

COURS DE PRÉPA

Mathématiques

Écrit par
Alexandre JOUANDIN

Année
2013—2015



15 janvier 2015

Table des matières

I	Première année	7
1	Géométrie	8
1.1	Équations générales	8
2	Calculs algébriques	9
2.1	Somme des termes d'une suite arithmétique	9
2.2	Coefficients binomiaux	10
3	Suites	11
3.1	Comparaison de suites	11
3.2	Suites de Cauchy	12
4	Nombres complexes	13
4.1	Plan complexe	13
4.2	Nombres complexes de module 1	13
II	Structures algébriques usuelles	15
5	Groupes et sous-groupes	17
5.1	Définition d'un groupe	17
5.2	Produit fini de groupes	17
5.3	Sous-groupe	17
5.4	Morphismes de groupes	18
5.4.1	Définition	18
5.4.2	Propriétés d'un morphisme de groupe	19
5.4.3	Isomorphismes	19
5.5	Groupes monogènes et cycliques	19
5.6	Ordre d'un élément dans un groupe	19
5.7	Classe d'équivalence	20
5.8	Idéaux de \mathbb{Z}	20

III	Algèbre	21
6	Réduction des Endomorphismes	22
6.1	Généralités	23
6.1.1	Matrices carrées semblables	23
6.1.2	Sous-espace stable par un endomorphisme	24
6.2	Éléments propres d'un endomorphisme	24
6.2.1	Éléments propres	25
6.2.2	Éléments propres en dimension finie	25
6.3	Polynôme Caractéristique	26
6.4	Endomorphismes et matrices carrées diagonalisables	28
6.5	Endomorphismes et matrices carrées trigonalisables	29
6.6	Endomorphismes nilpotents	29
6.6.1	Définition	29
6.6.2	Propriétés en dimension finie	29
6.7	Polynômes d'un endomorphisme	29
6.8	Lemme de décomposition des noyaux	30
6.9	Polynômes annulateurs et diagonalisabilité	30
6.10	Endomorphismes à polynôme minimal scindé	31
7	Topologie des espaces vectoriels normés	32
7.1	Normes et espaces vectoriels normés	32
7.1.1	Rappels	32
7.1.2	Norme	32
7.1.3	Distance	33
7.1.4	Boules	33
7.2	Suites d'éléments d'un espace vectoriel normé	34
7.3	Comparaison des normes	34
7.4	Complets	34
7.5	Parties compactes d'un espace normé	34
7.6	Applications continues sur une partie compacte	35
7.7	Connexité par arcs	36
7.7.1	Convexité	36
7.7.2	Connexité	36
7.8	Topologie	37
IV	Analyse	39
8	Séries	40
8.1	Définitions	40
8.2	Séries à termes positifs	41
8.2.1	Comparaison des Série À Termes Positifs (SATP)	41
8.2.2	Règle de d'ALEMBERT	42
8.3	Séries alternées	43
8.4	Hors programme	43
9	Familles sommables de nombres complexes	45
9.1	Dénombrement	45
9.2	Familles sommables	46
9.2.1	Pour les réels positifs	46

9.2.2	Pour les réels et les complexes	47
10	Probabilités sur un univers au plus dénombrable	49
10.1	Espace probabilisé	49
10.2	Conditionnement	51
10.3	Indépendance	51
11	Variables aléatoires discrètes	52
11.1	Espérance	52
11.1.1	Définitions	52
11.1.2	Propriétés	52
11.2	Variance	53
11.2.1	Moment	53
11.2.2	Variance et écart-type	53
11.2.3	Covariance	53
11.3	Lois usuelles	54
11.3.1	Loi binomiale	54
11.4	Fonctions génératrices	55
12	Suites de fonctions	56
12.1	Convergence de suites de fonctions	56
12.2	Convergence des Séries	58
12.3	Propriétés de la somme	59
12.4	Séries doubles	59
13	Séries Entières	60
13.1	Généralités	60
13.1.1	Rayon de Convergence	60
13.1.2	D'ALEMBERT	61
13.2	Série entière d'une variable réelle	62
13.2.1	Primitivation	62
13.2.2	Dérivation	62
13.3	Fonctions développables en série entière	63
13.4	Propriétés de la somme	63
14	Calcul Différentiel et Intégral	64
14.1	Dérivation	64
14.2	Intégration	65
14.3	Primitive	65
14.4	Accroissements finis	66
14.4.1	Cas réel	66
14.4.2	Cas vectoriel	66
14.5	Formules de Taylor	66
15	Intégrales sur un intervalle	67
15.1	Intégrabilité	68
15.2	Intégrales classiques	69
15.3	Espaces vectoriels normés de fonction intégrables	69
15.4	Intégrales dépendant d'un paramètre	70
15.5	Fonction Gamma	70
15.6	Intégrales doubles	71

