'attente, modèles de population). Par ailleurs, une bonne compréhension de ces processus est probablement nécessaire avant d'aborder les processus de diffusion en M2. Le but de ce cours est donc une étude rigoureuse des processus markoviens de sauts ainsi que de certaines de leurs applications.

Prérequis : Un cours de probabilités (il n'est pas nécessaire d'avoir suivi un cours sur les chaînes de Markov ou sur les martingales pour suivre ce cours).

Thèmes abordés : Processus de Poisson, chaînes de Markov, processus markoviens de sauts, files d'attente et autres applications.

UM 4MA **239** **Histoire d'un objet mathématique (6 ECTS)**

Responsables : Alexandre Guilbaud et Laurent Mazliak

mél : laurent.mazliak@sorbonne-universite.fr

url : <https://perso.lpsm.paris/~mazliak/M1HistMaths.html>

Objectifs de l'UE : Ce module veut être une initiation à l'histoire des mathématiques en tant que discipline vivante. On s'y intéressera à différents aspects de l'analyse infinitésimale à travers une présentation qui combinerà cours magistraux sur des points d'histoire du calcul différentiel et de l'intégration entre l'Antiquité et le 20ème siècle et analyse de textes originaux de mathématiciens ayant travaillé sur ces sujets. En plus d'acquérir des connaissances factuelles sur l'histoire de la discipline, chaque semaine les étudiants se confronteront donc par exemple à des écrits de Descartes, Fermat, Newton, D'Alembert, Lagrange, Cauchy, Riemann, Lebesgue et bien d'autres, et pourront de ce fait comprendre comment les mathématiques enseignées aujourd'hui sont le produit d'un

long processus de découverte, construction et réécriture. Cette approche est intéressante en soi mais elle permet souvent aussi, en revenant à la source des questionnements, de saisir pourquoi des concepts fondamentaux des mathématiques ont été élaborés. Une telle approche doit donc permettre de prendre du recul sur les mathématiques en général, sur l'articulation entre les différentes branches qui les composent, leurs dynamiques passées et actuelles ainsi que leurs interactions avec d'autres champs du savoir.

UM
4MA 243

Introduction à la géométrie algébrique effective (6 ECTS)

Responsables : Antonin Guilloux, Fabrice Rouillier

mél : antonin.guilloux@upmc.fr, Fabrice.Rouillier@inria.fr

Objectifs de l'UE : Ce cours présente des objets calculables utiles à la description effectives de variétés algébriques. Nous revisiterons les notions nécessaires sur les anneaux de polynômes et les variétés algébriques. Ensuite nous présenterons des méthodes à la fois formelles et numériques pour décrire ces dernières. Nous nous concentrerons sur le cas des variétés de dimension 0 (c'est-à-dire un nombre fini de points), déjà très riche.

Ce cours ouvre à une deuxième année de Master de Mathématiques Fondamentales, ou des parcours autour de l'Algèbre Appliquée. Certaines des notions présentées sont aussi présentes dans le cours «Méthodes algébriques effectives».

Prérequis : Connaissances générales en algèbre de niveau L3.

Thèmes abordés :

1. **Rappels d'algèbre commutative**

Anneaux de polynômes, Anneaux noetheriens, anneaux quotients, anneaux locaux, produit tensoriel. Action de groupes finis sur les polynômes multivariés.

2. **Éléments sur les variétés algébriques**

Ensembles algébriques, ensembles constructibles, dictionnaire Idéal-Variété, théorème des zéros de Hilbert et théorème de Bézout.

3. **Problèmes univariés**

Résultant univarié, sous-résultant, discriminant, suite de Sturm, règle de Descartes. Relations coefficients-racines.

4. **Élimination - Projection - Résolution**

Résultant multivarié, Définition et propriété des bases de Gröbner, Résolution de systèmes algébriques en dimension 0 : réduction au cas univarié et/ou à des problèmes de valeurs propres.

5. **Approximations numériques certifiées**

Localisation et multiplicités de zéros réels ou complexes d'un polynôme. Approximation de racines et valeurs propres. Algorithme de Newton et ses généralisations.

UM
4MA 245

Travail d'étude et de recherche - TER (6 ECTS)

Responsable : Simon André

mél : simon.andre@imj-prg.fr

url : <https://webusers.imj-prg.fr/~simon.andre/>

Objectifs de l'UE : Le TER de la première année de master de mathématiques consiste en un travail d'étude et de recherche effectué sous la direction d'un-e enseignant-e qui propose le sujet. Il peut s'effectuer en binôme. Ce travail pourra être de nature théorique ou/et comporter une partie de simulation numérique. Il pourra également être

réalisé autour d'une question émanant d'un partenaire industriel ; le sujet est alors proposé conjointement par ce partenaire et l'enseignant-e encadrant le TER.

Le TER est généralement mené au second semestre.

Évaluation l'UE : Le TER donne lieu à un rapport écrit et à une soutenance orale (d'environ 30 minutes), qui constituent l'évaluation du travail. La soutenance devra avoir eu lieu au plus tard deux semaines avant le jury du second semestre. La validation du TER permet l'attribution de 6 ECTS dans le cadre du second semestre du M1.

Déroulement de l'UE : Un TER dure au moins quatre mois ; pour qu'il soit soutenu avant les jurys de juin, il doit donc avoir débuté au plus tard à la fin janvier.

L'inscription en TER est subordonnée au choix d'un sujet, à l'obtention de l'accord de l'enseignant-e responsable du sujet ainsi que de l'accord du responsable des TER. Certains sujets proposés en début d'année universitaire sont rassemblés dans un fascicule disponible auprès du responsable de l'UE¹⁰. L'étudiant-e intéressé-e par un sujet rencontre l'enseignant-e qui le propose. Un-e étudiant-e motivé-e par un domaine particulier peut aussi aller voir un-e enseignant-e de son choix afin de lui proposer de le/la diriger lors d'un TER ; le sujet peut alors être défini d'un commun accord.

Dans tous les cas, l'étudiant confirme son choix auprès du responsable des TER, qui coordonne le processus. Le responsable des TER doit ensuite donner son accord. Une fois le sujet choisi et, le cas échéant, le binôme constitué, les étudiant-e-s rencontrent régulièrement l'enseignant-e responsable du sujet, qui les guidera dans leur travail.

NB :

- Le TER n'est pas ouvert aux étudiant-e-s inscrit-e-s en EAD.
- Pour s'inscrire à cette UE, il est nécessaire d'avoir validé le premier semestre d'une part, et d'autre part, toutes les UE mathématiques du premier semestre **sans compensation**.

UM
4MA

248 Systèmes dynamiques (6 ECTS)

Responsable : Jean-Pierre Marco

mél : jean-pierre.marco@sorbonne-universite.fr

Objectifs de l'UE : Ce cours a pour objet de présenter quelques concepts fondamentaux de systèmes dynamiques (conjugaison, orbites périodiques, récurrence, mesures invariantes, etc.) introduits à travers l'étude de nombreux exemples. Ce sera aussi l'occasion de revisiter de nombreuses notions du programme de licence en topologie, algèbre linéaire, calcul différentiel, analyse réelle, analyse complexe, etc. En particulier, il peut être intéressant de le suivre dans l'optique d'une préparation à l'agrégation.

Prérequis : Cours standard de topologie, calcul différentiel, algèbre linéaire, un peu de théorie de la mesure.

Thèmes abordés :

- Systèmes dynamiques en dimension 1 : période 3 implique chaos ; théorème de Sharkovski ; croissance des orbites périodiques, notion de mesure invariante, conjugaison. Exemple de l'application logistique.
- Dynamique linéaire : Exemple de la suite de Fibonacci. Classification des applications linéaires. Linéarisation au voisinage d'un point fixe hyperbolique.
- Équidistribution : Rotation du cercle, minimalité, équirépartition, notion de théorie ergodique.

10. <https://webusers.imj-prg.fr/~frederic.klopp/TER/TER.pdf>

- Équations différentielles, champs de vecteurs et flots : théorème de Cauchy-Lipschitz à paramètres ; portraits de phase des champs de vecteurs linéaires ; notions de conjugaison.
- Systèmes dynamiques en dimension deux : Flots planaire, application de premier retour, théorie de Poincaré-Bendixson dans le plan.

UM 4MA 253 Calcul scientifique pour les grands systèmes linéaires (6 ECTS)

Responsable : Mi-Song Dupuy

mel : mi-song.dupuy@sorbonne-universite.fr

Objectifs de l'UE : Ce cours abordera les méthodes numériques de résolution classiques (Gauss, LU, Jacobi, Gauss-Seidel) et modernes de systèmes linéaires (gradient conjugué, GMRES, méthode de Krylov), ainsi que leur analyse théorique. Des algorithmes pour les problèmes aux valeurs propres seront aussi présentés.

Des travaux dirigés permettront de maîtriser les notions théoriques vues en cours. Les travaux pratiques pour implémenter les différents algorithmes, s'effectueront avec le langage Julia, avec lequel il n'est pas nécessaire d'être familier avant le cours.

Prérequis : Bases solides en algèbre linéaire, et une première expérience en programmation.

Thèmes abordés : stockage des matrices creuses, méthodes de résolution directe (Gauss, LU), méthodes de résolution itératives stationnaires (Jacobi, Gauss-Seidel, gradient à pas optimal), principe général des méthodes de Krylov, gradient conjugué, méthode GMRes, décomposition en valeurs singulières, méthode de la puissance, algorithme de Lanczos, langage Julia.

Remarque : Ce cours donne lieu à un projet, soutenu individuellement.

UM 4MA 255 Stage en entreprise pour mathématicien-ne-s (6 ECTS)

Responsable : Bruno Després

mél : bruno.despres@sorbonne-universite.fr

url : <https://sciences.sorbonne-universite.fr/formation-sciences/offre-de-formation/masters/master-mathematiques-et-applications/m1-master>

(onglet insertion professionnelle)

Objectifs de l'UE : Donner aux étudiant-e-s la possibilité d'avoir une expérience de l'utilisation des outils mathématiques et des logiciels scientifiques dans le milieu de l'entreprise ou de l'industrie. Préciser un projet professionnel en découvrant de façon concrète un domaine d'application lié aux mathématiques.

Prérequis : prendre contact avec le responsable de l'UE avant d'établir la convention de stage.

Thèmes abordés : L'étudiant-e trouve son stage seul-e. Le sujet est proposé par l'entreprise et doit être validé par le responsable de l'UE **avant** le début du stage. Le stage doit comprendre une immersion totale dans l'entreprise pendant deux mois minimum, soit pendant l'été, soit pendant un semestre universitaire si l'étudiant-e a déjà validé les autres modules, dans le cas d'un M1 étalé sur plus d'un an. Les stages ayant lieu pendant l'été seront évalués à la rentrée de septembre. D'autres situations particulières peuvent être étudiées au cas par cas. Les stages validés au titre d'un autre diplôme ne peuvent pas être pris en compte. L'évaluation du stage repose sur trois critères : la rédaction d'un rapport, la soutenance orale et l'avis motivé des responsables du stage dans l'entreprise.

Les étudiant-e-s voulant faire un stage en entreprise pendant l'année de M1, dans le cadre de cette UE ou non, doivent remplir un formulaire en ligne qui vous sera communiqué

par le responsable des stages, pour pouvoir ensuite établir une **convention de stage**, préalable indispensable au stage.

UM 4MA **256** **Programmation en C++ (6 ECTS)**

Responsable : Damien Simon

mél : damien.simon@sorbonne-universite.fr

url : <http://www.normalesup.org/~dsimon/enseignement/cplusplus/>

Objectifs de l'UE :

La plupart des bibliothèques de calcul numérique, pour Python, R ou Tensorflow, sont écrites en C++ afin d'assurer une vitesse de calcul maximale, nécessaire dans de nombreuses applications (du machine learning à la discrétisation d'EDP en passant par les méthodes Monte-Carlo). Ce langage fortement typé et compilé permet une gestion fine de la mémoire et sa bibliothèque standard très complète propose la plupart des algorithmes et structures de données élémentaires codés très efficacement.

Ce cours donne les bases du langage de programmation C++ (standard C++11 et ultérieurs) avec une orientation vers les probabilités, les statistiques et les structures de données (mais pas seulement !) et est donc un très bon complément à Python pour ceux qui se destinent au développement et à l'écriture de bibliothèques de calcul numérique intensif. Si le temps le permet, nous aborderons également l'interfaçage avec Python et les bases du calcul parallèle.

Ce cours n'a pas de TD et est composé d'un cours magistral (2h par semaine) et de TP sur machine (2h ou 4h par semaine, en alternance).

Prérequis : Notions d'algorithmique (tests logiques, boucles, fonctions)

Thèmes abordés : syntaxe, compilation avec g++, classes, programmation générique, exploration de la bibliothèque standard, simulations numériques, algorithmes et structure de données usuels.

UM 4MA **257** **Analyse convexe (6 ECTS)**

Responsable : Marco Mazzola

mél : marco.mazzola@imj-prg.fr

url : <https://perso.imj-prg.fr/marco-mazzola/>

Objectifs de l'UE : L'analyse convexe apparaît depuis les années 1970 (au moins) comme l'un des piliers des mathématiques dites "appliquées". Elle intervient en particulier dans la modélisation et la résolution numérique de problèmes dans pratiquement tous les secteurs où la modélisation mathématique est pertinente. Plus récemment, les propriétés de convexité ont joué un rôle central dans certaines branches des mathématiques dites "pures", par exemple le calcul des variations, les systèmes dynamiques et l'analyse fonctionnelle.

L'objectif de ce cours est d'introduire les fondements de l'analyse convexe, de montrer quelques-unes de ses applications.

Prérequis : Algèbre linéaire, topologie élémentaire, calcul différentiel élémentaire.

Thèmes abordés :

- Ensembles convexes et sous-espaces affines d'un e.v.n., propriétés algébriques et topologiques
- Projection, théorème de Hahn-Banach, extrémalité
- Fonctions convexes, propriétés algébriques et topologiques

- Calcul différentiel pour les fonctions convexes : sous-différentiel, dérivées directionnelles, différentiabilité
- Conjugaison de Legendre-Fenchel, convolution infimale
- Vers des applications “pratiques” et “théoriques”
 - Quelques problèmes d’optimisation, théorèmes de dualité, conditions d’optimalité
 - Quelques autres applications à définir (calcul des variations, jeux, théorie KAM faible, ...)

UM
4MA 258

Introduction à la théorie du contrôle en dimension finie (6 ECTS)

Responsable : Hoai-Minh Nguyen

mél : hoai-minh.nguyen@sorbonne-universite.fr

Objectifs de l’UE : Ce cours est une brève introduction à la théorie du contrôle dans les espaces de dimension finie. L’objectif est de fournir un aperçu concis du sujet, en se concentrant principalement sur le cadre linéaire. Les démonstrations sont présentées en détail et choisies de manière à permettre des extensions au cas de dimension infinie dans de nombreuses situations.

Prérequis : Cours de calcul différentiel de L3.

Thèmes abordés :

Les sujets abordés incluent la condition de rang de Kalman, le test de Hautus, l’observabilité, la stabilité, la détectabilité et les observateurs dynamiques, le théorème du déplacement des pôles, le test linéaire de contrôlabilité, le contrôle optimal linéaire-quadratique sur des horizons finis et infinis, ainsi que la stabilisation via les gramiennes.

Références :

J.-M. Coron, Control and nonlinearity.

H.-M. Nguyen, A short introduction to the control theory in finite-dimensional spaces.

E. D. Sontag, Mathematical Control Theory : Deterministic Finite Dimensional Systems.

E. Trélat, Contrôle optimal : théorie et application.

J. Zabczyk, Mathematical control theory.

UM
4MA 260

Introduction aux surfaces de Riemann (6 ECTS)

Responsable : Pascal Dingoyan

mél : pascal.dingoyan@imj-prg.fr

url : <https://webusers.imj-prg.fr/~pascal.dingoyan/>

Objectifs de l’UE : L’objectif de ce cours est de proposer une introduction aux divers aspects algébriques, analytiques et géométriques d’un des objets les plus riches et importants des mathématiques.

Prérequis : Connaissances de base en analyse complexe, géométrie différentielle, topologie algébrique.

Thèmes abordés : Surfaces de Riemann, courbes algébriques, introduction à la cohomologie des surfaces de Riemann, diviseurs et fibrés en droites complexes, théorème de Riemann-Roch.

UM
4MA

261 Modèles mathématiques en neurosciences (6 ECTS)

Responsables : Delphine Salort et Michèle Thieullen

méls : delphine.salort@sorbonne-universite.fr

michele.thieullen@sorbonne-universite.fr

Objectifs de l'UE : Introduire les modèles mathématiques développés dans les neurosciences et donner aux étudiants la formation en systèmes dynamiques déterministes ou stochastiques nécessaire à leur compréhension.

Prérequis : Sont souhaitables :

- un cours de niveau L3 au moins en Probabilités,
- un cours de Topologie et Calcul différentiel,
- une initiation à la programmation pourra être utile.

Thèmes abordés :

- Comment fonctionne un neurone. Notion d'excitabilité, de décharge. Génération et propagation du potentiel d'action.
- Modèle Intègre-et-Tire déterministes et stochastiques.
- Les modèles classiques : équations de Hodgkin-Huxley, de FitzHugh-Nagumo, de Morris-Lecar.
- Bruits gaussiens et poissoniens. Modélisation du fonctionnement des canaux ioniques par des processus de Markov.
- Introduction aux systèmes dynamiques. Points stationnaires, cycles limites et théorie des bifurcations.
- Systèmes dynamiques lents-rapides.
- Temps de décharge et problèmes d'estimation. Densité de probabilité et équations aux dérivées partielles.

UM
4MA

266 Optimisation numérique et science des données (6 ECTS)

Responsable : Emmanuel Trélat

mél : emmanuel.trelat@sorbonne-universite.fr

url : <https://www.ljll.fr/trelat/>

Objectifs de l'UE : Ce cours permet d'acquérir les outils mathématiques théoriques et pratiques de pointe en optimisation numérique et science des données. L'objectif est d'apprendre à modéliser et résoudre des problèmes complexes d'optimisation, avec ou sans contraintes, et d'apprendre à mettre en œuvre divers algorithmes innovants efficaces pour l'approximation numérique des solutions.

Prérequis : Pas de prérequis particuliers.

Thèmes abordés : Dans ce cours, on apprendra les méthodes classiques d'optimisation : existence, conditions de premier et de second ordre, diverses variantes de méthodes de gradient, conditions de Karush-Kuhn-Tucker, dualité Lagrangienne, puis on fera une ouverture à la science des données : gradient stochastique, gradient coordonnée par coordonnée, gradient non lisse, TensorFlow. Des TD et TP (Python) viendront compléter la formation, ainsi qu'une introduction aux méthodes les plus à la pointe : différentiation automatique (AMPL) couplée aux outils experts (IpOpt). Elles seront illustrées sur divers exemples, comme l'analyse d'image ou le machine learning.

UM
4MA 273**Statistique avancée : non paramétrique, grande dimension et données massives (6 ECTS)****Responsable :** Étienne Roquainmél : etienne.roquain@sorbonne-universite.frurl : <https://etienneroquain-81.websself.net/>

Objectifs de l'UE : Ce cours a pour but d'introduire les outils nécessaires à l'analyse des données massives et complexes et ouvre sur les thématiques d'apprentissage automatique (machine learning) que l'on peut rencontrer au niveau master 2. Les étudiants devront s'approprier les concepts évoqués en cours et TD et seront évalués sur leur capacité à manipuler ces notions.

Prérequis : Ce cours est un cours de statistique avancée, qui nécessite d'avoir validé un cours de statistique de contenu au moins équivalent à 4MA315 et un cours de probabilité de niveau L3.

Thèmes notamment abordés :

- Statistique de base : rappels sur l'estimation, les tests et les régions de confiance ; estimateur minimax ; estimateur de Bayes ; régression linéaire ;
- Statistique non paramétrique : inférences pour la fonction de répartition ; test d'adéquation à une loi ; test du χ^2 ; régression non-paramétrique ; estimateur par moyennes locales ; classification supervisée ; méthode des plus proches voisins ; apprentissage automatique ;
- Estimation en grande dimension : modèles de grande dimension ; estimateur par rétrécissement (shrinkage) ; phénomène de Stein ; estimateur par seuillage ; sparité ; modèles à représentation sparse ; application à l'identification des gènes différentiellement exprimés en cancérologie ; application au débruitage des images.

UM
4MA 277**Bases de l'analyse de données (6 ECTS)****Responsable :** Rafaël Pinotmél : pinot@lpsm.parisurl : <https://rpinot.github.io/>

Objectifs de l'UE : Initier les étudiants à la pratique de l'analyse de données. Ce cours présente les outils classiques de l'analyse et de visualisation de données mis en œuvre en TP avec le logiciel Python. Les étudiants seront évalués sur un projet consistant en l'analyse d'un jeu de données réelles grâce aux outils vus en cours. Ce projet donnera lieu à la rédaction d'un rapport.

Prérequis : Connaissances de base (niveau Licence) en probabilités et algèbre linéaire ainsi que des bases de programmation (peu importe le langage). Les TP commenceront par une initiation au langage Python sur des Jupyter notebooks. Les rendus seront à rédiger à l'aide d'un langage de programmation pour l'écriture scientifique tel que Latex.

Thèmes abordés :

- Statistique descriptive univariée et multivariée (caractérisation de la nature des données, résumés numériques et graphiques d'un nuage de point).
- Analyse de données non supervisé : visualisation de données, réduction de dimension (Analyse en Composantes Principales), regroupement/clustering de données (K-means, K-medoids, regroupement hiérarchique)
- Analyse de données supervisé : Présentation du problème d'apprentissage supervisé (régression et classification), algorithmes simples (K-plus-proches voisins, re-

gression linéaire et régression logistique), initiation aux méthodes plus avancées (réseaux de neurones artificiels)

UM
4MA

278 Probabilités numériques (6 ECTS)

Responsable : Vincent Lemaire

mél : vincent.lemaire@sorbonne-universite.fr url : <https://perso.lpsm.paris/~vlemaire/>

Objectifs de l'UE :

Présenter des méthodes numériques actuelles basées sur la simulation aléatoire. Les cours et TD seront consacrés à la justification théorique des algorithmes : résultats d'approximation et de convergence. Les TP permettront une implémentation efficace en python scientifique : utilisation avancée de numpy et scipy.

Prérequis :

Programmation en Python. Connaissances en probabilités et statistique.

Thèmes abordés :

Simulation de variables aléatoires et processus aléatoires : processus gaussiens, chaînes de Markov à temps discret et continu (processus de Poisson, de naissance et de mort). Méthodes de Monte Carlo et méthodes de réduction de variance. Simulation d'événements rares, calcul de sensibilités et méthodes de Monte Carlo imbriquées (*Nested Monte Carlo*).

UM
4MA

280 Martingales et contrôle (6 ECTS)

Responsable : Camille Tardif

mél : camille.tardif@sorbonne-universite.fr

url : <https://perso.lpsm.paris/~tardif/>

Objectifs de l'UE : Compléter l'étude des martingales à temps discret qui a été commencée dans le cours de Probabilités approfondies (311) au premier semestre, et appliquer cette théorie à des problèmes de contrôle markovien et de filtrage.

Prérequis : Il est indispensable d'avoir les connaissances du cours de Probabilités approfondies (espérance conditionnelle, chaînes de Markov, martingales)

Thèmes abordés :

Martingale : inégalité maximale de Doob, convergence dans L^p pour $p > 1$, uniforme intégrabilité, convergence dans L^1 , critère de fermeture, intégrale stochastique discrète, martingales locales.

Contrôle stochastique : chaîne de Markov contrôlées, programmation dynamique, arrêt optimal, enveloppe de Snell, filtre de Kalman-Bucy, équations de Riccati.

UM
4MA

324 Groupes et algèbres de Lie (9 ECTS)

Responsable : Elisha Falbel

mél : elisha.falbel@imj-prg.fr

url : <https://webusers.imj-prg.fr/~elisha.falbel/>

Objectifs de l'UE : Ce cours combine l'algèbre et l'analyse pour étudier la structure des groupes de matrices réelles ou complexes.

Prérequis : Notions de base d'algèbre linéaire, de théorie des groupes, et de géométrie différentielle.

Thèmes abordés : Groupes topologiques et groupes de Lie. Application exponentielle. Algèbres de Lie. Théorèmes de structure des algèbres de Lie. Représentations

linéaires des groupes et algèbres de Lie. Mesure de Haar. Représentations de groupe de Lie compacts et théorème de Peter-Weyl. Application aux groupes $SO(3)$, $SU(2)$, $SL(2)$.

UM 4MA 329 **Approximation des EDP elliptiques et simulation numérique (9 ECTS)**

Responsables : Nathalie Ayi, Émile Parolin
 mél : nathalie.ayi@sorbonne-universite.fr
emile.parolin@inria.fr

Objectifs de l'UE : Ce cours porte sur l'analyse des équations aux dérivées partielles (EDP) linéaires. Plus particulièrement, le cours traite des équations de type elliptique pour lesquelles nous aborderons la théorie variationnelle permettant d'étudier l'existence, l'unicité et la régularité des solutions. Nous présenterons également en détail la méthode des éléments finis, qui permet la résolution numérique des EDP elliptiques, et nous étudierons d'un point de vue théorique la stabilité et la consistance de cette méthode. La mise en œuvre effective de la méthode des éléments finis du point de vue de la programmation et de l'algorithmique sera détaillée. Le cours s'appuiera sur des séances de TP de programmation en python.

Prérequis : Notions de base d'analyse réelle et hilbertienne, d'algèbre linéaire, et de calcul différentiel et intégral.

Thèmes abordés : Rappels sur le calcul différentiel, les espaces de Hilbert et de Sobolev : injections de Sobolev, théorème de trace, intégration par parties, inégalités de Poincaré et de Bramble-Hilbert.

EDP elliptiques : Conditions au bord type Dirichlet, Neumann, et Robin. Solutions faibles et fortes. Formulations variationnelles. Théorème de Lax Milgram. Existence, unicité et stabilité de la solution exacte. Approximation par éléments finis : lemme de Céa, problème variationnel discret et système linéaire équivalent, estimation d'erreur.

Principe d'assemblage des matrices éléments finis, calcul des intégrales élémentaires par formules de quadrature, méthode de pseudo-élimination, visualisation des solutions numériques, debuggage et validation d'un code élément fini, algorithmique pratique sur les maillages.

UM 4MA 330 **Théorie des distributions (9 ECTS)**

Responsable : Fabrice Planchon
 mél : fabrice.planchon@sorbonne-universite.fr
 url : <https://anadel.math.cnrs.fr/members/fab/>

Objectifs de l'UE : Le but de ce cours est de permettre l'acquisition de bases solides dans la théorie des distributions, notamment en lien avec l'analyse de Fourier. Les techniques développées seront appliquées à l'étude de problèmes classiques d'équations aux dérivées partielles et d'analyse réelle.

Prérequis : Théorie de la mesure, analyse fonctionnelle, calcul différentiel et intégral de licence. Avoir suivi l'UE 4MA305 d'Analyse fonctionnelle du premier semestre de master facilitera grandement la compréhension de l'UE, mais n'est pas indispensable.

Thèmes abordés : Fonctions de test et distributions, notions de convergence, ordre, lien avec les mesures. Support, dérivation, convolution, restriction. Distributions tempérées et leur transformée de Fourier. Espaces de Sobolev : produits, traces, cas des domaines bornés, problème de Dirichlet. Régularité intérieure, résolubilité locale, solutions fonda-

mentales d'EDP. Fonction maximale, points de Lebesgue, transformée de Hilbert (vers les opérateurs de Calderon-Zygmund).

UM
4MA

365 Modèles stochastiques pour la finance (9 ECTS)

Responsable : Idris Kharroubi

mél : idris.kharroubi@sorbonne-universite.fr

url : <https://www.lpsm.paris//pageperso/kharroubi/>

Objectifs de l'UE : Présenter des éléments de calculs stochastiques à temps discret et continu, avec application à la finance.

Prérequis : Il est indispensable d'avoir les connaissances du cours de Probabilités Approfondies (espérance conditionnelle, chaînes de Markov, martingales)

Thèmes abordés :

Temps discret : Introduction à l'évaluation en finance, martingales, calcul stochastique temps discret, arbitrage, théorie de Markowitz.

Temps continu : martingales, mouvement brownien, intégrale stochastique, formule d'Itô, formule de Feynman-Kac, contrôle de diffusions. Applications à la formule de Black et Scholes, à la gestion de portefeuille de Merton.

UM
4MA

376 Bases de l'apprentissage statistique (9 ECTS)

Responsable : Sylvain Le Corff

mél : sylvain.le_corff@sorbonne-universite.fr

url : <https://sylvainlc.github.io/>

Objectifs de l'UE : Ce cours propose une introduction à l'apprentissage statistique supervisé. Nous introduirons les notions de fonction de coût et de risque pour des problèmes de classification et de régression. Nous étudierons en particulier le classifieur de Bayes, l'analyse discriminante, la régression logistique. Nous aborderons des problèmes de régression multivariés et différents problèmes de régression pénalisée (avec pénalité L^1 et L^2). Pour chaque modèle, nous proposerons des bornes de risque ainsi que des considérations numériques utiles pour la mise en œuvre des TP. Le cours portera également sur les modèles linéaires généralisés ainsi que sur les méthodes de régression non paramétriques et à base de réseaux de neurones et de noyaux.

Le cours sera accompagné de travaux dirigés ainsi que de séances pratiques en Python utilisant les bibliothèques d'apprentissage statistique classique.

Prérequis : Connaissances en probabilités et statistique (variables aléatoires, espérance, vraisemblance). Connaissances en Python utiles mais non indispensables.

Thèmes abordés :

- Apprentissage statistique supervisé (classification, régression)
- Régression pénalisée et modèles linéaires généralisés
- Contrôle du risque
- Régression non paramétrique et à base de réseaux de neurones.

Remarque : Ce cours est ouvert en priorité aux étudiant-e-s des parcours Sciences des données, car il a un nombre de places limité. Il pourra accueillir d'autres étudiants sous réserve de disponibilité.

