

# Classe préparatoire PC

## Projet de programme de mathématiques

### Table des matières

<b>Objectifs de formation</b>	<b>2</b>
Description et prise en compte des compétences . . . . .	2
Unité de la formation scientifique . . . . .	3
Architecture et contenu du programme . . . . .	4
Organisation du texte . . . . .	4
Usage de la liberté pédagogique . . . . .	5
<b>Programme</b>	<b>6</b>
Algèbre linéaire . . . . .	6
A - Espaces vectoriels, endomorphismes et matrices . . . . .	6
B - Réduction des endomorphismes et des matrices carrées . . . . .	7
Espaces euclidiens . . . . .	8
Espaces vectoriels normés de dimension finie . . . . .	9
Suites et séries . . . . .	10
A - Séries numériques . . . . .	10
B - Suites et séries de fonctions . . . . .	11
C - Séries entières . . . . .	12
Fonctions vectorielles, arcs paramétrés . . . . .	14
Intégration . . . . .	14
Probabilités . . . . .	17
A- Espaces probabilisés . . . . .	17
B - Variables aléatoires discrètes . . . . .	19
Calcul différentiel . . . . .	21
Équations différentielles linéaires . . . . .	23

Le programme de mathématiques de PC, dans le prolongement de celui de PCSI, s'inscrit entre deux continuités : en amont avec les programmes rénovés du lycée, en aval avec les enseignements dispensés dans les grandes écoles, et plus généralement les poursuites d'études universitaires. Il est conçu pour amener progressivement tous les étudiants au niveau requis pour poursuivre avec succès un cursus d'ingénieur, de chercheur, d'enseignant, de scientifique, et aussi pour leur permettre de se former tout au long de la vie.

## Objectifs de formation

La formation mathématique en classe préparatoire scientifique vise deux objectifs :

- l'acquisition d'un solide bagage de connaissances et de méthodes permettant notamment de passer de la perception intuitive de certaines notions à leur appropriation, afin de pouvoir les utiliser à un niveau supérieur, en mathématiques et dans les autres disciplines. Ce degré d'appropriation suppose la maîtrise du cours, c'est-à-dire des définitions, énoncés et démonstrations des théorèmes figurant au programme ;
- le développement de compétences utiles aux scientifiques, qu'ils soient ingénieurs, chercheurs ou enseignants, pour identifier les situations auxquelles ils sont confrontés, dégager les meilleures stratégies pour les résoudre, prendre avec un recul suffisant des décisions dans un contexte complexe.

Pour répondre à cette double exigence, et en continuité avec les programmes de mathématiques du lycée, les programmes des classes préparatoires définissent un corpus de connaissances et de capacités, et explicitent six grandes compétences qu'une activité mathématique permet de développer :

- **s'engager dans une recherche, mettre en œuvre des stratégies** : découvrir une problématique, l'analyser, la transformer ou la simplifier, expérimenter sur des exemples, formuler des hypothèses, identifier des particularités ou des analogies ;
- **modéliser** : extraire un problème de son contexte pour le traduire en langage mathématique, comparer un modèle à la réalité, le valider, le critiquer ;
- **représenter** : choisir le cadre (numérique, algébrique, géométrique...) le mieux adapté pour traiter un problème ou représenter un objet mathématique, passer d'un mode de représentation à un autre, changer de registre ;
- **raisonner, argumenter** : effectuer des inférences inductives et déductives, conduire une démonstration, confirmer ou infirmer une conjecture ;
- **calculer, utiliser le langage symbolique** : manipuler des expressions contenant des symboles, organiser les différentes étapes d'un calcul complexe, effectuer un calcul automatisable à la main ou à l'aide d'un instrument (calculatrice, logiciel...), contrôler les résultats ;
- **communiquer à l'écrit et à l'oral** : comprendre les énoncés mathématiques écrits par d'autres, rédiger une solution rigoureuse, présenter et défendre un travail mathématique.

## Description et prise en compte des compétences

### S'engager dans une recherche, mettre en œuvre des stratégies

Cette compétence vise à développer les attitudes de questionnement et de recherche, au travers de réelles activités mathématiques, prenant place au sein ou en dehors de la classe. Les différents temps d'enseignement (cours, travaux dirigés, heures d'interrogation) doivent privilégier la découverte et l'exploitation de problématiques, la réflexion sur les démarches suivies, les hypothèses formulées et les méthodes de résolution. Le professeur ne saurait limiter son enseignement à un cours dogmatique : afin de développer les capacités d'autonomie des étudiants, il doit les amener à se poser eux-mêmes des questions, à prendre en compte une problématique mathématique, à utiliser des outils logiciels, et à s'appuyer sur la recherche et l'exploitation, individuelle ou en équipe, de documents.

Les travaux proposés aux étudiants en dehors des temps d'enseignement doivent combiner la résolution d'exercices d'entraînement relevant de techniques bien répertoriées et l'étude de questions plus complexes. Posées sous forme de problèmes ouverts, elles alimentent un travail de recherche individuel ou collectif, nécessitant la mobilisation d'un large éventail de connaissances et de capacités.

### Modéliser

Le programme présente des notions, méthodes et outils mathématiques permettant de modéliser l'état et l'évolution de systèmes déterministes ou aléatoires issus de la rencontre du réel et du contexte, et éventuellement du traitement qui en a été fait par la mécanique, la physique, la chimie, les sciences de l'ingénieur. Ces interprétations viennent en retour éclairer les concepts fondamentaux de l'analyse, de l'algèbre linéaire, de la géométrie ou des probabilités. La modélisation contribue ainsi de façon essentielle à l'unité de la formation scientifique et valide les approches interdisciplinaires. À cet effet, il importe de promouvoir l'étude de questions mettant en œuvre des interactions entre les différents champs de connaissance scientifique (mathématiques et physique, mathématiques et chimie, mathématiques et sciences industrielles, mathématiques et informatique).

### Représenter

Un objet mathématique se prête en général à des représentations issues de différents cadres ou registres : algébrique, géométrique, graphique, numérique. Élaborer une représentation, changer de cadre, traduire des informations dans plusieurs registres sont des composantes de cette compétence. Ainsi, en analyse, le concept de fonction s'appréhende à travers diverses représentations (graphique, numérique, formelle) ; en algèbre, un problème linéaire se prête à des représentations de nature géométrique, matricielle ou algébrique ; un problème de probabilités peut recourir à un arbre, un tableau, des ensembles. Le recours régulier à des figures ou à des croquis permet de développer une vision géométrique des objets abstraits et favorise de fructueux transferts d'intuition.

### **Raisonnement, argumenter**

La pratique du raisonnement est au cœur de l'activité mathématique. Basé sur l'élaboration de liens déductifs ou inductifs entre différents éléments, le raisonnement mathématique permet de produire une démonstration, qui en est la forme aboutie et communicable. La présentation d'une démonstration par le professeur (ou dans un document) permet aux étudiants de suivre et d'évaluer l'enchaînement des arguments qui la composent ; la pratique de la démonstration leur apprend à créer et à exprimer eux-mêmes de tels arguments. L'intérêt de la construction d'un objet mathématique ou de la démonstration d'un théorème repose sur ce qu'elles apportent à la compréhension même de l'objet ou du théorème : préciser une perception intuitive, analyser la portée des hypothèses, éclairer une situation, exploiter et réinvestir des concepts et des résultats théoriques.

### **Calculer, manipuler des symboles, maîtriser le formalisme mathématique**

Le calcul et la manipulation des symboles sont omniprésents dans les pratiques mathématiques. Ils en sont des composantes essentielles, inséparables des raisonnements qui les guident ou qu'en sens inverse ils outillent.

Mener efficacement un calcul simple fait partie des compétences attendues des étudiants. En revanche, les situations dont la gestion manuelle ne relèverait que de la technicité seront traitées à l'aide d'outils de calcul formel ou numérique. La maîtrise des méthodes de calcul figurant au programme nécessite aussi la connaissance de leur cadre d'application, l'anticipation et le contrôle des résultats qu'elles permettent d'obtenir.

### **Communiquer à l'écrit et à l'oral**

La phase de mise au point d'un raisonnement et de rédaction d'une solution permet de développer les capacités d'expression. La qualité de la rédaction et de la présentation, la clarté et la précision des raisonnements constituent des objectifs très importants. La qualité de structuration des échanges entre le professeur et sa classe, entre le professeur et chacun de ses étudiants, entre les étudiants eux-mêmes, doit également contribuer à développer des capacités de communication (écoute et expression orale) à travers la formulation d'une question, d'une réponse, d'une idée, d'hypothèses, l'argumentation de solutions ou l'exposé de démonstrations. Les travaux individuels ou en petits groupes proposés aux étudiants en dehors du temps d'enseignement, au lycée ou à la maison (interrogations orales, devoirs libres, comptes rendus de travaux dirigés ou d'interrogations orales) contribuent fortement à développer cette compétence. La communication utilise des moyens diversifiés : les étudiants doivent être capables de présenter un travail clair et soigné, à l'écrit ou à l'oral, au tableau ou à l'aide d'un dispositif de projection.

L'intégration des compétences à la formation des étudiants permet à chacun d'eux de gérer ses propres apprentissages de manière responsable en repérant ses points forts et ses points faibles et en suivant leur évolution. Les compétences se recouvrent largement et il importe de les considérer globalement : leur acquisition doit se faire dans le cadre de situations suffisamment riches pour nécessiter la mobilisation de plusieurs d'entre elles.