16	Espaces Préhilbertiens réels	72
16.1	Produit scalaire	72
16.2	Orthogonalité	73
16.3	Automorphismes orthogonaux	73
17	Espaces Préhilbertiens complexes	75
17.1	Structure Préhilbertienne complexe	75
17.2	Orthogonalité	75
17.3	Séries de FOURIER	75
V	Équations Différentielles	80
18	Équations Différentielles Linéaire	81
18.1	Équations Différentielles Scalaire s d'ordre 1	81
18.2	Équations Différentielles Vectorielles d'ordre 1	82
18.3	Équations Différentielles linéaires du second ordre	83
18.3.1	Coefficients constants	84
18.3.2	Cas général	84
19	Équations Différentielles non linéaires	86
19.1	Équations autonomes	86
19.2	Équations non autonomes	87
20	Fonctions de plusieurs variables	88
20.1	Différentielle, dérivée	88
20.1.1	Différentielle	88
20.1.2	Dérivée selon un vecteur	88
20.2	Inversion locale	89
20.3	Complément sur les courbes planes	89
VI	Géométrie	91
20.4	Arcs Paramétrés	92
20.5	Courbes Planes	92
20.5.1	En polaire	92
20.5.2	Étude d'une courbe paramétrée	93
VII	Annexe	94
20.6	Équivalences	95
20.7	Trigonométrie	95
20.7.1	Définition	95
20.7.2	Addition / Produit	95
20.7.3	Dérivation	95
20.7.4	Formule de MOIVRE	96
20.8	Formules usuelles	96
20.9	Espaces vectoriels	96
20.10	Astuces	96
	Liste des acronymes	98

Première partie

Première année

Chapitre 1

Géométrie

1.1 Équations générales

Type	Équation
Droite	$ax + by + c = 0$
Plan	$ax + by + cz + d = 0$
Cercle	$(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 = R^2$
Sphère	$(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2 = R^2$

Chapitre 2

Calculs algébriques

2.1 Somme des termes d'une suite arithmétique

Définition 1

Soit I un ensemble fini, et $(x_i)_{i \in I}$ une famille de nombres complexes.

La somme des x_i est notée $\sum_{i \in I} x_i$

Le produit des x_i est noté $\prod_{i \in I} x_i$

Théorème 1.1 : Somme des entiers de 1 à n

Pour tout n de 1 à n :

$$(2.1) \quad \sum_{k=1}^n k = \frac{n(n-1)}{2}$$

Preuve 1.1.1

$$(2.2) \quad \begin{array}{rcl} S & = & 1 + 2 + \cdots + n - 1 + n \\ + S & = & n + n - 1 + \cdots + 2 + 1 \\ \hline 2S & = & n + 1 + n + 1 + \cdots + n + 1 + n + 1 \end{array}$$

$$d'où 2S = n \times (n + 1), \text{ et } S = \frac{n(n + 1)}{2}$$

Théorème 1.2 : Somme des premières puissances

Pour tout n entier naturel non nul, on a :

$$(2.3a) \quad \sum_{k=1}^n k^2 = \frac{n(n+1)(2n+1)}{6}$$

$$(2.3b) \quad \begin{aligned} \sum_{k=1}^n k^3 &= \frac{n^2(n+1)^2}{4} \\ &= \left(\sum_{k=1}^n k \right)^2 \end{aligned}$$

Les démonstrations de ces formules se font par récurrence (en connaissant le résultat), ou en primitivant.

2.2 Coefficients binomiaux

Définition 2

Pour E un ensemble fini de n éléments, on note $\binom{n}{p}$ le nombre de sous-parties de E à p éléments.

$$(2.4) \quad \binom{n}{p} = \frac{n!}{p!(n-p)!}$$

Chapitre 3

Suites

Définition 3 : Borne supérieure

On appelle **borne supérieure** d'une partie F d'un ensemble ordonné fini E le **plus petit** des majorants de F .