UM 4MA	379	Statistique computationnelle et machine learning (9 ECTS)
-----------	------------	--

Responsables : Arnaud Guyader et Sylvain Le Corff

méls : arnaud.guyader@upmc.fr et sylvain.le_corff@sorbonne-universite.fr

url : <https://perso.lpsm.paris/~aguyader/> et <https://sylvainlc.github.io/>

Objectifs de l'UE : Dans ce cours, nous présenterons des outils de simulation importants pour résoudre des problèmes d'apprentissage. Dans de nombreux cadres, en apprentissage automatique ou en statistiques bayésiennes, il est nécessaire de simuler des variables aléatoires ayant une distribution cible complexe afin en particulier d'estimer des espérances. On peut notamment citer les cas où cette distribution n'est connue qu'à une constante multiplicative près. Nous proposerons des méthodes de simulation exacte ainsi que des méthodes approchées. D'une part, nous donnerons des justifications théoriques pour les différents algorithmes. D'autre part, la mise en œuvre pratique sur machine des différentes méthodes est au cœur de ce cours (en python avec les modules : numpy, scipy, seaborn, scikit-learn, pytorch).

Prérequis : Programmation en Python. Il est très fortement recommandé d'avoir suivi les UE UM4MA311 et UM4MA315 du premier semestre.

Thèmes abordés :

- Principe et applications des méthodes Monte-Carlo, illustration en statistique bayésienne
- Méthodes Monte-Carlo par chaînes de Markov, application à la simulation de lois a posteriori
- Estimation des modèles à variables latentes (modèles de mélange, algorithme EM)
- Méthodes variationnelles pour les modèles à données manquantes (algorithme CAVI)
- Introduction aux méthodes de Monte-Carlo séquentielles.

UM 4MA	384	Méthodes classiques pour les EDP, modélisation (9 ECTS)
-----------	------------	--

Responsable : Julien Guillod

mél : julien.guillod@sorbonne-universite.fr

url : <https://guillod.org/>

Objectifs de l'UE : Ce cours aborde l'analyse d'équations emblématiques et fondamentales des grandes classes d'équations aux dérivées partielles (EDP) par des méthodes classiques.

Dans un premier temps, la méthode des caractéristiques sera introduite pour étudier les équations de transport (quasi-)linéaires régulières. Les équations emblématiques des classes elliptiques et paraboliques, à savoir les équations de Laplace-Poisson et de la chaleur seront étudiées. Les méthodes abordées incluront la représentation via solutions fondamentales, les méthodes d'énergie, ainsi que l'utilisation des séries et transformées de Fourier. Ces études s'accompagneront de l'analyse des propriétés fondamentales telles que le principe du maximum, la régularité des solutions et leur unicité.

La combinaison des phénomènes de transport et de diffusion sera ensuite étudiée à travers l'analyse des équations d'advection-diffusion, incluant la construction de solutions faibles par approximation de Galerkin et l'analyse de l'unicité et de la régularité.

Finalement, les équations des ondes linéaires seront étudiées par des méthodes de représentation (en 1D) et des méthodes d'énergie.

Une attention particulière sera portée tout au long du cours aux interprétations physiques des différentes équations rencontrées, en s'appuyant sur des ébauches de modélisation.

Prérequis : Notions de base d'analyse réelle, de calcul différentiel et intégral, ainsi que d'équations différentielles ordinaires.

Thèmes abordés : définition d'une équation aux dérivées partielles et des différents types (linéaires, semilinéaires, quasilinéaires), exemples fondamentaux d'équations avec interprétation physique et ébauche de modélisation, méthodes des caractéristiques, solution fondamentale, méthodes de représentation, méthodes d'énergies, principe du maximum, régularité, unicité, solution faible, approximation de Galerkin.



Orientation et insertion professionnelle (3 ECTS)

Responsable : Bruno Després

mel : bruno.despres@sorbonne-universite.fr

Voir en section [1.4.2](#).

Chapitre 2

Master 2, Parcours Mathématiques fondamentales

2.1 Objectifs et descriptions

Le parcours *Mathématiques fondamentales* s'adresse aux étudiants titulaires d'un M1 de mathématiques ou d'un titre équivalent.

Un large spectre des mathématiques fondamentales est généralement couvert, avec des variations selon les années : théorie des nombres, géométrie algébrique, théorie de Lie, topologie, géométries analytique et différentielle, systèmes dynamiques, analyse fonctionnelle, analyse harmonique, équations aux dérivées partielles, etc.

2.2 Débouchés professionnels

Le programme fournit une base solide aux futurs chercheurs et enseignants-chercheurs d'universités et centres de recherche, ainsi que pour les futurs enseignants. Certains étudiants continueront après le master un cursus de 3 ans d'études doctorales.

Une partie importante d'étudiants avec leurs diplômes du Master 2 pourront commencer ou avancer leurs carrières académiques ou dans le secteur des entreprises.

Notons que dans plusieurs grands pays comme l'Allemagne, le Royaume Uni ou les Etats-Unis, un master ou, mieux, une thèse de mathématiques est un gage suffisant de puissance et de créativité intellectuelles pour être recruté par une entreprise de haute technologie.

Les étudiants étrangers développeront des collaborations avec la France aussi bien en matière de recherche, d'enseignement que d'autres domaines. Certains d'eux travaillent déjà dans les universités ou les centres de recherche.

2.3 Organisation

Le cursus comprend des *cours*, une *UE d'ouverture* et un *mémoire*. Les étudiants sont libres de choisir les cours (en plus des cours de ce parcours à Sorbonne Université, les étudiants peuvent suivre et valider les cours du parcours M2 Mathématiques fondamentales de l'Université Paris Cité et de l'Université Sorbonne Paris Nord). Quatre cours seront exigés ainsi qu'un mémoire de recherche. Le mémoire, dirigé par un enseignant-chercheur, introduit les étudiants aux sujets de recherche en cours de développement.

Les étudiants sont tous suivis, guidés et encadrés par les responsables et les enseignants-chercheurs.

2.4 Publics visés, prérequis

Les étudiants ayant un diplôme de Master 1 de Sorbonne Université ou l'équivalent auront les meilleures chances de réussite dans ce parcours. Nous visons également les élèves des grandes écoles, les futurs agrégés et bien sûr les étudiants étrangers.

Les étudiants en thèse et les chercheurs débutants profiteront de ce programme pour élargir leur champ de connaissances.

Un nombre important de cours seront proposés pour l'enseignement à distance visant les étudiants en situation familiale ou professionnelle particulière.

2.5 Description des UE

5MF41. Surfaces de Riemann (9 ECTS) (1er semestre)

Professeur : ELISHA FALBEL

mel : elisha.falbel@imj-prg.fr

Objectifs de l'UE : L'objectif de ce cours est de proposer une introduction aux divers aspects algébriques, analytiques et géométriques d'un des objets les plus riches et les plus importants des mathématiques, qui est la source de plusieurs domaines de la recherche contemporaine.

Prérequis : Analyse complexe de M1 et bases de topologie et de géométrie différentielle.

Thèmes abordés :

- Définition et exemples, courbes elliptiques, courbes algébriques, courbes associées aux fonctions holomorphes, théorème d'uniformisation de Riemann.
- Aspects topologiques, genre, formule de Riemann-Hurwitz.
- Fibrés en droites (et courbure), différentielles holomorphes et théorème de Riemann-Roch.
- Faisceaux, cohomologie de Dolbeaut.

5MF45. Variétés algébriques (9 ECTS) (1er semestre)

Professeur : MATHIEU FLORENCE

mel : mflorence@imj-prg.fr

Objectifs de l'UE : On introduit le langage des variétés algébriques, qui systématise l'étude des solutions d'équations polynomiales à coefficients dans un corps (supposé ici parfait). On définira la notion de point lisse et d'espace tangent. On construira les courbes projectives lisses, en introduisant leur groupe de Picard (classes d'équivalence de diviseurs).

Prérequis : Familiarité avec l'algèbre commutative : modules sur un anneau, quotient, localisation, produit tensoriel, platitude... C'est la grammaire de la géométrie algébrique : à intégrer dès le début, solidement et sans excès ! :) Des révisions seront faites en TD si nécessaire.

Vous pouvez lire le premier chapitre du livre de U. Görtz et T. Wedhorn. Notez cependant que les schémas ne seront pas abordés dans ce cours.

Thèmes abordés :

- ensembles algébriques, topologie de Zariski, composantes irréductibles, sous-variétés
- variétés (affines, projectives, abstraites), exemples
- dimension, régularité, espace tangent
- courbes projectives lisses et corps de degré de transcendance 1
- diviseurs sur les courbes projectives lisses, formule du degré et groupe de Picard
- théorème d'intersection de Bézout (énoncé, et démontré si temps)

5MF43. Introduction aux systèmes dynamiques (9 ECTS) (1er semestre)

Professeur : PATRICE LE CALVEZ

mel : patrice.le-calvez@imj-prg.fr

Objectifs de l'UE : Intuitivement, un système dynamique est un système soumis aux effets d'une loi d'évolution dans le temps. Nous présenterons dans ce cours les principales notions permettant de développer cette idée, notamment en décrivant différents types de comportements "à long terme". Ces notions seront illustrées par des exemples classiques.

Prérequis : Notions de topologie générale et de théorie de la mesure.

Thèmes abordés :

- Dynamique topologique (récurrence, transitivité, minimalité, conjugaison,...)
- Introduction à la théorie ergodique (mesures ergodiques, théorèmes de Birkhoff et de Bogolyubov)
- Entropie topologique

5MF51. Géométrie différentielle et Riemannienne (9 ECTS) (1er semestre)

Professeur : FREDERIC NAUD

mel : frederic.naud@imj-prg.fr

Objectifs de l'UE : Ce cours introductif traite des notions de base en géométrie différentielle. Après des rappels sur les champs de vecteurs, les formes différentielles et le théorème de Stokes, on abordera la théorie des fibrés vectoriels et des connections que l'on spécialisera ensuite au cas Riemannien pour y parler de géodésiques, de courbure etc...

Prérequis :

Thèmes abordés :

- Variétés différentielles : variétés, sous-variétés, espace tangent, champs de vecteurs, flots, théorème de Frobenius.
- Formes différentielles, orientation, Stokes.
- Fibrés vectoriels, connections, courbure. Exemples
- Métriques Riemanniennes, connection de Levi-Civita. Géodésiques, application exponentielle, Hopf-Rinow.
- Courbures : sectionnelle, Ricci. Espaces à Courbure constante. Classes de Chern, forme d'Euler et généralisations de Gauss-Bonnet.

5MF50. Introduction à l'analyse géométrique (9 ECTS) (1er semestre)

Professeur : OLIVIER BIQUARD

mel : olivier.biquard@sorbonne-universite.fr

Objectifs de l'UE : L'analyse géométrique est au coeur des progrès en géométrie réelle et complexe sur les variétés dans les années récentes (par exemple, le flot de Ricci a permis la démonstration de la conjecture de Poincaré). Le cours donnera une introduction à ces techniques.

Prérequis : Géométrie différentielle et riemannienne

Thèmes abordés :

- Analyse des opérateurs elliptiques
- Inégalités de Sobolev
- Formule de Bochner et applications
- Fonctions harmoniques
- Exemples de problèmes géométriques non linéaires

5MF13. Introduction aux formes modulaires (9 ECTS) (1er semestre)

Professeur : FARRELL BRUMLEY

mel : brumley@imj-prg.fr

Objectifs de l'UE : Les formes modulaires jouent un rôle essentiel dans la théorie des nombres moderne, comme en témoigne la preuve par Wiles du dernier théorème de Fermat, et ont leurs racines dans des questions arithmétiques fondamentales, telles que la formule de Jacobi du nombre de représentations d'un entier comme somme de 4 carrés. Ce cours introduira ses objets, donnera des exemples, explorera quelques-unes de leurs propriétés arithmétiques et analytiques, et introduira des outils nécessaires à leur étude.

Prérequis : Fonctions d'une variable complexe.

Thèmes abordés :

- Géométrie hyperbolique (demi-plan de Poincaré, $SL_2(\mathbb{Z})$ et ses sous-groupes de congruences)
- Formes modulaires (définitions et exemples : séries thêta, séries d'Eisenstein, séries de Poincaré, Ramanujan Delta) et leur coefficients de Fourier
- Opérateurs de Hecke, le calcul de leurs traces par Eichler-Selberg, la théorie des formes nouvelles, lien avec les fonctions L
- Multiplication complexe, algébraicité des modules singuliers, principe du q-développement
- Séries d'Eisenstein (continuation analytique, équation fonctionnelle, terme constant, preuve de Bernstein)
- Formules de traces (existence des formes de Maass cuspidales pour $SL_2(\mathbb{Z})$, preuve par amplification)

5MF22. Introduction à la théorie des schémas (9 ECTS) (1er semestre)

Professeur : JEAN-FRANÇOIS DAT

mel : jean-francois.dat@imj-prg.fr

Objectifs de l'UE : La théorie des schémas est le langage moderne de la géométrie algébrique. Même si on s'intéresse principalement aux variétés sur un corps algébriquement clos, la théorie des schémas est le cadre formel dans lequel on peut définir et étudier les espaces de déformations ou les espaces de modules de ces variétés. Si on s'intéresse aussi aux propriétés arithmétiques des dites variétés, la théorie des schémas permet de travailler sur un anneau quelconque. Dans ce cours, on introduira les concepts fondamentaux, qu'on essaiera de motiver par des analogies avec des objets plus classiques.

Prérequis : Algèbre commutative de M1 (notamment localisation et produit tensoriel). C'est un plus de connaître un peu le langage classique de la géométrie algébrique comme dans le cours introductif "variétés algébriques"

Thèmes abordés :

- Rappels algébriques, catégoriques, et faisceautiques

- Le spectre d'un anneau commutatif
- Schémas : points de vue géométrique et fonctoriel
- Immersions, morphismes affines, morphismes finis
- Faisceaux quasi-cohérents
- Schémas projectifs, morphismes propres

5MF24. Introduction à l'arithmétique des courbes elliptiques (9 ECTS)
(1er semestre)

Professeur : JAVIER FRESÁN

mel : javier.fresan@imj-prg.fr

Objectifs de l'UE : Une courbe elliptique sur \mathbb{Q} est une courbe algébrique lisse que l'on peut obtenir comme lieu des zéros d'un polynôme homogène de degré 3 dans le plan projectif sur \mathbb{Q} . C'est en quelque sorte l'objet le plus simple de la géométrie arithmétique après les "quadriques". Les points complexes d'une courbe elliptique forment une surface de Riemann dont l'espace topologique sous-jacent est un tore, et donc en particulier un groupe. Le fait que cette loi de groupe soit algébrique et définie sur \mathbb{Q} permet d'attacher des invariants arithmétiques très importants, à savoir la structure du groupe des points rationnels et l'action de Galois sur les points "de torsion". Le but de ce cours sera d'introduire ces notions afin de pouvoir énoncer deux conjectures majeures du 20ème siècle : celle de Birch et Swinnerton-Dyer, toujours ouverte, et celle dite "de modularité", célèbre pour impliquer le théorème de Fermat, et prouvée par Wiles, Taylor et al.

Prérequis : "Surfaces de Riemann" et "Variétés algébriques"

Thèmes abordés :

- Sur \mathbb{C} : tores de dimension 1, invariant modulaire, courbes et formes modulaires.
- Sur un corps quelconque : courbes de genre 1, structure de groupe, équations, isogénies, points de torsion.
- Sur un corps fini : théorème de Hasse, fonction zêta
- Sur \mathbb{Q} : théorème de Mordell-Weil, fonction L, conjectures.

5MF52. Topologie algébrique des variétés I (9 ECTS) (1er semestre)

Professeur : ILIA ITENBERG

mel : ilia.itenberg@imj-prg.fr

Objectifs de l'UE : Un des buts de la topologie algébrique est de fournir des outils algébriques pour l'étude des espaces topologiques. Parmi ces outils, on peut mentionner, par exemple, les groupes d'homologie et les groupes de cohomologie. Un des objectifs principaux de ce cours est d'approfondir les notions d'homologie et de cohomologie à travers l'étude des variétés topologiques et des variétés lisses. L'on supposera connues la définition et les propriétés de base d'homologie et de cohomologie (mais on fera, néanmoins, un petit rappel) et l'on se proposera d'étudier le contenu géométrique de ces notions. Les thèmes phares de ce cours sont la dualité de Poincaré et la théorie de l'intersection.

Prérequis : Il est souhaitable d'avoir suivi un cours de topologie algébrique de niveau M1. Il est aussi souhaitable d'avoir suivi au moins un des cours introductifs "Homologie, cohomologie et faisceaux" et "Géométrie différentielle et riemannienne".

Thèmes abordés :

- Rappels sur l'homologie singulière et la cohomologie singulière.
- CW complexes, homologie cellulaire.

- Variétés, classe fondamentale.
- Produits. Dualité de Poincaré. Intersections dans les variétés.

5MF42. Géométrie complexe et théorie de Hodge (9 ECTS) (1er semestre)

Professeur : BENOÎT STROH

mel : benoit.stroh@imj-prg.fr

Objectifs de l'UE : Dans un premier temps on présentera une introduction à la géométrie complexe, qui est une version géométrique globale (au sens de la géométrie différentielle) de la théorie des fonctions analytiques. On introduira ensuite des outils cohomologiques basés sur la théorie des faisceaux. Enfin, on étudiera en détail la théorie harmonique et ses conséquences pour les variétés Kähleriennes : le théorème de décomposition de Hodge, mais également les théorèmes de Lefschetz.

Prérequis : Cours introductifs recommandés : surfaces de Riemann et Géométrie différentielle et riemannienne.

Thèmes abordés :

- Structure complexes, hermitiennes et symplectiques.
- Fibrés vectoriels, métriques, variétés complexes et Kähleriennes
- Faisceaux, cohomologie de De Rham et de Dolbeault
- Théorie Harmonique et décomposition de Hodge
- Suite spectrale Hodge vers De Rham.
- Théorèmes de Lefschetz.

5MF90. Topologie algébrique des variétés II : classes caractéristiques (9 ECTS) (2nd semestre)

Professeur : PENKA GEORGIEVA

mel : penka.georgieva@imj-prg.fr

Objectifs de l'UE : Le cours poursuit l'étude de la topologie des variétés différentiables, commencée dans le cours "Topologie algébrique des variétés I". Il peut être considéré comme introduction à la théorie des classes caractéristiques, un sujet qui se situe à l'interface de la topologie algébrique et de la géométrie.

Prérequis : Cours fondamental I "Topologie algébrique des variétés I".

Thèmes abordés :

- Fibrés vectoriels et notion de classe caractéristique.
- Classes de Stiefel-Whitney pour les fibrés vectoriels réels.
- Classes de Chern pour les fibrés vectoriels complexes.
- Classes de Pontryagin. Cobordismes et cobordismes orientés.

5MF64. Aspects tropicaux de la géométrie énumérative (9 ECTS) (2nd semestre)

Professeur : ILIA ITENBERG

mel : ilia.itenberg@imj-prg.fr

Objectifs de l'UE : Le but du cours est de faire les premiers pas en géométrie énumérative, en considérant quelques problèmes consacrés au dénombrement d'objets algèbro-géométriques, par exemple, de courbes algébriques dans le plan projectif, satisfaisant certaines conditions. Les outils principaux pour l'étude de problèmes énumératifs dans ce cours proviennent de la géométrie tropicale, un domaine mathématique qui a connu un progrès spectaculaire pendant les vingt-cinq dernières années.

La géométrie tropicale peut être vue comme une géométrie algébrique sur le semi-corps des *nombre tropicaux*, c'est-à-dire, les nombres réels complétés par $-\infty$ et munis de l'arithmétique $(\max, +)$. Géométriquement, les variétés tropicales sont beaucoup plus simples que leurs analogues classiques (par exemple, les courbes tropicales dans le plan sont certains graphes rectilignes). Néanmoins, elles portent une information importante concernant des variétés algébriques complexes ou réelles. On parlera tout particulièrement de courbes tropicales et d'applications de la géométrie tropicale en géométries énumératives complexe et réelle.

Prérequis : Familiarité avec la géométrie complexe (cours *Surfaces de Riemann et Géométrie complexe et théorie de Hodge*).

Thèmes abordés :

- Exemples de problèmes énumératifs.
- Courbes tropicales (en particulier, courbes tropicales vues comme limites tropicales de surfaces de Riemann).
- Géométrie énumérative tropicale.
- Approche tropicale au dénombrement de courbes algébriques complexes ou réelles. Théorèmes de correspondance.
- Résultats concernant les invariants de Gromov-Witten et les invariants de Welschinger.
- Invariants énumératifs raffinés.

5MF65. Introduction aux équation dispersives (9 ECTS) (2nd semestre)

Professeur : JACEK JENDREJ

mel : jendrej@imj-prg.fr

url : <https://webusers.imj-prg.fr/~jacek.jendrej/enseignement/Dispersives-25/poly.pdf>

Objectifs de l'UE : L'objectif de ce cours est d'introduire les notions fondamentales de la théorie des équations aux dérivées partielles dites *dispersives*. Ces équations modélisent les ondes dispersives, c'est-à-dire les ondes dont la vitesse de propagation dépend du nombre d'onde. La dispersion joue un rôle crucial dans la description de nombreux phénomènes physiques.

Dans la première partie du cours, nous présentons une théorie générale des équations dispersives linéaires. Ensuite, nous nous intéressons aux ondes dispersives non linéaires, en nous focalisant sur le cas de l'équation de Klein-Gordon.

Prérequis : Calcul différentiel ; équations différentielles ordinaires ; transformation de Fourier ; notions de base sur l'analyse fonctionnelle et les équations aux dérivées partielles. Il est recommandé d'avoir suivi les cours HFE et EDP proposés dans le programme M2.

Thèmes abordés :

- Équations dispersives linéaires et leur résolution par la transformation de Fourier. Relation de dispersion. Lemme de la phase stationnaire. Notion de vitesse de groupe d'une onde. Description asymptotique des ondes dispersives en temps grand. Estimations de dispersion.
- Équation de Klein-Gordon non linéaire. Caractère bien posé (problème de Cauchy). Description asymptotique des solutions en temps grand dans différents régimes asymptotiques. Scattering non linéaire.
- Si le temps le permet : Scattering modifié en dimension 1. Formes normales.

5MF73. Systèmes dynamiques II (9 ECTS) (2nd semestre)

Professeur : FRÉDÉRIC LE ROUX

mel : frederic.le-roux@imj-prg.fr

Objectifs de l'UE : Ce cours, qui constitue la suite du cours Systèmes Dynamiques I du premier semestre, sera principalement consacré à l'étude des systèmes dynamiques uniformément hyperboliques. Ceux-ci forment une large classe de systèmes qui sont à la fois "chaotiques" et stables.

Nous introduirons les exemples fondamentaux (doublement de l'angle, fer à cheval de Smale, automorphismes linéaires hyperboliques du tore, flot géodésique en courbure négative) et les principaux outils pour leur étude (théorème de la variété stable, théorème de stabilité, partitions de Markov, sous-décalages).

Ceci nous permettra d'étudier les systèmes concernés sous de nombreux points de vue : géométrique (dessin des variétés stables et instables), combinatoires (codage comme sous-décalages), ergodiques (mesures de Markov, mesure d'entropie maximale), etc.

Prérequis : Le cours introductif de systèmes dynamiques et le cours de systèmes dynamiques I sont conseillés. On peut aussi lire la partie II de la première référence indiquée ci-dessous.

Thèmes abordés :

- Orbites périodiques hyperboliques. Ensembles invariants hyperboliques.
- Théorème de la variété stable
- Théorème de stabilité
- Partitions de Markov et codage
- Exemples : doublement de l'angle, fer à cheval de Smale, automorphismes d'Anosov, flot géodésique en courbure négative

5MF66. Introduction aux espaces de modules de surfaces de Riemann (9 ECTS) (2nd semestre)

Professeur : BRAM PETRI

mel : bram.petri@imj-prg.fr

url : https://webusers.imj-prg.fr/~bram.petri/teaching_moduli_2526.html

Objectifs de l'UE : Les surfaces de Riemann sont des objets qui apparaissent partout en mathématiques. Bien sûr, elles jouent un rôle important en analyse complexe et en géométrie mais par exemple aussi en dynamique, en théorie des nombres et en combinatoire.

Leurs espaces de modules - les espaces qui paramétrisent les surfaces de Riemann - sont également étudiés de nombreux points de vues différents. Le but de ce cours est de comprendre la géométrie et la topologie de ces espaces de modules. Le cours est aussi préparatoire pour le cours spécialisé "Géométrie et dynamique dans les espaces de modules" d'Anton Zorich.

Prérequis : Topologie, géométrie différentielle, surfaces de Riemann.

Thèmes abordés :

- Rappel rapide sur les surfaces de Riemann
- Groupes modulaires (mapping class groups)
- La topologie de l'espace de modules : par exemple la caractéristique d'Euler et les bases de la théorie d'intersection
- La géométrie de l'espace de modules : Métrique Weil-Petersson et métrique de Teichmüller

5MF70. La théorie des noeuds via le polynôme d'Alexander (9 ECTS) (2nd semestre)

Professeur : FATHI BEN ARIBI

mel : benaribi@imj-prg.fr

url : https://www.normalesup.org/~benaribi/Cours_Alexander_31mai2021.pdf

Objectifs de l'UE : La théorie des noeuds est une branche de la topologie de petite dimension qui vise à classer les noeuds et entrelacs, i.e. les plongements de cercles dans l'espace de dimension 3.

Pour classer les noeuds, on utilise des invariants dont les constructions touchent à de multiples domaines (combinatoire, topologie, topologie algébrique, théorie des groupes, théorie des représentations, géométrie hyperbolique...).

Un de ces invariants est le polynôme d'Alexander, un polynôme de Laurent à coefficients entiers aux nombreuses définitions, qui vient de fêter son centenaire.

Dans ce cours, on se propose donc d'explorer les différentes facettes de la théorie des noeuds (combinatoire de diagramme, surfaces plongées, homologie de revêtement, invariants quantiques, représentations de groupes de tresses...) en suivant le fil rouge qu'est le polynôme d'Alexander : chaque chapitre sera illustré par une nouvelle définition de cet invariant.

Ainsi, nous pourrons mettre en évidence des liens entre divers domaines, toujours étudiés dans la recherche actuelle. On s'entraînera aussi à dessiner des noeuds et à reconnaître les méthodes de calculs d'invariants les plus efficaces selon la situation.

Prérequis : Algèbre commutative de niveau licence (groupes, anneaux, algèbres, modules).

De préférence, bases de la topologie algébrique : groupe fondamental, revêtements, complexes de chaînes, homologie, éventuellement CW-complexes (on fera de brefs rappels dessus, mais c'est mieux d'avoir déjà rencontré ces concepts).

Il est ainsi recommandé d'avoir suivi les cours « Topologie algébrique des variétés I » et/ou « Homotopie I ».

Thèmes abordés :

- Noeuds, diagrammes et invariants
- Surfaces de Seifert
- Relations skein et invariants quantiques
- Groupe du noeud et module d'Alexander
- Groupes de tresses
- Homologies tordues et torsions de Reidemeister

5MF71. Metric Embeddings (9 ECTS) (2nd semestre)

Professeur : ALEXANDROS ESKENAZIS

mel : alexandros.eskenazis@imj-prg.fr

Objectifs de l'UE : In this course we will explore methods showing the (non)embeddability of metric spaces into Banach spaces. This classical direction in nonlinear functional analysis has grown to be a central topic in mathematics having interactions with Banach space theory, discrete analysis, geometric group theory, combinatorics, probability, differential geometry, and noncommutative geometry, while also having powerful applications to theoretical computer science. Our goal is to study fundamental aspects of embedding theory including : Schoenberg's theory of isometric embeddings, Bourgain's embedding theorem for finite metric spaces, Assouad's embedding theorem for doubling spaces, the embeddability properties of Hamming cubes, ℓ_∞ grids, trees and fractals into Banach

spaces, the metric geometry of planar graphs and expander graphs, metric notions of Rademacher type, cotype and uniform convexity, dimensionality reduction, topological methods in embedding theory, and applications to algorithms.

Prérequis : No prerequisites are needed, though a solid background in general functional analysis (Hilbert and Banach spaces) and graph theory would be useful.

Thèmes abordés :

- Isometric, bi-Lipschitz, uniform and coarse embeddings
- Euclidean embeddings of finite and doubling metric spaces
- Embeddings of expanders and planar graphs into Banach spaces
- Metric invariants and the Ribe program
- Metric dimension reduction
- Algorithmic applications

5MF77. Exponential motives (9 ECTS) (2nd semestre)

Professeur : JAVIER FRESAN

mel : fresan@imj-prg.fr

Objectifs de l'UE : Exponential motives are a universal cohomology theory for pairs consisting of an algebraic variety over some field and a regular function on it. These objects have attracted considerable attention in recent years, especially in connection with exponential periods, exponential sums over finite fields, and mirror symmetry for Fano varieties. At first sight unrelated, these three topics enjoy rich connections with each other. Guided by the philosophy of exponential motives, we can sometimes turn into theorems what had earlier been inspiring analogies.

Prérequis : Variétés algébriques, Schémas I : introduction à la théorie des schémas, Schémas II : faisceaux cohérents et cohomologie.

The course "Perverse sheaves and decomposition theorem" would definitely be useful but is not a prerequisite.

Thèmes abordés :

- Rapid decay cohomology, twisted de Rham cohomology, and the comparison isomorphism
- The category of perverse sheaves with vanishing cohomology on the affine line
- Construction of the tannakian category of exponential motives over a subfield of the complex numbers
- Characterisation of classical motives within the category of exponential motives
- The exponential period conjecture
- Applications to E-functions

5MF78. Théorie de la rotation sur les surfaces hyperboliques (9 ECTS) (2nd semestre)

Professeur : PIERRE-ANTOINE GUIHÉNEUF

mel : pierre-anotoine.guiheneuf@imj-prg.fr

Objectifs de l'UE : La théorie de la rotation pour les homéomorphismes du tore a été développée dans les années 90 comme une généralisation en dimension 2 de la théorie de Poincaré pour les homéomorphismes du cercle. La morale de ces travaux est qu'il est possible de lire certaines propriétés dynamiques de l'homéomorphisme (comme par exemple son entropie) sur un invariant appelé "ensemble de rotation" qui collecte toutes les vitesses de rotation des orbites autour du tore.

Dans ces mêmes années 90 il y a eu plusieurs tentatives pour obtenir des résultats similaires sur les surfaces fermées de genre au moins 2, qui n'ont abouti qu'à des résultats partiels. L'apparition récente de nouveaux outils, mais aussi la définition d'un nouvel invariant homotopique (par opposition à l'invariant classique qui est homologique), ont permis ces dernières années de commencer à comprendre les propriétés rotationnelles des homéomorphismes de telles surfaces, ce qui a abouti à la preuve de résultats similaires au cas du tore, mais aussi à l'obtention de nouveaux énoncés traduisant une plus grande richesse dynamique que pour le cas du tore.