### **Unité de la formation scientifique**

Il est important de mettre en valeur l'interaction entre les différentes parties du programme, tant au niveau du cours que des thèmes des travaux proposés aux étudiants. À titre d'exemples, la géométrie apparaît comme un champ d'utilisation des concepts développés en algèbre linéaire et euclidienne ; les probabilités utilisent le vocabulaire ensembliste et illustrent certains résultats d'analyse.

Percevoir la globalité et la complexité du monde réel exige le croisement des regards disciplinaires. Ainsi, les mathématiques interagissent avec des champs de connaissances partagés par d'autres disciplines. Aussi le programme valorise-t-il l'interprétation des concepts de l'analyse, de l'algèbre linéaire, de la géométrie et des probabilités en termes de paramètres modélisant l'état et l'évolution de systèmes mécaniques, physiques ou chimiques (mouvement, vitesse et accélération, signaux continus ou discrets, mesure de grandeurs, incertitudes...)

La coopération des enseignants d'une même classe ou d'une même discipline et, plus largement, celle de l'ensemble des enseignants d'un cursus donné, doit contribuer de façon efficace et cohérente à la qualité de ces interactions.

Il importe aussi que le contenu culturel et historique des mathématiques ne soit pas sacrifié au profit de la seule technicité. En particulier, il peut s'avérer pertinent d'analyser l'interaction entre un contexte historique et social donné, une problématique spécifique et la construction, pour la résoudre, d'outils mathématiques.

## Architecture et contenu du programme

L'étude de chaque domaine du programme (analyse, algèbre, probabilités) permet de développer des aptitudes au raisonnement et à la modélisation, et d'établir des liens avec les autres disciplines.

Afin de contribuer au développement des compétences de modélisation et de représentation, le programme préconise le recours à des figures géométriques pour aborder l'algèbre linéaire, les espaces euclidiens, les fonctions d'une ou plusieurs variables réelles, les fonctions vectorielles.

Le programme d'algèbre comprend deux volets. Le premier prolonge l'étude de l'algèbre linéaire abordée en première année et aboutit à la théorie de la réduction dont il développe quelques applications. Le second, consacré à l'algèbre euclidienne, met l'accent sur les relations entre les points de vue vectoriel, matriciel et géométrique, notamment à travers une étude spécifique aux dimensions deux et trois. Le théorème spectral établit un lien entre ces deux volets. Le vocabulaire sur les structures algébriques est introduit au fur et à mesure des besoins.

Le programme d'analyse est introduit par un chapitre de topologie des espaces vectoriels normés. Celui-ci s'attache à développer et illustrer les notions générales dans le cadre de la dimension finie avant d'aborder celui des espaces fonctionnels. L'introduction des normes de la convergence uniforme, en moyenne ou en moyenne quadratique pose le cadre topologique de l'étude des suites et séries de fonctions, qui aboutit aux théorèmes classiques de régularité et d'interversion. Cette étude bénéficie de l'introduction de nouveaux outils relatifs aux séries numériques, permettant de compléter l'approche qui en a été faite en première année.

Le chapitre sur les séries entières permet de construire des fonctions de variable complexe et de fournir un outil pour la résolution d'équations différentielles linéaires.

La généralisation aux fonctions à valeurs dans  $\mathbb{R}^n$  des résultats d'analyse réelle étudiés en première année fournit, avec une étude modeste des arcs paramétrés, une nouvelle occasion de relier les registres analytique et géométrique.

L'étude de l'intégration, entamée en première année dans le cadre des fonctions continues sur un segment, se poursuit dans celui des fonctions continues par morceaux sur un intervalle quelconque. L'intégrale généralisée est un intermédiaire à l'introduction de la notion de fonction intégrable, qui permet d'énoncer les théorèmes classiques sur l'intégration des suites et séries de fonctions et sur les intégrales à paramètre.

Le chapitre relatif au calcul différentiel à plusieurs variables est limité au cas des fonctions numériques de deux ou trois variables réelles. Il fournit des méthodes et des outils opérationnels pour résoudre des problèmes pouvant être issus d'autres disciplines scientifiques (recherche d'extremums, équations aux dérivées partielles). Il comporte un paragraphe présentant les premières notions de géométrie différentielle et favorise ainsi les interprétations et visualisations géométriques.

L'étude des équations et des systèmes différentiels est limitée au cas linéaire, dont les interventions sont fréquentes tant en mathématiques que dans les autres disciplines scientifiques. L'utilisation dans ce cadre du théorème de Cauchy permet d'établir la structure de l'ensemble des solutions, illustrant la pertinence des outils de l'algèbre linéaire pour résoudre des problèmes d'origine analytique. Le cas particulier où les coefficients sont constants permet de mettre en œuvre des techniques de réduction matricielle.

L'enseignement des probabilités présente brièvement le formalisme de Kolmogorov qui sera repris dans le cursus ultérieur des étudiants. Son objectif majeur est l'étude des variables aléatoires discrètes, en prolongement des variables finies étudiées en première année, ce qui permet d'élargir aux processus stochastiques à temps discret le champ des situations réelles se prêtant à une modélisation probabiliste.

La loi faible des grands nombres permet de justifier a posteriori l'approche fréquentiste d'une probabilité pour un schéma de Bernoulli, déjà évoquée dans le cursus antérieur des étudiants. L'inégalité qui la sous-tend précise la vitesse de convergence de cette approximation et valide l'interprétation de la variance comme indicateur de dispersion.

Ce chapitre a vocation à interagir avec le reste du programme.

## Organisation du texte

Les programmes définissent les objectifs de l'enseignement et décrivent les connaissances et les capacités exigibles des étudiants ; ils précisent aussi certains points de terminologie et certaines notations. Ils fixent clairement les limites à respecter tant au niveau de l'enseignement que des épreuves d'évaluation, y compris par les opérateurs de concours. Le programme est décliné en chapitres. Chaque chapitre comporte un bandeau définissant les objectifs essentiels et délimitant le cadre d'étude des notions qui lui sont relatives et un texte présenté en deux colonnes : à gauche figurent les contenus du programme (connaissances et méthodes) ; à droite un commentaire indique les capacités exigibles des étudiants, précise quelques notations ainsi que le sens ou les limites à donner à certaines questions. Dans le cadre de sa liberté pédagogique et dans le respect de la cohérence de la formation globale, le professeur décide de l'organisation de son enseignement et du choix de ses méthodes.

En particulier, l'ordre de présentation des différents chapitres ne doit pas être interprété comme un modèle de progression. Parmi les connaissances (définitions, notations, énoncés, démonstrations, méthodes, algorithmes...) et les capacités de mobilisation de ces connaissances, le texte du programme délimite trois catégories :

- celles qui sont exigibles des étudiants : il s'agit de l'ensemble des points figurant dans la colonne de gauche des différents chapitres ;
- celles qui sont indiquées dans les bandeaux et la colonne de droite comme étant « hors programme ». Elles ne doivent pas être traitées et ne peuvent faire l'objet d'aucune épreuve d'évaluation ;
- celles qui relèvent d'activités possibles ou souhaitables, mais qui ne sont pas exigibles des étudiants. Il s'agit des activités proposées pour illustrer les différentes notions du programme (visualisations à l'aide de l'outil informatique, activités en lien avec les autres disciplines).

Pour les démonstrations des théorèmes dont l'énoncé figure au programme et qui sont repérées dans la colonne de droite par la locution « démonstration non exigible », le professeur est libre d'apprécier, selon le cas, s'il est souhaitable de démontrer en détail le résultat considéré, d'indiquer seulement l'idée de sa démonstration, ou de l'admettre.

Afin de faciliter l'organisation du travail des étudiants et de montrer l'intérêt des notions étudiées, il convient d'en aborder l'enseignement en coordination avec les autres disciplines scientifiques.

Les liens avec les disciplines scientifiques et technologiques sont identifiés par le symbole  $\Leftrightarrow$  PC pour la physique et la chimie et  $\Leftrightarrow$  I pour l'informatique.

### **Usage de la liberté pédagogique**

Dans le cadre de la liberté pédagogique qui lui est reconnue par la loi, le professeur choisit ses méthodes, sa progression, ses problématiques. Il peut organiser son enseignement en respectant deux grands principes directeurs :

- pédagogue, il privilégie la mise en activité des étudiants en évitant tout dogmatisme : l'acquisition des connaissances et des capacités est en effet d'autant plus efficace que les étudiants sont acteurs de leur formation. Quel que soit le contexte (cours, travaux dirigés), la pédagogie mise en œuvre développe la participation, la prise d'initiative et l'autonomie des étudiants.
- didacticien, il choisit le contexte favorable à l'acquisition des connaissances et au développement des compétences. La mise en perspective d'une problématique avec l'histoire des sociétés, des sciences et des techniques, mais aussi des questions d'actualité ou des débats d'idées, permet de motiver son enseignement.

# Programme

## Algèbre linéaire

Dans toute cette partie,  $\mathbb{K}$  désigne  $\mathbb{R}$  ou  $\mathbb{C}$ .

### A - Espaces vectoriels, endomorphismes et matrices

Le programme est organisé autour de trois objectifs :

- consolider les acquis de la classe de première année;
- étudier de nouveaux concepts : somme de plusieurs sous-espaces vectoriels, sous-espaces stables, trace ;
- passer du registre géométrique au registre matriciel et inversement.