En d'autres termes,

$$(3.1) \quad a = \sup F \Leftrightarrow \forall y \in F, \left[a \leq y \Leftrightarrow (\forall x \in F, x \leq y) \right]$$

Théorème 3.1 : Théorème de la suite monotone

Soit $(u_n)_{n \in \mathbb{N}}$ une suite croissante de $\mathbb{R}^{\mathbb{N}}$.

Si (u_n) est majorée, alors elle converge vers sa borne supérieure.

Sinon, si (u_n) n'est pas majorée, alors elle admet $+\infty$ pour limite.

3.1 Comparaison de suites

Définition 4 : Suites équivalentes

Deux suites u_n et v_n sont dites **équivalentes** en l'infini s'il existe une suite w_n tendant vers 1 en l'infini telle que $u_n = w_n \times v_n$.

Autrement dit :

$$u_n \sim v_n \Leftrightarrow \exists w_n \xrightarrow{+\infty} 1 \text{ tq } u_n = w_n v_n$$

Définition 5 : $O(\dots)$ et $o(\dots)$

Si x_n est une suite de $(E, N)^{\mathbb{N}}$ et (α_n) une suite de $\mathbb{R}^{\mathbb{N}}$:

$$(3.3) \quad \begin{aligned} x_n &= O(\alpha_n), \text{ si } \forall M \in R^+, \exists n_0, \forall n \in \mathbb{N}, \quad n \geq n_0 \implies N(x_n) \leq M|\alpha_n| \\ x_n &= o(\alpha_n), \text{ si } \forall \varepsilon > 0, \exists n_0, \forall n \in \mathbb{N}, \quad n \geq n_0 \implies N(x_n) \leq \varepsilon|\alpha_n| \end{aligned}$$

Définition 6 : $O(\dots)$ et $o(\dots)$ dans \mathbb{R}

Si $(\alpha_n)_n$ est une suite à valeurs dans \mathbb{R}^* ,

$$(3.4) \quad \begin{aligned} x_n &\underset{n \rightarrow +\infty}{=} O(\alpha_n), \text{ si et seulement si } \frac{x_n}{\alpha_n} \text{ est bornée} \\ x_n &\underset{n \rightarrow +\infty}{=} o(\alpha_n), \text{ si et seulement si } \frac{x_n}{\alpha_n} \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} 0 \end{aligned}$$

(ATTENTION) Une suite ne peut pas, à notre niveau, être ~ 0 , en $o(0)$ ou $O(0)$, car la définition dirait que la suite est nulle à partir d'un certain rang.

3.2 Suites de Cauchy

Définition 7 : Suite de CAUCHY

Une suite $(x_n)_n$ dans (E, N) est dite de Cauchy si

$$(3.5) \quad \forall \varepsilon > 0, \exists n_0, \forall (n, p) \in \mathbb{N}^2, n \geq n_0 \implies \boxed{N(x_{n+p} - x_n) < \varepsilon}$$

Chapitre 4

Nombres complexes

4.1 Plan complexe

Définition 8 : Corps complexe $(\mathbb{C}, +, \times)$

Un **nombre complexe** est un élément $(a, b) \in \mathbb{R}^2$. L'ensemble des nombres complexes est noté \mathbb{C} , c'est un corps muni des lois suivantes :

Addition $(a, b) + (c, d) = (a + c, b + d)$
de neutre $(0, 0)$

Multiplication $(a, b) \times (c, d) = (ac - bd, ad + bc)$
de neutre $(1, 0)$

Théorème 8.1

$(\mathbb{C}, +, \times)$ est un corps (*cf.* tableau 4.1 page 16 pour la définition d'un corps)

Définition 9 : Module

Soit $z = x + iy$ un nombre complexe. On appelle **module** la valeur $|z| = \sqrt{x^2 + y^2}$

4.2 Nombres complexes de module 1

Définition 10

On note \mathcal{U} l'ensemble des nombres complexes de module 1.
Le disque unité est l'ensemble de ses points.

Propriétés

- \mathcal{U} est stable par le produit \times
- $z \in \mathcal{U} \iff \bar{z} = \frac{1}{z}$

Deuxième partie

Structures algébriques usuelles

		Groupe	Groupe Abélien	Anneau	Corps
Loi $(+/*)$	Neutre e (ou 0)	✓	✓	✓	✓
	Assossiative	✓	✓	✓	✓
	Symétrique (admet a^{-1})	✓	✓	✓	✓
	Commutative		✓	✓	✓
Loi \times	Neutre 1			✓	✓
	Associative			✓	✓
	Distributive de la loi $+$			✓	✓
	Commutative				✓
	Inversible				✓

TABLE 4.1 – Tableau récapitulatif des définitions

Chapitre 5

Groupes et sous-groupes

5.1 Définition d'un groupe

Définition 1 : Groupe

On appelle **groupe** le couple $(G, *)$ où G est un ensemble muni d' $*$, une Loi de Composition Interne (LCI) associative, symétrique, et admettant un neutre.