Prérequis : Théorie de Poincaré pour les homéomorphismes du cercle, théorèmes principaux de théorie ergodique (Birkhoff et Kingman) et fer à cheval de Smale. Ces notions sont abordées dans les trois cours précédents dans le parcours systèmes dynamiques.

Thèmes abordés :

- Ensemble de rotation homologique
- Géodésiques traçantes
- Création de fers à cheval rotationnels
- Déviations bornées
- Homéomorphismes avec gros ensemble de rotation

2.6 Responsables et site

Les responsables du parcours sont FRÉDÉRIC NAUD et BENOÎT STROH. Les informations complètes, régulièrement mises à jour, seront disponibles sur les pages web :

<http://master-math-fonda.imj-prg.fr>

Sécrétariat : Mme LAURENCE DREYFUSS

Campus de Jussieu

(premier étage, couloir 15-25, bureau 1.09)

4 place Jussieu, 75005 Paris

Tél & Fax : 01 44 27 85 45

Mél : laurence.dreyfuss@sorbonne-universite.fr

Chapitre 3

Master 2, Parcours Probabilités et modèles aléatoires

3.1 Objectifs et descriptions

L'objectif du parcours “PROBABILITÉS ET MODÈLES ALÉATOIRES” de la seconde année du Master de Sorbonne Université, est de délivrer une formation de haut niveau en probabilités théoriques et appliquées.

En 2025-26 nous proposons **trois majeures** :

- Théorie des Processus Stochastiques
- Probabilités et Analyse
- Probabilités Appliquées.

La première et la deuxième majeure préparent les étudiants à une carrière de chercheur (ou enseignant-chercheur) en milieu académique. La deuxième majeure est organisée conjointement avec le parcours “Mathématiques de la Modélisation”. La troisième majeure oriente les étudiants vers une carrière en milieu industriel, en passant par des stages et des thèses CIFRE.

3.2 Débouchés professionnels

L'objectif principal de cette spécialité est de préparer à une carrière de recherche dans les domaines des probabilités théoriques ou appliquées, de la statistique mathématique. Une bonne proportion des étudiants devrait s'orienter vers la préparation d'une thèse ; un autre débouché naturel est la professionnalisation en milieu industriel. Finalement le diplôme de ce master constitue un atout incontestable dans la carrière de professeurs agrégés en mathématiques.

3.3 Organisation

Cette formation se fait en co-habilitation l'École Normale Supérieure - Ulm et le CERMICS (Ecole des Ponts ParisTech).

Après un cours préliminaire de 2 semaines de remise à niveau, au **premier semestre** *tous* les étudiants suivent les cours

- Processus Stochastiques (9 ECTS)
- Modèles Markoviens Discrets (6 ECTS).

Les étudiants qui ont choisi la majeure “*Processus stochastiques*” suivent les cours

- Processus de Markov et Applications (3ECTS)
- Convergence de Mesures, Grandes Déviations, Percolation (6ECTS)
- Nuages Poissoniens, Processus de Lévy et Excursions(6 ECTS).

Les étudiants qui ont choisi la majeure “*Probabilités et Analyse*” suivent les cours communs avec le parcours M2 Mathématiques de la Modélisation

- Équations aux dérivées partielles linéaires (5 ECTS)
- Équations aux dérivées partielles elliptiques (5 ECTS)
- Équations aux dérivées partielles d’évolution (5 ECTS)

Les étudiants qui ont choisi la majeure “*Probabilités Appliquées*” suivent les cours

- Probabilités Numériques et Méthodes de Monte Carlo (9ECTS),
- Statistique et Apprentissage(6 ECTS).

Ces cours du premier semestre présentent les aspects fondamentaux du domaine ; ils forment la base sur laquelle s’appuient les cours spécialisés. Au **deuxième semestre** les étudiants choisissent les cours spécialisés dans la liste suivante :

- “Probabilités, Géométrie et Dynamique”(6ECTS),
- “Probabilités et Physique”(6ECTS),
- “Probabilités, Méthodes Numériques et Algorithmes”(6ECTS),
- “Processus Stochastiques et Statistiques II”(6ECTS),
- “Géométrie et Graphes aléatoires”(6ECTS),
- “Probabilités, Biologie et Neurosciences”(6 ECTS),
- “Probabilités et Analyse”(6 ECTS).

Ces cours présentent plusieurs domaines à la pointe de la recherche en Probabilités Théoriques et Appliquées.

Les cours du second semestre conduisent les étudiants à une première confrontation avec la recherche sous forme d’un mémoire ou d’un stage. **Le mémoire** consiste en général en la lecture approfondie d’un ou plusieurs articles de recherches récents, sous la direction d’un membre du Laboratoire de Probabilités, Statistique et Modélisation ou d’un enseignant de la spécialité. Il doit être rédigé en Latex et soutenu devant un jury.

Le mémoire peut-être remplacé par un rapport de stage. **Le stage** s’effectue dans un organisme de recherche ou un bureau d’études, sous la direction conjointe d’un ingénieur de l’organisme d’accueil et d’un enseignant de la spécialité.

La travail de mémoire ou de stage est crédité de 12ECTS. Les étudiants doivent le compléter par la validation de 3 cours optionnels de 6 ECTS au choix pour valider le deuxième semestre

3.4 Publics visés, prérequis

Cette spécialité s’adresse à des types très variés d’étudiants, en fonction de l’orientation choisie : Les majeures “Processus Stochastiques” et “Probabilités et Analyse” sont plutôt destinées à des étudiants ayant une très bonne formation mathématique se dirigeant vers la recherche académique. La majeure “Probabilités Appliquées” est aussi destinée aux étudiants plus intéressés par les applications en milieu industriel. Elle est très largement ouverte aux élèves ayant une formation plus générale de type ingénieur. Accessoirement, elle approfondit et complète la formation de professeurs agrégés en classes préparatoires.

3.5 Description des UE

UE préliminaires

5MA00 Prérentrée en probabilités (0 ECTS) (cours préliminaire intensif de deux semaines au 1er semestre)

Professeur :

mel : irina.kourkova@sorbonne-universite.fr

Objectifs de l'UE : Compléter et consolider un prérequis de connaissances en calcul des probabilités indispensable pour réussir le parcours "Probabilités et Modèles Aléatoires".

Prérequis : Cours de théorie de la mesure et d'intégration, cours de probabilités de base.

Thèmes abordés : Rappels de théorie de la mesure et de l'intégration, de différents modes de convergence en calcul de probabilités. Espérance conditionnelle, martingales à temps discret.

UE du 1er semestre

5MA02 Calcul Stochastique et Processus de Diffusion (9 ECTS) (1er semestre)

Professeur : Nicolas Fournier

mel : nicolas.fournier@sorbonne-universite.fr

url : <https://perso.lpsm.paris/~nfournier/>

Objectifs de l'UE : Donner les connaissances indispensables sur l'intégrale stochastique et les équations différentielles stochastiques.

Prérequis : Cours de théorie de la mesure et d'intégration, cours de probabilités de base, espérance conditionnelle, martingales à temps discret.

Thèmes abordés : Le mouvement brownien, la continuité de ses trajectoires, la propriété de Markov (forte), l'intégration stochastique par rapport à une martingale de carré intégrable, la formule d'Ito, le théorème de Girsanov, les équations différentielles stochastiques (EDS) et leurs solutions faibles ou fortes (dites diffusions), les liens avec les équations aux dérivées partielles, la formule d'Ito-Tanaka, le temps local du mouvement brownien, les EDS réfléchies, EDS à coefficients non-lipschitziens, processus de Bessel.

5MM32 Modèles Markoviens sur des espaces discrets (6ECTS) (1er semestre)

Professeur : Thomas Duquesne

mel : thomas.duquesne@sorbonne-universite.fr

url : <https://perso.lpsm.paris/~tduquesne/>

Objectifs de l'UE : Présenter la théorie des processus de Markov sur des espaces discrets, des exemples et les techniques indispensables pour leur analyse.

Prérequis : Cours de théorie de la mesure et d'intégration, cours de probabilités de base, espérance conditionnelle, martingales à temps discret.

Thèmes abordés : Chaînes de Markov, récurrence et transience, mesure invariante. Processus de Markov de saut pur, équations de Kolmogorov, mesure invariante, phénomène d'explosion, théorèmes limites. Applications en mécanique statistique, en biologie et autres domaines.

5MA03 Processus de Markov et Applications (3 ECTS) (1er semestre)

Professeur : Thomas Duquesne

mel : thomas.duquesne@sorbonne-universite.fr

url : <https://perso.lpsm.paris/~tduquesne/>

Objectifs de l'UE : Compléter le cours de Modèles Markoviens Discrets par la théorie des processus de Markov, des exemples et des techniques de base indispensables pour leur analyse.

Prérequis : Cours de théorie de la mesure et d'intégration, cours de probabilités de base, espérance conditionnelle, martingales à temps discret, cours "Modèles Markoviens Discrets".

Thèmes abordés : Processus de Markov, générateur infinitésimal, résolvante. Propriété de Markov forte. Problème de martingales. Équations de Kolmogorov. Processus de diffusions, leurs générateurs, les liens avec les EDP. Applications.

5MA01 Convergence de Mesures, Grandes Déviations, Percolation (6 ECTS) (1er semestre)

Professeur : Thierry Levy

mel : thierry.levy@sorbonne-universite.fr

url : <https://www.lpsm.paris/users/levyt/index>

Objectifs de l'UE : Ce cours consiste en trois chapitres largement indépendants dont le point commun est d'explorer des interactions entre la théorie des probabilités et la topologie ou la géométrie.

Prérequis : Une connaissance de la théorie de la mesure et de l'intégration, et des bases de la théorie des probabilités ; un contact avec la topologie des espaces métriques, et avec de l'analyse fonctionnelle.

Thèmes abordés : Convergence des processus : espaces polonais, espace des mesures sur un espace polonais, tension, théorème de Prokhorov, théorème de Donsker, convergence fonctionnelle des processus continus, critère de Kolmogorov.

Grandes déviations : entropie relative de deux mesures, théorème de Sanov, transformation de Legendre, théorème de Cramér.

Percolation : notion de transition de phase, ergodicité, inégalité FKG, phases sous- et sur-critique, théorème de Kesten.

5MA04 Nuages Poissoniens, processus de Levy, excursions (6 ECTS) (1er semestre)

Professeur : Thomas Duquesne

mel : thomas.duquesne@sorbonne-universite.fr

url : <https://perso.lpsm.paris/~tduquesne/>

Objectifs de l'UE : Approfondir le cours "Processus de Markov et Applications".

Prérequis : Cours de base "Processus de Markov et Applications", "Calcul Stochastique et Processus de Diffusions", "Théorèmes Limites pour les processus stochastiques".

Thèmes abordés : Les processus de Lévy, les processus de branchement, les mesures ponctuelles de Poisson, la théorie des excursions, des applications aux processus de Lévy.

5MA14 Probabilités Numériques et Méthodes de Monté Carlo (9 ECTS) (1er semestre)

Professeur : Gilles Pagès, Vincent Lemaire

mel : gilles.pages@sorbonne-universite.fr, vincent.lemaire@upmc.fr

url : <https://www.lpsm.paris/users/pages/index>

url : <https://perso.lpsm.paris/~vlemaire/site.html>

Objectifs de l'UE : Présenter les méthodes de Monte-Carlo et de Quasi-Monte-Carlo d'usage courant et les illustrer sur de nombreux exemples (calculs de prix de couverture et autres).

Prérequis : Cours de théorie de la mesure et d'intégration, cours de probabilités de base, espérance conditionnelle, martinagles à temps discret.

Thèmes abordés : 1. Génération de variables aléatoires suivant les lois usuelles.
 2. Méthode de Monte-Carlo : calcul d'espérance par simulation.
 3. Méthodes de réduction de variance : variables de contrôle, échantillonnage préférentiel, variables antithétiques, stratification, conditionnement.
 4. Quasi-Monte-Carlo : techniques de suites à discrécances faibles.
 5. Méthodes de gradient stochastique et de Bootstrap.
 6. Discrétisation en temps des équations différentielles stochastiques (schéma d'Euler, de Milstein) : application au pricing d'options européennes.
 7. Amélioration de la méthode dans le cas d'options path-dependent : ponts browniens et autres.
 8. Calcul des couvertures et sensibilités par méthode de Monte-Carlo.

Une mise en œuvre informatique des techniques abordées sera effectuée lors des séances de TD. Chaque étudiant devra réaliser, en binôme, un projet informatique (en langage C) implémentant soit des calculs de prix et de couvertures d'options soit des simulations d'autres modèles. Il remettra un rapport décrivant les méthodes utilisées et commentant les résultats obtenus.

5MA06 Statistique et Apprentissage (6 ECTS) (1er semestre)

Professeur : Cathrine Matias

mel : catherine.matias@sorbonne-universite.fr

url : <https://cmatias.perso.math.cnrs.fr/>

Objectifs de l'UE : Donner aux étudiants les bases fondamentales du raisonnement et de la modélisation statistique, tout en présentant une ouverture vers des thématiques de recherche contemporaines. L'accent sera particulièrement mis sur l'utilisation pratique des nouveaux objets rencontrés.

Prérequis : Une bonne connaissance du calcul des probabilités et de l'algèbre linéaire.

Thèmes abordés : Introduction à l'apprentissage statistique et à la classification supervisée. Minimisation du risque empirique, théorème de Vapnik-Chervonenkis. Règles de décision non paramétriques (méthode des k plus proches voisins et arbres de décision). Quantification et classification non supervisée. Modèle linéaire : estimation, intervalles de confiance et tests. Régression ridge et lasso. Spectral clustering en classification non supervisée. Arbres de décision.

Pour les cours "Équations aux dérivées partielles linaires, elliptiques et d'évolution" de la majeure "Probabilités et Analyse" voir la [section correspondante](#) dans le chapitre consacré au parcours Mathématiques de la Modélisation.

UE optionnelles, 2ème semestre.

5MA07 Probabilités, Géométrie et Dynamique (6 ECTS) (2ème semestre)

Professeurs : Bastien Fernandez, Romain Dujardin, Anna Erschler

mel : anna.erschler@sorbonne-universite.fr

mel : romain.dujardin@sorbonne-universite.fr

mel : fernandez@lpsm.paris

url : <https://bastienfernandez.perso.math.cnrs.fr/Home.html>

url : <https://perso.lpsm.paris/~rdujardin/Site/>

url : <https://perso.lpsm.paris/~rdujardin/Site/>

Thèmes abordés : Introduction à la théorie ergodique et systèmes dynamiques. Invariants asymptotiques et Marches aléatoires sur les groupes et les graphes. La dynamique du modèle Kuramoto.

5MA08 Probabilités et Physique. (6 ECTS) (2ème semestre)

Professeurs : Piet Lammers, Cedric Boutillier, Titus Lupu, Guillaume Barraquand

mel : cedric.boutillier@sorbonne-universite.fr

mel : titus.lupu@sorbonne-universite.fr

mel : plammers@lpsm.paris

mel : guillaume.barraquand@ens.fr

url : <https://perso.lpsm.paris/~boutillier/>

url : <https://www.lpsm.paris/users/tlupu/index>

url : <https://www.pietlammers.com/>

url : <https://www.phys.ens.psl.eu/~barraquand/>

Thèmes abordés : Mécanique statistique critique en dimension 2 et invariance conforme. Probabilités intégrables et la classe d'universalité de Kardar-Parisi-Zhang. Modèle d'Ising.

5MA09 Probabilités, Méthodes Numériques et Algorithmes (6 ECTS) (2ème semestre)

Professeurs : Benjamin Jourdain, Pierre Monmarché

mel : benjamin.jourdain@enpc.fr

mel : pierre.monmarche@sorbonne-universite.fr

url : <http://cermics.enpc.fr/~jourdain/>

url : <https://www.ljll.fr/monmarche/>

Thèmes abordés : Analyse Statistique des graphes. Transport optimal (martingale). Convergence en temps long des processus de Markov.

5MA10 Processus stochastiques et statistiques II (6 ECTS) (2ème semestre)

Professeurs : Olivier Wintenberger, Ismael Castillo, Raphael Lachieze-Rey

mel : ismael.castillo@sorbonne-universite.fr

mel : olivier.wintenberger@sorbonne-universite.fr

mel : raphael.lachieze-rey@math.cnrs.fr

url : <https://wintenberger.fr/>

url : <https://perso.lpsm.paris/~castillo/>

url : <https://helios2.mi.parisdescartes.fr/~rlachiez/>

Thèmes abordés : Bayésien non paramétrique et applications. Théorie et analyse des valeurs extrêmes. Processus déterminantaux, matrices aléatoires et hyperuniformité.

5MA11 Géométrie et Graphes Aléatoires (6 ECTS) (2ème semestre)

Professeurs : Bartek Blaszczyzyn, Nicolas Broutin, Jean-François Delmas

mel : bartek.blaszczyszyn@ens.fr, delmas@cermics.enpc.fr

mel : nicolas.broutin@upmc.fr

url : <http://www.di.ens.fr/~blaszczy/>

url : <https://perso.lpsm.paris/~broutinn/>

url : <https://cermics.enpc.fr/~delmas/>

Thèmes abordés : Processus ponctuels et graphes aléatoires. Limites d'échelle de graphes aléatoires. Les grands réseaux aléatoires denses, les graphons.

5MA12 Probabilités, Biologie et Neurosciences (6 ECTS) (2ème semestre)

Professeurs : Michele Thieullen, Gregory Nuel, Quentin Berger

mel : michele.thieullen@upmc.fr, gregory.nuel@upmc.fr

mel : quentin.berger@univ-paris13.fr

url : <https://nuel.perso.math.cnrs.fr/>

url : <https://www.math.univ-paris13.fr/~quentin.berger/>

Thèmes abordés : Modèles et méthodes stochastiques en neurosciences et en électrophysiologie. Propagation d'évidence dans les réseaux Bayésiens. Systèmes désordonnés et polymères dirigés.

5MA05 Probabilités et Analyse (6 ECTS) (2ème semestre)

Professeurs : Lorenzo Zambotti, Milica Tomasevic, Anna Ben-Hamou

mel : lorenzo.zambotti@sorbonne-universite.fr

mel : anna.ben-hamou@sorbonne-universite.fr

mel : milica.tomasevic@polytechnique.edu

url : <https://www.lpsm.paris/users/zambotti/index>

url : <https://www.lpsm.paris/users/abenhamou/index>

url : <http://www-sop.inria.fr/members/Milica.Tomasevic/>

Thèmes abordés : Rough paths et applications aux équations aux dérivées partielles. Processus de type McKean-Vlasov et équations paraboliques. Inégalités de concentration.

5MA13 Mémoire de recherche ou de stage (12 ECTS) (2ème semestre)

Deux possibilités se présentent.

Première possibilité : l'étudiant analyse en profondeur un ou plusieurs articles scientifiques sous la direction d'un enseignant. Ce travail aboutit à un mémoire de recherche (12 ECTS) que l'étudiant doit écrire et ensuite soutenir devant un jury.

Deuxième possibilité : l'étudiant effectue un stage en entreprise ou dans un institut de recherche sous la direction conjointe d'un ingénieur (ou chercheur) de cet organisme et un enseignant du parcours "Probabilités et Modèles Aléatoires". L'étudiant doit écrire un rapport de stage et soutenir son travail devant un jury.

3.6 Responsable et site

Responsable : IRINA KOURKOVA, Professeur à Sorbonne Université.

Adresse électronique : irina.kourkova@upmc.fr

Site : <https://www.lpsm.paris/formation/masters/m2-probabilites-et-modeles-aleatoires/>

Secrétariat : Yann Poncin, Sorbonne Université

2ème étage, couloir 14-15, Campus Jussieu, Sorbonne Université

Chapitre 4

Master 2, Parcours Probabilités et Finance

Ce master 2 est actuellement co-opéré avec l'École Polytechnique.

4.1 Objectifs et descriptions

L'objectif de ce parcours est d'apporter aux étudiants un enseignement de haut niveau dans le domaine de la finance mathématique probabiliste. Celle-ci recouvre l'ensemble de la finance de marchés, avec un accent tout particulier mis sur les instruments dérivés, l'étude approfondie des taux d'intérêt, l'analyse du risque d'une part et les méthodes numériques de la simulation de Monte Carlo au Machine Learning d'autre part.

L'année se décompose en un semestre de cours intensifs (de début septembre à fin mars) et un semestre de stage dans un établissement financier (de début avril au 30 septembre, éventuellement prolongeable jusqu'à la fin de l'année civile en cours).

4.2 Débouchés professionnels

Les diplômés de ce parcours s'orientent majoritairement vers les cellules de recherche des établissements financiers en France, en Europe (Londres) et dans le reste du monde (USA, Asie). Une fraction d'entre eux s'oriente vers la recherche (thèse, thèse CIFRE, etc.), puis vers des carrières universitaires.

4.3 Organisation

L'année se décompose en deux semestres.

Semestre 1 : Tronc commun fondamental

Il s'agit d'un semestre de cours intensifs.

– 4 cours de remise à niveau à choisir parmi 4 (Informatique de Python à C++, Probabilités, Statistique, EDP pour la Finance) pendant deux semaines à partir de la seconde semaine de tout début septembre.

– 1 bloc (UE) “Probabilités, méthodes numériques et optimisation” (à partir de fin septembre).

– 1 bloc (UE) “Finance de marché, dérivés et économétrie” (à partir de fin septembre).

Le tronc commun s’achève par une session d’examens la semaine de la rentrée en janvier.

Semestre 2 : Spécialisation et Professionnalisation

Le second semestre est constitué de deux phases.

Lors de la première, de janvier à fin mars, les étudiants doivent

– Valider deux cours obligatoires et (au loins) quatre cours d’option organisés en majeure et mineure.

– Réaliser un projet informatique dans la continuité du cours de *Probabilités numériques et méthode de Monte Carlo en Finance* du tronc commun.

La seconde partie de ce semestre est consacrée au stage en entreprise d’une durée minimale de 5 mois entre la mi-avril (après la fin de la session de rattrapage) et la fin septembre. Celui-ci doit impérativement avoir lieu en entreprise pour être validé.

Un séminaire hebdomadaire est entièrement dévolu à la recherche de stage : les entreprises y sont invitées à venir se présenter et à détailler leurs offres de stage. Le programme du séminaire est consultable sur le site (cf. infra).

4.4 Publics visés, prérequis

Les titulaires d’un M1 de mathématiques appliquées et les élèves de troisième année d’école d’ingénieurs. Les pré-requis sont :

– quantitativement : un excellent niveau général en mathématiques appliquées (Mention Bien au M1 ou top 15% dans une école d’ingénieurs ; double-cursus apprécié).

– qualitativement : un parcours ayant privilégié les disciplines de l’aléatoire (probabilités et statistique), si possible complété par des connaissances en Analyse appliquée (EDP) et un acquis solide en calcul scientifique (programmation C, C++).

La sélection des candidats est faite par un jury conjoint “Sorbonne Université-École Polytechnique”.

4.5 Liste des UE

• AU PREMIER SEMESTRE :

5MK01 Probabilités et calcul stochastique pour la finance” (15 ECTS) (1er semestre)

Professeur : Gilles Pagès

courriel : gilles.pages@sorbonne-universite.fr

<https://www.lpsm.paris/users/pages/index>

Objectifs de l’UE : Acquérir les outils mathématiques fondamentaux, notamment à caractère probabiliste et statistique en vue de leur application en finance de marché.

Prérequis : Cf. pré-requis généraux pour l’admission dans le parcours “Probabilités et Finance” du Master 2 de mathématiques et Applications

Thèmes abordés : Cette UE est constituée des 4 cours (ou ECUÉ) suivants : Introduction aux processus de diffusion et calcul stochastique ; Probabilités numériques : méthode de Monte Carlo en finance ; Optimisation convexe et contrôle stochastique ; Machine learning, réseaux de neurones et apprentissage profond. Les contenus de ces cours sont détaillés dans les paragraphes ci-après.

Cette UE est constituée des modules suivants :

- Introduction aux processus de diffusion, calcul stochastique (24C+ 24 TD, L. Zambotti).

Ce cours vise à fournir les outils probabilistes de base nécessaires à la théorie financière en univers aléatoire.

- Rappels de probabilités.
- Processus gaussiens. Mouvement brownien.
- Espérance conditionnelle. Martingales.
- Intégrale stochastique par rapport au mouvement brownien.
- Calcul stochastique. Formule d’Itô. Théorème de Girsanov.
- Équation différentielles stochastiques. Caractère Markovien des solutions. Liens avec certaines E.D.P.

- Probabilités numériques : méthode de Monte Carlo en finance (30C+18 TD+ projet cf. ci-après, G. Pagès, V. Lemaire).

Le but de ce cours est de présenter les méthodes de Monte-Carlo et de Quasi-Monte-Carlo d’usage courant en finance. De nombreux exemples issus de problèmes de calcul de prix et de couverture d’options illustrent les développements. Une mise en œuvre informatique des techniques abordées sera effectuée lors des séances de TD. Chaque étudiant devra réaliser, en binôme, un projet informatique (en langage C++) implémentant, soit des calculs de prix et de couvertures d’options, soit des simulations de modèles financiers. Il remettra un rapport décrivant les méthodes utilisées et commentant les résultats obtenus. Ce cours aborde les thèmes suivants :

- Introduction à la simulation : génération de variables aléatoires suivant les lois usuelles.
- Méthode de Monte-Carlo : calcul d’espérance par simulation.
- Méthodes de réduction de variance : variables de contrôle, échantillonnage préférentiel, variables antithétiques, stratification, conditionnement.
- Quasi-Monte-Carlo : techniques de suites à discrécances faibles.
- Optimisation stochastique, approximation stochastique, gradient stochastique et application à la résolution de problèmes inverses en finance.
- Discrétisation en temps des équations différentielles stochastiques (schéma d’Euler, de Milstein) : application au pricing d’options européennes.
- Amélioration de la méthode dans le cas d’options path-dependent : ponts browniens, pont de diffusion.
- Calcul de couvertures et de sensibilités par méthode de Monte-Carlo.
- Méthodes multi-niveaux avec et sans poids.

- Optimisation convexe et contrôle stochastique (24 C, I. Kharroubi).

Ce cours vise à fournir les outils probabilistes de base nécessaires en optimisation convexe et en contrôle stochastique en vue d’applications à la finance.

- Optimisation convexe.
- Contrôle stochastique.

- Machine learning, réseaux de neurones et apprentissage profond (24 C +12 TP, P. Gallinari, O. Schwander et B. Wilbertz).

Le but de ce cours est de présenter :

- les principales méthodes employées en Machine learning (régressions linéaire et non-linéaire, arbres de décision (random forest, CART, Catboost, etc)),

- les réseaux de neurones (perceptron multicouches, rétro-propagation du gradient et gradient stochastique)
 - les derniers développements en apprentissage profond (neurones convolutionnels, récurrents)
- le tout dans un esprit résolument tourné vers les applications. Le cours est sanctionné par un examen et un mini-projet.

Un polycopié (incluant une bibliographie) et/ou les slides utilisés encours sont fourni dans chacun des cours.

5MK02. Finance de marché, dérivés et économétrie (15 ECTS) (1er semestre)

Professeur : M. Rosenbaum

courriel : mathieu.rosenbaum@polytechnique.edu

<http://www.cmap.polytechnique.fr/~rosenbaum>

Objectifs de l'UE : Acquérir les concepts probabilistes et les outils modernes en optimisation pour maîtriser les méthodes quantitatives mises en œuvre sur les marchés financiers, de matières premières et de l'énergie.

Pré-requis : Cf. pré-requis généraux pour l'admission dans le parcours "Probabilités et Finance" du Master 2 de Mathématiques et Applications.

Thèmes abordés : Cette UE est constituée des 5 cours (ou ECUE) suivants : processus stochastiques et produits dérivés en temps discret et continu ; économétrie sur données financières ; marchés financiers et théorie financière ; mesures de risque et extrêmes ; Introduction aux modèles de saut.

Les programmes de ces cours sont détaillés ci-dessous.

- o Modélisation stochastique des produits dérivés en finance traditionnelle et digitale. Modèles de taux (27C + 27 TD, M. Garcin & H. Pham, C. Hillairet & N. El Karoui).

Le marché des produits dérivés est un élément important du transfert des risques de marché des investisseurs vers les établissements financiers. L'objectif du cours est de décrire les produits financiers proposés, et les méthodes théoriques et pratiques mises en oeuvre dans le marché pour évaluer et couvrir ces produits financiers. Le cours comprend plusieurs parties : une première partie sur les dérivés sur actions, européens ou exotiques avec une large référence au modèle de Black Scholes, et ses nombreuses applications dans un monde sans arbitrage, dominé par la vision "implicite" du marché. Une partie sur les taux d'intérêt et leur récents développements. Une partie sur la mesure des risques de marchés, via la VaR, et ses extensions.

I. Évaluation et couverture des produits dérivés sur action.

- Présentation des marchés à terme et des marchés d'options
- Le modèle de Black et Scholes : évaluation et couverture des options d'achat ou de vente par réplication dynamique. L'EDP d'évaluation. La formule de Black et Scholes.
- Le portefeuille de couverture. Les Grecques. La volatilité implicite.
- Robustesse de la formule de Black et Scholes.
- Options barrières dans le monde de Black et Scholes. Formules fermées, couverture. Autres options exotiques.
- L'absence d'arbitrage et la réplication statique. La formule de Carr et la distribution implicite.
- Premières réflexions sur la calibration. Distribution risque-neutre implicite.
- Volatilité stochastique : Formule de Dupire et volatilité locale. Introduction aux problèmes de calibration. Les modèles à volatilité stochastique exogène. (Marché incomplet)
- Théorie de l'arbitrage multi-dimensionnel : Absence d'arbitrage et primes de risques.
- Changement de numéraire ; numéraire de marché.

II. Problèmes de taux d'intérêt.

- Introduction au marché des taux d'intérêt et des produits dérivés de taux.
- Définition et construction de la courbe des taux :
- Les modèles classiques, Vasicek, C.I.R, Longstaff et Schwarz, modèles affines.
- Les modèles multifacteurs. Modèles de HJM : Equations de structure des taux d'intérêt issues de l'arbitrage.
- Le modèle de BGM ou modèle de marché. Approximations.
- Options de taux et instruments hybrides : évaluation et couverture.
- Swaps, Obligations à taux variable.
- Caps, floors, swaptions, boosts.
- Matrices de volatilité et Problèmes de calibration.

III. Mesures des risques.

- Présentation des normes réglementaires.
- La Value-at-Risk d'un portefeuille. Problèmes pratiques et méthodologiques.
- Le concept de mesures de risques.
- Application au pricing en marché incomplet.

- Finance haute fréquence : outils probabilistes, modélisation statistique à travers les échelles et problèmes de trading (30C, M. Rosenbaum).