Le programme valorise les interprétations géométriques et l'illustration des notions et des résultats par de nombreuses figures.

#### CONTENUS

#### CAPACITÉS & COMMENTAIRES

### a) Produit et somme d'espaces vectoriels

Produit d'un nombre fini d'espaces vectoriels ; dimension dans le cas où ces espaces sont de dimension finie.

Somme, somme directe d'une famille finie de sous-espaces vectoriels ; sous-espaces supplémentaires.

Base d'un espace vectoriel  $E$  de dimension finie adaptée à un sous-espace vectoriel  $F$  de  $E$  ; base d'un espace vectoriel  $E$  de dimension finie adaptée à une décomposition en somme directe  $E = \bigoplus E_i$ .

Si  $F_1, \dots, F_p$  sont des sous-espaces de dimension finie, alors :

$$\dim\left(\sum_{i=1}^p F_i\right) \leq \sum_{i=1}^p \dim(F_i)$$

avec égalité si et seulement si la somme est directe.

Décomposition en somme directe obtenue par fractionnement d'une base.

### b) Matrices par blocs et sous-espaces stables

Matrices définies par blocs, opérations.

Sous-espace vectoriel stable par un endomorphisme, endomorphisme induit.

Si  $u$  et  $v$  commutent, le noyau et l'image de  $u$  sont stables par  $v$ .

Les étudiants doivent savoir traduire matriciellement la stabilité d'un sous-espace vectoriel par un endomorphisme et interpréter en termes d'endomorphismes une matrice triangulaire ou diagonale par blocs.

### c) Déterminants

Exemples de déterminants.

Les étudiants doivent savoir calculer le déterminant d'une matrice triangulaire par blocs, et connaître l'expression d'un déterminant de Vandermonde.  
 $\Leftrightarrow$  I : calcul du déterminant d'une matrice.

### d) Matrices semblables et trace

Matrices semblables.

Trace d'une matrice carrée. Linéarité ; trace de la transposée d'une matrice, du produit de deux matrices. Invariance de la trace par similitude. Trace d'un endomorphisme d'un espace de dimension finie.

La notion de matrices équivalentes est hors programme.

## B - Réduction des endomorphismes et des matrices carrées

Après avoir introduit le vocabulaire des éléments propres en dimension quelconque, cette partie s'intéresse de manière plus approfondie au cas de la dimension finie, et à la question de diagonalisabilité d'une matrice carrée.

L'application des résultats de la réduction à la recherche des solutions d'une récurrence linéaire à coefficients constants crée un nouveau pont entre l'algèbre et l'analyse et anticipe l'étude des équations différentielles linéaires, dont la résolution repose sur des outils similaires.

La notion de polynôme annulateur est hors programme. L'étude des classes de similitude est hors programme.

### CONTENUS

### CAPACITÉS & COMMENTAIRES

#### a) Éléments propres

Droite stable par un endomorphisme  $u$  d'un espace vectoriel  $E$ .

Valeur propre, vecteur propre, sous-espace propre d'un endomorphisme, d'une matrice carrée.

Spectre d'un endomorphisme en dimension finie, d'une matrice carrée.

Les sous-espaces propres sont en somme directe.

Polynôme caractéristique d'une matrice carrée, d'un endomorphisme en dimension finie.

Les valeurs propres sont les racines du polynôme caractéristique.

Expressions du déterminant et de la trace en fonction des valeurs propres dans le cas où le polynôme caractéristique est scindé.

Multiplicité d'une valeur propre.

Majoration de la dimension d'un sous-espace propre.

Les étudiants doivent savoir que si  $u$  et  $v$  commutent, les sous-espaces propres de  $u$  sont stables par  $v$ .

Notation  $\text{Sp}(u)$ . La notion de valeur spectrale est hors programme.

Par convention le polynôme caractéristique est unitaire. Notations  $\chi_A, \chi_u$ .

Le théorème de Cayley-Hamilton est hors programme.

#### b) Diagonalisation en dimension finie

Un endomorphisme d'un espace vectoriel de dimension finie est dit diagonalisable s'il existe une base dans laquelle sa matrice est diagonale.

Une matrice carrée est dite diagonalisable si l'endomorphisme de  $\mathbb{K}^n$  canoniquement associé est diagonalisable.

Une matrice carrée est diagonalisable si et seulement si elle est semblable à une matrice diagonale.

Un endomorphisme est diagonalisable si et seulement si la somme des dimensions de ses sous-espaces propres est égale à la dimension de l'espace.

Un endomorphisme est diagonalisable si et seulement si son polynôme caractéristique est scindé sur le corps de base  $\mathbb{K}$  et si, pour toute valeur propre, la dimension du sous-espace propre associé est égale à sa multiplicité dans le polynôme caractéristique.

Un endomorphisme admettant  $n$  valeurs propres distinctes est diagonalisable.

Calcul des puissances d'une matrice diagonalisable.

Application à la résolution des récurrences linéaires d'ordre  $p$  à coefficients constants lorsque l'équation caractéristique admet  $p$  racines distinctes.

Dans la pratique des cas numériques, on se limite à  $n = 2$  ou  $n = 3$ .

Exemple des projecteurs et des symétries.

Interprétation matricielle de ces résultats.

Les étudiants doivent savoir traduire matriciellement une relation de récurrence linéaire.

#### c) Trigonalisation en dimension finie

Un endomorphisme d'un espace vectoriel  $E$  de dimension finie est dit trigonalisable s'il existe une base de  $E$  dans laquelle sa matrice est triangulaire supérieure.

Une matrice est dite trigonalisable si elle est semblable à une matrice triangulaire supérieure.

Un endomorphisme est trigonalisable si et seulement si son polynôme caractéristique est scindé sur le corps  $\mathbb{K}$ .  
En particulier, toute matrice de  $\mathcal{M}_n(\mathbb{C})$  est trigonalisable.

Démonstration non exigible.  
Interprétation matricielle de ce résultat.  
La technique générale de trigonalisation n'est pas au programme. On se limite dans la pratique à des exemples simples en petite dimension et tout exercice de trigonalisation effective doit comporter une indication.  
 $\Leftrightarrow$  I : calcul de la valeur propre de plus grand module à l'aide du quotient des traces de deux puissances itérées consécutives.

Application à la résolution des récurrences linéaires d'ordre 2 à coefficients constants.

## Espaces euclidiens

*Ce chapitre est organisé autour de trois objectifs :*

- consolider les acquis de la classe de première année sur les espaces euclidiens ;
- étudier les isométries vectorielles et les matrices orthogonales, et les classer en dimension deux en insistant sur les représentations géométriques ;
- énoncer les formes géométrique et matricielle du théorème spectral.

### a) Isométries vectorielles

Un endomorphisme d'un espace euclidien  $E$  est une isométrie vectorielle s'il conserve la norme.  
Caractérisations par la conservation du produit scalaire, par l'image d'une base orthonormale.  
Groupe orthogonal.  
Stabilité de l'orthogonal d'un sous-espace stable.

Autre dénomination : automorphisme orthogonal.  
Exemple des réflexions en dimension deux et trois.

Notation  $O(E)$ .

### b) Matrices orthogonales

Une matrice de  $\mathcal{M}_n(\mathbb{R})$  est dite orthogonale si l'endomorphisme de  $\mathbb{R}^n$  qui lui est canoniquement associé est une isométrie vectorielle.  
Caractérisation par l'une des relations  $MM^T = I_n$  ou  $M^T M = I_n$ .  
Caractérisation d'un automorphisme orthogonal à l'aide de sa matrice dans une base orthonormale.  
Groupe orthogonal d'ordre  $n$ .  
Déterminant d'une matrice orthogonale. Groupe spécial orthogonal.  
Orientation d'un espace euclidien.

Caractérisation comme matrice de changement de base orthonormale.

Interprétation en termes de colonnes et de lignes.

Notations  $O_n(\mathbb{R})$ ,  $O(n)$ .

Notations  $SO_n(\mathbb{R})$ ,  $SO(n)$ .

### c) Isométries vectorielles d'un plan euclidien

Détermination des matrices de  $O_2(\mathbb{R})$ , de  $SO_2(\mathbb{R})$ .  
Mesure de l'angle d'une rotation d'un plan euclidien orienté.  
Classification des isométries vectorielles d'un plan euclidien.

Commutativité de  $SO_2(\mathbb{R})$ .  
Écriture complexe d'une rotation.

### d) Réduction des endomorphismes symétriques et des matrices symétriques réelles

Endomorphisme symétrique d'un espace euclidien.

Si  $\mathcal{B}$  est une base orthonormale de  $E$  et  $u$  un endomorphisme de  $E$ , alors  $u$  est symétrique si et seulement si  $\text{Mat}_{\mathcal{B}}(u)$  est symétrique.

Théorème spectral : un endomorphisme symétrique d'un espace euclidien admet une base orthonormale de vecteurs propres.

Interprétation matricielle : pour toute matrice symétrique réelle  $A$ , il existe  $D$  diagonale réelle et  $P$  orthogonale telles que  $A = PDP^{-1}$ .

Démonstration non exigible.