5.2 Produit fini de groupes

Définition 2 : Groupe Produit

Soient $(G, *)$ et (G', \circ) deux groupes.
Le groupe $(G \times G', \square)$ tel que

$$(x, x') \square (y, y') = (x * y, x' \circ y')$$

est un groupe appelé **groupe produit** de G et G'

Exemple : Groupe de KLEIN

Le groupe $(\mathbb{Z}/2\mathbb{Z} \times \mathbb{Z}/2\mathbb{Z})$ est appelé **groupe de KLEIN**. C'est un groupe produit, il n'est pas isomorphe à $\mathbb{Z}/4\mathbb{Z}$, et il a la spécificité de ne pas être cyclique.

5.3 Sous-groupe

Définition 4 : Sous-groupe

Soit $(G, *)$ un groupe, et soit H une partie de G

On dit que H est un **sous-groupe** de G si, muni de la LCI $*$, H est un groupe stable par $*$.

Théorème 4.1 : Caractérisation d'un sous-groupe

Avec les notations précédentes, H est un sous-groupe de G si :

- H n'est pas vide
- $\forall (x, y) \in H^2, x * y^{-1} \in H$.

En général, pour vérifier que H est non vide, on vérifie que le neutre e de G est aussi dans G .

Théorème 4.2 : Intersection de sous-groupes

Soit $(H_i)_{i \in \mathbb{N}}$ une famille de sous-groupes.

Alors $H = \bigcap_{i \in \mathbb{N}} H_i$ est un sous-groupe.

Preuve 4.2.1 Avec les notations précédentes, montrons que H est un sous-groupe :

$$\begin{aligned} \forall i \in \mathbb{N}, e \in H_i &\implies e \in H \\ \forall (x, y) \in H^2, \forall i \in \mathbb{N}, (x, y) \in H_i^2, \text{ donc } x * y^{-1} \in H_i &\implies x * y^{-1} \in H \end{aligned}$$

Ainsi, H respecte les propriétés de caractérisation d'un sous-groupe, donc H est un sous-groupe. \square

Définition 5 : Sous-groupe engendré

Soit G un groupe, et soit A une partie de G .

L'intersection des sous-groupes de G contenant A est le plus petit sous-groupe contenant A .

On le note $\langle A \rangle$, et on dit que c'est le **sous-groupe engendré** par A .

Quand $A = \{a\}$ est une partie à un seul élément, on dit que $\langle a \rangle$ est un **groupe monogène**

Théorème 5.1 : Sous-groupes de $(\mathbb{Z}, +)$

Pour tout sous-groupe H de $(\mathbb{Z}, +)$, $\exists n \in \mathbb{N}$ tel que $H = n\mathbb{Z}$

Preuve 5.1.1 Soit H un sous-groupe. Si $H = \{0\}$, alors $H = 0\mathbb{Z}$.

Supposons maintenant que H contient au moins un entier.

Soit n le plus petit entier de H . Il convient de dire que $n\mathbb{Z} \in H$.

Soit m un entier quelconque de H . Effectuons sa division euclidienne par n :

$$m = nq + r \quad 0 \leq r < n$$

$$nq \in H, m \in H \implies \boxed{r \in H}$$

Or n étant le plus petit entier dans H , r dans H étant inférieur à n , $r = 0$, donc $m = nq$ \square

5.4 Morphismes de groupes

5.4.1 Définition

Définition 6 : Morphisme de groupe

On appelle **morphisme** d'un groupe $(G, *)$ à un groupe (H, \times) l'application f telle que

$$(5.1) \quad \forall (x, y) \in G^2, f(x * y) = f(x) \times f(y)$$

5.4.2 Propriétés d'un morphisme de groupe

Théorème 6.1 : Image et image réciproque d'un sous-groupe

L'image d'un sous-groupe par un morphisme est un sous-groupe.