Après avoir rappelé les outils économétriques standards, on s'intéressera dans ce cours au traitement des principales questions statistiques se posant lors de l'analyse des données financières.

Les thèmes suivants sont abordés : . – Analyse en composantes principales.

- Modèle linéaire et moindres carrés.
- Séries temporelles.
- Statistique des extrêmes.
- Mesures de dépendances entre actifs.
- Introduction aux problèmes en grande dimension.
- Quelques éléments de statistique des diffusions.

- Marchés financiers et théorie financière (30 C, V. Lozève, C. de Langue).

Dans une première partie du cours, les divers marchés financiers seront présentés, avec une attention particulière au marché des capitaux. Les mécanismes et utilisations des contrats futures seront étudiés dans le détail. Le cours suivra le fil des produits et techniques qui permettent une gestion des risques efficace dans cet environnement spécifique. Quelques incursions auront lieu dans le domaine des techniques quantitatives d'évaluation, mais le cours restera introductif en cette matière.

Une deuxième partie du cours se concentrera sur le marché des actions. Les éléments essentiels de la théorie financière au sens de Markowitz seront présentés et discutés, avec des implications importantes en terme de gestion de portefeuille.

- Mesures de risque et extrêmes (18 C, A. Alfonsi & L. Abbas-Turki).

Le but de ce cours est de présenter les outils de mesure des risques concernant la salle de marché et la gestion du "book" (portefeuille d'actifs) pour une échelle de temps courte (1 à 10 jours). Les principaux thèmes théoriques seront : la théorie des valeurs extrêmes, la représentation multidimensionnelle des risques via les copules, les mesures de risques monétaires et leurs diverses interprétations ainsi que la présentation par des intervenants de marché de leur implémentation pratique, les normes réglementaires concernant le risque de marché à court terme, la VaR et son implémentation, la gestion du risque de modèle et le calcul de réserves sur les books de produits dérivés.

Cette ECUE constitue la première partie – théorique – du cours de risques. La seconde partie, plus pratique et assurée par des professionnels, est proposée en cours d'option (Ouverture professionnelle).

- Introduction : le cadre des recommandations de Bâle, mesurer le risque avec la valeur en risque.
- Mesures de risques monétaires, convexes, cohérentes (I).
- Mesures de risques monétaires : propriétés de la VaR et de la CVaR (II).

- Sortir du modèle gaussien pour calculer la VaR. Quantiles : définitions et estimation à l'aide de la théorie des lois de valeurs extrêmes (I).
- Quantiles : estimation à l'aide de la théorie des lois de valeurs extrêmes (II).
- Modélisation des corrélations : les copules.
- Simulation, estimation des copules.

o Introduction aux modèles de saut (12 C, T. Duquesne)

Ce cours propose une introduction au nuages et aux processus de Poisson, simple et composés, et à leurs applications en Finance, notamment aux modèles d'actifs avec sauts poissonniens incluant ou non une composante brownienne de type Merton. Il s'agit d'un premier cadre où apparaissent des modèles non complets dans lesquels on introduira des notions de couverture en moyenne quadratique, etc. Des calculs explicites des risques résiduels et des couvertures optimales seront menées à bien, préparant l'étude des modèles dirigés par des processus de Lévy.

Attention ! Ce cours a lieu au second semestre (janvier) pour des raisons d'emploi du temps.

Un polycopié (incluant une bibliographie) est fourni dans chacun des cours.

• AU SECOND SEMESTRE :

Spécialisation et Professionnalisation (30 ECTS) (2^e semestre)

Professeurs : Gilles Pagès et H. Pham

courriel : gilles.pages@sorbonne-universite.fr et huyen.pham@polytechnique.edu

<https://www.lpsm.paris/users/pages/index>

et

<https://sites.google.com/site/phamxuanhuyen/>

Objectifs de l'UE : Il s'agit d'offrir aux étudiants à la fois un parcours de spécialisation thématique qui clôt leur parcours académique et une composante applicative professionnalisante. La spécialisation se traduit par le choix de quatre cours d'options donnant lieu à évaluation dont deux (au moins) choisis dans une thématique répertoriée ci-dessous constituant la "majeure", les deux autres étant laissés en libre choix pour constituer la "mineure". Majeure et mineure confèrent 3 ECTS. La professionnalisation se concrétise dans une première phase par la réalisation d'un projet informatique (3 ECTS) en programmation scientifique pour la finance en liaison avec le cours de Probabilités numériques. Le cœur de cette UE reste cependant l'insertion professionnelle (3 ECTS) et le stage obligatoire d'une durée minimale de 5 mois (18 ECTS) en immersion complète dans le milieu professionnel.

Pré-requis : Acquisition des connaissances du 1^{er} semestre.

Thèmes abordés : Les parcours et les cours de spécialisation sont

Cette UE est constituée des cours (ou ECUE) suivants :

- Cycle de cours-conférences "Ce que les crises financières nous enseignent : évolution des pratiques et de la régulation" par M. Vincent (Bank Resolution & Financial Stability Expert à Single Resolution Board (Communauté européenne)). (L'évaluation est couplée avec le module d'insertion professionnelle (OIP) dans une proportion de 1/3) :
- Module "Spécialisation (Options)" (6 ECTS).
 - deux cours à valider dans module spécialisé (*majeur*),

– deux autres cours à valider parmi les autres parcours (*mineure*),

Attention : Certains cours peuvent figurer plusieurs fois.

Probabilités numériques avancées

- Optimisation stochastique pour le Machine learning en Finance (15h, G. Pagès, 5MK06).
- Massive parallel programming on GPU devices for Big Data (15h, L. Abbas-Turki, 5MK12).
- Machine learning pour les produits dérivés (15h, V. Lemaire, 5MK04).
- Équations de McKean-Vlasov et applications (15h, M. Tomasevic, 5MK05).
- Algorithmes de Monte-Carlo pour chaînes de Markov et méthodes particulières (15h, B. Jourdain, 5MK25).
- Processus fractionnaires et processus de Volterra en finance (15h, E. Abi Jaber, 5MK29).
- Apprentissage automatique et contrôle stochastique (15h, H. Pham 5MK15).

Machine learning et modélisation statistique pour la finance de marché

- Analyse et modélisation statistique multi-échelle de séries chronologiques financières (24 h, E. Bacry, 5MK19).
- Machine Learning and optimal trading (15h, Ch. Lehalle + 12h TD S. Laruelle M06AK13).
- Optimisation stochastique pour le Machine learning en Finance (15h, G. Pagès, M06AK06).
- Apprentissage automatique et contrôle stochastique (15h, H. Pham, 5MK15).
- Optimisation stochastique pour le Machine learning en Finance (15h, G. Pagès, M06AK06).

Les TD du cours 5MK13 sont ouverts aux étudiants suivant le cours 5MK10 et, le cas échéant, seront pris en compte dans son évaluation.

Produits dérivés (avancés)

- Non linear pricing (15h, J. Guyon, 5MK26).
- Contrôle stochastique pour les marchés imparfaits (15h, I. Kharroubi, 5MK23)
- Calibration de modèles (15h, S. de Marco, 5MK11).
- Modèles de taux et produits dérivés : nouveau paradigme, risque de contrepartie (15h, S. Migus & N. El Karoui, 5MK14).
- Jeux à champ moyen (15h, C. Bertucci 5MK27).
- Processus fractionnaires et processus de Volterra en finance (15h, E. Abi Jaber, 5MK29).
- Méthodes de calibration avancées et produits dérivés sur le VIX (15h, J. Guyon, 5MK00).

Nouveaux marchés

- Valorisation et gestion du risque sur les marchés de l'énergie (15h, O. Bardou, 5MK07).
- Stratégies quantitatives : application au marché du crédit (15h, J. Turc & R. Dando, 5MK08).
- Économétrie de l'assurance non-vie (15h, A. Ocello)

Ouverture professionnelle

- Allocation d'actifs et arbitrage multi-asset (15h, J.G. Attali, 5MK09).
- Trading quantitatif : utilisation d'estimateurs haute fréquence pour l'exécution d'ordres (15h, Ch. Lehalle + 12h TD S. Laruelle, 5MK13).
- Stratégies quantitatives et risque de crédit (15h, J. Turc & R. Dando, 5MK08).

Les examens de cette UE ont lieu fin mars et ne donnent pas lieu à session de rattrapage.

- Module “Anglais/Projet informatique” (3 ECTS) : un projet informatique à réaliser en C++ (ou en CUDA/Open CL) couplé au cours de Probabilités numériques du semestre 1 (ne peut être validé seul). Un vivier de 25 sujets, généralement des articles de recherche récents en Probabilités numériques appliquées à la Finance (écrits en Anglais), sont proposés aux étudiants.
- Module “Stage” (21 ECTS).

Un stage de 5 à 6 mois en entreprise débutant le deuxième lundi avril, après validation du sujet scientifique du stage par l'équipe pédagogique. La soutenance a lieu fin septembre en présence du Maître de stage et d'un membre de l'équipe pédagogique.

4.6 Responsable et site

Gilles Pagès est le responsable Sorbonne Université du parcours. La formation dispose d'un site internet propre (webmaster : G. Pagès) :

<https://finance.math.upmc.fr>

sur lequel on peut consulter

- La liste des cours incluant résumé et bibliographie (notamment les cours d'options partiellement renouvelés chaque année),
- Le programme du séminaire hebdomadaire “Étudiants-Entreprise” de l'année en cours.
- L'historique des sujets de stage sur 6 ans,
- L'Annuaire des Anciens (accès sur abonnement, accès libre pour la promotion en cours).

Le formulaire de candidature spécifique sont téléchargeables sur le site (combiné à un lien d'accès au site de l'Université pour les pré-inscriptions). L'essentiel du site est bilingue (français-anglais).

La liste des cours est aussi consultable via la plaquette du Master 2, *Probabilités & Applications*, mise en ligne sur le site du LPSM comme pour l'ensemble des formations de Sorbonne Université placées sous la responsabilité scientifique du LPSM.

Secrétariat : Yann PONCIN yann.poncin@sorbonne-universite.fr

4, place Jussieu - Tour 16

Couloir 16-26 - 1er Etage - Bureau 08

Case courrier 188

75252 PARIS CEDEX 05

Téléphone : 01.44.27.53.20.

Site : <https://finance.math.upmc.fr/>

Site LPSM <https://www.lpsm.paris/>

Chapitre 5

Master 2, Parcours Mathématiques de la modélisation

Ce diplôme de master est cohabilité avec l’Ecole Polytechnique et l’ENPC. La formation de M2 “Mathématiques de la modélisation” est assurée par l’UFR 929 conjointement avec

- l’Ecole Polytechnique,
- l’Ecole Nationale des Ponts et Chaussées,
- Inria.

Responsable du parcours : Antoine Gloria.

Directeur adjoint et responsable des stages à SU : Antoine Le Hyaric.

Site web : <https://www.ljll.fr/MathModel>

Les cours proposés à distance sont indiqués sur ce site web.

5.1 Objectifs et descriptions

La modélisation mathématique permet de résoudre des problèmes issus de domaines variés (physique, biologie, économie, ...), par l’analyse mathématique et la simulation numérique des modèles proposés.

Parmi les connaissances et compétences attendues à l’issue du master, signalons (en fonction de la majeure choisie) :

- Théorie des équations aux dérivées partielles, discrétisation numérique, analyse d’erreurs.
- Calcul stochastique et aspects aléatoires.
- Optimisation continue et discrète, calcul des variations, théorie des jeux.
- Théorie du contrôle en dimension finie ou infinie, contrôle optimal, problèmes inverses.
- Outils d’analyse, de simulation et de modélisation utilisés en sciences du vivant.
- Informatique scientifique, calcul scientifique, calcul parallèle, conception assistée par ordinateur.

Les étudiants devront également acquérir des connaissances dans les domaines applicatifs variés : informatique, biologie, physique, mécanique, économie...

Pour la majeure à l’interface entre les probabilités et les EDP, dont le parcours est spécifique, voir Section 5.8.

5.2 Débouchés professionnels

Le parcours forme des chercheurs de haut niveau en mathématiques appliquées pouvant faire carrière dans l'enseignement supérieur et la recherche, participer aux programmes de haute technologie de l'industrie, ou intégrer des centres d'étude et de décision des grandes entreprises. Elle forme aussi des mathématiciens de type ingénieur maîtrisant tous les aspects du calcul et de l'informatique scientifique moderne, dont le profil intéresse les bureaux d'étude industriels ou les sociétés de service en calcul scientifique.

Si la poursuite en doctorat est un débouché naturel du parcours, celle-ci n'est pas une obligation et cette dernière offre bien d'autres possibilités.

Pour les étudiants qui souhaitent poursuivre en doctorat, l'équipe pédagogique apporte un soutien personnalisé dans la construction du projet de thèse.

De très nombreuses offres de stages, thèses, ou emplois, sont mises en ligne sur le site web du parcours, au fur et à mesure que nous les recevons.

5.3 Organisation (hors EDProba)

L'année est divisée en cinq périodes comme indiqué dans le tableau ci-dessous :

Bloc	1	2	3	4
période	sept.-nov.	nov.-févr.	févr.-avril	mi avril-sept.
intitulé	cours de base	cours fondamentaux	cours spécialisés	stage ou mémoire
durée	10 semaines	8 semaines	7 semaines	≥ 3 mois
ECTS	12	18	12	18

Il y a donc trois périodes de cours :

- bloc 1 : remise en forme début septembre (2 semaines) et cours de base de mi-septembre à mi-novembre (8 semaines)
- bloc 2 : cours fondamentaux de mi-novembre à mi-février (9 semaines)
- bloc 3 : cours spécialisés de mi-février à début avril (7 semaines)

Ces trois périodes de cours sont suivies en bloc 4 par un stage de recherche en entreprise ou un mémoire. Un.e étudiant.e ne peut commencer son stage / mémoire que si les blocs 1 et 2 sont validés. Il n'y a pas de compensation possible entre blocs.

La formation est donnée principalement en français. Il est possible de suivre la formation à distance. Tous les cours ne sont cependant pas disponibles à distance – cette information est donnée sur le site web des UE : <https://www.ljll.fr/MathModel>

Année 2025/2026 :

- bloc 1 :
 - prérentrée du 1 au 12 septembre 2025 (semaines 36 et 37)
 - cours de base du 15 septembre au 31 octobre puis du 10 au 14 novembre (semaines 38 à 44 et semaine 46)
 - vacances (semaine 45)
 - examens des cours de base du 17 au 21 novembre (semaine 47)
- bloc 2 :
 - cours fondamentaux du 24 novembre au 19 décembre puis du 5 au 30 janvier (semaines 48 à 51 puis 2 à 5)
 - vacances (semaine 52 et 1)
 - examens des cours fondamentaux du 2 au 6 février (semaine 6)
- bloc 3 :
 - cours spécialisés du 9 au 20 février puis du 2 mars au 3 avril (semaines 7 à 8 et 10 à 14)
 - vacances (semaine 9)
 - examens des cours spécialisés du 6 au 10 avril (semaine 15)
 - examens des seconde session des cours de base et fondamentaux du 13 au 24 avril (semaines 16 et 17)

Dans le but d’orienter et d’accompagner les étudiants vers les sujets et les carrières de leur choix, nous proposons de structurer les études autour de thèmes, appelés **Majeures**, à choisir pour les blocs 2 et 3. Elle s’articulent aussi bien autour des domaines applicatifs que des méthodes mobilisées. Voici la liste des sept Majeures :

- **ANEDP** : Analyse numérique et équations aux dérivées partielles. Responsable : K. Schratz.
- **COCV** : Contrôle, Optimisation, Calcul des Variations. Responsable : E. Trélat.
- **HPC** : Calcul scientifique hautes performances. Responsable : D. Smets.
- **SDEDP** : Sciences des données et EDP. Responsable : B. Després.
- **MBIO** : Mathématiques de l’écologie et des milieux vivants. Responsables : L. Almeida et M. Thieullen.
- **MEM** : Mécanique, énergies et matériaux. Responsable : E. Cancès.
- **EDProba** : EDP et probabilités. Responsable : A. Gloria.

La majeure EDProba a une organisation particulière – voir Section 5.8.

Chaque Majeure propose un ensemble cohérent de cours fondamentaux (bloc 2) et spécialisés (bloc 3), ouvrant ainsi à de nombreux débouchés naturels. Le choix des cours à l’intérieur de chaque Majeure est libre et il est possible de choisir un cours par bloc en dehors des listes proposées.

C’est à l’issue des cours de base (bloc 1) que les étudiants devront choisir **obligatoirement** l’une des six premières Majeures proposées. La majeure EDProba, qui offre une formation de pointe à la fois en probabilités et en analyse des EDP, a une organisation spécifique et son choix doit être fait dès le bloc 1.

5.4 Publics visés, prérequis

Les personnes susceptibles d’intégrer le parcours sont les étudiants des universités ayant effectué une première année de Master, les élèves ingénieurs des grandes écoles, et étudiants d’universités étrangères ayant une formation équivalente. Dans tous les cas, une

solide formation mathématique est requise, en particulier dans les domaines de l'analyse ou de l'analyse numérique. L'admission se fait sur dossier compte tenu du niveau et du cursus antérieur.

Pour la majeure EDProba, les étudiants doivent en outre avoir une formation antérieure en probabilités.

5.5 Description des Majeures (hors EDProba)

Analyse numérique et équations aux dérivées partielles (ANEDP)

Responsable : K. Schratz.

Cette Majeure a pour thème central l'étude théorique et numérique des problèmes modélisés par des équations aux dérivées partielles linéaires et non linéaires provenant de domaines variés tels que la physique, les sciences de l'ingénieur, la chimie, la biologie, l'économie, ainsi que les méthodes de calcul scientifique qui ont pour but la simulation numérique de ces problèmes. Le calcul scientifique est devenu la clé maîtresse du progrès technologique, il nécessite une compréhension approfondie de la modélisation mathématique, de l'analyse numérique, et de l'informatique. La Majeure, par sa large gamme de cours, permet d'explorer et de maîtriser les divers aspects de ces disciplines. Les différents domaines mathématiques concernés sont variés et en évolution rapide. Leur développement se traduit par un besoin accru en chercheurs mathématiciens dont la formation est un des objectifs de la Majeure. Les cours proposés couvrent les domaines suivants :

- L'analyse mathématique des équations aux dérivées partielles linéaires et non linéaires (existence, unicité et régularité des solutions).
- Les méthodes d'approximation : éléments finis, différences finies, méthodes spectrales, méthodes particulières, ondelettes.
- La modélisation mathématique de nombreux domaines d'applications : mécanique des solides, mécanique des fluides, phénomènes de propagation (acoustique, sismique, électromagnétisme), traitement du signal et de l'image, finance, chimie et combustion.
- La mise en oeuvre sur ordinateur de ces méthodes et la conception de logiciels de calcul scientifique.

Contrôle, Optimisation, Calcul des Variations (COCV)

Responsable : E. Trélat

Cette Majeure propose une formation de haut niveau dans les domaines du Contrôle, Optimisation et Calcul des Variations. La théorie du contrôle analyse les propriétés des systèmes contrôlés, c'est-à-dire des systèmes dynamiques sur lesquels on peut agir au moyen d'un contrôle (ou commande). Le but est alors d'amener le système d'un état initial donné à un certain état final, en respectant éventuellement certains critères.

Les systèmes abordés sont multiples : systèmes différentiels, discrets, avec bruit, avec retard, équations aux dérivées partielles... Leurs origines sont très diverses : mécanique, électricité, électronique, biologie, chimie, économie, théorie des jeux, informatique... Les objectifs peuvent être de stabiliser le système pour le rendre insensible à certaines perturbations, ou encore de déterminer des solutions optimales pour un certain critère d'optimisation (contrôle optimal). La théorie du contrôle optimal généralise la théorie mathématique du calcul des variations.

Les débouchés envisagés sont aussi bien académiques qu'industriels. La formation mène à des thèses académiques ou à des thèses dans le milieu industriel (thèse CIFRE par exemple, en partenariat universitaire), ou à des emplois d'ingénieurs dans des domaines spécialisés comme l'aéronautique ou l'aérospatiale. Dans les industries modernes où la notion de rendement est prépondérante, l'objectif est de concevoir, de réaliser et d'optimiser, tout au moins d'améliorer les méthodes existantes. De ce fait beaucoup d'autres débouchés industriels existent : services R&D de Thalès, IFPen, EDF, ArianeGroup, Dassault, RTE, etc. Cette formation intéresse aussi beaucoup les organismes comme le CEA ou Inria. Enfin, de multiples partenariats existent avec un très grand nombre d'universités en France et à l'étranger, garantissant de nombreuses possibilités de thèses académiques.

Calcul scientifique haute performance (HPC)

Responsable : D. Smets

Le calcul scientifique Haute Performance est un enjeu stratégique pour la recherche scientifique et l'innovation industrielle. Les architectures de calcul modernes, en évolution continue, allient en effet des composantes dont la rapidité ne cesse d'augmenter et dont le nombre de coeurs dépasse le million. Cette puissance de calcul pétaflopique (et hexaflopique depuis peu) donne des possibilités nouvelles, mais nécessite des algorithmes nouveaux et une compréhension profonde à la fois des architectures des ordinateurs parallèles et de la modélisation mathématique.

Ces aspects de la recherche sont donc en pleine évolution pour être adaptés aux architectures actuelles et celles à venir et les compétences sur ce créneau sont indispensables mais bien trop rares tant dans la recherche que dans la formation des unités académiques. C'est aussi le cas dans les laboratoires de R & D des grands groupes industriels capables d'avoir les équipes nécessaires sur ce créneau et qui basent leur compétitivité sur un meilleur contrôle, une meilleure optimisation et une plus profonde connaissance de leurs produits par la modélisation mathématique. Tous les industriels hitech sont concernés ainsi que les banques et les organismes concernés par les défis sociétaux (climat, pollution, planification, etc).

Les cours proposés dans cette Majeure couvrent les thèmes suivants :

- Méthodes avancées pour la résolution numérique des équations aux dérivées partielles issues de la physique, la chimie, la théorie des graphes.
- Introduction au calcul parallèle avec un survol des machines parallèles et modèles de programmation et une mise en oeuvre parallèle.
- Conception des algorithmes parallèles efficaces à travers la décomposition de domaines, le parallélisme en temps, la minimisation des communications.
- Aspects calcul parallèle pour l'analyse des grands volumes de données, allant du calcul matriciel aux tenseurs en grande dimension.

Sciences des données et EDP (SDEDP)

Responsable : B. Després.

La montée en puissance des méthodes fondées sur les données (en particulier grâce au développement de l'apprentissage profond) donne une alternative aux approches plus classiques (fondées sur la mise en équation par des EDP et leur résolution numérique) pour modéliser les phénomènes réels.

La Majeure SDEDP vise à former des étudiants à ces deux types de modélisation et à l'ensemble des techniques mathématiques permettant de les combiner efficacement.

Les cours proposés couvrent les domaines suivants :

- la théorie de l'approximation (linéaire et non linéaire) et la réduction de modèles

- la modélisation par EDP, leur analyse théorique et numérique
- l’optimisation et le contrôle
- les aspects algorithmiques
- les liens entre le contrôle, le transport optimal et l’apprentissage
- l’utilisation de méthodes d’apprentissage pour résoudre numériquement des EDP
la résolution d’EDP en grande dimension

Mathématiques de l’écologie et des milieux vivants (MBIO)

Responsables : L. Almeida et M. Thieullen

Cette Majeure est également accessible par le parcours “Probabilités et modèles aléatoires” de Sorbonne Université. En particulier des aménagements des cours proposés sont possibles pour les étudiants qui voudraient combiner les cours des deux parcours, après accord des responsables (voir aussi le site web).

La Majeure MBIO propose une formation centrée sur la simulation et la modélisation pour les sciences du vivant, elle s’appuie sur les outils d’analyse déterministe et stochastique. L’ambition de La Majeure n’est pas de couvrir l’ensemble des thèmes du “vivant”, elle se propose de donner une vision générale des outils “continus” et des applications, couvrant des questions de biologie fondamentale et des applications biomédicales.

Cette majeure vise à la fois la formation de chercheurs dans le domaine des “Mathématiques pour la biologie” et sur des débouchés directs dans les biotechnologies.

Les étudiants qui envisagent de continuer en thèse y trouveront de nombreux sujets et supports financiers. Ils sont proposés au sein de laboratoires de mathématiques, de calcul scientifique comme de biologie ou médecine.

Les étudiants désirant terminer leur études sur un M2 y trouveront des questions scientifiques passionnantes où les mathématiques sont un outil fondamental pour traiter de la complexité des phénomènes observés. De nombreux laboratoires, instituts et entreprises utilisent maintenant la modélisation et proposent des stages.

Mécanique, énergies et matériaux (MEM)

Responsable : E. Cancès

La production d’énergie, ainsi que l’utilisation de sources d’énergies de toutes sortes, tant classiques qu’alternatives, nécessitera dans un avenir proche un renforcement de la recherche fondamentale et appliquée. Par classique on peut entendre les énergies hydraulique, nucléaire de fission, pétrolière, etc. Par alternative on entend l’énergie nucléaire de fusion, éolienne, photovoltaïque, etc. Dans tous ces domaines il faut prendre en compte des phénomènes complexes dont la modélisation sous forme de systèmes d’équations aux dérivées partielles (EDP) et leurs résolutions numériques sont déterminantes pour les avancées de la recherche scientifique.

De même, le développement de nouveaux composés chimiques et de nouveaux matériaux (matériaux composites, micro et nanostructurés, graphène et nanotubes de carbones, biomatériaux, méta-matériaux, matériaux intelligents, ...) donne lieu à des avancées spectaculaires dans tous les domaines de l’ingénierie. Ces recherches s’appuient également de plus en plus sur la simulation numérique de modèles faisant intervenir des EDP, ainsi que sur des modèles stochastiques.

La majeure MEM entend proposer un ensemble cohérent de cours qui aborde quelques-uns des aspects fondamentaux de ces problématiques.

Les cours fondamentaux portent sur les approximations variationnelles et la simulation numérique des EDP elliptiques, l’étude théorique et numérique des systèmes hyper-

boliques de lois de conservation utilisés notamment en mécanique des fluides, le couplage de modèles à différentes échelles, et la simulation numérique des modèles stochastiques.

Les cours spécialisés de la filière “énergie” portent sur la mécanique des fluides incompressibles, les écoulements complexes (cela va par exemple des modèles d’écoulements compressibles ou diphasiques pour les coeurs de centrales nucléaires aux modèles de barrages), ou les modèles cinétiques (ou particulières).

Les cours spécialisés de la filière ”matériaux” portent sur la théorie spectrale et les méthodes variationnelles utilisées notamment dans les modèles quantiques de la matière, les modèles de biomatériaux solides et fluides, et les méthodes mathématiques et numériques utilisées dans les simulations à l’échelle moléculaire.

Les cours proposés permettent d’acquérir tout à la fois une bonne maîtrise de l’analyse théorique des EDP concernées et de l’analyse numérique des méthodes d’approximation les plus récentes utilisées pour les simuler, et une connaissance d’un ou plusieurs domaines d’application, avec un accent mis sur la modélisation.

Il est également possible d’emprunter des cours du M2 de mécanique.

5.6 Description des UE

5.6.1 Bloc 1 (12 ECTS)

Objectifs : Proposer un socle homogène de connaissances partagées par l’ensemble des étudiants, avant leur choix de majeure. L’accent est mis sur les outils mathématiques communs et parfois indispensables à toutes les Majeures, tout en sensibilisant les étudiants aux enjeux de la modélisation et du calcul scientifique.

Tous les cours du bloc 1 sont accompagnés de TD et/ou de TP. Ce bloc de base comporte deux parties. Tout d’abord une remise en forme de deux semaines avec les cours

Semaine 1 :

B2 Analyse fonctionnelle et espaces de fonctions, H. Le Dret

Semaine 2 : un cours au choix parmi

B3 Méthodes numériques pour les EDP, S. Hirstoaga

B4 Probabilités, P. Monmarché

Les étudiants suivent ensuite au moins 3 cours parmi les 5 cours suivants. Le cours B001 est obligatoire. Ces UE se composent de cours magistraux et de séances de travaux dirigés ou travaux pratiques.

B1 Analyse des équations aux dérivées partielles linéaires, F. Béthuel

B5 Analyse de Fourier et outils d’analyse pour les EDP, C. Audiard

MAM99 Quelques grands algorithmes d’hier et d’aujourd’hui, B. Després

MAM32 Principes de modélisation, F. Legoll & L. Almeida

MAM24 Optimisation, contrôle, données, D. Prandi

5.6.2 Bloc 2 (18 ECTS)

Dans le bloc 2, les étudiants suivent 3 cours fondamentaux (dont au moins 2 dans leur majeure).

- MAM30** Mise en oeuvre de la méthode des éléments finis (bloc 2), D. Smets
- MAM53** Contrôle en dimension finie et infinie (bloc 2), E. Trélat
- MAM97** Analyse théorique et numérique des équations hyperboliques (bloc 2), A. Hayat & A. Ern
- MAM03** Mathematical methods in Ecology and in Biology (bloc 2), L. Almeida
- MAM12** Introduction aux EDP d'évolution (bloc 2), V. Banica
- MAM29** Calcul haute performance pour les méthodes numériques et l'analyse des données (bloc 2), L. Grigori et E. Parolin
- MAM35** Méthodes numériques probabilistes (bloc 2), J. Reygnier
- MAM36** Méthodes d'approximation variationnelle des EDP (bloc 2), Y. Maday
- MAM47** Equations elliptiques (bloc 2), H.M. Nguyen
- MAM95** Réduction de dimension linéaire et non linéaire ; Applications aux EDP, problèmes inverses et science des données (bloc 2), A. Cohen
- MAM??** Optimisation sous contraintes d'EDP (bloc 2), G. Allaire
- MAM28** Modèles cinétiques et limites hydrodynamiques (bloc 2), F. Golse
- MAM70** Equations structurées en biologie (bloc 2), D. Salort
- MAM71** Méthodes du premier ordre pour l'optimisation non convexe et non lisse (bloc 2), P. Tan (cours désynchronisé)
- MAM22** Some Mathematical Methods for Neurosciences (bloc 2) (module externe M2 MVA)
- MAA06** Statistiques et Apprentissages (bloc 2) (module externe M2 STAT), I. Kourkova

5.6.3 Bloc 3 (12 ECTS)

Au bloc 3, les étudiants suivent 3 cours spécialisés (dont au moins 2 dans leur majeure).