## Espaces vectoriels normés de dimension finie

Ce chapitre vise les objectifs suivants :

- généraliser au cas des espaces vectoriels de dimension finie sur  $\mathbb{K} = \mathbb{R}$  ou  $\mathbb{C}$  certaines notions (convergence de suites, limite et continuité de fonctions) étudiées en première année dans le cadre de l'analyse réelle, indispensables pour aborder l'étude des suites de matrices, des fonctions à valeurs vectorielles et du calcul différentiel. ;
- préparer l'introduction de la norme de la convergence uniforme, afin de fournir un cadre topologique à la convergence des suites et séries de fonctions.

Le théorème (admis) d'équivalence des normes permet de ramener l'étude topologique à celle de  $\mathbb{K}^p$ , qui peut servir de cadre à la présentation des différentes notions (boules, ouverts, limite et continuité...).

L'aspect géométrique de certains concepts topologiques gagne à être illustré par de nombreuses figures.

### a) Normes

Norme sur un espace vectoriel réel ou complexe ; espace vectoriel normé.

Norme associée à un produit scalaire.

Distance associée à une norme.

Boules ouvertes, boules fermées, sphères.

Parties convexes.

Parties bornées, suites bornées, fonctions bornées.

Normes usuelles sur  $\mathbb{K}^n$ .

Convexité des boules.

### b) Suites convergentes

Convergence d'une suite.

Une suite convergente est bornée.

Toute suite extraite d'une suite convergente est convergente.

Exemples de suites de matrices.

### c) Équivalence des normes

Deux normes  $N$  et  $N'$  sont dites équivalentes s'il existe deux réels  $\alpha$  et  $\beta$  strictement positifs tels que  $N \leq \alpha N'$  et  $N' \leq \beta N$ .

Propriétés invariantes par changement de normes équivalentes.

Théorème d'équivalence des normes en dimension finie.

Démonstration hors programme.

Illustration sur des normes simples définies sur  $\mathbb{K}^p$ .

Le théorème d'équivalence des normes permet de ramener l'étude de la convergence d'une suite à celle de ses coordonnées dans une base.

**d) Topologie d'un espace vectoriel normé de dimension finie**

Point intérieur à une partie.  
Partie ouverte.  
Point adhérent à une partie.  
Partie fermée.  
Intérieur, adhérence, frontière.

L'étude topologique d'un espace vectoriel normé de dimension finie se ramène à celle de  $\mathbb{K}^p$  muni d'une norme.

Une boule ouverte est un ouvert.  
Caractérisation séquentielle.  
Une boule fermée, une sphère sont des fermés.  
Seules les définitions sont au programme. Ces notions sont illustrées par des figures.

**e) Limite et continuité en un point**

Limite d'une fonction en un point adhérent à son domaine de définition.  
Caractérisation séquentielle.  
Équivalence entre l'existence d'une limite et celle des limites des coordonnées de la fonction dans une base de l'espace d'arrivée.  
Opérations algébriques sur les limites, composition.  
Continuité en un point. Lien avec la continuité des composantes.  
Caractérisation séquentielle.

**f) Continuité sur une partie**

Opérations algébriques, composition.

Si  $f$  est une application continue de  $E$  dans  $\mathbb{R}$  alors l'ensemble défini par  $f(x) > 0$  est un ouvert et les ensembles définis par  $f(x) = 0$  ou  $f(x) \geq 0$  sont des fermés.  
Démonstration non exigible.

Toute fonction réelle continue sur une partie fermée bornée est bornée et atteint ses bornes.

Fonction lipschitzienne. Toute fonction lipschitzienne est continue.

Toute application linéaire sur un espace de dimension finie est lipschitzienne.

La notion de norme subordonnée est hors programme.

Continuité des applications multilinéaires et polynomiales sur  $\mathbb{K}^n$ .

Exemple du déterminant.

**Suites et séries****A - Séries numériques**

*Cette partie consolide et élargit les acquis de première année sur les séries, notamment la convergence absolue, en vue de l'étude des probabilités discrètes et des séries de fonctions.*

*La semi-convergence n'est pas un objectif du programme.*

**a) Compléments sur les séries à valeurs réelles**

Théorème de comparaison entre une série et une intégrale : si  $f$  est une fonction continue par morceaux sur  $[0, +\infty[$ , positive et décroissante alors la série  $\sum f(n)$  converge si et seulement si  $f$  est intégrable sur  $[0, +\infty[$ .

Formule de Stirling : équivalent de  $n!$ .

Démonstration non exigible.

Règle de d'Alembert.

Théorème spécial des séries alternées, majoration et signe du reste.

La transformation d'Abel est hors programme.

**b) Produit de Cauchy de deux séries**

Le produit de Cauchy de deux séries  $\sum u_n$  et  $\sum v_n$  de nombres complexes est la série  $\sum w_n$  avec :

$$w_n = \sum_{p+q=n} u_p v_q.$$

Si les séries  $\sum u_n$  et  $\sum v_n$  sont absolument convergentes alors la série  $\sum w_n$  l'est aussi et on a :

$$\sum_{n=0}^{+\infty} w_n = \left( \sum_{p=0}^{+\infty} u_p \right) \left( \sum_{q=0}^{+\infty} v_q \right).$$

Démonstration non exigible.

**B - Suites et séries de fonctions**

*L'objectif de ce chapitre est de définir les modes usuels de convergence d'une suite et d'une série de fonctions et de les exploiter pour étudier la stabilité des propriétés de ces fonctions par passage à la limite. En prolongement du chapitre sur les espaces vectoriels normés de dimension finie, un lien est établi avec l'utilisation de la norme de la convergence uniforme.*

*Les fonctions sont définies sur un intervalle  $I$  de  $\mathbb{R}$  et à valeurs dans  $\mathbb{R}$  ou  $\mathbb{C}$ .*

**a) Modes de convergence d'une suite ou d'une série de fonctions**

Convergence simple, convergence uniforme d'une suite de fonctions.

La convergence uniforme entraîne la convergence simple.

Norme de la convergence uniforme sur l'espace des fonctions bornées à valeurs dans  $\mathbb{R}$  ou  $\mathbb{C}$ .

Convergence simple, convergence uniforme, convergence normale d'une série de fonctions.

Pour établir la convergence normale de  $\sum f_n$ , les étudiants doivent savoir utiliser une série numérique convergente  $\sum \alpha_n$  majorante, c'est-à-dire telle que pour tout  $n$ ,  $\|f_n\|_\infty \leq \alpha_n$ .

La convergence normale entraîne la convergence uniforme.

**b) Régularité de la limite d'une suite de fonctions**

Continuité de la limite d'une suite de fonctions :

si  $(f_n)$  converge uniformément vers  $f$  sur  $I$  et si, pour tout  $n$ ,  $f_n$  est continue sur  $I$ , alors  $f$  est continue sur  $I$ .

Adaptation au cas où la convergence est uniforme sur tout segment de  $I$ .

Interversion limite-intégrale :

si une suite  $(f_n)$  de fonctions continues converge uniformément vers  $f$  sur  $[a, b]$  alors

$$\int_a^b \lim_{n \rightarrow +\infty} f_n(t) dt = \lim_{n \rightarrow +\infty} \int_a^b f_n(t) dt.$$

Dérivabilité de la limite d'une suite de fonctions :

si  $(f_n)$  est une suite de fonctions de classe  $\mathcal{C}^1$  sur  $I$  qui converge simplement sur  $I$  vers  $f$  et telle que la suite  $(f'_n)$  converge uniformément sur  $I$  vers  $h$ , alors  $f$  est de classe  $\mathcal{C}^1$  sur  $I$  et  $f' = h$ .

Adaptation au cas où la convergence est uniforme sur tout segment de  $I$ .

Extension aux fonctions de classe  $\mathcal{C}^k$ .

Les étudiants peuvent appliquer directement le théorème concluant au caractère  $\mathcal{C}^k$  de la limite sous l'hypothèse de convergence simple des  $(f_n^{(j)})_{n \geq 0}$  pour  $0 \leq j \leq k - 1$  et de convergence uniforme de  $(f_n^{(k)})_{n \geq 0}$  sur tout segment de  $I$ .

**c) Régularité de la somme d'une série de fonctions**

Continuité de la somme :

si  $\sum f_n$  converge uniformément sur  $I$  et si, pour tout  $n$ ,  $f_n$  est continue sur  $I$ , alors  $\sum_{n=0}^{+\infty} f_n$  est continue sur  $I$ .

Adaptation au cas où la convergence est uniforme sur tout segment de  $I$ .

Intégration terme à terme d'une série de fonctions :

soit  $(f_n)$  une suite de fonctions continues sur  $[a, b]$ . Si la série  $\sum f_n$  converge uniformément sur  $[a, b]$  alors la série des intégrales est convergente et on a :

$$\int_a^b \sum_{n=0}^{+\infty} f_n(t) dt = \sum_{n=0}^{+\infty} \int_a^b f_n(t) dt.$$

Dérivation terme à terme d'une série de fonctions :

soit  $(f_n)$  une suite de fonctions de classe  $\mathcal{C}^1$  sur  $I$ . Si la série  $\sum f_n$  converge simplement sur  $I$  et si la série  $\sum f'_n$  converge uniformément sur  $I$ , alors  $\sum_{n=0}^{+\infty} f_n$  est de

Adaptation au cas où la convergence est uniforme sur tout segment de  $I$ .

classe  $\mathcal{C}^1$  sur  $I$  et sa dérivée est  $\sum_{n=0}^{+\infty} f'_n$ .