L'image réciproque d'un sous-groupe par un morphisme est un sous-groupe

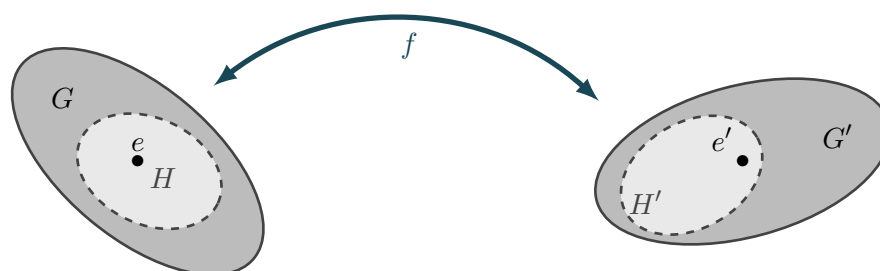


FIGURE 5.1 – Image et image réciproque d'un sous-groupe par un morphisme f

Théorème 6.2 : Condition d'injectivité d'un morphisme

Soit f un morphisme de groupes de $(G, *)$ dans (H, \times) . Alors :

f est injective $\Leftrightarrow \text{Ker } f = \{e\}$

f est surjective $\Leftrightarrow \text{Im } f = H$

5.4.3 Isomorphismes

Définition 7 : Isomorphisme

Un morphisme de groupe bijectif est appelé **isomorphisme**

Théorème 7.1 : Réciproque d'un isomorphisme

La bijection réciproque d'un isomorphisme est un isomorphisme.

5.5 Groupes monogènes et cycliques

5.6 Ordre d'un élément dans un groupe

Définition 8 : Éléments nilpotents

Un élément est **nilpotent** si, composé par lui même, il peut être nul :

$$(5.2) \quad \begin{cases} a \text{ nilpotent} \\ a \neq 0 \end{cases} \Leftrightarrow \exists p \in \mathbb{N}^+ \text{ tel que } a^p = 0$$

5.7 Classe d'équivalence

Définition 9 : Relation d'équivalence

Une relation d'équivalence \mathcal{R} est une relation binaire caractérisée de la manière suivante :

$$(5.3) \quad \left| \begin{array}{ll} \forall x \in E, & x\mathcal{R}x \quad \text{(Réflexivité)} \\ \forall (x, y) \in E^2, & x\mathcal{R}y \Rightarrow y\mathcal{R}x \quad \text{(Symétrie)} \\ \forall (x, y, z) \in E^3, & (x\mathcal{R}y \text{ et } y\mathcal{R}z) \Rightarrow x\mathcal{R}z \quad \text{(Transitivité)} \end{array} \right.$$

Définition 10 : Relation d'ordre

Une relation d'ordre \mathcal{R} est également une relation binaire. Elle se caractérise de la manière suivante :

$$(5.4) \quad \left| \begin{array}{ll} \forall x \in E, & x\mathcal{R}x \quad \text{(Réflexivité)} \\ \forall (x, y) \in E^2, & (x\mathcal{R}y \text{ et } y\mathcal{R}x) \Rightarrow x = y \quad \text{(Anti-symétrie)} \\ \forall (x, y, z) \in E^3, & (x\mathcal{R}y \text{ et } y\mathcal{R}z) \Rightarrow x\mathcal{R}z \quad \text{(Transitivité)} \end{array} \right.$$

(ATTENTION) Bien savoir ce que signifient Symétrie et Anti-symétrie

5.8 Idéaux de \mathbb{Z}

Définition 11

Un élément de $\mathbb{Z}/n\mathbb{Z}$ est la classe des éléments ayant tous le même reste par la division euclidienne par n .

E.g. : Dans $\mathbb{Z}/3\mathbb{Z}$, l'élément $\bar{1}$ est la classe des éléments de \mathbb{Z} ayant tous le même reste $\bar{1}$ dans leur division par 3.

Théorème 11.1 : Indicatrice d'EULER

C'est la fonction φ telle que

$$\varphi(n) = \text{Card}(\{(\mathbb{Z}/n\mathbb{Z})^*\})$$

Troisième partie

Algèbre

Chapitre 6

Réduction des Endomorphismes

Méthode

Valeurs propres

Pour montrer que λ est une valeur propre d'un endomorphisme u d'un espace vectoriel E , on peut :

- Revenir à la définition, et trouver un vecteur propre x tel que $u(x) = \lambda x$
- Montrer que l'application $f - \lambda \text{Id}_E$ est non-injective, c'est-à-dire que

$$\det(f - \lambda \text{Id}_E) = 0$$

- Montrer que λ est une racine du polynôme caractéristique χ_u de u
- On sait que la somme des valeurs propres est égale à la trace

Polynôme caractéristique

Si on cherche le polynôme caractéristique d'un endomorphisme u , ces étapes peuvent permettre d'avancer sa détermination :

- Prendre le polynôme dont les racines sont les valeurs propres de u . C'est à dire le polynôme $\prod (X - \lambda_i)$
- Reconnaître les coefficients de degré $n - 1$ et 0 (*cf.* théorème 7.2 page 27).
- Si la matrice est triangulaire, faire le produit des éléments diagonaux.