- MAM00** Transport in random media (bloc 3), A. Gloria
- MAM01** Coarse-graining theory for elliptic PDE (bloc 3), S. Armstrong
- proba** Rough paths (bloc 3), L. Zambotti

- MAM10** Théorie spectrale et méthodes variationnelles (bloc 3), E. Cancès & M. Lewin
- MAM21** Méthodes de Galerkin discontinues et applications (bloc 3), A. Ern
- MAM26** Modèles mathématiques et méthodes numériques pour la simulation en hémodynamique (bloc 3), M. Fernández
- MAM27** Modèles hyperboliques d'écoulements complexes dans le domaine de l'océanographie, des risques naturels et de l'énergie (bloc 3), J. Sainte-Marie et N. Aguillon
- MAM38** Méthodes modernes et algorithmes pour le calcul parallèle (bloc 3), P. Marchand
- MAM50** Méthodes mathématiques et analyse numérique pour la simulation moléculaire (bloc 3), G. Stoltz & T. Lelièvre
- MAM51** Modèles probabilistes en Neurosciences (bloc 3), M. Thieullen
- MAM58** Algèbre tropicale en optimisation et en jeux (bloc 3), S. Gaubert
- MAM67** Autour de la stabilité de l'espace-temps de Minkowski (bloc 3), J. Szeftel
- MAM73** Théorie géométrique du contrôle (bloc 3), M. Sigalotti & U. Boscain
- MAM86** Réseaux de neurones et approximation numérique adaptative (bloc 3), B. Després
- MAM94** Analyse des effets géométriques sur les équations dispersives (bloc 3), O. Ivanovici
- MAM92** Flots de gradient et particules en interaction en théorie de l'apprentissage (bloc 3), B. Geshkovski
- MAM31** Mécanique statistique des gaz de Coulomb (bloc 3), S. Serfaty
- MAM93** Systèmes paraboliques (bloc 3), A. Moussa
- MAM84** Méthodes de tenseurs pour la résolution d'EDPs en grande dimension (bloc 3), V. Ehrlacher & M.-S. Dupuy
- MAM83** Propagation d'évidence dans les réseaux bayésiens, applications en médecine (bloc 3) (module externe M2 PMA), G. Nuel
- MAM82** Modèles stochastiques de la biologie moléculaire (bloc 3) (module externe M2 PMA), P. Robert
- MAK26** Jeux à champ moyen (bloc 3) (module externe M2 PMA), C. Bertucci
- MAM98** Du fluide de Stokes aux suspensions de solides rigides : aspects théoriques et numériques (bloc 3), A. Lefebvre-Lepot et F. Nabet
- MAM84** Modèles d'équations aux dérivées partielles pour l'écologie (bloc 3), G. Raoul

MAM49 Problèmes directs et inverses en dynamique des populations (bloc 3), M. Doumic-Jauffret

MAM93 Modèles mathématiques discrets pour le vivant (bloc 3), D. Peurichard et S. Hecht

MAM37 Méthodes numériques basées sur les résonances pour les EDP dispersives (bloc 3), K. Schratz

5.7 UE proposées par majeure

5.7.1 UE proposées pour la Majeure ANEDP

UE bloc 2

- Introduction aux EDP d'évolution
- Equations elliptiques
- Analyse théorique et numérique des équations hyperboliques
- Modèles cinétiques et limites hydrodynamiques
- Méthodes numériques probabilistes
- Méthodes d'approximation variationnelle des EDP
- Mise en oeuvre de la méthode des éléments finis
- Contrôle en dimension finie et infinie
- Optimisation sous contraintes d'EDP

UE bloc 3

- Autour de la stabilité de l'espace-temps de Minkowski
- Analyse des effets géométriques sur les équations dispersives
- Théorie spectrale et méthodes variationnelles
- Flots de gradient et particules en interaction en théorie de l'apprentissage
- Systèmes paraboliques
- Du fluide de Stokes aux suspensions de solides rigides : aspects théoriques et numériques
- Modèles mathématiques et méthodes numériques pour la simulation en hémodynamique
- Modèles hyperboliques d'écoulements complexes dans le domaine de l'océanographie, des risques naturels et de l'énergie
- Méthodes de Galerkin discontinues et applications
- Méthodes mathématiques et analyse numérique pour la simulation moléculaire
- Réseaux de neurones et approximation numérique adaptative
- Méthodes de tenseurs pour la résolution d'EDPs en grande dimension
- Méthodes numériques basées sur les résonances pour les EDP dispersives
- Transport in random media
- Coarse-graining theory for elliptic PDE
- Mécanique statistique des gaz de Coulomb

5.7.2 UE proposées pour la Majeure COCV

UE fondamentales

- Contrôle en dimension finie et infinie
- Optimisation sous contraintes d'EDP
- Equations elliptiques

- Introduction aux EDP d'évolution
- Optimisation sous contrainte
- Equations structurées en biologie
- Analyse théorique et numérique des équations hyperboliques
- Méthodes du premier ordre pour l'optimisation non convexe et non lisse

UE spécialisées

- Théorie géométrique du contrôle
- Algèbre tropicale en optimisation et en jeux
- Réseaux de neurones et approximation numérique adaptative
- Flots de gradient et particules en interaction en théorie de l'apprentissage
- Jeux à champ moyen

5.7.3 UE proposées pour la Majeure HPC

UE fondamentales

- Calcul haute performance pour les méthodes numériques et l'analyse des données
- Mise en oeuvre de la méthode des éléments finis
- Méthodes d'approximation variationnelle des EDP
- Méthodes numériques probabilistes

UE spécialisées

- Méthodes modernes et algorithmes pour le calcul parallèle
- Méthodes de tenseurs pour la résolution d'EDPs en grande dimension
- Approximation et traitement de données en grande dimension
- Réseaux de neurones et approximation numérique adaptative

5.7.4 UE proposées pour la Majeure SDEDP

UE fondamentales

- Réduction de dimension linéaire et non linéaire, applications aux EDP, problèmes inverses et science des données
- Mise en oeuvre de la méthode des éléments finis
- Optimisation sous contraintes d'EDP
- Méthodes du premier ordre pour l'optimisation non convexe et non lisse
- Calcul haute performance pour les méthodes numériques et l'analyse des données

UE spécialisées

- Flots de gradient et particules en interaction en théorie de l'apprentissage
- Réseaux de neurones et approximation numérique adaptative
- Méthodes de tenseurs pour la résolution d'EDPs en grande dimension

5.7.5 UE proposées pour la Majeure MBIO

UE fondamentales

- Mathematical methods in Ecology and in Biology
- Méthodes numériques probabilistes
- Analyse théorique et numérique des équations hyperboliques
- Equations elliptiques

- Contrôle en dimension finie et infinie
- Equations structurées en biologie
- Some Mathematical Methods for Neurosciences
- Statistique et Apprentissages

UE spécialisées

- Modèles mathématiques discrets pour le vivant
- Modèles mathématiques et méthodes numériques pour la simulation en hémodynamique
- Modèles probabilistes en Neurosciences
- Propagation d'évidence dans les réseaux bayésiens, applications en médecine
- Modèles stochastiques de la biologie moléculaire
- Modèles d'équations aux dérivées partielles pour l'écologie
- Problèmes inverses et directs en dynamique des populations

5.7.6 UE proposées pour la Majeure MEM

UE fondamentales

- Analyse théorique et numérique des équations hyperboliques
- Modèles cinétiques et limites hydrodynamiques
- Méthodes numériques probabilistes
- Méthodes d'approximation variationnelle des EDP
- Mise en oeuvre de la méthode des éléments finis

UE spécialisées

- Théorie spectrale et méthodes variationnelles
- Du fluide de Stokes aux suspensions de solides rigides : aspects théoriques et numériques
- Modèles hyperboliques d'écoulements complexes dans le domaine de l'océanographie, des risques naturels et de l'énergie
- Méthodes de Galerkin discontinues et applications
- Méthodes mathématiques et analyse numérique pour la simulation moléculaire
- Méthodes de tenseurs pour la résolution d'EDPs en grande dimension

5.8 Majeure EDProba

La majeure EDProba est commune avec le parcours Probabilités et Modèles Aléatoires. Son recrutement est spécifique et le choix de cette majeure doit être fait dès le début de l'année universitaire.

Cette formation a pour but de donner une double culture de théorie des probabilités et d'analyse des EDP et de leurs interactions. On peut citer, parmi d'autres, les EDP à coefficients aléatoires modélisant des matériaux hétérogènes ou décrits de manière statistique, les EDP avec forçage aléatoire qui apparaissent en dynamique des fluides et théorie quantique des champs, ou des équations de particules en interaction et leurs propriétés statistiques. L'étude de ces modèles combine notamment le calcul stochastique et la théorie des EDP.

Comparée aux autres majeures, cette majeure a un cursus adapté. La première partie de l'année vise à introduire des concepts avancés de probabilités et d'EDP et la formation s'articule autour de 4 blocs de compétence :

- Bloc 1 : analyse des EDP (15 ECTS), 1er semestre
- Bloc 2 : probabilités (15 ECTS), 1er semestre
- Bloc 3 : EDP et probabilités (12 ECTS), 2ème semestre
- Bloc 4 : stage ou mémoire (18 ECTS), 2ème semestre

La formation commence la première semaine de septembre. Les stages ou mémoires se terminent entre fin août et fin novembre.

5.8.1 Bloc 1 : analyse des EDP

- Semaine de pré-rentrée : rappels d'analyse fonctionnelle, calcul des variations et espaces de fonctions (15h de cours, 15h de TD)
- EDP linéaires (24h de cours, 24h de TD) (*F. Béthuel*)
- EDP d'évolution (24h de cours) (*V. Banica*)
- EDP elliptiques (24h de cours) (*H.M. Nguyen*)

5.8.2 Bloc 2 : probabilités

- Semaine de pré-rentrée : rappels de probabilité (15h de cours, 15h de TD)
- Calcul stochastique et processus de diffusion (48h de cours) (*N. Fournier*)
- Modèles Markoviens Discrets (30h de cours) (*T. Duquesne*)

5.8.3 Bloc 3 : EDP et Probabilités

Trois cours à choisir dans la liste suivante

- Transport in random media (24h de cours) (*A. Gloria*)
- Homogénéisation stochastique (24h de cours) (*S. Armstrong*)
- Mécanique statistique des gaz de Coulomb (24h de cours) (*S. Serfaty*)
- Chemins rugueux et applications aux équations différentielles stochastiques (24h de cours) (*L. Zambotti*)
- Processus de type de McKean-Vlasov et EDP paraboliques (24h de cours) (*M. Tomasevic*)

ou tout cours équivalent proposé dans les universités de Paris et d'Île de France.

5.8.4 Bloc 4 : Stage

Le stage ou mémoire doit durer au moins 10 semaines, à effectuer en France ou à l'étranger.

Il n'y a pas de compensation entre les blocs de compétence. Les étudiant.e.s doivent avoir validé les blocs 1 et 2 pour pouvoir commencer leur stage / mémoire.

Chapitre 6

Master 2, parcours Ingénierie mathématique

6.1 Objectifs et descriptions

Le parcours **Ingénierie Mathématique** du Master 2 s'inscrit dans une logique de professionnalisation visant à former des mathématicien·ne·s appliqué·e·s de haut niveau. Les diplômé·e·s de cette formation bénéficient non seulement d'une solide expertise en mathématiques, mais aussi d'une maîtrise avancée des outils informatiques, leur permettant de répondre aux besoins complexes des entreprises, des institutions financières, ou encore du secteur des services.

Depuis la rentrée 2018, ce parcours est ouvert tant aux étudiant·e·s en formation initiale qu'à celles et ceux en alternance (avec un contrat d'apprentissage).

La formation est structurée en quatre majeures :

IMPA Ingénierie Mathématique Pour l'Aléatoire

Majeure adaptée aux étudiant·e·s ayant un bagage solide en probabilités, statistiques, optimisation et souhaitant s'orienter vers la mise en œuvre algorithmique autour de l'aléatoire, *anciennement IMPE proba-stats* (responsable : C. Guichard)

IMPC Ingénierie Mathématique Pour le Calcul scientifique

Majeure destinée aux étudiant·e·s ayant des prérequis en analyse numérique, en équations différentielles, optimisation et visant à s'orienter vers la simulation numérique de systèmes physiques *anciennement IMPE méca* (responsable : C. Guichard)

IFMA Ingénierie Financière et Modèles Aléatoires

Majeure s'adressant aux étudiant·e·s ayant déjà suivi une bonne formation en probabilités et souhaitant se spécialiser en finance mathématique et gestion des risques (responsables : L. Abbas-Turki et V. Lemaire)

SCDI SCiences des Données pour l'Ingénieur·e

Majeure en partenariat avec l'ISUP délivrant le double diplôme Master Ingénierie Mathématique et ISUP. Anciennement ISDS, cette majeure est dédiée au machine learning, à l'intelligence artificielle et à l'analyse et au traitement des données à grande échelle (big data) (responsable : O. Wintenberger)

La formation permet un fort ancrage dans le monde professionnel : grâce à l'alternance ou au stage de fin d'étude, les étudiant·e·s appliquent directement leurs connaissances dans des environnements industriels, bancaires et technologiques...

6.2 Débouchés professionnels

Des compétences pluridisciplinaires et un stage de quatre mois minimum en entreprise (ou la mission en apprentissage) donnent accès à des débouchés variés dans les secteurs utilisant la modélisation, la simulation numérique, l'estimation ou la prévision (R&D dans l'industrie, ESN, Banque, Assurance).

Les débouchés spécifiques à chacune des majeures La liste des stages effectués ces dernières années, consultable sur les sites des majeures, atteste de la réalité de l'insertion de ce parcours dans ces différents secteurs professionnels.

Les meilleur·e·s étudiant·e·s peuvent aussi continuer en thèse, le plus souvent en mathématiques appliquées, en milieu universitaire, dans un centre de recherche (comme IFPEN, ONERA, etc.) ou dans l'entreprise ou l'industrie (thèse CIFRE par exemple).

6.3 Organisation

Le master Ingénierie mathématique propose quatre majeures différenciées. Chaque majeure est contrainte, et ne permet que peu de choix dans les enseignements suivis. Les quatre majeures ont une structure en UE identique, avec certains enseignements de probabilités, statistique ou de méthodes numériques communs à plusieurs majeures. Un cours obligatoire d'Anglais est également proposé aux étudiant·e·s, il est assuré par le Département de langues qui offre la possibilité d'un entraînement au TOEIC.

La présence aux cours est obligatoire et ce parcours n'est pas ouvert en formation à distance.

La première partie de l'année à l'université est structurée en trois blocs (voir tableau 6.1) : un bloc de base sur 7 semaines, un bloc fondamental sur 8 semaines, et un bloc de spécialisation sur 10 semaines.

De manière à rendre possible l'alternance, les cours et examens communs à tous les étudiant·e·s ont lieu

- de septembre à décembre : les lundis, mardis et mercredis.
- de janvier à fin mars : les lundis et mardis.

Les étudiant·e·s (non apprenti·e·s) sont susceptibles d'avoir des enseignements les autres jours également.

TABLE 6.1 – Organisation des enseignements en trois blocs

Bloc de base	7 semaines d'enseignement dès début septembre UE : Anglais, 5MAI01 et 5MAI02 Mathématiques Examens la mi-octobre
Bloc fondamental	8 semaines d'enseignement dès mi-octobre UE : Anglais, 5MAI03 et 5MAI04 Evaluations avant les vacances de décembre et la première semaine de janvier
Bloc de spécialisation	10 semaines d'enseignement UE : 5MAI05 et 5MAI06 Evaluations au fil de l'eau sur les 10 semaines. Une semaine sans enseignements fin février.

A la suite de cette période de formation (à partir du mois d'avril), les étudiant·e·s

non apprenti·e·s effectuent un stage long en immersion complète en entreprise ou dans un grand centre de recherche.

Pendant cette période les étudiant·e·s apprenti·e·s sont à temps plein dans l'entreprise.

Les examens de seconde session (rattrapage) ont lieu début mai pour les UE du premier semestre (bloc de base et bloc fondamental) et en septembre 2026 pour les UE du seconde semestre (bloc de spécialisation).

Majeure IMPA

La majeure IMPA prépare les étudiant·e·s à une intégration dans un environnement professionnel utilisant la modélisation stochastique, les statistiques et l'informatique, le tout au sein de structures variées (petite ou grande entreprise, centre de recherche privé ou public, bureau d'études, ...). Elle leur permet d'intervenir au niveau de la modélisation, l'utilisation de libraires informatiques et la mise en œuvre algorithmique de différents outils statistiques.

Les prérequis spécifiques à cette majeure sont

- Des bases solides en statistiques et probabilités
- Maîtriser au moins deux langages informatiques parmi C/C++, Python, R, Matlab, et connaître la syntaxe de base dans les deux autres
- Un enseignement de M1 en analyse numérique et/ou optimisation.

La brochure des résumés de stage et mission d'alternance est disponible sur le site de la formation. Elle permet de se rendre compte de la variété des stages effectués. Tous les ans, à l'issue du stage ou de l'apprentissage, certain·e·s étudiant·e·s poursuivent leur formation dans le cadre d'un doctorat.

Majeure IMPC

La majeure IMPC forme des étudiant·e·s à la modélisation et la simulation des EDP pour des structures variées (service R&D privé ou public, société de services, ...). Cette formation permet d'intervenir dans l'élaboration et l'implémentation de méthodes numériques. En outre, une base de statistiques fait également partie des blocs d'enseignements afin de fournir une formation complète en mathématiques appliquées et ainsi répondre au mieux aux besoins des différents secteurs cibles.

Les prérequis spécifiques à cette majeure sont

- Des bases solides en approximation numérique des EDP ;
- Un enseignement de M1 en statistiques et/ou optimisation ;
- Maîtriser au moins deux langages informatiques parmi C/C++, Python, R, Matlab, et connaître la syntaxe de base dans les deux autres.

La brochure des résumés de stage et mission d'alternance est disponible sur le site de la formation. Chaque année, à l'issue du M2, certain·e·s étudiant·e·s poursuivent en doctorat.

Majeure IFMA

La majeure IFMA forme des diplômés de niveau M2 avec un profil d'ingénieur mathématicien doté d'une triple compétence en

- Calcul stochastique et finance mathématique : modélisation et évaluation des risques financiers, couverture de produits dérivés et optimisation de portefeuille.

- Méthodes numériques appliquées et informatique : développement d’algorithmes de simulation, de pricers et d’outils d’aide à la décision, avec une maîtrise des langages de programmation utilisés en finance quantitative (Python, C++, PyTorch, etc.).
- Statistiques et sciences des données : traitement, analyse et modélisation des données financières à grande échelle, avec une expertise en machine learning et en intelligence artificielle.

La formation met l’accent sur la résolution de problèmes concrets issus de la finance de marché et de la gestion des risques. Les étudiants développent des compétences avancées en programmation et en calcul haute performance pour répondre aux défis des métiers d’IT Quant. L’enseignement repose sur des projets pratiques et des travaux collaboratifs, simulant les conditions de travail en entreprise.

Les diplômés s’orientent vers des postes d’analystes quantitatifs et de développeurs IT Quant au sein des banques d’investissement (modélisation de produits financiers, gestion des risques de marché et de crédit, pricing d’options exotiques), des compagnies d’assurance (gestion des risques actuariels et modélisation stochastique des sinistres) de sociétés de gestion d’actifs (optimisation de portefeuille, stratégie de trading algorithmique et gestion quantitative) et d’entreprises de conseil et sociétés de services en ingénierie informatique (développement d’outils de simulation et d’aide à la décision, Big Data et machine learning appliqué à la finance).

La maîtrise des langages de programmation comme Python et C++, ainsi que des bibliothèques spécialisées en calcul scientifique et en machine learning, constitue un atout essentiel pour intégrer ces secteurs en forte demande.

Majeure SCDI

La majeure SCDI répond à une demande croissante de professionnels de haut niveau en Sciences des Données en offrant une spécialisation très recherchée en statistiques couplée à une forte formation en informatique.

La majeure se distingue par la place prépondérante qu’elle accorde au machine learning et à l’intelligence artificielle. Elle bénéficie d’un enseignement de qualité donné à la fois par des universitaires à la pointe de la Recherche dans le domaine des Data sciences et des professionnels reconnus qui occupent ou ont occupé des postes à responsabilités dans des grands groupes (Directeur scientifique chez Thalès et IBM France, Ingénieur fiabilité nucléaire, EDF R&D, etc).

Par ailleurs, l’alliance de la théorie avec l’enseignement des fondamentaux et de la pratique par la réalisation de projets et de stages, voire de la deuxième année en alternance, garantit aux étudiants de la majeure SCDI une insertion professionnelle rapide (taux d’insertion professionnelle au sortir d’études = 100%) et durable, un salaire attractif et des missions variées.

Les débouchés professionnels sont très variés. Tous les domaines s’ouvrent à eux : l’économie du web, les transports, la santé, l’énergie, la banque, l’assurance. . . Ils bénéficient des liens forts qu’entretient l’ISUP avec le monde de l’entreprise et reçoivent régulièrement des propositions de stage, d’alternance mais également d’emplois.

6.4 Publics visés, prérequis

Ce parcours s’adresse à des titulaires d’une première année de Master de Mathématiques (une composante de mathématiques appliquées est souhaitée), ou de titres équivalents.

L'admission se fait sur dossier pour chaque majeure.

Pour les majeures IMPA et IMPC, des connaissances de base en analyse numérique matricielle et des équations différentielles ordinaires (EDO), et en équations aux dérivées partielles (EDP) sont souhaitées. La majeure IFMA (Ingénierie Financière et Modèles Aléatoires) s'adresse à des candidat·e·s ayant déjà une bonne formation en probabilités. La majeure SCDI s'adresse à des étudiant·e·s sortant de la première année de la filière Sciences des Données pour l'Ingénieur·e de l'ISUP ou de la première année d'un master de mathématiques appliquées avec une spécialisation en probabilité et statistiques équivalente au parcours Data Science de Sorbonne Université. Une expérience de stage dès le M1 est souhaitable pour SCDI.

6.5 Description des UE

Le parcours propose 6 UE scientifiques à 6 ECTS chacune, 2 pour le *Bloc de base* (1er semestre), 2 pour le *Bloc fondamental* (1er semestre), 2 pour le *Bloc de spécialisation* (2ème semestre), soit 36 ECTS en tout. On rappelle que le découpage en bloc est un découpage temporel (cf. tableau 6.1).

Une UE d'anglais à 3 ECTS est répartie sur les deux premiers blocs (1er semestre).

Une UE *Insertion professionnelle* (IP) de 3 ECTS au premier semestre correspond à un contenu différent à la fois par majeure et entre les étudiant·e·s en formation initiale versus les apprenti·e·s.

L'UE de stage constitue 18 ECTS (2ème semestre).

Chaque UE est composée de plusieurs cours, communs ou non à plusieurs majeures, suivant le code couleur suivant :

IMPA	étudiant·e·s de la majeure IMPA
IMPC	étudiant·e·s de la majeure IMPC
IFMA	étudiant·e·s de la majeure IFMA
SCDI	étudiant·e·s de la majeure SCDI

Sauf indication contraire les cours sont assurés par des enseignants-chercheurs de Sorbonne Université.

UE MAI01 Ingénierie 1, 6 ECTS

— **Méthodes numériques**



Enseignante : Cindy Guichard

Volume : 21h, 2ECTS

Description : Ce cours traite de la discrétisation des EDP en 1D notamment par la méthode des différences finies pour des problèmes instationnaires. Si le temps le permet, des notions d'algèbre linéaire numérique seront également abordées en fin de cours. En fonction du parcours de l'étudiant·e, ce contenu pourra être vu comme des rappels de M1.

— **Fondamentaux du C/C++**



Enseignant : Vincent Lemaire

Volume : 21h, 2ECTS

Description : Ce cours traite la syntaxe et les outils fondamentaux du langage C++. On aborde notamment l'allocation dynamique, la programmation orientée objet (classes, héritage, polymorphisme dynamique) et la programmation générique (templates, STL, polymorphisme statique). Chaque séance de cours magistral est suivie d'une séance de mise en pratique sur machine. L'évaluation consiste en un DM et une épreuve de programmation en temps limité.

— **Modèles aléatoires markoviens**



Enseignant : Damien Simon

Volume : 21h, 2ECTS

Description : Cours d'introduction aux processus de Markov : chaînes de Markov à temps discret et à temps continu (processus de sauts markoviens), comportement en temps long (résultats d'ergodicité), applications aux files d'attente, processus de Markov à valeurs dans un espace d'état continu (notion de semi-groupe).

— **Mécanique des milieux continus**



Enseignant : Julien Waeytens (Université Gustave Eiffel)

Volume : 21h, 2ECTS

Description : Initiation à la mécanique des milieux continus : cinématique, déformations, efforts intérieurs et notion de contrainte, lois de conservation.

UE MAI02 Mathématiques et modélisation, 6 ECTS

— **Calcul stochastique**



Enseignant : Camille Tardif

Volume : 21h, 2ECTS

Description : Martingales à temps discret, martingales à temps continu, convergences et théorème d'arrêt. Mouvement brownien, propriété de Markov et propriété de martingale. Intégrale stochastique par rapport au mouvement brownien, formule d'Itô, théorème de Girsanov. Introduction aux équations différentielles stochastiques, équations à coefficients lipschitziens, diffusions et propriété de Markov.

— **Méthodes d'optimisation numériques**



Enseignante : Marie Postel

Volume : 21h, 2ECTS

Description : Rappel (ou la découverte) de quelques méthodes et algorithmes d'optimisation continue, dans le cas sans contraintes (gradient, Newton) et avec contraintes (extréma liés, théorème de Karush Kuhn Tucker) Utilisation de Matlab, logiciel scientifique en langage interprété très utilisé dans les entreprises, pour appliquer directement les méthodes numériques vues en cours.

— **Statistique inférentielle**



Enseignant : Yassin Mazroui

Volume : 21h, 2ECTS

Description : Introduction à la statistique mathématique : modèles statistiques

paramétriques, estimation ponctuelle, intervalles de confiance, tests statistiques. TP avec le logiciel R.

— **Méthodes de Monte Carlo**



Enseignant : Raphaël Roux

Volume : 21h, 2ECTS

Description : Généralités sur les méthodes de Monte Carlo (Loi des grands nombres, vitesse de convergence et intervalles de confiance), simulation de variables et vecteurs aléatoires (inversion, rejet, transformation, variables corrélées), réduction de variance (variables de contrôle et antithétique, stratification, fonction d'importance), méthodes de quasi-Monte Carlo (discrédance, exemples de suites à discrédance faible), calcul de sensibilité (différences finies, différentiation et log-vraisemblance).

— **Mécanique des solides avec code_Aster**



Enseignants : Thomas Douillet-Grellier et Yi Zhang (EDF R&D)

Volume : 21h, 2ECTS

Description : Méthodes de résolution de problèmes de diffusion, de thermo-élasticité linéaire, de viscoélasticité linéaire et de plasticité parfaite. Initiation à un code de calcul utilisé dans l'industrie : `code_Aster`.

— **Apprentissage statistique**



Enseignants : Ismael Castillo et Erwan Scornet

Volume : 42h, 4ECTS

Description : Dans ce cours, nous explorerons différents algorithmes d'apprentissage supervisés, par le prisme de la théorie statistique et des implémentations sur machine. La théorie générale de l'apprentissage statistique nous permettra de comprendre le rôle des différents hyperparamètres sur les performances des méthodes. Les algorithmes les plus classiques pour des problèmes de régression et de classification seront décrits et étudiés (analyse discriminante, support vector machines, plus proches voisins, méthodes d'ensembles basées sur les arbres). Certaines séances donneront lieu à des implémentations sur machine permettant de comparer les performances des différentes méthodes.

UE MAI03 Informatique pour l'ingénierie, 6 ECTS

— **Séries chronologiques**



Enseignant : Jean-Patrick Baudry

Volume : 24h, 2ECTS

Description : Introduction aux méthodes statistiques de traitement de données temporelles dépendantes : propriétés au second ordre d'une série temporelle ; stationnarité et stationnarisation ; tendance et saisonnalité ; fonction d'autocovariance ; prédiction linéaire ; modèles paramétriques : AR, MA, ARMA.

— **Analyse de données**



Enseignant : Yassin Mazroui

Volume : 24h, 2ECTS

Description : Consolidation des connaissances théoriques et pratiques (TP avec le logiciel R) d'Analyse de données et de Statistique appliquée. L'objectif est de permettre aux étudiants d'acquérir les bons réflexes avant d'analyser une base de

données, d'avoir une palette assez large de méthodes d'analyse, de connaître les limites d'application de ces méthodes.

- Analyse descriptive (numérique et graphique)
- Tests paramétriques et non-paramétriques d'égalité de moyennes (Student, Mann-Whitney), d'égalité de proportions (Chi-2, Fisher exact) pour 2 échantillons indépendants et appariés
- ANOVA à un et deux facteurs, ANCOVA, test de Krukal-Wallis
- Modèles de régression linéaire simple et multiple, test de corrélation linéaire
- Modèles de régression logistique simple et multiple, notion de rapport de cote
- Analyse exploratoire : Analyse en Composante Principale
- Analyse de survie (survenue d'un événement : décès, panne d'une machine, ...)

— **Programmation en Python**



Enseignant : Baptiste Gregorutti (SCAI)

Volume : 12h, 1ECTS

Description : Ce cours débute avec un rappel des éléments fondamentaux de Python 3 (types, structures du code, les classes) en y pointant au passage quelques pièges communs (telles que la transmission des données mutables/immuables). Le cours développe ensuite les possibilités offertes par quelques bibliothèques pour les sciences numériques : numpy, pandas et matplotlib. La partie pratique vise à mettre en situation les mécanismes décrits en cours et invite à explorer les concepts et ces bibliothèques, à travers leurs documentations, afin d'en préciser l'emploi en situation.

— **Introduction au CUDA (GPU)**



Enseignant : Lokmane Abbas-Turki

Volume : 12h, 1ECTS

Description : Ce cours introduit de façon simple et efficace à la simulation sur GPU (Graphics Processing Units). Il est agencé autour de la simulation Monte Carlo fortement adaptée à la parallélisation. Il permet ainsi de se concentrer sur les optimisations permises par l'architecture du GPU.

— **Projet code_Aster**



Enseignants : Thomas Douillet-Grellier et Yi Zhang (EDF R&D)

Volume : 24h, 2ECTS

Description : L'enseignement consiste à former les étudiant-e-s à l'utilisation d'un code de calcul professionnel (`code_aster` et `salome_meca`) pour la modélisation des problèmes en mécanique des solides et en thermique. L'accent est mis sur le processus de modélisation, les choix d'hypothèses, l'analyse critique des résultats. Pour faciliter l'appréhension de ces problématiques, des mini-projets simples très variés sont réalisés avec des sujets choisis par les étudiant-e-s (de la tenue à la pression d'un bathyscaphe jusqu'à la déformation de la Tour Eiffel) avec rédaction d'une note d'étude et d'une soutenance.