Extension aux fonctions de classe  $\mathcal{C}^k$ .

Les étudiants peuvent appliquer directement un théorème concluant au caractère  $\mathcal{C}^k$  de la somme.

**C - Séries entières**

Les objectifs de ce chapitre sont les suivants :

- étudier la convergence d'une série entière de variable complexe et mettre en évidence la notion de rayon de convergence ;
- étudier les propriétés de sa somme en se limitant à la continuité dans le cas d'une variable complexe ;
- établir les développements en série entière des fonctions usuelles.

La théorie des séries entières sera appliquée au cas des séries génératrices dans le chapitre dédié aux variables aléatoires discrètes et à la recherche de solutions d'équations différentielles linéaires.

**a) Rayon de convergence**

Lemme d'Abel : si la suite  $(a_n z_0^n)$  est bornée alors, pour tout nombre complexe  $z$  tel que  $|z| < |z_0|$ , la série  $\sum a_n z^n$  est absolument convergente.

Rayon de convergence  $R$  défini comme borne supérieure dans  $\mathbb{R}$  de l'ensemble des réels positifs  $\rho$  tels que la suite  $(a_n \rho^n)$  est bornée.

Pour  $|z| < R$ , la série  $\sum a_n z^n$  converge absolument.

Disque ouvert de convergence, intervalle ouvert de convergence.

Si  $R_a$  est le rayon de convergence de  $\sum a_n z^n$  et  $R_b$  celui de  $\sum b_n z^n$ , alors :

si  $a_n = O(b_n)$ , alors  $R_a \geq R_b$  ;

si  $|a_n| \sim |b_n|$ , alors  $R_a = R_b$ .

Les séries entières  $\sum a_n z^n$  et  $\sum n a_n z^n$  ont même rayon de convergence.

Règle de d'Alembert.

Rayon de convergence de la somme et du produit de Cauchy de deux séries entières.

### b) Régularité de la somme

Convergence normale d'une série entière d'une variable réelle sur tout segment inclus dans l'intervalle ouvert de convergence.

Continuité de la somme sur l'intervalle ouvert de convergence.

Primitivation d'une série entière d'une variable réelle sur l'intervalle ouvert de convergence.

Caractère  $\mathcal{C}^\infty$  de la somme d'une série entière d'une variable réelle sur l'intervalle ouvert de convergence et obtention des dérivées par dérivation terme à terme.

Expression des coefficients d'une série entière au moyen des dérivées successives en 0 de sa somme.

On admet la continuité de la somme d'une série entière d'une variable complexe sur le disque ouvert de convergence.

L'étude des propriétés de la somme au bord de l'intervalle ou du disque de convergence n'est pas un objectif du programme.

### c) Développement en série entière au voisinage de 0 d'une fonction d'une variable réelle

Fonction développable en série entière.

Série de Taylor d'une fonction de classe  $\mathcal{C}^\infty$ .

Unicité du développement en série entière.

Développements des fonctions usuelles.

Les étudiants doivent connaître les développements en série entière des fonctions exponentielle, cosinus, sinus, cosinus et sinus hyperboliques,  $x \mapsto \operatorname{Arctan} x$ ,  $x \mapsto \ln(1+x)$  et  $x \mapsto (1+x)^\alpha$ .

Les étudiants doivent savoir utiliser une équation différentielle linéaire pour développer une fonction en série entière.

### d) Séries géométrique et exponentielle d'une variable complexe

Développement de  $\frac{1}{1-z}$  sur le disque unité ouvert.

Développement de  $\exp(z)$  sur  $\mathbb{C}$ .

## Fonctions vectorielles, arcs paramétrés

L'objectif de ce chapitre est double :

- généraliser aux fonctions à valeurs dans  $\mathbb{R}^n$  la notion de dérivée d'une fonction numérique, en vue notamment de préparer le chapitre sur les équations différentielles ;
- formaliser des notions géométriques (arc paramétré, tangente) et cinématiques (vitesse, accélération) rencontrées dans d'autres disciplines scientifiques.

Toutes les fonctions sont définies sur un intervalle  $I$  de  $\mathbb{R}$  et à valeurs dans  $\mathbb{R}^n$ .

CONTENUS

CAPACITÉS & COMMENTAIRES

### a) Dérivabilité et opérations sur les fonctions dérivables

Dérivabilité en un point.

Dérivabilité sur un intervalle.

Taux d'accroissement et développement limité d'ordre un.

Interprétations géométrique et cinématique.

$\Leftrightarrow$  PC : vecteur vitesse.

Combinaison linéaire de fonctions dérivables.

Dérivée de  $L \circ f$ ,  $B(f, g)$ ,  $f \circ \varphi$  où  $f$  et  $g$  sont dérivables et à valeurs vectorielles,  $L$  est linéaire,  $B$  est bilinéaire,  $\varphi$  est dérivable et à valeurs réelles.

Application au produit scalaire et au déterminant dans une base de  $\mathbb{R}^2$  de deux fonctions vectorielles.

### b) Fonctions de classe $\mathcal{C}^k$

Fonction de classe  $\mathcal{C}^k$ , de classe  $\mathcal{C}^\infty$  sur un intervalle.

Opérations sur les fonctions de classe  $\mathcal{C}^k$ , de classe  $\mathcal{C}^\infty$ .

$\Leftrightarrow$  PC : vecteur accélération.

Brève extension des résultats du paragraphe précédent.

### c) Arcs paramétrés

Arc paramétré de classe  $\mathcal{C}^k$ , avec  $k \in \mathbb{N}^*$ .

Point régulier, tangente en un point régulier.

Construction d'arcs plans.

L'étude des points stationnaires, des asymptotes et des arcs définis en coordonnées polaires est hors programme.

$\Leftrightarrow$  I : visualisation à l'aide d'une calculatrice ou d'un logiciel.

## Intégration

L'objectif de ce chapitre est multiple :

- étendre la notion d'intégrale étudiée en première année à des fonctions continues par morceaux sur un intervalle quelconque par le biais des intégrales généralisées ;
- définir, dans le cadre des fonctions continues par morceaux, la notion de fonction intégrable ;
- compléter le chapitre dédié aux suites et aux séries de fonctions par le théorème de la convergence dominée et le théorème d'intégration terme à terme ;
- étudier les fonctions définies par des intégrales dépendant d'un paramètre.

Les fonctions considérées sont définies sur un intervalle de  $\mathbb{R}$  et à valeurs réelles ou complexes.

CONTENUS

CAPACITÉS & COMMENTAIRES

### a) Fonctions continues par morceaux

Fonctions continues par morceaux sur un segment, sur un intervalle.

Intégrale sur un segment d'une fonction continue par morceaux.

Brève extension des propriétés étudiées en première année.

**b) Intégrales généralisées sur  $[a, +\infty[$** 

Si  $f$  est une application à valeurs complexes continue par morceaux sur  $[a, +\infty[$  alors l'intégrale  $\int_a^{+\infty} f(t) dt$  est dite convergente si  $\int_a^x f(t) dt$  a une limite finie lorsque  $x$  tend vers  $+\infty$ . Si tel est le cas, on note  $\int_a^{+\infty} f(t) dt$  cette limite.

Si  $f$  est continue par morceaux sur  $[a, +\infty[$  et à valeurs positives,  $\int_a^{+\infty} f(t) dt$  converge si et seulement si  $x \mapsto \int_a^x f(t) dt$  est majorée.

Intégrale divergente.

**c) Intégrales généralisées sur un intervalle quelconque**

Adaptation du paragraphe précédent aux fonctions continues par morceaux définies sur un intervalle ouvert ou semi-ouvert de  $\mathbb{R}$ .

Intégrales de référence :  $\int_1^{+\infty} t^{-\alpha} dt$ ,  $\int_0^1 t^{-\alpha} dt$ .

Propriétés des intégrales généralisées : linéarité, positivité, croissance, relation de Chasles.

Changement de variable :

si  $\varphi : ]\alpha, \beta[ \rightarrow ]a, b[$  est une bijection strictement croissante de classe  $\mathcal{C}^1$ , et si  $f : ]a, b[ \rightarrow \mathbb{C}$  est continue par morceaux alors  $\int_a^b (f \circ \varphi)(u) \varphi'(u) du$  est convergente si et seulement si  $\int_a^b f(t) dt$  est convergente et, si tel est le cas, elles sont égales.

Intégration par parties sur un intervalle quelconque.

Notation  $\int_a^b f(t) dt$ .

Les étudiants doivent connaître la nature de  $\int_0^1 \ln(t) dt$  et  $\int_0^{+\infty} e^{-\alpha t} dt$  selon le signe de  $\alpha$ .

Adaptation au cas où  $\varphi$  est strictement décroissante.

L'existence des limites du produit  $fg$  aux bornes de l'intervalle assure que les intégrales de  $fg'$  et  $f'g$  sont de même nature. Notation  $[fg]_a^b$ .

**d) Intégrales absolument convergentes et fonctions intégrables**

Intégrale absolument convergente.

La convergence absolue implique la convergence et dans ce cas la valeur absolue (ou le module) de l'intégrale est inférieure ou égale à l'intégrale de la valeur absolue (ou du module).

Une fonction continue par morceaux sur un intervalle  $I$  est dite intégrable sur  $I$  si son intégrale sur  $I$  est absolument convergente.