Polynôme minimal

Si on cherche le polynôme minimal d'un endomorphisme u dans l'espace E de dimension finie, on peut avoir recours aux affirmations suivantes :

- Le polynôme minimal divise le polynôme caractéristique.
- Si $\lambda_1, \dots, \lambda_p$ sont des valeurs propres distinctes de u d'ordre de multiplicité m_i , alors le polynôme minimal est la valeur minimale des m'_i tels que

$$\Pi_u(u) = \left(X - \lambda_i \right)^{m'_i} (u) = 0$$

- Si on a un polynôme annulateur P , on peut le factoriser pour obtenir les racines. Puisque le polynôme minimal Π_u divise P , il reste à essayer de combiner ces racines pour obtenir le polynôme de plus petit degré qui annule u .

Théorème de décomposition des noyaux

En général, dès qu'on voit une somme directe, on utilise le théorème de décomposition des noyaux.

Si on a P , un polynôme annulateur de u tel que $P(u) = 0$, alors on a $\text{Ker} P(u) = E$, et si $P(u)$ est le produit de plusieurs polynômes, par exemple A et B , on peut écrire

$$E = \text{Ker} A(u) \oplus \text{Ker} B(u)$$

Diagonalisation

6.1 Généralités

6.1.1 Matrices carrées semblables

Définition 1 : Matrices semblables

Deux matrices sont dites **semblables** si elles représentent le même endomorphisme d'un espace vectoriel de dimension finie.

Théorème 1.1

Deux matrices sont **semblables** si et seulement si il existe une matrice P inversible telle que

(6.1)

$$A_1 = P A_2 P^{-1}$$

Théorème 1.2

Deux matrices semblables ont la même trace et le même déterminant. Ce sont des **invariants de similitude**.

C'est ce dernier théorème qui permet de confirmer l'unicité de la trace et du déterminant d'un endomorphisme.

6.1.2 Sous-espace stable par un endomorphisme

Définition 2 : Sous-espace stable

Soit E un \mathbb{K} -espace vectoriel, F un sous-espace vectoriel de E , et u un endomorphisme de E . On dit que F est stable par u si :

$$(6.2) \quad \forall x \in F, u(x) \in F$$

On écrit alors que $u(F) \subset F$.

La restriction de u à F au départ et à l'arrivée est l'**endomorphisme induit**.

(ATTENTION)

La simple restriction de u à F ($u|_F$) est une application de F dans E et ce n'est pas un endomorphisme, alors que l'endomorphisme induit va de F à F .

Traduction matricielle

On va maintenant voir, conformément au programme, la traduction en termes de matrices. On se place donc dans E qui est cette fois de **dimension finie** n .

Si on reprend le sous-espace F , on peut trouver une base (e_1, \dots, e_p) . Cette base peut être complétée en une base de n vecteurs de E : $\mathcal{B} = (e_1, \dots, e_p, \dots, e_n)$. La matrice de u dans \mathcal{B} s'écrit :

$$\begin{array}{c} e_1 \\ \vdots \\ e_p \\ \hline \vdots \\ e_n \end{array} \left(\begin{array}{ccc|ccc} e_1 & \dots & e_p & & \dots & e_n \\ & & & B & & C \\ & & & & & \\ & & & 0 & & D \end{array} \right) \quad \text{où } B \text{ est la matrice de l'endomorphisme induit.}$$

6.2 Éléments propres d'un endomorphisme

Théorème 2.1 : Droite stable

Une **droite** est **stable** par un endomorphisme u ssi elle est engendrée par un vecteur propre de u .

6.2.1 Éléments propres

Définition 3 : Valeur propre, vecteur propre

Soit u un endomorphisme de E un \mathbb{K} -espace vectoriel.

Un scalaire λ est appelé **valeur propre** de u s'il existe un vecteur x non nul de E tel que

$$(6.3) \quad u(x) = \lambda x$$

Si un tel vecteur x existe, on l'appellera **vecteur propre**.