— **Apprentissage séquentiel pour la prévision de séries temporelles**



Enseignante : Margaux Brégère

Volume : 36h, 3ECTS

Description : L'ensemble des cours s'appuyera sur des TP en R et/ou Python appliqués à la prévision de consommation électrique. L'évaluation se fera sous forme de projet. Les thématiques abordées sont :

- Analyse de séries temporelles et modèles ARMA
- Régression, régularisation et approches en ligne
- Modèles additifs généralisés
- Forêts aléatoires, boosting et approches en ligne
- Réseaux de neurones récurrents et variations (LSTM, GRU)
- Agrégation d'expert en ligne
- Interprétabilité des modèles d'apprentissage automatique
- **Modèles à structure latente** SCDI
 - Enseignant* : Jean-Patrick Baudry
 - Volume* : 24h, 2ECTS
 - Description* : Classification non supervisée ; Approches algorithmiques : K-means, classification hiérarchique ; Approche probabiliste basée sur les modèles de mélange ; Algorithme EM ; Approche bayésienne ; Algorithmes de Gibbs, Metropolis-Hastings.
- **Contrôle qualité** SCDI
 - Enseignante* : Mitra Fouladirad (UTT)
 - Volume* : 12h, 1ECTS
 - Description* : Thèmes abordés :
 - Tests statistiques
 - Introduction des outils de Contrôle Statistique des procédés (histogramme et arbre d'événement, feuille de contrôle, diagramme de Pareto)
 - Cartes de contrôles (les cartes R, S, p, np, c, etc)
 - Cartes de contrôle en présence de données corrélées.
 - Méthodes d'échantillonnage pour le contrôle de qualité.

UE MAI04 Ingénierie 2, 6 ECTS

- **Méthodes pour les EDP** IMPA IMPC
 - Enseignant.e* : Sidi-Mahmoud Kaber et Marie Postel
 - Volume* : 24h, 2ECTS
 - Description* : Enseignement sur des méthodes autour de la théorie des EDP avec une partie applicative et algorithmique.
- **Projet Optimisation** IMPA IMPC
 - Enseignant* : Max Cerf (EADS)
 - Volume* : 24h, 2ECTS
 - Description* : Le projet a pour but de mettre en œuvre sur un problème de lancement spatial les connaissances acquises en cours d'optimisation. La première étape consiste à développer un algorithme d'optimisation par méthode SQP (Sequential Quadratic Programming) et à le valider sur des cas tests fournis, dont un problème d'étagement du lanceur Ariane. La deuxième étape consiste à développer un simulateur simplifié de la trajectoire du lancement (trajectoire plane, modèles de forces élémentaires, commande paramétrique par phase de vol). La troisième étape consiste à réaliser le dimensionnement d'un lanceur spatial en itérant sur l'optimisation d'étagement et l'optimisation de trajectoire afin d'aboutir au lanceur optimal pour une mission donnée (charge utile, orbite visée). L'ensemble du projet est réalisé en Matlab.

— **Approfondissement C/C++**

IMPA

IMPC

Enseignante : Daphné Giorgi

Volume : 24h, 2ECTS

Description : Ce cours est basé sur une approche projet. Les étudiant·e-s travaillent par binôme sur un projet de programmation en C++ qu'ils choisissent et sur lequel ils sont évalués. A chaque séance, on fait une réunion d'avancement de projet avec chaque binôme et on présente des outils de programmation. On verra, entre autres, ce qu'on peut attendre d'un IDE, les logiciels git, gdb, valgrind, et l'utilisation des exceptions. Exemples de projets possibles : un logiciel d'éléments finis en 2D, un logiciel de résolution de Sudoku, un jeu graphique en 2D (tetris, snake, ...)

— **Finance : marchés complets**

IFMA

Enseignant : Shen Lin

Volume : 24h, 2ECTS

Description : Introduction à la couverture de produits dérivés et à la gestion de portefeuille en marchés complets dans les modèles de diffusions browniennes, modèle de Black-Scholes généralisé, lien avec les EDP, modèles de taux.

— **Finance : marchés incomplets**

IFMA

Enseignant : Olivier Bardou

Volume : 24h, 2ECTS

Description : Modèles de la courbe des taux, modèles de volatilité locale, modèles de volatilité stochastique, options exotiques, risque de défaut, modèles de crédit, marchés incomplets.

— **PyTorch et Machine Learning pour la Finance**

IFMA

Enseignant : Vincent Lemaire

Volume : 12h, 1ECTS

Description : Discrétisation d'EDS, calcul de sensibilités, méthodes de Monte Carlo et Régression Monte Carlo (Least Squares Monte Carlo), régression non linéaire et approximation par réseaux de neurones (Feedforward Neural Network), avec des applications en finance et programmation avancée en PyTorch.

— **Calcul Stochastique**

IFMA

SCDI

Enseignant : Camille Tardif

Volume : 12h, 1ECTS

Description : Compléments au cours de l'UE "Base 2".

— **Apprentissage statistique**

SCDI

Enseignant : Ismael Castillo et Erwan Scornet

Volume : 12h, 1ECTS

Description : Compléments au cours de l'UE "Base 2".

— **Réseaux Neuronaux**

SCDI

Enseignante : Annick Valibouze

Volume : 24h, 2ECTS

Description : Fondements et principes des réseaux neuronaux jusqu'à l'apprentissage automatique. Etude et description des principaux réseaux : modèles historiques, à compétitions, réseaux profonds (Deep learning) : Perceptron Multi-Couches, PMC, (DNN), convolutionnels (CNN) et DBN. Pratique logicielle précisée plus bas. S'appuyant sur les projets individuels, une partie du cours se réalise en

pédagogie inversée. De par la remise d'un projet individuel et de sa présentation orale, l'étudiant.e acquiert à la fois la compétence orientée statistique dans l'usage des réseaux neuronaux pour le traitement des grandes masses de données (Big Data) ainsi qu'une autonomie (pédagogie inversée) et un savoir faire dans la présentation d'exposés scientifiques.

Evaluation : Un devoir logiciel, un projet individuel (parties théorique et logicielle), exposé avec démos interactives. La présence est obligatoire à tous les cours.

— **Optimisation convexe séquentielle**

SCDI

Enseignant : Olivier Wintenberger

Volume : 24h, 2ECTS

Description : L'objectif de ce cours est d'étudier la convergence de nombreux algorithmes en ligne, d'abord dans un cadre déterministe puis aléatoire. Il sera démontré que l'apprentissage séquentiel fournit des solutions adaptatives et robustes à de nombreux problèmes d'optimisations convexes sous contraintes. La convergence des algorithmes étudiés sera illustrée sous R dans le cadre de la classification des données MNIST. Thèmes abordés

- Introduction à l'optimisation convexe dans un cadre séquentiel
- Projection sur le simplexe, parcimonie
- Algorithmes du premier et du second ordre
- Régularisation et algorithmes libres de projection
- Problème du bandit
- Apprentissage dans un cadre stochastique

UE MAI05 Spécialisation 1, 6 ECTS

— **Fiabilité**

IMPA

IFMA

Enseignant.e : Michèle Thieullen et Thomas Guillon (RTE)

Volume : 30h, 3ECTS

Description :

- Partie théorique (M. Thieullen) : Modèles semi-markoviens et processus déterministes par morceaux (PDMP). Le but du cours et des séances de TD est de passer en revue certains aspects théoriques des modèles fondamentaux en fiabilité. On y abordera les chaînes de Markov, le processus de Poisson, les processus de renouvellement, les processus semi-markoviens et de Markov déterministes par morceaux. Le fil conducteur est la notion de taux de hasard pour la modélisation d'événements aléatoires.
- Partie industrielle (T. Guillon, RTE) : Introduction à la science des risques et aux trois grandes stratégies de gestions de risques (Risk-Informed, principe de prudence, stratégie discursive), études des cas : Faillite de Pacific Gas & Electricity, Crashes Boeing 737 MAX. Statistiques des durées de vie et biais d'observations (estimateur de Kaplan-Meier, estimateur du maximum de vraisemblance, régression de survie). Valorisation des conséquences et analyse socio-économique. Politiques de maintenance préventive, processus de renouvellement à récompense, politiques optimales de remplacement par âge. Étude de cas et TP en python.

— **Base de données SQL et VBA**

IMPA

IFMA

Enseignant :

Volume : 30h, 3ECTS

Description : Création et utilisation de base de données SQL. Création d'une interface Excel avec des "UserForms" VB pour interagir avec la base. Utilisation du VBA comme langage de programmation : types de données, attributs, opérateurs, fonctions, boucles, types RANGE et VARIANT, tableaux, etc.

— **Projet Collaboratif**

IMPC

Enseignant : Stéphane Labbé

Volume : 30h, 3ECTS

Description : Ce projet a pour objectif de traiter un problème complexe de mécanique, plutôt des fluides, proche des applications pouvant apparaître dans le cadre de problèmes industriels. Effectué en petits groupes, le travail va de la compréhension de la modélisation mathématique du sujet proposé à sa discrétisation et à la génération de simulations. Le travail comporte une partie développement informatique.

— **Initiation FreeFem++**

IMPC

Enseignante : Rachida Chakir (Univ. Gustave Eiffel)

Volume : 10h, 1ECTS

Description : Les développements numériques du cours précédent seront faits à l'aide du logiciel FreeFem++, auquel les étudiant.e.s seront initié.e.s dans des séances de TP dédiées.

— **Modèles mathématiques appliqués à la biologie**

IMPC

Enseignant : Miguel Fernandez (Inria)

Volume : 15h, 2ECTS

Description : Ce cours abordera quelques problèmes rencontrés en mécanique des fluides en sciences du vivant, dans leur analyse mathématique et sur leur simulation numérique. On parlera notamment des équations de (Navier-)Stokes : résultats théoriques, méthodes numériques, discrétisation par éléments finis. Cet enseignant comporte une partie mise en œuvre numérique à l'aide de FreeFem++.

— **Modèles statistiques pour l'écologie**

SCDI

Enseignant : Stéphane Robin

Volume : 30h, 3ECTS

Description : L'écologie s'intéresse aux relations que les espèces vivantes entretiennent entre elles et avec leur milieu. L'analyse et la compréhension de ces interactions passe fréquemment par une modélisation statistique impliquant des variables latentes (c'est-à-dire non observées) visant à décrire les structures et les processus qui sous-tendent ces interactions.

L'objectif de ce cours est de présenter certains de ces modèles comme les modèles de distributions (jointes) d'espèces ou les modèles de réseaux écologiques. Les modèles les plus simples sont des modèles linéaires généralisés, éventuellement mixtes. Les modèles plus complexes posent des problèmes d'inférence spécifiques qui peuvent être surmontés grâce à des généralisations de l'algorithme EM reposant sur des approximations variationnelles. Un des objectifs principaux de ce cours est la bonne compréhension de tels modèles et la définition d'un algorithme permettant d'en inférer les paramètres.

— **Statistiques industrielles : plans d'expériences**

SCDI

Enseignant·e : Marc Joncour et Céline Berthou (SAFRAN)

Volume : 15h, 1,5ECTS

Description : Dans un contexte industriel où les essais peuvent être coûteux, il est impossible de couvrir toutes les combinaisons de paramètres pour optimiser les performances d'un produit. Ce cours vous familiarisera avec les principes théoriques et pratiques de la planification expérimentale pour sélectionner les paramètres les plus pertinents et modéliser le problème à résoudre.

Nous aborderons les méthodes de planification expérimentale telles que les plans factoriels, ou de surface de réponse et vous appliquerez ces concepts via un projet où vous concevrez et analyserez un plan d'expérience afin d'améliorer les performances d'une problème physique concret.

— **Pratique de la fiabilité**

SCDI

Enseignant : Emmanuel Rémy (EDF R&D)

Volume : 15h, 1,5ECTS

Description : Assurer la sûreté et la performance des systèmes et limiter leur impact sur l'environnement sont des enjeux majeurs pour tous les industriels, quel que soit le secteur d'activités (agroalimentaire, armement, aéronautique, automobile, chimie, énergie, ferroviaire, métallurgie, pharmaceutique...). Ces objectifs passent nécessairement par une évaluation précise de la fiabilité des équipements, c'est-à-dire leur aptitude à ne pas tomber en panne. Les méthodes probabilistes et statistiques sont des outils bien adaptés pour quantifier ces risques de défaillance.

En fonction des connaissances disponibles, différentes approches sont envisageables : fréquentistes pour traiter les données de retour d'expérience d'exploitation et de maintenance des matériels, bayésiennes pour tirer profit de dires de spécialistes métier, ou structurelles pour manipuler les résultats de calculs de modèles ou de codes de simulation numérique de phénomènes physiques.

Le cours visera à introduire ces trois grandes familles d'approches, en présentant pour chacune d'elles les concepts, modèles, méthodes et outils de base et en illustrant leur application à des vrais cas d'études industriels.

UE MAI06 Spécialisation 2, 6 ECTS

— **Machine Learning**

IMPA

IMPC

IFMA

Enseignante : Ana Karina Fermin Rodriguez (Univ. Paris Nanterre)

Volume : 15h, 1,5ECTS

Description : Introduction à l'apprentissage statistique supervisé : construction de prédictions automatisées à partir d'une base d'exemples de bonnes prédictions. Nous décrirons le cadre théorique et présenterons les méthodes les plus classiques. Un accent sera mis sur le choix et la validation de ces méthodes à l'aide des données elles-mêmes. Le cours est illustré par des exemples dans le langage R. Il se valide par un projet avec R sur des données réelles.

— **Calcul Parallèle**

IMPA

IMPC

SCDI

Enseignant : Xavier Juvigny (Onera)

Volume : 30h, 3ECTS

Description : Présentation des architectures parallèles, architecture de la mémoire

(partagée, hiérarchique, distribuée, hybride, etc.). Modèles de programmation : OpenMP (mémoire partagé) MPI (mémoire distribuée).

Algorithmes parallèles distribués dans le contexte de résolution de grands systèmes linéaires pleins ou creux, par méthodes directes ou itératives. Approches de découpage par blocs pour des matrices pleines ou par décomposition de graphe (de la matrice ou du maillage) pour des matrices creuses. TD en Python avec MPI et projets.

Pour les SCDI ce cours est optionnel, choix avec IA pour l'assurance.

— **Projet Python / Calcul parallèle**



Enseignant : Xavier Juvigny (Onera)

Volume : 15h, 1,5ECTS

Description : Ce projet vise à approfondir l'usage de Python 3 dans un contexte numérique. Différents sujets de projet sont proposés, et il vous est possible d'y soumettre votre propre projet (soumis à la validation de l'encadrant). A travers des séances de travail supervisés, vous serez conseillés et orientés dans votre pratique du langage Python 3 afin d'atteindre un programme complet et de bonnes pratiques de programmation.

— **Marchés des matières premières**



Enseignant : Olivier Bardou (GRDF)

Volume : 15h, 1,5ECTS

Description : Ce cours est une introduction aux marchés des énergies et aux méthodes actuellement développées pour répondre aux questions de valorisation de produits dérivés et de gestion des risques qui s'y rencontrent. Le programme du cours est le suivant :

- Présentation des marchés du pétrole, du gaz, de l'électricité, du charbon et des émissions,
- Modèles de prix pour les énergies et les émissions,
- Valorisation et couverture des produits dérivés sur les marchés de l'énergie,
- Valorisation et gestion des actifs réels (options swing, stockages, CCGT...),
- Gestion du risque (financier, physique et climatique).

— **Produits dérivés de taux**



Enseignant : Sébastien Roland (SGCIB)

Volume : 15h, 1,5ECTS

Description : Le cours aborde la modélisation de certaines courbes de taux ainsi que différents modèles stochastiques de taux. On y voit notamment comment ces derniers sont construits, calibrés et utilisés dans les usages quotidiens de la banque. On se donne pour but de construire, à partir de données de marché liquides, un framework dans lequel on est capable de calculer les prix de différents produits présents ou pas dans le marché de départ.

— **Risques de marché et de contrepartie**



Enseignant : Babacar Diallo (Natixis)

Volume : 15h, 1,5ECTS

Description : Ce cours est une introduction à la gestion des risques en finance de marché. Nous présenterons les concepts réglementaires et la modélisation du risque de marché et du risque de contrepartie. Nous verrons comment ces risques sont gérés dans les banques à travers des métriques tel que la VaR, l'ES, l'IRC, les Stress-test, l'EEPE, ou encore la CVA VaR.

— **Méthodes de simulation pour les modèles génératifs**

SCDI

Enseignant : Sylvain Le Corff

Volume : 30h, 3ECTS

Description : La simulation de variables aléatoires en grande dimension est un véritable défi pour de nombreux problèmes de machine learning récents et pour l'apprentissage de modèles génératifs profonds. Ce problème se rencontre par exemple dans un contexte bayésien lorsque la loi a posteriori n'est connue qu'à une constante de normalisation près, dans le cadre des auto encodeurs variationnels ou encore pour la métamodélisation de systèmes dynamiques complexes.

De nombreuses méthodes sont basées sur des approches de type "Importance Sampling" ou "Sequential Monte Carlo" dont nous rappellerons les éléments principaux. Pour surmonter les faiblesses inhérentes à ces méthodologies en grande dimension ou pour les modèles génératifs profonds (à base de réseaux récurrents, réseaux denses ou convolutifs), nous étudierons dans ce cours de récentes solutions en mettant l'accent sur les aspects méthodologiques. Le fonctionnement de ces méthodes sera illustré à l'aide de jeux de données publics pour des problématiques de "computer vision" et de prédictions de séries temporelles.

Pour les SCDI ce cours est optionnel, choix avec IA pour l'assurance.

— **IA pour l'assurance**

SCDI

Enseignant : Emmanuel Gobet, intervenants CCR

Volume : 60h, 6ECTS

Description : L'intelligence artificielle est de plus en plus utilisée dans le domaine des applications assurantielles. Cette spécialisation de l'ISUP se concentre sur la présentation de quelques grands modèles d'apprentissage, tels que les LLM et les modèles génératifs, ainsi que sur leurs applications récentes à des données réelles.

Après une introduction générale au traitement de grandes bases de données par l'IA — que ce soit sous l'angle de l'analyse de données ou de l'actuariat (5h + 5h) — un cours présentera les principes fondamentaux des modèles profonds et génératifs en s'appuyant sur des illustrations numériques (28h). Enfin, des retours d'expérience de professionnels du secteur de l'assurance et/ou finance seront présentés (8h + 8h). L'évaluation de cette matière se fera à l'issue d'un hackathon sur données réelles, en fonction de la performance des modèles d'IA implémentés par équipes (6h).

Pour les SCDI ce cours est optionnel, choix avec Calcul parallèle et Méthodes de simulation pour les modèles génératifs.

UE Anglais, 3 ECTS

L'enseignement est assuré par le département de langues (pour IFMA, IMPA et IMPC essentiellement en ligne, quelques ateliers en présence). Préparation au test TOEIC, ou Anglais professionnel.

L'UE se fait dans le cadre de l'ISUP pour les SCDI, le TOEIC est payé aux étudiants SCDI qui doivent avoir un niveau B2 pour valider le diplôme de l'ISUP.

UE Stage, 18 ECTS

Enseignant·e·s : Cindy Guichard (pour IMPA et IMPC), Lokmane Abbas-Turki (pour IFMA), Jean-Patrick Baudry et Olivier Wintenberger (pour SCDI)

Objectifs de l'UE : Cette expérience professionnelle, la première de cette ampleur par la durée et le niveau des tâches effectuées, est essentielle pour l'insertion ultérieure des étudiant·e·s dans le marché du travail. Elle est très valorisante et leur permet d'aborder la recherche du premier emploi avec un bagage scientifique et professionnel consistant. Pour les étudiant·e·s qui effectuent un stage de qualité en centre de recherche, elle peut éventuellement leur donner la possibilité d'obtenir une bourse de thèse pour continuer le travail de recherche appliquée initié pendant le stage, ou d'aborder un travail sur des thématiques proches dans une autre équipe.

Thèmes abordés : Immersion totale dans l'entreprise, dans un secteur correspondant à la majeure suivie : banque, assurance, sociétés de conseil, services de statistiques dans des établissements, . . .) ou dans un centre de recherche public (CEA, IFPEN, Inria, ONERA) ou du secteur industriel (automobile, aéronautique, BTP, énergie, télécoms, transport, électronique, . . .).

Suivi pédagogique assuré par un enseignant de la formation, rédaction d'un rapport, soutenance officielle devant un jury composé des responsables de majeure et de l'encadrant du stage en entreprise.

Les étudiants SCDI doivent rendre un mémoire ISUP intégrant la formalisation mathématique d'une problématique de Sciences des Données rencontrée lors de leur stage. Une note de 14 ou plus est indispensable pour obtenir le diplôme de l'ISUP.

6.6 Responsables et sites

Responsable du parcours : Vincent Lemaire

<https://m2ingmath.math.upmc.fr/>

Responsables des majeures :

— majeure IMPA : Cindy Guichard

<https://m2ingmath.math.upmc.fr/impa/>

— majeure IMPC : Cindy Guichard

<https://m2ingmath.math.upmc.fr/impc/>

— majeure IFMA : Vincent Lemaire et Lokmane Abbas-Turki

<https://m2ingmath.math.upmc.fr/ifma/>

— majeure SCDI : Olivier Wintenberger

<https://m2ingmath.math.upmc.fr/scdi/>

Informations complémentaires sur le site de l'ISUP

Secrétariat : Francelise Hardoyal

francelise.hardoyal@sorbonne-universite.fr

Campus Jussieu, 15-14, 2e étage, bureau 206, tél. 01 44 27 51 14

Responsable pédagogique pour les apprenti·e·s : Nathalie Obert-Ben Taieb

nobert@cfa-sciences.fr, secretariat@cfa-sciences.fr

CFA des Sciences, tél. 01 44 27 71 40

Chapitre 7

Master 2, Parcours Statistique, Apprentissage et Algorithmes

7.1 Objectifs et description

Le parcours Statistique, Apprentissage et Algorithmes (MS2A) est né en 2025 de la fusion du M2 Statistique & Learning et du M2 Apprentissage et Algorithmes, avec la volonté de mettre à disposition des étudiant·e·s un parcours de M2 permettant une grande liberté dans la définition d'un profil personnalisé alliant les aspects théoriques et numériques de la statistique et de l'apprentissage automatique.

Le MS2A est une formation pluridisciplinaire en mathématiques appliquées et en informatique, centrée sur la statistique, la science des données et l'intelligence artificielle. Il propose un vaste choix de cours permettant d'acquérir un profil unique et personnalisé, allant de la statistique mathématique à l'apprentissage profond, en passant par les mathématiques de l'apprentissage statistique. La formation dispensée est à la fois :

- théorique, au travers d'enseignements de haut niveau abordant les notions mathématiques de la statistique et de l'apprentissage automatique ;
- numérique, via des exemples portés par des travaux pratiques et des projets ;
- concrète, grâce à un stage au second semestre et par le contact direct avec des entreprises et des laboratoires proposant des problèmes concrets d'apprentissage automatique.

Le parcours MS2A s'appuie principalement sur quatre laboratoires de Sorbonne Université :

- le Laboratoire de Probabilités, Statistique et Modélisation (LPSM) ;
- l'Institut des Systèmes Intelligents et de Robotique (ISIR) ;
- le Laboratoire d'Informatique de Paris 6 (LIP6) ;
- le Laboratoire Jacques-Louis Lions (LJLL).

7.2 Débouchés professionnels

À l'issue de la spécialité MS2A, les étudiant·e·s peuvent poursuivre par un doctorat (dans un laboratoire académique, un organisme de recherche ou en milieu industriel) ou intégrer directement le monde de l'entreprise.

7.3 Publics visés, prérequis

L'admission au sein de la spécialité MS2A s'effectue après examen du dossier de candidature par une commission pédagogique constituée des principaux responsables. La spécialité s'adresse à des étudiantes et étudiants extrêmement motivés, qui nourrissent l'ambition de poursuivre par un doctorat dans le domaine de la statistique, de l'apprentissage automatique ou de l'apprentissage profond ou de rejoindre des entreprises en pointe dans le domaine du traitement des données et de l'intelligence artificielle (grands groupes ou jeunes entreprises innovantes).

Il est vivement recommandé aux étudiant·e·s intéressé·e·s de posséder une solide formation initiale en mathématiques générales, statistique et informatique (cursus universitaire ou écoles d'ingénieurs), si possible validée avec mentions et éventuellement complétée par des MOOC.

7.4 Organisation

Chaque étudiant·e concourt pour 60 ECTS annuels : 30 au premier semestre et 30 au second (incluant une UE Stage de 18 ECTS). Il est possible de choisir au plus 36 ECTS par semestre, auquel cas la moyenne retenue est la plus favorable pour l'étudiant·e.

Premier semestre (de septembre à janvier)

- Pré-rentree (début septembre);
- Cours fondamentaux – Période 1 (avant la Toussaint);
- Cours fondamentaux – Période 2 (après la Toussaint).

Second semestre (de janvier à octobre)

- Cours d'ouverture (jusqu'à fin mars);
- Stage (à partir de mi-avril).

Examens

Les examens ont lieu à l'issue de chaque bloc (novembre, janvier et avril). Des rattrapages sont organisés en juin pour les étudiant·e·s n'ayant pas obtenu de notes validantes à la première session. Il existe une compensation entre UE. Cependant, il n'y a pas de compensation entre les semestres.

7.4.1 Pré-rentree

L'objectif de la pré-rentree est de réinstaller les fondamentaux mathématiques et informatiques des cours à venir. Les cours sont obligatoires mais non-notés. Vous devez choisir soit R, soit Python avancé.

INTITULÉ	VOLUME
Statistique	21h
Optimisation et calcul différentiel	15h
Python	12h
R	12h
Python avancé	12h

7.4.2 Premier semestre

(A) Tronc commun (18 ou 24 ECTS)

Les cours Apprentissage statistique et Optimisation stochastique sont obligatoires. Vous devez choisir 1 ou 2 cours parmi Statistique en grande dimension et Estimation non-paramétrique.

INTITULÉ	VOLUME	ECTS
Apprentissage statistique	60h	6
Optimisation stochastique	30h	6
Statistique en grande dimension	30h	6
Estimation non-paramétrique	30h	6

Les crédits ECTS restants, dans la limite d'un volume total de 30 ECTS au premier semestre (36 ECTS possibles et règle du maximum), peuvent être choisis :

- soit dans les cours de spécialisation ;
- soit dans les cours du label intensif maths-info ou de spécialisation.

(B) Spécialisation

INTITULÉ	VOLUME	ECTS
Optimisation non-convexe	30h	6
Data science en pratique	30h	6
Méthodes de simulation	30h	6

(C) Label intensif maths-info (ex-M2A)

Le parcours MS2A offre la possibilité de suivre une formation intensive bi-disciplinaire, portée par les départements de Mathématiques et d'Informatique de Sorbonne Université. Cette formation exigeante dispose d'un nombre de places limité. La sélection est réalisée sur dossier au moment des candidatures.

Pour ce faire, il faut choisir au moins 12 ECTS dans les cours ci-dessous, le cours Apprentissage profond constituant un prérequis pour tous les autres. Ces 12 ECTS peuvent être complétés librement par des cours du label intensif maths-info ou de spécialisation.

INTITULÉ	VOLUME	ECTS
Apprentissage profond (cours obligatoire)	30h	6
Analyse de données large échelle	30h	6
Reconnaissance des formes pour l'analyse et l'interprétation d'images	30h	6
Apprentissage par renforcement	30h	6
Nouvelles tendances en apprentissage profond	30h	6
Modèles de langage	30h	6

7.4.3 Second semestre

Les cours suivants sont au choix dans limite inférieur de 12 ECTS.

INTITULÉ	VOLUME	ECTS
Analyse statistique de graphes	30h	3
Apprentissage automatique pour données médicales	30h	3
Apprentissage statistique moderne	30h	3
Confidentialité et équité algorithmique	30h	3
Gestion des données	30h	3
Inégalités de concentration	24h	3
Modèles statistiques pour l'écologie	30h	3
Modélisation et statistique bayésienne computationnelle	30h	3
Optimisation stochastique, apprentissage PAC-Bayésien et inférence variationnelle	30h	3
Optimisation stochastique pour l'apprentissage automatique en finance	15h	3
Processus ponctuels	30h	3
Programmation parallèle à grande échelle sur GPU pour les grandes masses de données	30h	3
Réseaux de neurones et approximation numérique adaptative	30h	3
Séries temporelles	30h	3
Statistique bayésienne non-paramétrique	30h	3
Théorie et Analyse des Valeurs Extrêmes	24h	3

7.5 Description des UE

7.5.1 Pré-rentree

Statistique

Responsable : [Antoine Godichon-Baggioni](#)

Objectif : Réviser les notions de statistique mathématique

Prérequis : Notions fondamentales de probabilités, statistique, analyse et algèbre linéaire

Thèmes abordés :

- Rappels de probabilités
- Méthodologie statistique : estimation, intervalles de confiance et tests
- Modèle linéaire, vecteurs gaussiens, modèle linéaire gaussien

Ressources : [Moodle](#)

Optimisation et calcul différentiel

Responsable : [Romain Dujardin](#)

Objectif : Introduire les outils de base de l'optimisation

Prérequis : Notions fondamentales de probabilités et statistique

Thèmes abordés :

- Rappels de calcul différentiel et d'algèbre matricielle
- Minimisation de fonctions convexes via la dualité Lagrangienne
- Introduction à l'analyse convexe : sous-gradient, dualité de Fenchel-Legendre
- Descente de gradient, de sous-gradient, et gradient stochastique

Ressources : [Moodle](#)

Python

Responsable : [Maxime Sangnier](#)

Objectif : Se familiariser avec les outils de calcul scientifique en Python

Prérequis : Notions fondamentales de programmation et de statistique

Thèmes abordés :

- Éléments de langage
- Calcul matriciel et scientifique avec *NumPy* et *SciPy*
- Statistique et modèle linéaire avec *SciPy* et *statsmodels*
- Optimisation du premier ordre

Ressources : [Page web](#)

R

Responsable : [Anna Bonnet](#)

Objectif : Se familiariser avec l'utilisation de R pour la statistique

Prérequis : Notions fondamentales de programmation et de statistique

Thèmes abordés :

- TBA

Ressources : [Page web](#)

Python avancé

Responsable : [Raphael Cousin](#)

Objectif : Se familiariser avec les plateformes Python d'apprentissage de réseaux de neurones.