Pour  $f$  et  $g$  fonctions continues par morceaux sur  $[a, +\infty[$  :

- si  $|f| \leq |g|$ , alors l'intégrabilité de  $g$  implique celle de  $f$  sur  $[a, +\infty[$ .
- si  $f(x) \underset{x \rightarrow +\infty}{=} O(g(x))$ , alors l'intégrabilité de  $g$  implique celle de  $f$  sur  $[a, +\infty[$ .
- si  $f(x) \underset{x \rightarrow +\infty}{\sim} g(x)$ , alors l'intégrabilité de  $f$  est équivalente à celle de  $g$  sur  $[a, +\infty[$ .

Pour une fonction à valeurs réelles, on utilise ses parties positive et négative.

Notations  $\int_I f(t) dt$ ,  $\int_I f$ .

Adaptation au cas d'un intervalle quelconque.

Si  $f$  est continue et intégrable sur  $I$ , alors  $\int_I |f(t)| dt = 0$  implique  $f = 0$ .

Espace vectoriel des fonctions continues par morceaux intégrables sur  $I$ .

Espace vectoriel des fonctions continues par morceaux de carré intégrable sur  $I$ .

Le produit de deux fonctions de carré intégrable est intégrable. Inégalité de Cauchy-Schwarz.

Produit scalaire de deux fonctions continues de carré intégrable sur  $I$  à valeurs réelles.

### e) Suites et séries de fonctions intégrables

Théorème de convergence dominée :

Si  $(f_n)$  est une suite de fonctions continues par morceaux sur  $I$  convergeant simplement sur  $I$  vers une fonction  $f$  continue par morceaux et telle qu'il existe une fonction  $\varphi$  continue par morceaux et intégrable sur  $I$  vérifiant  $|f_n| \leq \varphi$  pour tout  $n$ , alors les fonctions  $f_n$  et  $f$  sont intégrables sur  $I$  et :

$$\int_I f_n(t) dt \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} \int_I f(t) dt.$$

Démonstration hors programme.

Théorème d'intégration terme à terme :

Si  $(f_n)$  est une suite de fonctions continues par morceaux et intégrables sur  $I$ , telle que la série  $\sum f_n$  converge simplement vers une fonction  $f$  continue par morceaux sur  $I$  et telle que la série  $\sum \int_I |f_n(t)| dt$  converge, alors  $f$  est intégrable sur  $I$  et

$$\int_I f(t) dt = \sum_{n=0}^{\infty} \int_I f_n(t) dt.$$

Démonstration hors programme.

### f) Intégrales à paramètre

Théorème de continuité :

Si  $I$  et  $J$  sont deux intervalles de  $\mathbb{R}$  et  $f$  une fonction définie sur  $I \times J$ , telle que :

- pour tout  $x \in I$ ,  $t \mapsto f(x, t)$  est continue par morceaux sur  $J$ ;
- pour tout  $t \in J$ ,  $x \mapsto f(x, t)$  est continue sur  $I$ ;
- il existe une fonction  $\varphi$  positive, continue par morceaux et intégrable sur  $J$ , telle que pour tout  $(x, t) \in I \times J$ , on ait  $|f(x, t)| \leq \varphi(t)$ ;

alors la fonction  $x \mapsto \int_J f(x, t) dt$  est continue sur  $I$ .

Démonstration non exigible.

Adaptation au cas où l'hypothèse de domination est vérifiée sur tout segment de  $I$ .

Théorème de dérivation : Si  $I$  et  $J$  sont deux intervalles de  $\mathbb{R}$  et  $f$  une fonction définie sur  $I \times J$ , telle que :

- Pour tout  $x \in I$ ,  $t \mapsto f(x, t)$  est continue par morceaux et intégrable sur  $J$ ;
- Pour tout  $t \in J$ ,  $x \mapsto f(x, t)$  est de classe  $\mathcal{C}^1$  sur  $I$ ;
- Pour tout  $x \in I$ ,  $t \mapsto \frac{\partial f}{\partial x}(x, t)$  est continue par morceaux sur  $J$ ;
- Il existe une fonction  $\varphi$  positive, continue par morceaux et intégrable sur  $J$ , telle que pour tout  $(x, t) \in I \times J$ , on ait  $\left| \frac{\partial f}{\partial x}(x, t) \right| \leq \varphi(t)$ ;

alors la fonction  $g : x \mapsto \int_J f(x, t) dt$  est de classe  $\mathcal{C}^1$  sur  $I$  et on a sur  $I$  :

$$g'(x) = \int_J \frac{\partial f}{\partial x}(x, t) dt.$$

Extension aux fonctions de classe  $\mathcal{C}^k$ .

Démonstration non exigible.

Adaptation au cas où l'hypothèse de domination est vérifiée sur tout segment de  $I$ .

$\Leftrightarrow$  PC : transformée de Fourier.

## Probabilités

Les chapitres de probabilités permettent de développer les compétences suivantes :

- modéliser des situations aléatoires par le choix d'un espace probabilisé ou de variables aléatoires adéquats ;
- maîtriser un formalisme spécifique aux probabilités.

### A- Espaces probabilisés

Cette partie a pour objectif la mise en place du cadre général de la théorie des probabilités permettant d'aborder l'étude de processus stochastiques à temps discret. Cette mise en place se veut minimale. En particulier :

- la notion de tribu ne doit donner lieu à aucun développement théorique autre que sa définition ;
- la construction d'espaces probabilisés n'est pas un objectif du programme.

#### a) Ensembles dénombrables

Un ensemble est dit dénombrable s'il est en bijection avec  $\mathbb{N}$ . Ensembles finis ou dénombrables.

Dénombrabilité de  $\mathbb{Z}$ , d'un produit cartésien de deux ensembles dénombrables.

Un ensemble fini ou dénombrable peut être décrit en extension sous la forme  $\{x_n; n \in \mathbb{N}\}$ .

Toute autre connaissance sur la dénombrabilité est hors programme.

#### b) Espace probabilisé

Si  $\Omega$  est un ensemble, on appelle *tribu* sur  $\Omega$  une partie  $\mathcal{A}$  de l'ensemble  $\mathcal{P}(\Omega)$  des parties de  $\Omega$  telle que :

- i.  $\Omega \in \mathcal{A}$ ,
- ii. pour tout  $A \in \mathcal{A}$ ,  $\bar{A} = \Omega \setminus A \in \mathcal{A}$ ,
- iii. pour toute suite  $(A_n)_{n \geq 0}$  d'éléments de  $\mathcal{A}$ , la réunion  $\bigcup_{n=0}^{+\infty} A_n$  appartient à  $\mathcal{A}$ .

L'ensemble  $\Omega$  est l'univers ; il n'est en général pas précisé. Les éléments de  $\mathcal{A}$  sont les événements. Les étudiants doivent savoir expliciter un événement à partir d'autres événements en utilisant la réunion, l'intersection et la complémentation. On fait le parallèle entre le vocabulaire probabiliste et le vocabulaire ensembliste.

Si  $\Omega$  est un ensemble et  $\mathcal{A}$  une tribu sur  $\Omega$ , on appelle *probabilité* sur  $(\Omega, \mathcal{A})$  une application  $P: \mathcal{A} \rightarrow [0, 1]$  telle que :

- i.  $P(\Omega) = 1$ ,
- ii. pour toute suite  $(A_n)_{n \geq 0}$  d'événements incompatibles,

$$P\left(\bigcup_{n=0}^{+\infty} A_n\right) = \sum_{n=0}^{+\infty} P(A_n).$$

On appelle espace probabilisé un triplet  $(\Omega, \mathcal{A}, P)$  où  $\mathcal{A}$  est une tribu et  $P$  une probabilité sur  $(\Omega, \mathcal{A})$ .

Propriétés :

- $\bigcap_{n=0}^{+\infty} A_n \in \mathcal{A}$ .
- Continuité croissante : si  $(A_n)_{n \geq 0}$  est une suite d'événements telle que, pour tout  $n$ , on ait  $A_n \subset A_{n+1}$ , alors :

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} P(A_n) = P\left(\bigcup_{n=0}^{+\infty} A_n\right).$$

- Continuité décroissante : si  $(A_n)_{n \geq 0}$  est une suite d'événements telle que, pour tout  $n$ , on ait  $A_{n+1} \subset A_n$ , alors :

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} P(A_n) = P\left(\bigcap_{n=0}^{+\infty} A_n\right).$$

- Sous additivité : si  $(A_n)_{n \in \mathbb{N}}$  est une suite d'événements, alors :

$$P\left(\bigcup_{n=0}^{+\infty} A_n\right) \leq \sum_{n=0}^{+\infty} P(A_n).$$

### c) Conditionnement et indépendance

Si  $A$  et  $B$  sont deux événements tels que  $P(B) > 0$ , on appelle probabilité conditionnelle de  $A$  sachant  $B$  le réel

$$P_B(A) = \frac{P(A \cap B)}{P(B)}$$

Formule des probabilités composées.

Système complet dénombrable d'événements.

Formule des probabilités totales : si  $(A_n)_{n \in \mathbb{N}}$  est un système complet d'événements, alors la série  $\sum P(B \cap A_n)$  converge et

$$P(B) = \sum_{n=0}^{+\infty} P(B \cap A_n) = \sum_{n=0}^{+\infty} P(B | A_n) P(A_n)$$

Formule de Bayes.