Définition 4 : Sous-espace propre

Avec les notations précédentes, on appellera **sous-espace propre (s-ep)** associé à une valeur propre λ le sous-espace vectoriel E_λ :

$$(6.4) \quad E_\lambda = \text{Ker}(u - \lambda \text{Id})$$

C'est donc le sous-espace de E contenant 0 et tous les vecteurs propres de u .

6.2.2 Éléments propres en dimension finie

(ATTENTION) On se place dans un espace E de dimension finie. Les théorèmes et définitions qui suivent ne sont valables (au programme) que dans ces conditions.

Définition 5 : Spectre

Le spectre d'un endomorphisme u de E , noté $\text{sp}(u)$, est l'ensemble de ses valeurs propres.

Théorème 5.1 : Famille finie de s-ep

La somme d'une famille finie de sous-espace propre (s-ep) E_{λ_i} de valeurs propres λ_i deux à deux distinctes est directe :

$$(6.5) \quad \sum_i E_{\lambda_i} = \bigoplus_i E_{\lambda_i}$$

Le programme officiel précise le corollaire qui va avec :

Théorème 5.2 : Famille de vecteurs propres

Toute famille de vecteurs propres dont les valeurs propres associées sont deux à deux distinctes est libre.

Théorème 5.3

Pour u un endomorphisme de E de dimension finie n , le spectre de u est fini, et de cardinal au plus n .

Théorème 5.4 : Endomorphismes commutant

Soient u et v sont deux endomorphismes d'un espace E de dimension finie.
Si u et v commutent, alors tout sous-espace propre de u est stable par v .

Preuve 5.4.1 Soit λ une valeur propre de u , et E_λ l'espace propre associé. On a :

$$E_\lambda = \text{Ker}(u - \lambda I)$$

Soit x_λ de E_λ . x_λ est un vecteur propre de u . Pour montrer qu'un sous-espace propre de u est stable par v , il faut montrer que $v(x_\lambda) \in \text{Ker}(u - \lambda I)$. Or :

$$\begin{aligned}(u - \lambda I) \circ v(x_\lambda) &= u \circ v(x_\lambda) - \lambda v(x_\lambda) \\ &= v \circ u(x_\lambda) - v(\lambda x_\lambda) \\ &= v(u(x_\lambda) - \lambda x_\lambda)\end{aligned}$$

D'où :

$$(u - \lambda I) \circ v(x_\lambda) = 0$$

Donc v est stable par tout s-ep de u . □

Définition 6 : Éléments propres d'une matrice

Soit A une matrice carrée de E un espace de dimension finie.

On appelle **valeur propre** de A un scalaire λ pour lequel il existe X tel que :

$$(6.6) \quad AX = \lambda X$$

Si ce vecteur X existe, on l'appelle **vecteur propre** de la matrice A pour la valeur propre λ .

Par extension, on définit le s-ep d'une matrice de manière similaire à la définition 4 page 25. L'ensemble des valeurs propres d'une matrice forme son spectre $\text{sp}(A)$.

6.3 Polynôme Caractéristique

Pour une matrice carrée M , on cherche un polynôme dont les valeurs propres sont les racines. C'est alors qu'est né le polynôme caractéristique.

Définition 7 : Polynôme caractéristique

Soit u un endomorphisme de E , un \mathbb{K} -espace vectoriel de dimension finie n . Soit M sa matrice dans une base associée \mathcal{B} .

Le **polynôme caractéristique** de u , noté χ_u , est le déterminant de l'application $(u - X \text{Id}_E)$. De même, le **polynôme caractéristique** de la matrice M , noté χ_M , est le déterminant de la matrice $(M - X I_n)$.

$$(6.7) \quad \chi_u = \det(u - X \text{Id}_E) \quad \chi_M = \det(M - X I_n)$$

Ce polynôme est de degré n . Le polynôme caractéristique doit être unitaire. Bien sûr, on a :

$$(6.8) \quad \chi_u = \chi_M$$

Théorème 7.1

Deux matrices semblables ont même polynôme caractéristique.