Prérequis : Notions fondamentales de programmation en Python

Thèmes abordés :

- Tenseurs et *TensorFlow*
- *PyTorch*
- *Tensorboard*

Ressources : [Page web](#)

7.5.2 Premier semestre (tronc commun)

Apprentissage statistique

Responsables : [Gérard Biau](#) et [Maxime Sangnier](#)

Objectif : Ce cours présente les grands principes de l'apprentissage statistique et les problématiques liées. Il introduit aussi les principales méthodes de prédiction (classification et régression), de partitionnement et de réduction de dimension. Il présente l'apprentissage statistique d'un point de vue algorithmique et sera illustré par des travaux pratiques (en Python) ainsi que par un challenge en science des données.

Prérequis : Notions fondamentales de probabilités et statistique, analyse convexe, algèbre linéaire et calcul scientifique en Python

Thèmes abordés :

- Introduction au problème de la classification supervisée
- Analyse discriminante, régression logistique, machines à vecteurs supports
- Principe de minimisation du risque empirique, théorie de Vapnik-Chervonenkis
- Bornes de performance, pertes convexes, sélection de modèle

- Classification non paramétrique, théorème de Stone, plus proches voisins, arbres, méthodes ensemblistes
- Classification par réseaux neuronaux
- Quantification et clustering
- Modèle de mélange et algorithme EM, k-moyennes, partitionnement spectral et hiérarchique
- Analyse en composantes principales, projections aléatoires et positionnement multidimensionnel

Ressources : [Moodle](#)

Optimisation pour l'apprentissage automatique

Responsable : [Raphaël Berthier](#)

Objectif : L'objectif de ce cours est de présenter les principales méthodes d'optimisation pour les modèles d'apprentissage ainsi que leurs implications (interpolation, régularisation implicite). On abordera ensuite l'optimisation pour les réseaux de neurones, l'apprentissage en ligne et les bandits. Le cours sera illustré par de séances de TP en Python.

Prérequis : Notions fondamentales de probabilités et statistique, calcul scientifique en Python

Thèmes abordés :

- Minimisation du risque empirique et erreur de généralisation
- Méthodes d'optimisation et descente de gradient stochastique
- Réduction de variance et accélération
- Interpolation, modèles sur-paramétrés et descente de gradient par coordonnée
- Réseaux de neurones et régularisation implicite
- Apprentissage en ligne et bandits

Ressources : [Moodle](#)

Modèle linéaire et grande dimension

Responsable : [Étienne Roquain](#)

Objectif : Appréhender les problématiques issues de la grande dimension dans le modèle linéaire

Prérequis : Notions fondamentales de probabilités et statistique, logiciel R

Thèmes abordés :

- Seuillage et hypothèse de parcimonie (sparsité)
- Estimateurs pénalisés : ridge et LASSO
- Régression logistique, régression Poisson et modèle linéaire généralisé
- Sélection et contrôle du taux de faux positifs
- Prédiction conformelle

Ressources : [Moodle](#)

Estimation non-paramétrique

Responsables : [Ismaël Castillo](#) et [Charlotte Dion](#)

Objectif : Présenter des méthodes classiques d'estimation non-paramétrique, étudier le comportement des estimateurs introduits pour différents risques, introduire à l'optimalité des vitesses de convergence au sens minimax. Les notions introduites seront illustrées

dans des exemples de modèles statistiques très utilisés en pratique : estimation de densité, régression non-paramétrique, signal en bruit blanc gaussien, modèles de graphes aléatoires.

Prérequis : Notions fondamentales de probabilités, bases de statistique, estimation paramétrique, bases d'analyse fonctionnelle (cas Hilbert au moins)

Thèmes abordés :

- Estimation non-paramétrique de densité
- Modèles de bruit blanc, de régression et de convolution
- Sélection de paramètres
- Seuillage et estimateurs par ondelettes
- Modèles de graphes aléatoires
- Bornes inférieures de vitesses au sens minimax
- Régions de confiance non-paramétriques

Ressources : [Moodle](#)

7.5.3 Premier semestre (spécialisation)

Méthodes du premier ordre pour l'optimisation non convexe et non lisse

Responsable : [Pauline Tan](#)

Objectif : Ce cours explore la vaste théorie de l'optimisation non convexe et non lisse, par le biais des méthodes dites du premier ordre. Une attention particulière sera accordée aux problématiques liées à l'optimisation sur données en grande dimension.

Prérequis : Analyse réelle

Thèmes abordés :

- Fonction à valeurs sur la droite réelle étendue, sous-différentiabilité, condition d'optimalité du premier ordre
- Méthodes de gradient (explicite, implicite), opérateur proximal, algorithme du point proximal
- Dualité de Lagrange et de Fenchel, conditions de Karush, Kuhn et Tucker
- Stratégies d'éclatement : forward-backward splitting, éclatement de Dykstra, méthode de Douglas-Rachford
- Optimisation par blocs : minimisations alternées (block coordinate descent), descentes (proximales) alternées
- Algorithmes primaux-duaux : méthode des directions alternées, algorithme de Chambolle-Pock
- Ouverture : variantes inertielles, pré-conditionnement, distances de Bregman

Ressources : [Moodle](#)

Data science en pratique

Responsable : [Raphael Cousin](#)

Objectif : Ce cours vise à développer les compétences pratiques nécessaires pour transformer des données brutes en solutions concrètes. Il présente des méthodes de visualisation, de transformation et de modélisation adaptées à un large éventail de problématiques telles que la régression, la classification, la réduction de dimension, les systèmes de recommandation, les modèles génératifs, et l'apprentissage par renforcement. Les participants apprendront à manipuler des ensembles de données réels, incluant des données tabulaires, des séries temporelles, des images et des textes, en utilisant des bibliothèques avancées de machine learning et de deep learning. De plus, le cours met un accent particulier sur

l'utilisation d'outils essentiels pour construire des pipelines robustes, indispensables à la mise en production.

Prérequis : Notions fondamentales de probabilités, statistique et algèbre linéaire. Connaissance basique de Python.

Thèmes abordés :

- Environnements de travail et gestion de versions avec Git et Docker
- Préparation des données et visualisation
- Optimisation d'hyperparamètres et Sélection de modèles
- Fondamentaux du deep learning et applications au traitement d'images et de textes
- Systèmes de recommandation
- Modèles génératifs
- Fondamentaux de l'apprentissage par renforcement

Ressources : [Page web](#)

Méthodes de simulation

Responsable : [Sylvain Le Corff](#)

Objectif : La simulation de variables aléatoires en grande dimension est un véritable défi pour de nombreux problèmes de machine learning récents et pour l'apprentissage de modèles génératifs profonds. Ce problème se rencontre par exemple dans un contexte bayésien lorsque la loi a posteriori n'est connue qu'à une constante de normalisation près, dans le cadre des auto encodeurs variationnels ou encore pour la métamodélisation de systèmes dynamiques complexes.

De nombreuses méthodes sont basées sur des approches de type "Importance Sampling" ou "Sequential Monte Carlo" dont nous rappellerons les éléments principaux. Pour surmonter les faiblesses inhérentes à ces méthodologies en grande dimension ou pour les modèles génératifs profonds (à base de réseaux récurrents, réseaux denses ou convolutifs), nous étudierons dans ce cours de récentes solutions en mettant l'accent sur les aspects méthodologiques. Le fonctionnement de ces méthodes sera illustré à l'aide de jeux de données publics pour des problématiques de "computer vision" et de prédictions de séries temporelles.

Prérequis : Notions fondamentales de probabilités et statistique ; notions concernant les méthodes de Monte Carlo et les chaînes de Markov. Notions concernant les méthodes de Monte Carlo.

Thèmes abordés :

- Rappels sur les modèles de Markov cachés et leur inférence (score de Fisher, algorithme Expectation Maximization)
- Méthodes de Monte Carlo séquentielles (filtrage et lissage) pour les modèles à espace d'état
- Méthodes de Monte Carlo séquentielles variationnelles
- Flots normalisants et "neural importance sampling"
- Estimation variationnelle en ligne.

Ressources : [Moodle](#)

7.5.4 Premier semestre (label intensif maths-info – ex-M2A)

Apprentissage profond

Responsable : [Patrick Gallinari](#)

Objectif : Le Deep Learning est actuellement au cœur du Machine Learning et plus généralement de l'IA. L'objectif de l'UE est de former des spécialistes du Deep Learning aptes à s'adapter aux évolutions constantes du domaine. Les travaux pratiques permettent de prendre en main une plateforme de Deep Learning telle que PyTorch et d'aborder les concepts vu en cours d'un point de vue applicatif et orienté tâche.

Prérequis : Notions élémentaires d'apprentissage statistique et calcul scientifique en Python

Thèmes abordés :

- Architectures usuelles, rétro-propagation, paradigmes d'apprentissage
- Graphe de calculs, auto-différentiation
- Architectures avancées : attention globale, self-attention, Graph Neural Networks, Transformers

Ressources : [Site du Master MIND](#)

Analyse de données large échelle

Responsable : [Mohamed Amine Baazizi](#)

Objectif : Ce cours aborde les problèmes et les solutions liés au “big data” avec comme objectif d'aborder tous les aspects permettant le développement d'un pipeline de données efficace allant de la préparation et la représentation des données jusqu'à leur analyse. Le cours aborde les deux axes suivants. 1) Gestion des données : paradigmes de programmation parallèle avec des données large échelle (MapReduce, Pregel), optimisation des data pipelines, qualité des données, stockage optimisé des données massives. 2) Analyse des données : analyse de données complexes (graphes de données et de connaissances, texte), in-database ML, bases de données vectorielles, intégration de données (datalake). Les travaux pratiques permettent d'aborder les langages et les technologies suivantes : SQL, MapReduce, Pregel, Cypher, Spark, Delta, MLlib, GraphX.

Prérequis : UE DEEP-L

Thèmes abordés :

- Introduction à la programmation parallèle et fonctionnelle sur Scala
- Données multidimensionnelles et entrepôts de données
- Paradigme Map-Reduce : modèle de calcul et implantation dans Spark
- Evaluation des requêtes distribuées
- Paradigme BSP (Bulk Synchronous Programming) et application pour l'analyse des graphes

Ressources : [Site du Master MIND](#)

Reconnaissance des formes pour l'analyse et l'interprétation d'images

Responsable : [Matthieu Cord](#)

Objectif : Ce cours aborde un ensemble de notions essentielles pour l'analyse et l'interprétation automatique du contenu visuel des images. A partir du signal image bidimensionnel, les différents systèmes de vision artificielle sont décrits. Outre les approches traditionnelles de vision par ordinateur, l'accent est mis sur les méthodes d'apprentissage statistique appliquées au traitement d'image. En particulier, la description des architectures profondes à base de réseaux de neurones et leur apprentissage (deep learning) occupent une place centrale dans ce cours. Les problématiques de vision étudiées concernent aussi bien des systèmes de classification et de segmentation, que de génération d'images.

L'ensemble des concepts présentés font l'objet d'applications pratiques mises en oeuvre dans les séances de TPs.

Prérequis : Notions basiques de représentation de l'image numérique, algorithmique de traitement statistique des données et calcul scientifique en Python

Thèmes abordés :

- Introduction à l'apprentissage supervisé
- Réseaux de neurones et machines à vecteurs supports
- Réseaux convolutionnels très large échelle, ImageNet
- Apprentissage par transfert et adaptation de domaine
- Réseaux antagonistes génératifs
- Segmentation et application à la conduite autonome

Ressources : [Moodle](#)

Apprentissage par renforcement

Responsable : [Olivier Sigaud](#)

Objectif : Cette UE présente l'ensemble des concepts fondamentaux de l'apprentissage par renforcement ainsi que les principaux algorithmes d'apprentissage par renforcement tabulaire (programmation dynamique, Q-learning, SARSA, actor-critic) et de Deep Reinforcement Learning (DQN, DDPG, TRPO, PPO, A2C, SAC, TQC ...). Des notions proches comme les méthodes de Direct Policy Search et l'apprentissage par imitation sont aussi abordées. Le cours est centré sur les algorithmes et les relations qu'ils entretiennent. Les travaux pratiques sont l'occasion de coder les algorithmes en s'appuyant sur une librairie dédiée, tandis que des mini-projets permettent d'aborder les questions méthodologiques que pose leur mise en oeuvre. Enfin, un projet plus conséquent permet d'évaluer la maîtrise globale acquise par les étudiants.

Prérequis : UE DEEP-L

Thèmes abordés :

- Markov Decision Process, programmation dynamique
- Apprentissage par renforcement tabulaire
- Apprentissage profond pour le renforcement (Deep Q learning, DDPG, TD3, Policy gradient, Reinforce, A2C, TRPO, PPO, SAC, TQC...)
- Apprentissage par imitation, Goal-Conditioned Reinforcement Learning

Ressources : [Site du Master MIND](#)

Nouvelles tendances en apprentissage profond

Responsable : [Nicolas Thome](#)

Objectif : Cette UE introduit des concepts récents en deep learning et a vocation à s'adapter aux avancées du domaine. En particulier, le cours présente en détail - du point de vue théorique et pratique les modèles génératifs récents (modèles variationnels, adverses, de flot normalisant et de diffusion, ...). Il aborde également le paradigme AI4Science : quelle place pour le deep learning dans la modélisation scientifique avec des exemples issus du « Physics-informed Machine Learning. » Les travaux pratiques permettent de découvrir les applications en lien avec ces thématiques dans différents domaines scientifiques.

Prérequis : UE DEEP-L

Thèmes abordés :

- Modèles génératifs : GAN, VAE, normalizing flows, diffusion models

- Paradigme AI4Science
- Machine learning informé par la physique (NeuralODE).

Ressources : [Site du Master MIND](#)

Modèles de langage

Responsable : [Laure Soulier](#)

Objectif : Cette UE a pour objectif de présenter les modèles de langage et modèles de fondation (« foundation models ») pour des applications orientées texte telles que traitement automatique du langage et recherche d'information. Le cours aborde les notions algorithmiques mais également les aspects techniques et expérimentaux. Les travaux pratiques permettent d'acquérir l'expérience nécessaire pour utiliser les modèles de langage comme brique de base de nombreux systèmes d'intelligence artificielle.

Prérequis : UE DEEP-L

Thèmes abordés :

- Architectures Transformer
- Techniques sous-jacentes au pré-entraînement (« masked language modeling », « causal modeling », ...), à l'adaptation (distillation, PEFT, ...) et à l'évaluation de ces modèles.

Ressources : [Site du Master MIND](#)

7.5.5 Second semestre (cours d'ouverture)

Analyse statistique de graphes

Responsable : [Catherine Matias](#)

Objectif : L'analyse statistique des réseaux d'interaction (ou graphes) connaît de nos jours un fort développement dans des domaines très variés (internet, biologie, réseaux sociaux, etc.) avec des données de bien plus grande taille (quelques centaines, milliers, voire millions de nœuds). L'objectif du cours est d'apprendre à manipuler et modéliser des données de type réseaux ainsi que de se familiariser avec des méthodes de classification et inférence statistique sur des graphes. De nombreux TP sous R permettront de pratiquer l'analyse de graphes et de mettre en œuvre les méthodes statistiques.

Prérequis : Notions fondamentales de probabilités et statistique, connaissance du logiciel R

Thèmes abordés :

- Statistiques descriptives élémentaires des réseaux et visualisation
- Détection de communautés et de la classification des nœuds
- Modèles de graphes aléatoires et des méthodes d'inférence statistique

Ressources : [Moodle](#)

Apprentissage automatique pour données médicales

Responsable : [Xavier Tannier](#)

Objectif : Le but de ce cours est double : d'une part, découvrir les défis réels de la biologie fondamentale et de la médecine où l'apprentissage statistique est déjà utilisé avec succès ; d'autre part, acquérir les bases pour modéliser des données médicales complexes

Prérequis : Notions fondamentales de probabilités et statistique, algèbre linéaire, Python

Thèmes abordés :

- Médecine et apprentissage statistique.
- Clustering des données médicales : analyse exploratoire
- Stratification efficace des individus (patients) pour le développement des méthodes de médecine personnalisée
- Modèles interprétables
- A la recherche de la causalité dans des données (drug effects, variables latentes)

Ressources : [Moodle](#)

Apprentissage statistique moderne

Responsables : [Ismaël Castillo](#), [Étienne Roquain](#) et [Simon Coste](#)

Objectif : Ce cours tentera de faire un tour d’horizon des dernières tendances mathématiques dans la communauté du machine learning et de l’apprentissage statistique

Prérequis : Notions fondamentales de probabilités et statistique

Thèmes abordés :

- Théorie de l’approximation pour les réseaux de neurones
- Dimension VC pour les réseaux de neurones
- Bornes minimax pour la régression avec réseaux de neurones
- GANs
- Biais implicite des descentes de gradient
- Interpolation & overfitting bénin
- Confidentialité

Ressources : [Moodle](#)

Confidentialité et équité algorithmique

Responsables : [Christophe Denis](#) et [Rafael Pinot](#)

Objectif : L’objectif de ce cours est de sensibiliser les étudiant·e·s aux enjeux de confiance liés à l’utilisation des algorithmes d’apprentissage automatique. Les défis liés à la confiance dans l’apprentissage automatique sont nombreux et concernent aussi bien le milieu de la recherche que le monde de l’entreprise (notamment en raison de la nouvelle réglementation européenne entrée en vigueur en 2018). Le cours est divisé en deux parties, chacune abordant une thématique liée à l’apprentissage automatique de confiance. La première partie se concentre sur les questions relatives à la protection des données personnelles. La seconde partie fournit des outils de compréhension des problématiques de biais et d’équité algorithmique.

Prérequis : Notions fondamentales de probabilités et statistique. Notions élémentaires d’apprentissage statistique et d’optimisation.

Thèmes abordés :

- Confidentialité dans analyse statistique des bases de données (k-anonymat, confidentialité différentielle, etc)
- Apprentissage supervisé sous contrainte de confidentialité différentielle
- Équité algorithmique en apprentissage statistique (parité statistique, parité statistique conditionnelle, etc)
- Méthodes in-processing et post-processing pour l’équité algorithmique

Ressources : [Moodle](#)

Gestion des données

Responsable : [Olivier Schwander](#)

Objectif : Apprendre à charger et manipuler des données réelles, déployer une chaîne de traitement telle qu'utilisée en entreprise, comprendre les problèmes posés par la manipulation de données dans une application réelle. Ces points sont des préliminaires essentiels à l'intégration de méthodes statistiques avancées dans des applications réelles.

Prérequis : Connaissances basiques d'un langage de programmation

Thèmes abordés :

- Systèmes de gestion des bases de données (SQL et noSQL)
- Business Intelligence (ETL, Data Warehouse, OLAP)
- Extraction de données sur le web (services web, scraping)
- Paradigme MapReduce pour le Big Data (Spark, SPARKQL)

Ressources : [Moodle](#)

Inégalités de concentration

Responsable : [Anna Ben-Hamou](#)

Objectif : En probabilités comme en statistiques, on est souvent amené à étudier les déviations d'une variable aléatoire par rapport à son espérance. Alors que le théorème central limite nous renseigne sur les fluctuations asymptotiques, les inégalités de concentration fournissent des résultats non-asymptotiques (à n fixé). Les inégalités exponentielles classiques, comme l'inégalité de Hoeffding, concernent les sommes de variables indépendantes. Dans ce cours, nous verrons que le phénomène de concentration de la mesure apparaît aussi pour des fonctions bien plus complexes que la somme : « une variable qui dépend (de façon lisse) de beaucoup de variables indépendantes (mais pas trop de chacune d'entre elles) est essentiellement constante » (Michel Talagrand). La théorie de la concentration trouve des applications dans de nombreux domaines, et le cours sera illustré par beaucoup d'exemples issus de la physique statistique, mais aussi d'autres contextes comme l'apprentissage statistique, les matrices et graphes aléatoires, le mélange de chaînes de Markov, la théorie de l'information.

Prérequis : Notions de base en probabilités et statistique

Thèmes abordés :

- Inégalités de Poincaré et de Sobolev
- Méthode entropique
- Méthode de transport
- Isopérimétrie
- Méthode de Stein

Ressources : [Moodle](#)

Modèles statistiques pour l'écologie

Responsable : [Stéphane Robin](#)

Objectif : L'écologie s'intéresse aux relations que les espèces vivantes entretiennent entre elles et avec leur milieu. L'analyse et la compréhension de ces interactions passe fréquemment par une modélisation statistique impliquant des variables latentes (c'est-à-dire non observées) visant à décrire les structures et les processus qui sous-tendent ces interactions. L'objectif de ce cours est de présenter certains de ces modèles comme les modèles de distributions (jointes) d'espèces ou les modèles de réseaux écologiques. Les

modèles les plus simples sont des modèles linéaires généralisés, éventuellement mixtes. Les modèles plus complexes posent des problèmes d'inférence spécifiques qui peuvent être surmontés grâce à des généralisations de l'algorithme EM. Un des objectifs principaux de ce cours est la bonne compréhension de tels modèles et la définition d'un algorithme permettant d'en inférer les paramètres. Nous utiliserons également la représentation de ces modèles selon le formalisme des modèles graphiques qui permettent de comprendre la structure de dépendance entre les différentes variables (observés ou latentes) et de d'anticiper la complexité de l'algorithme d'inférence. Cette représentation est par ailleurs pertinente pour traiter le problème de l'inférence de réseaux écologiques, dans lequel il s'agit notamment de distinguer entre interactions directes ou indirectes entre les espèces. Certains des modèles présentés seront mis en oeuvre lors de séances de travaux dirigés sur machine. Ce cours vise notamment à apprendre à définir un modèle pertinent pour répondre à une question écologique, concevoir un algorithme permettant d'en estimer les paramètres et implémenter cet algorithme.

Prérequis : Notions fondamentales de probabilités et statistique, connaissance de R

Thèmes abordés :

- Modèles à variables latentes
- Modèles graphiques
- Modèles de distribution d'espèces
- Modèles de réseaux écologiques

Ressources : [Moodle](#)

Modélisation et statistique bayésienne computationnelle

Responsable : [Nicolas Bousquet](#)

Objectif : Présenter d'une part les principales méthodologies de modélisation bayésienne appliquées à des problèmes d'aide à la décision en univers risqué sur des variables scalaires et fonctionnelles, et d'autre part des méthodes avancées de calcul inférentiel permettant l'enrichissement de l'information utile, en fonction de l'emploi et de la nature des modèles.

Prérequis : Notions fondamentales de probabilités et statistique, introduction aux statistiques bayésiennes, méthodes de Monte-Carlo, calcul scientifique en R

Thèmes abordés :

- Formalisation et résolution de problèmes d'aide à la décision en univers risqué, représentation probabiliste des incertitudes (Cox-Jaynes, de Finetti)
- Maximum d'entropie, familles exponentielles, modélisation par données virtuelles
- Règles d'invariance, de compatibilité et de cohérence pour les modèles bayésiens
- Algorithmes de Gibbs via OpenBUGS, MCMC adaptatives, introduction aux chaînes de Markov cachées, méthodes de filtrage et approches « likelihood-free » (ABC)
- Modélisation bayésienne fonctionnelle, processus gaussiens, calibration par expériences numériques, critères d'enrichissement bayésiens

Ressources : [Moodle](#)

Optimisation stochastique, apprentissage PAC-Bayésien et inférence variationnelle

Responsables : [Antoine Godichon-Baggioni](#) et [Badr-Eddine Chérif-Abdellatif](#)

Objectif : Présenter et analyser de méthodes stochastiques pour l'optimisation numérique ; donner un aperçu de la théorie PAC-Bayésienne, en partant de la théorie de l'apprentissage statistique (bornes de généralisation et inégalités oracles) et en couvrant les développements

algorithmiques par inférence variationnelle, jusqu'aux analyses PAC-Bayésiennes récentes des propriétés de généralisation des réseaux de neurones profonds

Prérequis : Notions fondamentales de probabilités et statistique, notions d'optimisation convexe, logiciel R ou Python

Thèmes abordés :

- Théorèmes de convergence pour les Martingales
- Algorithmes de gradient stochastiques et applications
- Généralisation en apprentissage statistique
- Théorie PAC-Bayésienne
- Inférence variationnelle
- Bornes de généralisation en apprentissage profond

Ressources : [Moodle](#)

Optimisation stochastique pour le Machine Learning en finance

Responsable : [Gilles Pagès](#)

Objectif : Ce cours présente les principes mathématiques d'analyse des algorithmes de gradient ou de pseudo-gradient stochastiques en apprentissage supervisé ou non supervisé

Prérequis : Notions fondamentales de probabilités à temps fixe et à temps discrets (martingales, chaîne de Markov)

Thèmes abordés :

- Introduction à l'optimisation, algorithme de Newton-Raphson, descente de gradient
- Simulation versus data : un changement de paradigme
- Genèse d'un algorithme stochastique : pourquoi et comment. Descente de Gradient stochastique (SGD)
- Théorèmes de convergence : lemme de Robbins-Siegmund et application à la convergence p.s.
- Autres modes de convergence, vitesse : principe de moyennisation de Ruppert & Pòliak
- Application aux réseaux de neurones : rétro-propagation du gradient, approximation universelle
- Apprentissage non supervisé : des k-means à la quantification optimale
- Algorithme de Langevin Monte Carlo
- Accélération d'une descente de gradient : SAGA, etc

Ressources : [Moodle](#)

Processus ponctuels

Responsable : [Céline Duval](#)

Objectif : Les processus ponctuels et processus à sauts interviennent dans la modélisation de nombreuses applications (neurosciences, sismologie, télécommunications, ...). L'objectif de ce cours est tout d'abord d'introduire différentes familles de processus, d'étudier leurs spécificités et de voir comment les simuler. Ensuite, à partir d'observations discrètes des procédures d'estimations adaptées seront étudiées.

Prérequis : Notions fondamentales de Probabilités et Statistique et algèbre. Connaissance basique de Python.

Thèmes abordés :

- Processus de Poisson, processus de Lévy, processus de Hawkes
- Discrétisation (haute fréquence et basse fréquence)

— Estimation et bornes de risque

Ressources : [Moodle](#)

Programmation parallèle à grande échelle sur GPU pour les grandes masses de données

Responsable : [Lokman Abbas Turki](#)

Objectif : Ce cours introduit la programmation CUDA et présente des éléments d'optimisation mémoire et algorithmique pour le calcul massivement parallèle sur cartes graphiques

Prérequis : Notions fondamentales de probabilités et programmation C

Thèmes abordés :

- Le streaming multiprocessor et son interprétation en termes de blocks et de threads
- L'utilisation de la mémoire globale, shared, registres et constante pour une simulation Monte Carlo
- Locked, mapped memory & concurrency
- Batch computing et applications : tri fusion, algèbre linéaire, EDP
- Utilisation GPU pour un problème de deep learning

Ressources : [Moodle](#)

Réseaux de neurones et approximation numérique adaptative

Responsable : [Bruno Després](#)

Objectif : Ce cours présente comment utiliser les réseaux de neurones pour l'approximation numérique adaptative

Prérequis : Quelques notions d'analyse et un intérêt pour la programmation

Thèmes abordés :

- Fonctions représentables par des réseaux de neurones
- Preuves élémentaires du théorème de Cybenko. La fonction de Takagi
- Construction de datasets et malédiction de la dimension
- Interprétation des algorithmes de gradients stochastiques sous la forme d'équations différentielles ordinaires
- Applications à des problèmes issus du calcul scientifique pour la CFD en lien avec la classification d'images
- Illustration avec quelques logiciels

Ressources : [Moodle](#)

Séries temporelles

Responsable : [Frédéric Guilloux](#)

Objectif : Initiation aux modèles mathématiques de séries temporelles, visant à étudier des données dont la structure est déterminée par les corrélations au cours du temps. Sans chercher à multiplier les concepts et les modèles, ni viser à la maîtrise de l'ensemble des méthodes utilisées en pratiques, l'ambition sera d'acquérir une bonne connaissance des idées mathématiques à la base de ces modèles, en mêlant l'intuition à la rigueur mathématique.

Prérequis : Notions fondamentales de probabilités, statistique et algèbre linéaire, connaissance basique de R ou Python

Thèmes abordés :

- Les données temporelles et leur modélisation
- Structure de corrélation entre les variables, stationnarité et conséquences
- Préviation linéaire
- Modèles ARMA
- Compléments : Analyse spectrale, tests, séries multidimensionnelles, modèles à espaces d'état

Ressources : [Moodle](#)

Statistique bayésienne non-paramétrique

Responsable : [Ismaël Castillo](#)

Objectif : Expliquer l'approche bayésienne non-paramétrique. Le paramètre d'intérêt est de dimension infinie et on étudie la loi a posteriori bayésienne correspondante sous l'angle de la convergence.

Prérequis : Notions fondamentales de probabilités et statistique

Thèmes abordés :

- Loi a priori, loi a posteriori. Cadre général d'obtention de vitesses de convergence
- Processus gaussiens, adaptation à la régularité
- Deep Bayes : réseaux de neurones, processus gaussiens profonds et adaptation à des structures cachées
- Approximations variationnelles de lois a posteriori

Ressources : [Moodle](#)

Théorie et Analyse des Valeurs Extrêmes

Responsable : [Olivier Wintenberger](#)

Objectif : Ce cours est structuré en deux parties complémentaires. La première partie aborde la théorie des probabilités appliquée à l'étude des valeurs extrêmes. La seconde partie se concentre sur l'analyse statistique des valeurs extrêmes et les techniques d'extrapolation. Une attention particulière sera portée à l'analyse des risques pour des données multivariées.

Prérequis : Connaissances solides en probabilités et statistique, expérience en programmation (Python ou R)

Thèmes abordés :

- Lois max-stables (et lois alpha-stables).
- Domaines d'attraction
- Variations régulières
- Processus ponctuels des excès
- Processus de Poisson
- Loi des extrêmes généralisée
- Loi de Pareto généralisée
- Estimateur de Hill
- Méthode d'extrapolation de Weissman
- Standardisation des marges
- Apprentissage automatique de seuils
- Extremogramme

Ressources : [Moodle](#)

7.5.6 Second semestre (stage)

Le stage, encourageant au maximum l'interdisciplinarité, peut commencer dès la fin des cours, c'est-à-dire à partir du mois d'avril, et a une durée de 6 mois. L'évaluation est réalisée sur la base d'un rapport et d'une soutenance.