Indépendance de deux événements.

Indépendance mutuelle d'une famille finie d'événements.

Notation  $P_B(A) = P(A | B)$ . L'application  $P_B$  est une probabilité sur  $(\Omega, \mathcal{A})$ .

Ce paragraphe étend rapidement les concepts et résultats vus en première année dans le cadre des univers finis.

On adopte la convention  $P(B | A_n)P(A_n) = 0$  lorsque  $P(A_n) = 0$ .

La formule reste valable dans le cas d'une suite  $(A_n)_{n \in \mathbb{N}}$  d'événements deux à deux incompatibles tels que  $\sum_{n=0}^{+\infty} P(A_n) = 1$ .

Si  $P(B) > 0$ , l'indépendance de  $A$  et  $B$  équivaut à  $P(A | B) = P(A)$ .

L'indépendance des événements  $A_i$  deux à deux n'entraîne pas leur indépendance mutuelle si  $n \geq 3$ .

## B - Variables aléatoires discrètes

Les objectifs de cette partie sont les suivants :

- étendre la notion de variable aléatoire finie à des variables dont l'image est un ensemble dénombrable ;
- fournir des outils permettant, sur des exemples simples, l'étude de processus stochastiques à temps discret ;
- exposer deux résultats asymptotiques : l'approximation de la loi binomiale par la loi de Poisson et la loi faible des grands nombres ;
- introduire les fonctions génératrices et utiliser les propriétés des séries entières.

La construction d'espaces probabilisés modélisant une suite d'expériences aléatoires est hors programme, on admet l'existence de tels espaces. Les différents types de convergence probabiliste (presque sûre, en probabilité, en loi, en moyenne) sont hors programme.

Toutes les variables aléatoires mentionnées dans le programme sont implicitement supposées discrètes.

### CONTENUS

### CAPACITÉS & COMMENTAIRES

#### a) Généralités

Une variable aléatoire discrète  $X$  sur  $(\Omega, \mathcal{A})$  est une application définie sur  $\Omega$  dont l'image est finie ou dénombrable et telle que l'image réciproque de tout élément de  $X(\Omega)$  appartient à  $\mathcal{A}$ .

Notations  $(X \in U)$ ,  $\{X \in U\}$ .

Loi d'une variable aléatoire discrète.

Fonction de répartition d'une variable aléatoire réelle. Croissance, limites en  $-\infty$  et en  $+\infty$ .

Si  $X$  prend ses valeurs dans  $\{x_n ; n \geq 0\}$ , les  $x_n$  étant distincts, et si  $(p_n)_{n \geq 0}$  est une suite de réels positifs vérifiant

$\sum_{n=0}^{+\infty} p_n = 1$ , alors il existe une probabilité  $P$  sur  $(\Omega, \mathcal{A})$  telle

que pour tout  $n \in \mathbb{N} : P(X = x_n) = p_n$ .

Couple de variables aléatoires discrètes. Loi conjointe et lois marginales

Loi conditionnelle de  $Y$  sachant  $(X = x)$ .

Deux variables aléatoires  $X$  et  $Y$  discrètes définies sur un espace probabilisé  $(\Omega, \mathcal{A}, P)$  sont dites indépendantes si, pour tout  $(x, y) \in X(\Omega) \times Y(\Omega)$ ,

$$P(X = x, Y = y) = P(X = x)P(Y = y).$$

Si  $X$  et  $Y$  sont indépendantes, alors, pour toute partie  $A \subset X(\Omega)$  et toute partie  $B \subset Y(\Omega)$ , on a

$$P(X \in A, Y \in B) = P(X \in A)P(Y \in B)$$

Si  $X$  et  $Y$  sont deux variables aléatoires indépendantes alors, pour toutes fonctions  $f$  et  $g$ , les variables  $f(X)$  et  $g(Y)$  sont indépendantes.

Variables mutuellement indépendantes.

Suite de variables aléatoires indépendantes (deux à deux ou mutuellement).

Pour tout  $U \subset X(\Omega)$ ,  $X^{-1}(U)$  est un événement.

$F_X(x) = P(X \leq x)$ . L'étude des propriétés de continuité des fonctions de répartition n'est pas au programme.

Démonstration hors programme.

Extension aux variables discrètes des notions étudiées en première année sur les variables finies.

Démonstration hors programme.

Extension sans démonstration aux variables discrètes des notions et des résultats vues en première année.

La démonstration de l'existence d'un espace probabilisé portant une suite de variables aléatoires mutuellement indépendantes de lois discrètes données est hors programme.

Application à la modélisation d'un jeu de pile ou face infini par une suite de variables aléatoires de Bernoulli mutuellement indépendantes.

**b) Espérance et variance**

La variable aléatoire réelle discrète  $X$  à valeurs dans un ensemble dénombrable  $\{x_n; n \geq 0\}$  est dite d'espérance finie si la série  $\sum x_n P(X = x_n)$  est absolument convergente; si tel est le cas, on appelle espérance de  $X$ , noté  $E(X)$ , le réel  $\sum_{n=0}^{+\infty} x_n P(X = x_n)$ .

Si  $X$  est à valeurs dans  $\mathbb{N}$ , alors  $E(X) = \sum_{n=1}^{+\infty} P(X \geq n)$ .

**Théorème du transfert :** si  $X$  est une variable aléatoire et  $f$  une application à valeurs réelles définie sur l'image  $\{x_n, n \in \mathbb{N}\}$  de  $X$ , alors  $f(X)$  est d'espérance finie si et seulement si la série  $\sum P(X = x_n) f(x_n)$  converge absolument. Dans ce cas, on a :

$$E(f(X)) = \sum_{n=0}^{+\infty} P(X = x_n) f(x_n).$$

Linéarité de l'espérance.

Positivité, croissance de l'espérance.

Si  $X$  et  $Y$  sont deux variables aléatoires discrètes indépendantes, alors  $E(XY) = E(X)E(Y)$ .

Si la variable aléatoire  $X^2$  est d'espérance finie, alors  $X$  est elle-même d'espérance finie.

Si  $X^2$  est d'espérance finie, la variance de  $X$  est le réel  $V(X) = E((X - E(X))^2) = E(X^2) - E(X)^2$ .

Écart type  $\sigma(X) = \sqrt{V(X)}$ .

Pour  $a$  et  $b$  réels et  $X$  une variable aléatoire réelle, égalité  $V(aX + b) = a^2 V(X)$ .

Inégalités de Markov et de Bienaymé-Tchebychev.

Variance d'une somme finie de variables aléatoires; cas de variables deux à deux indépendantes.

Covariance, coefficient de corrélation.

Encadrement  $-1 \leq \rho(X, Y) \leq 1$ .

On admet que la somme  $\sum_{n=0}^{+\infty} x_n P(X = x_n)$  ne dépend pas de l'ordre d'énumération.

$\Leftrightarrow$  PC : énergie moyenne de systèmes à spectre discret.

Démonstration hors programme.

Démonstration non exigible.

Démonstration hors programme.

Brève extension des résultats obtenus dans le cadre d'un univers fini.

Notations :  $\text{Cov}(X, Y)$  et  $\rho(X, Y)$ .

Inégalité de Cauchy-Schwarz.

**c) Variables aléatoires à valeurs dans  $\mathbb{N}$**

Série génératrice d'une variable aléatoire à valeurs dans  $\mathbb{N}$  :

$$G_X(t) = E(t^X) = \sum_{n=0}^{+\infty} P(X = n) t^n.$$

Le rayon de convergence est au moins égal à 1.

La variable aléatoire  $X$  admet une espérance  $E(X)$  si et seulement si  $G_X$  est dérivable en 1 et, si tel est le cas,  $E(X) = G'_X(1)$ .

La variable aléatoire  $X$  admet une variance si et seulement si  $G_X$  est deux fois dérivable en 1.

Série génératrice de la somme de deux variables aléatoires indépendantes.

La loi d'une variable aléatoire  $X$  à valeurs dans  $\mathbb{N}$  est caractérisée par sa série génératrice  $G_X$ .

Démonstration non exigible.

Démonstration non exigible.

Les étudiants doivent savoir retrouver l'expression de  $V(X)$  en fonction de  $G'_X(1)$  et de  $G''_X(1)$  en cas d'existence.

**d) Lois usuelles**

Pour  $p$  dans  $]0, 1[$ , loi géométrique de paramètre  $p$  : la variable aléatoire  $X$  suit une loi géométrique de paramètre  $p$  si et seulement si

$$\forall k \in \mathbb{N}^*, \quad P(X = k) = p(1 - p)^{k-1}.$$

Notation  $X \hookrightarrow \mathcal{G}(p)$ .

La loi géométrique peut être interprétée comme rang du premier succès dans une suite illimitée d'épreuves de Bernoulli indépendantes et de même paramètre  $p$ .

Série génératrice, espérance et variance.  
Caractérisation comme loi sans mémoire :

$$P(X > n + k \mid X > n) = P(X > k).$$

Loi de Poisson de paramètre  $\lambda$ . Série génératrice, espérance et variance. Somme de deux variables indépendantes suivant une loi de Poisson.

Notation  $X \hookrightarrow \mathcal{P}(\lambda)$ .  
 $\Leftrightarrow$  PC : compteur Geiger.