7.6 Responsables et site

Responsables : Gérard Biau, Patrick Gallinari, Sylvain Le Corff, Étienne Roquain et Maxime Sangnier

Secrétariat : Laurence Dreyfuss (Tél : 01 44 27 85 45)

Adresse :

Sorbonne Université
Campus Pierre et Marie Curie
Tour 15-25, premier étage, bureau 109
Case courrier 202
4 place Jussieu
75005 Paris

Site : <http://ms2a.lpsm.paris/>

Chapitre 8

Master 2, Parcours Agrégation de Mathématiques

8.1 Objectifs

La préparation à l'agrégation de mathématiques a un triple objectif :

- consolider les connaissances acquises par les étudiants jusqu'en M1, en couvrant un large spectre des mathématiques ;
- préparer les étudiants à passer dans les conditions les plus favorables le concours de l'agrégation externe de mathématiques ;
- former au métier d'enseignant, tant en lycée qu'en classes préparatoires.

Il s'agit d'une formation diplômante ; en particulier, tous les étudiants doivent faire une inscription en Master 2. Ceux qui ne sont pas déjà titulaires d'un M2 ou d'une équivalence en arrivant dans la formation, devront valider leur Master au moment des épreuves d'admissibilité pour avoir une chance de réussir le concours. Le jury délibérera donc suffisamment tôt pour délivrer aux lauréats le Master de sciences et technologies, Mention Mathématiques et Applications, parcours Agrégation de Mathématiques, et ce avant la publication de la liste d'admissibilité à l'agrégation.

8.2 Débouchés professionnels

Insertion professionnelle

Enseignement des mathématiques dans les lycées, classes préparatoires, premières années de l'enseignement supérieur (postes de PRAG).

Poursuite d'études

M2 Recherche et Doctorat : carrière de chercheur dans des entreprises ou de grands organismes de recherche, carrière universitaire d'enseignant-chercheur.

Chaque année, une centaine d'agrégés en mathématiques obtiennent un report pour poursuite d'études. Environ 75 % des enseignants en Classes Préparatoires sont docteurs en mathématiques.

8.3 Organisation

La préparation à l'agrégation de mathématiques se déroule en un an, en deuxième année du Master de Mathématiques. Elle comprend :

- une solide préparation aux épreuves d'écrit, couvrant l'essentiel du programme d'algèbre, de géométrie, d'analyse et de probabilités du concours ; ces cours sont complétés par des travaux dirigés et par des interrogations individuelles (colles) permettant de s'assurer que les notions essentielles ont été bien assimilées ;
- une préparation à l'oral, consistant d'une part en des cours ou leçons présentées par les enseignants, d'autre part en des leçons confiées aux étudiants, mais qui sont préparées en concertation avec les enseignants pour en améliorer la qualité ;
- une préparation aux options Probabilités et Statistiques (option A), Calcul Scientifique (option B), Algèbre et Calcul formel (option C), incluant des travaux pratiques sur ordinateur et des présentations de texte confiées aux étudiants.
- l'organisation régulière d'épreuves écrites (concours blancs) et d'oraux blancs, permettant aux étudiants de se confronter aux conditions réelles du concours.

8.4 Publics visés, prérequis

La sélection des candidats admis à la préparation à l'agrégation se fait sur dossier. Une formation solide en mathématiques, du niveau de la première année de Master de mathématiques de Sorbonne Université ou d'un Capes de mathématiques est exigée.

Nous accueillons également des étudiants avec un profil plus atypique, que ce soit des Docteurs, des ingénieurs issus des grandes écoles, ou simplement des personnes qui souhaitent se reconvertir dans l'enseignement après une première expérience dans un autre domaine d'activité. Ces personnes doivent constituer un dossier nous permettant d'évaluer leurs capacités à suivre la formation.

Nous conseillons fortement la lecture du **rapport** du jury de l'agrégation externe pour connaître les attentes du concours.

Choix des UE de Master 1

Le choix des Unités d'Enseignement en Master 1 dépend du projet de l'étudiant, suivant qu'il envisage ou non la poursuite d'études après l'année de préparation du concours.

Il convient de suivre d'une part ses goûts et d'autre part d'éviter d'avoir des lacunes importantes dans un domaine particulier. Les étudiants ne doivent donc délaissier ni l'algèbre, ni la géométrie, ni l'analyse, ni les probabilités. Nous indiquons dans la liste des UE de Master 1, celles qui nous semblent particulièrement pertinentes.

Stage intensif et travail de préparation pendant l'été

Nous conseillons fortement aux étudiants, encore plus particulièrement aux personnes en reprise d'études, de consacrer une partie de leur été à réviser et à consolider leurs bases. Le rythme de la formation est extrêmement soutenu, il est donc indispensable que les étudiants aient dès la rentrée une très bonne connaissance des contenus mathématiques de niveau L1/L2. Des connaissances de niveau plus élevé seront évidemment appréciées, mais c'est avant tout une grande maîtrise des bases qui est indispensable : on conseille d'ailleurs la lecture du début du **rapport** du jury pour étayer ce point.

Afin de guider les étudiants, nous organisons avec le service de la formation continue de Sorbonne université un stage intensif en juillet précédant l'année de préparation. Il s'agit de revoir les notions essentielles de L1-L2 de mathématiques qui ne seront pas reprises pendant l'année de préparation et de fournir des références bibliographiques permettant de combler les éventuelles lacunes pendant l'été.

Ce stage est facultatif et ne constitue en aucun cas un préalable à l'admission à la préparation à l'agrégation à Sorbonne Université. Il est ouvert également aux étudiants extérieurs à Sorbonne Université. Ce stage est en général suivi par environ 40 participants.

Renseignements et inscription ici : <http://agreg.math.upmc.fr/reprise.html>.

Concours spécial docteur

Depuis la session 2017 a été mis en place un concours docteur (appelé Agrégation externe spéciale) réservé aux détenteurs d'un doctorat (pas nécessairement en mathématiques), et avec un aménagement des épreuves, voir par exemple le [rapport 2024 de cette agrégation](#). Nous accueillons volontiers les étudiants visant ce concours.

8.5 Liste et description des UE du parcours

INTITULÉ	SEM.	CODE	VOL.	ECTS
Préparation à l'écrit de Mathématiques Générales	1	5ME01	160h	15
Préparation à l'écrit d'Analyse et Probabilités	1	5ME02	160h	15
Préparation à l'oral I	2	5ME03	120h	9
Préparation à l'oral II	2	5ME04	120h	9
Préparation à l'oral d'option A, B, C	2	5ME05	120-140h	12
TOTAL			~690h	60

Les cours sont destinés à tous les étudiants, qu'ils soient dispensés ou non de la validation du M2. Ils couvrent la totalité du programme.

Les cours représentent à peu près 690 heures par an. Dix concours blancs, des oraux blancs et des colles sont organisés. L'emploi du temps se trouve ici : <http://agreg.math.upmc.fr/calendrier.html>. La formation n'est pas adaptée aux personnes ayant un emploi à côté.

8.6 Déroulement du concours

Les épreuves écrites d'admissibilité se déroulent généralement vers fin février/début mars et les épreuves orales d'admission entre la fin du mois de juin et le début du mois de juillet.

Les candidats intéressés sont invités à prendre connaissance des [rapports](#) du jury de l'agrégation de Mathématiques, qui décrivent parfaitement les modalités du concours.

Le programme actualisé de l'agrégation de Mathématiques est disponible sur le site de l'[Agrégation de Mathématiques](#).

Données

Nombre de places au concours, nombre de postes attribués, nombre d'étudiants de Sorbonne université admissibles, nombre de candidats de Sorbonne université admis. Les chiffres (+) indiquent les résultats pour le concours réservé aux candidats possédant un doctorat.

	Places	Postes	Admissibles	Admis
2014-2015	457	274	40	25
2015-2016	467	304	46	28
2016-2017	459(+15)	305(+10)	43	25
2017-2018	381(+16)	315(+10)	40(+2)	22
2018-2019	391(+16)	308(+11)	50(+1)	21(+1)
2019-2020	387(+16)	325(+7)	-	31
2020-2021	382(+16)	327(+13)	45	31(+1)
2021-2022	364(+16)	338(+9)	41	33
2022-2023	385(+15)	345(+10)	43	30(+1)
2023-2024	365(+15)	315(+6)	39	24(+1)
2024-2025	345(+10)	-	-	-

8.7 Responsables et site

Responsable du parcours Préparation à l'agrégation :

Cyril Demarche (cyril.demarche@imj-prg.fr)

Secrétariat, Couloir 14-15, bureau 202 - Tél : 01 44 27 53 38

Nicole Abrahamian (nicole.abrahamian@sorbonne-universite.fr)

Site de la préparation à l'agrégation : <http://agreg.math.upmc.fr/>

Chapitre 9

Parcours Sciences des données (SCDA et SCDI)

9.1 Objectifs et description

Initié en 2021, le parcours Science des données de Sorbonne Université constitue un ensemble de cours sélectionnés au sein de la Licence de Mathématiques et du Master de Mathématiques de Sorbonne Université. Il vise à répondre aux objectifs nationaux de formation en sciences du numérique et plus particulièrement en intelligence artificielle. Porté par plusieurs composantes de l’UFR de Mathématiques (929), ce parcours offre une formation de pointe en science des données pour répondre aux problématiques économiques et académiques de demain. Le parcours Science des données s’étend de la L1 au M2 et peut être rejoint à chaque niveau.

Au niveau M1, le parcours Science des données se divise entre le parcours Science des données Avancées (SCDA), constitué d’un ensemble de cours choisis parmi ceux ouverts aux étudiants du M1 du master Mathématiques et Applications (voir [ce chapitre](#)), et le parcours Science des données pour l’Ingénieur.e (SCDI), qui est aussi la première année de la filière Science des données de l’Institut de Statistique de Sorbonne Université (ISUP) et qui est constitué d’une majeure du M1 du master Mathématiques et Applications (voir [ce chapitre](#)) complétée d’enseignements spécifiques. Ces parcours sont détaillés dans les sections ci-dessous.

Au niveau M2, les parcours associés au parcours Science des données sont le M2 MS2A (voir [ce chapitre](#)) et les quatre majeures du M2 Ingénierie mathématique (incluant la majeure SCDI, voir [ce chapitre](#)).

9.2 Débouchés professionnels

Les étudiant·e·s acquièrent une formation solide en science des données leur permettant d’intégrer directement le monde de l’entreprise ou de poursuivre en doctorat (dans un laboratoire académique, un organisme de recherche ou en milieu industriel).

9.3 Organisation

Les deux dernières années du parcours Science des données (quatre semestres) s’appuyant sur le master de mathématiques, les règles du M1 du master Mathématiques

et Applications (voir [ce chapitre](#)) puis du M2 choisi s'appliquent. En particulier, il est nécessaire de valider 30 ECTS par semestre pour obtenir le diplôme de master.

Les étudiants suivant le parcours SCDI sont en outre des étudiants de l'ISUP et ils préparent donc, en plus du diplôme de master Mathématiques et Applications, le diplôme universitaire (DU) de statisticien de l'ISUP. Le parcours SCDI peut être suivi en formation en alternance au niveau M2. L'année de M1 SCDI prépare ainsi les étudiant·e·s à une formation en alternance en M2.

Au niveau M2, l'acceptation dans un des parcours proposés dans le master Mathématiques et Applications se fait sur dossier. Les étudiants du parcours Science des données ont la garantie d'avoir une place dans au moins l'un des parcours de M2 associés au parcours Science des données, à savoir le M2 **MS2A** (voir [ce chapitre](#)) et les quatre majeures du M2 **Ingénierie mathématique** (voir [ce chapitre](#)). Cependant, les règles spécifiques à l'ISUP s'appliquent au parcours SCDI, qui offre aux étudiants qui le suivent en M1 la garantie de pouvoir poursuivre en M2 Ingénierie mathématique, majeure **SCDI** (anciennement ISup parcours Data Sciences, voir [ce chapitre](#)), qui est la deuxième et dernière année de la **filière Science des données de l'ISUP**.

Les enseignements sont presque intégralement délivrés en français, bien que du matériel de cours en anglais soit disponible au niveau M2.

9.4 M1 Sciences des données avancées (SCDA)

Les étudiant·e·s du parcours SCDA sont des étudiant·e·s du M1 du master Mathématiques et Applications (voir [ce chapitre](#)) qui suivent un ensemble d'UE sélectionnées pour leur fournir un bagage mathématique solide et les outils informatiques nécessaires pour la science des données. Les étudiants de ce parcours peuvent rejoindre le parcours général du M1.

Ce parcours à la coloration théorique prépare particulièrement au M2 parcours MS2A (voir [ce chapitre](#)). Il ouvre aussi la possibilité de rejoindre au niveau M2 l'une des majeures du M2 Ingénierie mathématique (voir [ce chapitre](#)).

9.4.1 Publics visés, prérequis

Les étudiant·e·s ayant validé la troisième année (niveau L3) du parcours Science des données de la licence de mathématiques de Sorbonne Université ou une licence en mathématiques, après examen d'un dossier de candidature soumis dans tous les cas via la plateforme *Mon Master*.

La commission sera particulièrement attentive aux acquis antérieurs portant sur l'aléatoire, l'analyse et l'informatique.

9.4.2 Liste des UE

Les deux premiers semestres du parcours SCDA (niveau Master) s'appuient sur la première année du Master à travers un ensemble de cours fléchés en probabilités, statistique, analyse et informatique.

Semestre 1

- 4MA311 Probabilités approfondies (9 ECTS) ;
- 4MA315 Statistique (9 ECTS) ;

- 4MA305 Bases d'analyse fonctionnelle (9 ECTS) ;
- 4LVAN1 Anglais (3 ECTS).

Semestre 2

- 4MA076 Bases de l'apprentissage statistique (9 ECTS) ou
- 4MA379 Statistique computationnelle et machine learning (9 ECTS) ;
- 4MA266 Optimisation numérique et science des données (6 ECTS) ou
- 4MA257 Analyse convexe (6 ECTS) ou
- 4MA256 Programmation en C++ (6 ECTS) ;
- Deux UE au choix parmi :
 - 4MA245 Travail d'étude et de recherche (TER) (6 ECTS) ou
 - 4MA277 Bases de l'analyse de données (6 ECTS) ou
 - 4MA273 Statistique avancée, grande dimension et données massives (6 ECTS) ;
- 4MAOIP Orientation et Insertion professionnelle (OIP) (3 ECTS).

Se reporter au chapitre du M1 ([ici](#)) pour la description de ces UE.

Pour s'inscrire à l'UE TER, il est nécessaire d'avoir validé le premier semestre d'une part, et d'autre part, toutes les UE mathématiques du premier semestre **sans compensation**.

Pour les **Semestres 3 et 4** (niveau M2) se référer aux chapitres des parcours de M2 correspondant.

9.5 M1 Sciences des données pour l'ingénieur·e (SCDI)

Le niveau M1 du parcours SCDI est composé d'une majeure du M1 du master Mathématiques et Applications (voir [ce chapitre](#)) complétée d'enseignements spécifiques à l'ISUP. Il constitue la première année de la [filière Science des données de l'ISUP](#).

Le débouché naturel de ce parcours en M2 est la majeure SCDI du parcours Ingénierie mathématique (voir [ce chapitre](#)), qui a la particularité d'être ouverte à l'alternance. L'année de M1 prépare donc particulièrement à cette dernière année en alternance.

Ce parcours M1-M2 est orienté vers les applications : en parallèle des aspects mathématiques de la science des données, l'accent est mis sur la manipulation des données et la mise en œuvre des algorithmes.

Les étudiants de ce parcours préparent à la fois le diplôme de master Mathématiques et Applications de Sorbonne Université et le DU de statisticien de l'ISUP. Ils ont donc à procéder à deux inscriptions, au master de mathématiques et à l'ISUP. Chaque semestre comporte 36 ECTS qui doivent être validés en vue de l'obtention des deux diplômes.

9.5.1 Publics visés, prérequis

Le M1 SCDI est la première année de la filière dédiée à la science des données à l'ISUP et constitue donc l'une des deux options ouvertes aux étudiant·e·s en deuxième année à l'ISUP. Ce M1 est également ouvert aux étudiant·e·s ayant validé la troisième année (niveau L3) du parcours Science des données de la licence de mathématiques de Sorbonne Université ou une licence en mathématiques après examen d'un dossier de candidature soumis dans tous les cas via la plateforme *Mon Master*.

La commission sera particulièrement attentive aux acquis antérieurs portant sur l'aléatoire, l'analyse et l'informatique.

9.5.2 Liste des UE

Les deux premiers semestres du parcours SCDI (niveau master) s'appuient sur la première année du master Mathématiques et Applications à travers un ensemble de cours fléchés en probabilités, statistique, analyse et informatique auxquels s'ajoutent des enseignements spécifiques à l'ISUP, indiqués ci-dessous par le symbole *.

Chaque semestre comporte 36 ECTS qui doivent être validés en vue de l'obtention des deux diplômes.

Semestre 1

- 4MA311 Probabilités approfondies (9 ECTS)
- 4MA315 Statistique (9 ECTS)
- 4ACT13 [Risque statistique et échantillonnage](#) (6 ECTS) *
- 4ACOIP [Orientation et Insertion professionnelle ISUP \(OIP ISUP\)](#) (3 ECTS) *
- 4LVAN1 [Anglais ISUP](#) (3 ECTS) *
- 4ACT12 [Python ISUP](#) (6 ECTS) *.

Semestre 2

- 4MA376 Bases de l'apprentissage statistique (9 ECTS)
- 4MA266 Optimisation numérique et science des données (6 ECTS)
- 4MA277 Bases de l'analyse de données (6 ECTS)
- 4ACT14 [Fondements mathématiques pour les sciences des données](#) (3 ECTS) *
- 4ACT10 [Stage ISUP](#) (3 ECTS) *
- 4LVAN2 [Anglais ISUP](#) (3 ECTS) *
- 4ACT11 [Séries temporelles ISUP](#) (6 ECTS) *.

Se reporter au chapitre du M1 ([ici](#)) pour la description des UE dont le code est de la forme 4MAXXX.

Le stage obligatoire, d'une durée de deux mois minimum à plein temps, doit avoir lieu au cours des mois de juin, juillet et août.

9.5.3 Annexe : description des UE spécifiques à l'ISUP

4ACOIP Orientation et Insertion professionnelle - OIP (3 ECTS)

Responsable : [Nathalie Obert-Ben Taïeb](#)

L'UE se place dans le contexte de la réalité du métier de Data Scientist ou du chargé d'études statistiques et des attentes des professionnels du secteur industriel, ou de tout secteur, privé comme public traitant des données massives. Lors de cette UE seront abordés :

- La définition du (ou des) projet(s) professionnel(s) afin de mieux rédiger son CV et une lettre de motivation plus percutante.
- La mise en place de son réseau, l'utilisation de LinkedIn, et la meilleure façon de tenir à jour ses candidatures. Quelques conseils utiles sur l'utilisation de l'IA Générative au profit de sa recherche d'entreprise.
- Les différentes formes d'entretien et les meilleures conditions pour s'y préparer.

4LVAN1 et 4VLAN2 Anglais (2 × 3 ECTS)

Responsable : [Nadezda Kymlickova](#)

En M1, l'étudiant doit atteindre le niveau B2 du Cadre Européen Commun de Référence pour les Langues (CECRL) dans toutes les compétences (compréhension et production orales et écrites). L'accent est mis sur les compétences de compréhension écrite et orale qui seront évaluées au Toeic en M2. Les documents étudiés couvrent des thèmes scientifiques, économiques, la vie en entreprise et le monde du travail en général. Chaque étudiant doit faire une présentation orale de 10 à 15 minutes sur un thème scientifique et diriger le débat qui s'ensuit. Les cours de langues sont dispensés en petits groupes de niveau, ce qui permet d'encourager la participation de tous et d'adapter le contenu du cours au niveau du groupe. L'enseignement se fait en deux semestres de 30 heures. L'évaluation se fait en contrôle continu, avec deux épreuves communes à tous les groupes chaque semestre.

4ACT12 Python (6 ECTS)

Responsable : Etienne Guével

Ce cours vise à former à l'usage de Python3 en partant de ses différentes installations possibles, et ayant comme objectif la création de sa propre bibliothèque de code. Les éléments fondamentaux de Python (types, objets, structures de codes, scripts) ainsi que les pièges communs seront abordés. Le cours développe ensuite les possibilités offertes par quelques bibliothèques pour les sciences numériques : numpy, pandas, matplotlib, etc. La partie pratique vise à mettre en situation les mécanismes décrits en cours et invite à explorer les concepts et ces bibliothèques, à travers leurs documentations, afin d'en préciser l'emploi en situation.

4ACT11 Séries temporelles (6 ECTS)

Responsable : Céline Duval

L'objectif du cours est d'introduire des méthodes statistiques pour le traitement de données temporelles. Les propriétés au second ordre d'une série temporelle (stationnarité, tendance et saisonnalité, fonction d'autocovariance) seront étudiées. Différents modèles paramétriques (AR, MA, ARMA, GARCH) seront introduits, estimés et utilisés pour faire de la prévision.

4ACT13 Risque statistique et échantillonnage (6 ECTS)

L'objectif du cours est de fournir un complément autour de la notion de risque en apprentissage et en particulier du risque de prévision et la problématique de sur-apprentissage. Certaines méthodes de (sous) échantillonnage seront présentées. Associées à l'estimation du risque par validation croisée ou bootstrap, ces techniques permettent de valider ou sélectionner des modèles et de choisir des hyperparamètres ou des covariables. Des exemples de méthodes d'évaluation comme la courbe ROC et le score associé de l'aire sous la courbe, ainsi que les diagrammes de Shapley seront mis en pratique sur données réelles.

4ACT14 Fondements mathématiques pour les sciences des données (6 ECTS)

Ce cours vise à décrire quelques fondements mathématiques en science des données. La première partie du cours est centrée sur l'optimisation convexe, qui sous-tend de nombreuses tâches en science des données. L'hypothèse de convexité offre une structure permettant de caractériser leurs solutions. La deuxième partie du cours utilise ces résultats pour étudier des problèmes statistiques (classification et régression). Enfin, si le temps le permet, nous examinerons également des inégalités de concentration et la manière dont elles sont utilisées pour fournir des garanties théoriques pour ces problèmes.

9.6 Responsables et sites

Responsables niveau M1 : Jean-Patrick Baudry et Céline Duval.

Secrétariat :

- SCDA : Mathilde Besnard
Campus Jussieu, couloir 15-14, 2e étage, bureau 205, tél. 01 44 27 37 56
mathilde.besnard@sorbonne-universite.fr
- SCDI : Céline Chaussoy
Campus Jussieu, couloir 14-24, 3e étage, bureau 312, tél. 01 44 27 33 52
celine.chaussoy@sorbonne-universite.fr

Sites utiles :

- [Master mathématiques et applications](#)
- [M1 SCDA](#)
- [La filière SCDI de l'ISUP](#)

Concernant le niveau M2, voir les chapitres correspondant dans cette brochure, notamment pour le MS2A ([lien](#)) et les quatre majeures du M2 Ingénierie mathématique ([lien](#)).

Chapitre 10

Mobilité internationale

10.1 Objectifs et descriptions

Les débouchés professionnels sont accrus pour les étudiants se présentant avec une première expérience internationale durant leur cursus universitaire. Les entreprises ont souvent des contacts internationaux et cherchent à bénéficier de l'expérience internationale des étudiants qu'elles prévoient d'employer. Par ailleurs, dans l'éducation nationale, enseigner en classe européenne est une tâche gratifiante et enrichissante. Quant à la recherche en mathématiques, elle s'appuie sur des collaborations internationales depuis fort longtemps. Pour les étudiants de Master il s'agit aussi d'enrichir leur cursus d'une expérience culturelle différente, de découvrir d'autres systèmes d'enseignement, d'autres visions des mathématiques ou bien d'autres sujets.

Le système LMD, grâce à l'introduction des ECTS et des semestres, a permis de structurer les échanges internationaux qui sont maintenant simples à organiser et s'appuient sur un offre variée. Sorbonne Université a par ailleurs mis en place une politique volontariste pour conseiller et accompagner les étudiants dans leur démarche de mobilité (<https://sciences.sorbonne-universite.fr/formation-sciences/international>). Ce site est le premier à consulter pour organiser sa mobilité.

10.2 Quelques conseils supplémentaires

a) Les expériences passées ont montré en général que **les années du cursus les plus propices à une mobilité internationale en mathématique sont la L3 ou la M1** (ou, naturellement, le processus à long terme de préparation d'une thèse mais ce cas n'est pas considéré ici). Autrement dit, il est plutôt déconseillé d'envisager de partir pour l'année de M2, sauf raisons très spécifiques à discuter avec le coordinateur (adresse mail plus bas). **En outre, pour des mobilités en M1 d'un semestre, il est plus facile de trouver des équivalents pour le premier semestre de l'année académique et donc il est plutôt conseillé de choisir le premier semestre (ce qui veut dire que le dossier doit être déposé au milieu du deuxième semestre de L3).**

b) Les universités ont des pages d'information de qualité et de complétude extrêmement variables concernant l'accueil des étudiants internationaux. Du coup il est vraiment conseillé de s'y prendre bien à l'avance pour explorer les offres, et de ne pas multiplier démesurément les éventualités. Concentrez vous sur deux ou trois lieux à comparer.

c) Dans le système de mobilité internationale (hors double diplôme), vous passez les

examens dans l'université d'accueil mais c'est Sorbonne Université qui vous délivrera le diplôme. De ce fait, le rôle du Coordinateur International sera de valider un *Learning Agreement* qui fasse le poids par rapport aux cours que vous auriez dû suivre à Sorbonne Université : attendez-vous à une réelle exigence sur ce point et c'est aussi une raison pour laquelle il ne faut pas s'y prendre au dernier moment, surtout si un entretien avec le coordinateur international s'avère nécessaire.

d) D'une façon générale, essayez de composer un *Learning Agreement* qui suive les conseils qui vous sont donnés par les universités d'accueil. Même si celles-ci font de gros efforts pour accueillir les étudiants internationaux (à l'instar de ce que Sorbonne Université fait pour sa part), il est clair qu'elles ne sont pas en mesure de faire du *à la carte* complet. Soyez donc souples dans vos demandes. Le coordinateur international ne vous demandera pas une concordance *parfaite* entre le programme que vous suivrez à l'étranger et celui que vous suivriez potentiellement à SU : il faut juste garder une cohérence globale et s'assurer que les niveaux d'étude sont à peu près identiques. **Soyez en particulier vigilants à une composition du L.A. qui soit compatible avec les choix que vous envisagez pour le M2.**

e) Bien entendu, l'ouverture au monde entier est une éventualité tout à fait positive. Prenez cependant note que les échanges Erasmus sont administrativement particulièrement bien coordonnés et en général plus simples à mettre en place. Donc si vous hésitez entre deux destinations, privilégiez plutôt celle qui rentre dans le cadre européen. Ce n'est qu'une suggestion et n'ayez aucune hésitation à demander une destination qui vous attire depuis longtemps.

10.3 Les programmes Erasmus

Sorbonne Université dispose d'un réseau très dense d'accords Erasmus qui couvre la plupart des pays d'Europe. Les échanges sont particulièrement actifs avec l'Allemagne (Bonn, Berlin, Munich...), l'Espagne, la Grande-Bretagne, l'Italie. Cette liste n'est pas limitative. N'hésitez pas à explorer des pays où vous avez envie de séjourner en fonction de vos motivations et de votre programme d'étude, et à en parler avec le coordinateur pédagogique [Laurent Mazliak](#). Pour en savoir plus consulter

<https://sorbonne.adv-pub.moveonfr.com/home-page-1600/>

10.4 Les doubles diplômes

10.4.1 Politecnico di Milano

Le Master propose un cursus de double diplôme avec l'école d'ingénieurs "Politecnico di Milano" (PoliMi), à l'issue duquel les étudiants obtiennent les diplômes des deux établissements. Les étudiants admis suivent pendant la première année le programme de "Mathematical Engineering, study plan Laureat Magistrale -MSc-orientation in Computational Science and Engineering" à Milan. Ils continuent leurs études en seconde année à Paris au sein de Sorbonne Université. Comme la première année s'effectue en M1 à Milan, les étudiants retenus sont sélectionnés avant la fin juin, pour permettre leur inscription au PoliMI.

10.5 Responsables et sites

- Responsable pédagogique de la mobilité : laurent.mazliak@sorbonne-universite.fr
- *PoliMi* Accord spécifique avec le Politecnico di Milano
Responsable : antoine.gloria@sorbonne-universite.fr

Chapitre 11

Renseignements administratifs

11.1 Scolarité

Responsable administrative du master	Sandra MURCIA Tour 14-15 2ème étage bureau 209	sandra.murcia@sorbonne-universite.fr
Scolarité administrative du master M1 et M2	Amina HAMADI tour 14-15, 2ème étage bureau 203	amina.hamadi@sorbonne-universite.fr
Gestion pédagogique M1	Mathilde BESNARD tour 14-15, 2ème étage bureau 205	mathilde.besnard@sorbonne-universite.fr
Gestion pédagogique M1 & EAD	Bruno DEHAINAULT tour 14-15, 2ème étage bureau 210	bruno.dehainault@sorbonne-universite.fr
M2 Parcours – Mathématiques fondamentales – MS2A	Laurence DREYFUSS tour 15-25, 1er étage bureau 109	laurence.dreyfuss@sorbonne-universite.fr
M2 Parcours – Mathématiques de la modélisation – Ingénierie mathématique	Francelise HARDOYAL tour 14-15, 2ème étage bureau 206	francelise.hardoyal@sorbonne-universite.fr
M2 Parcours – Probabilités et modèles aléatoires – Probabilités et finance – Agrégation	Yann PONCIN tour 14-15, 2ème étage bureau 208	yann.poncin@sorbonne-universite.fr

11.2 Inscriptions

Les étudiants seront amenés à effectuer deux types différents d’inscriptions, qui se font en deux étapes *distinctes* et *successives*. Elles sont *toutes les deux obligatoires* pour pouvoir se présenter aux examens.

- **L’inscription administrative** : L’inscription administrative se fait auprès de la scolarité administrative du Master. Elle permet la délivrance de la carte d’étudiant par la Scolarité centrale.
- **L’inscription pédagogique** : Il s’agit du choix du parcours et des unités d’enseignements (UE). Elle se fait auprès des secrétariats pédagogiques de la mention

et des différentes spécialités. Elle conditionne l'inscription aux examens. Chaque étudiant devra choisir 2 contrats dans l'année, 1 par semestre d'examens. Pour chaque Unité d'Enseignement, il est organisé 2 sessions d'examen. Pour l'inscription aux UE du 1er semestre, se munir de la carte d'étudiant et d'une photo.

11.3 Calendrier du master

Le document figurant sur la page suivante est le calendrier de l'année universitaire en cours. Il est susceptible d'évolution et sa dernière version à jour sera disponible sur le site du M1.