**e) Résultats asymptotiques**

Approximation de la loi binomiale par la loi de Poisson : si, pour tout  $n$ ,  $X_n \hookrightarrow \mathcal{B}(n, p_n)$  et si  $\lim_{n \rightarrow +\infty} np_n = \lambda$ , alors, pour tout  $k \in \mathbb{N}$ , on a

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} P(X_n = k) = e^{-\lambda} \frac{\lambda^k}{k!}.$$

Interprétation de la loi de Poisson comme loi des événements rares.

$\Leftrightarrow$  I : simulation de cette approximation.

La notion de convergence en loi est hors programme.

Loi faible des grands nombres : si  $(X_n)_{n \geq 1}$  est une suite de variables aléatoires deux à deux indépendantes et de même loi admettant un moment d'ordre 2, alors, si  $S_n = \sum_{k=1}^n X_k$ ,  $m = E(X_1)$  et  $\sigma = \sigma(X_1)$ , on a pour tout  $\varepsilon > 0$ ,

Estimation : pour tout  $\varepsilon > 0$ ,

$$P\left(\left|\frac{1}{n}S_n - m\right| \geq \varepsilon\right) \leq \frac{\sigma^2}{n\varepsilon^2}.$$

$\Leftrightarrow$  I : simulation d'une suite de tirages.

$$P\left(\left|\frac{1}{n}S_n - m\right| \geq \varepsilon\right) \xrightarrow{n \rightarrow \infty} 0.$$

**Calcul différentiel**

*L'étude d'une fonction de  $\mathbb{R}^p$  dans  $\mathbb{R}^n$  se ramenant à celle de ses coordonnées, ce chapitre privilégie l'étude des fonctions de  $\mathbb{R}^p$  dans  $\mathbb{R}$ . Il est axé sur la mise en place d'outils permettant de traiter des applications du calcul différentiel à l'analyse et la géométrie : résolution d'équations aux dérivées partielles, problèmes d'extremums, courbes, surfaces. On se limite en pratique au cas  $p \leq 3$ .*

**a) Fonctions de classe  $\mathcal{C}^1$**

Dérivées partielles d'ordre 1 en un point d'une fonction définie sur un ouvert  $U$  de  $\mathbb{R}^p$  à valeurs dans  $\mathbb{R}$ .

Notations  $D_i f(a)$ ,  $\partial_i f(a)$ ,  $\frac{\partial f}{\partial x_i}(a)$ .

Une fonction est dite de classe  $\mathcal{C}^1$  sur  $U$  si ses dérivées partielles d'ordre 1 existent et sont continues sur  $U$ .

Opérations sur les fonctions de classe  $\mathcal{C}^1$ .

Une fonction de classe  $\mathcal{C}^1$  sur  $U$  admet en tout point  $a$  de  $U$  un développement limité d'ordre 1.

Démonstration non exigible.

Une fonction de classe  $\mathcal{C}^1$  sur  $U$  est continue sur  $U$ .

Différentielle de  $f$  en  $a$ .

Elle est définie comme l'application linéaire  $df(a)$  de  $\mathbb{R}^p$  dans  $\mathbb{R} : (h_1, \dots, h_p) \mapsto \sum_{i=1}^p h_i \partial_i f(a)$ .  
Notation  $df(a) \cdot h$ .

### b) Règle de la chaîne

Dérivée de  $t \mapsto f(x_1(t), \dots, x_p(t))$ .

Caractérisation des fonctions constantes sur un ouvert convexe.

Application au calcul des dérivées partielles de  $(u, v) \mapsto f(x(u, v), y(u, v))$ .

Les étudiants doivent connaître le cas particulier des coordonnées polaires.

### c) Gradient

Dans  $\mathbb{R}^p$  muni de sa structure euclidienne canonique, gradient d'une fonction de classe  $\mathcal{C}^1$ .

Relation  $\forall h \in \mathbb{R}^p, df(a) \cdot h = (\nabla f(a) | h)$ .

Le gradient est défini par ses coordonnées.

Notation  $\nabla f(a)$ .

$\Leftrightarrow$  PC : champ électrostatique, loi de Fick, loi de Fourier.

### d) Applications géométriques

Courbe du plan définie par une équation  $f(x, y) = 0$  avec  $f$  de classe  $\mathcal{C}^1$ .

Point régulier.

Équation de la tangente en un point régulier.

En un point où il est non nul, le gradient de  $f$  est orthogonal aux lignes de niveau  $f(x, y) = \lambda$  et orienté dans le sens des valeurs croissantes de  $f$ .

Surface définie par une équation  $f(x, y, z) = 0$  avec  $f$  de classe  $\mathcal{C}^1$ .

Point régulier.

Courbes tracées sur une surface.

Plan tangent à une surface en un point régulier défini comme le plan orthogonal au gradient et passant par le point.

On admet l'existence d'un paramétrage local de classe  $\mathcal{C}^1$ .

$\Leftrightarrow$  PC : équation de la diffusion thermique, équation de propagation.

$\Leftrightarrow$  I : tracé de lignes de niveau.

Cas particulier des courbes coordonnées d'une surface d'équation  $z = g(x, y)$ .

Tangentes aux courbes régulières de classe  $\mathcal{C}^1$  tracées sur la surface.

### e) Dérivées partielles d'ordre deux

Dérivées partielles d'ordre 2 d'une fonction de deux ou trois variables à valeurs dans  $\mathbb{R}$ .

Fonction de classe  $\mathcal{C}^2$ .

Théorème de Schwarz.

Exemples d'équations aux dérivées partielles du premier et du second ordre.

Démonstration hors programme.

Les étudiants doivent être capables d'utiliser un changement de variables dans les deux cas suivants : transformation affine, passage en coordonnées polaires.

$\Leftrightarrow$  PC : équation du transport, équation de la diffusion thermique, équation de propagation.

### f) Extremums d'une fonction de $\mathbb{R}^p$ dans $\mathbb{R}$

Extremum local, global.

Si une fonction de classe  $\mathcal{C}^1$  sur un ouvert de  $\mathbb{R}^p$  atteint un extremum local en un point, alors celui-ci est un point critique.

Recherche d'extremums globaux sur une partie fermée bornée de  $\mathbb{R}^p$ .

$\Leftrightarrow$  PC : mécanique et électricité.

## Équations différentielles linéaires

L'étude des équations différentielles linéaires scalaires d'ordres un et deux, abordée en première année, se poursuit par celle des systèmes différentiels linéaires d'ordre 1 et des équations scalaires à coefficients non constants, en mettant l'accent sur les équations d'ordre deux. On s'attache à développer à la fois les aspects théorique et pratique :

- la forme des solutions ;
- le théorème de Cauchy linéaire ;
- le lien entre les équations scalaires et les systèmes différentiels d'ordre un ;
- la résolution explicite.

Ce chapitre favorise les interactions avec les autres disciplines scientifiques.

Dans tout ce chapitre,  $\mathbb{K}$  désigne  $\mathbb{R}$  ou  $\mathbb{C}$  et  $I$  est un intervalle de  $\mathbb{R}$ .

### CONTENUS

### CAPACITÉS & COMMENTAIRES

#### a) Systèmes différentiels

Équation de la forme  $X' = A(t)X + B(t)$  où  $A : I \rightarrow \mathcal{M}_n(\mathbb{K})$  et  $B : I \rightarrow \mathcal{M}_{n,1}(\mathbb{K})$  sont continues.

Forme des solutions : somme d'une solution particulière et de la solution générale de l'équation homogène.

Théorème de Cauchy linéaire : existence et unicité de la solution d'un problème de Cauchy.

Isomorphisme entre  $\mathcal{M}_{n,1}(\mathbb{K})$  et l'espace vectoriel des solutions de  $X' = A(t)X$ .

Système différentiel linéaire à coefficients constants  
 $X' = AX$ .

Résolution lorsque  $A$  est une matrice diagonalisable.

Démonstration hors programme.

$\Leftrightarrow$  I : Méthode d'Euler pour la recherche d'une solution approchée d'un problème de Cauchy.

Dimension de l'espace vectoriel des solutions.

Exemples de résolution dans le cas où  $A$  est trigonalisable.

$\Leftrightarrow$  PC : comportement asymptotique des solutions en fonction du spectre de  $A$ .

#### b) Équations différentielles linéaires scalaires

Équation différentielle scalaire d'ordre 2 à coefficients continus  $y'' + a(t)y' + b(t)y = c(t)$ .

Forme des solutions : somme d'une solution particulière et de la solution générale de l'équation homogène.

Théorème de Cauchy linéaire : existence et unicité de la solution d'un problème de Cauchy.

Espace vectoriel des solutions de l'équation homogène, dimension.

Cas des équations à coefficients constants.

Les étudiants doivent savoir écrire cette équation sous la forme d'un système différentiel  $X' = A(t)X + B(t)$ .

La recherche d'une solution particulière de l'équation complète doit comporter des indications.

Exemples d'utilisation de développements en série entière pour la recherche de solutions.

On relie les résultats obtenus en première année à l'aide de l'équation caractéristique à la réduction de la matrice du système différentiel associé.

Les étudiants doivent savoir trouver une solution particulière de l'équation complète pour un second membre de la forme  $A\cos(\omega t)$  ou  $A\sin(\omega t)$ .

La méthode de la variation des constantes est hors programme.

## ANNEXE 2