Preuve 7.1.1 (Facile)

Soient A et A' nos deux matrices semblables. Elles représentent le même endomorphisme u dans des bases différentes. Donc

$$\begin{cases} \chi_u &= \chi_A \\ \chi_u &= \chi_{A'} \end{cases}$$

D'où $\chi_A = \chi_{A'}$. □

Théorème 7.2 : Valeurs des coefficients de degrés 0 et $n - 1$

Pour une matrice M de rang n , on peut obtenir quelques coefficients du polynôme caractéristique :

$$\chi_M = (-1)^n X^n + (-1)^{n-1} \text{tr}(M) \times X^{n-1} + \dots + \det(M)$$

Pour une matrice de rang 2, le polynôme caractéristique est donc donné par

$$\chi_M = X^2 - \text{tr}(M) X + \det(M)$$

Preuve 7.2.1 Il suffit de développer le polynôme caractéristique, en sachant que les valeurs propres sont les racines, puis d'identifier.

Théorème 7.3 : Polynôme caractéristique d'une matrice triangulaire

Soit $A = \begin{pmatrix} a_{1,1} & a_{1,2} & \dots & \dots & a_{1,n} \\ 0 & a_{2,2} & \dots & \dots & a_{2,n} \\ \vdots & \ddots & \ddots & & \vdots \\ \vdots & & \ddots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & \dots & 0 & a_{n,n} \end{pmatrix}$ une matrice triangulaire supérieure.

(6.10)

Le polynôme caractéristique de cette matrice est

$$\chi_A = \det(A - X I_n) = \prod (a_{i,i} - X)$$

Théorème 7.4 : Polynôme caractéristique d'un endomorphisme induit

Soit u un endomorphisme de E . Le polynôme caractéristique d'un endomorphisme induit de u divise χ_u .

6.4 Endomorphismes et matrices carrées diagonalisables

Définition 8 : Endomorphisme diagonalisable

On dit que u de E est **diagonalisable** s'il existe une base \mathcal{B} de E dans laquelle la matrice de u est diagonalisable.

Définition 9 : Matrice diagonalisable

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

Définition 10 : Quelques définitions

Quelques définitions portant sur les polynômes :

Racine simple Une racine α du polynôme P est dite simple si elle n'est pas multiple. On dit que son ordre de multiplicité est égal à 1.

Polynôme scindé P est scindé s'il peut s'écrire comme le produit de polynômes du premier degré.

Théorème 10.1 : Caractérisation de la diagonalisation

On donne des équivalences à " u diagonalisable" :

- i. E admet une base formée des vecteurs propres de u
- ii. E est somme directe d'espaces sur lesquels u induit des homothéties
- iii. χ_u est scindé, et $\omega(\lambda) = \dim(E_\lambda)$
- iv. $n = \sum \dim E_\lambda$
- v. u admet pour matrice une matrice diagonalisable

6.5 Endomorphismes et matrices carrées trigonalisables

6.6 Endomorphismes nilpotents

6.6.1 Définition

Définition 11 : Endomorphisme nilpotent

On dit qu'un endomorphisme u est **nilpotent** d'indice $p \geq 1$ si $u^p = 0$ avec $u^{p-1} \neq 0$.

6.6.2 Propriétés en dimension finie

Théorème 11.1 : Endomorphisme nilpotent trigonalisable

Un endomorphisme u dans un espace E de dimension finie est nilpotent si et seulement si u est trigonalisable avec 0 pour seule valeur propre.

Théorème 11.2 : Majoration de l'indice de nilpotence

Dans un espace de dimension n , l'indice de nilpotence d'un endomorphisme ne dépasse pas n .

Si u est nilpotent d'indice n , il existe une base \mathcal{B} dans laquelle la matrice de u est de la forme :

$$(6.11) \quad J_n = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \ddots & & \vdots \\ \vdots & & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & 0 & & \ddots & 1 \\ 0 & \cdots & \cdots & \cdots & 0 \end{pmatrix}$$

6.7 Polynômes d'un endomorphisme

Définition 12 : Polynôme d'un endomorphisme

Soit E un \mathbb{K} -espace vectoriel, et u un endomorphisme de E .

Pour tout polynôme $P = \sum_{k=0}^p a_k X^k$, on définit l'endomorphisme

$$(6.12) \quad P(u) = \sum_{k=0}^p a_k u^k$$

$P(u)$ est appelé **polynôme de l'endomorphisme** u .

Théorème 12.1

Pour u dans $\mathcal{L}(E)$, l'application $P \mapsto P(u)$ est un morphisme d'algèbre de $\mathbb{K}[X]$ dans $\mathcal{L}(E)$

Théorème 12.2

Si d est le degré du polynôme minimal P_u de u , alors la famille $(u^k)_{k \in [0, d-1]}$ est une base de $\mathbb{K}[u]$.

Preuve 12.2.1 Soit d le degré minimal du polynôme minimal P_u . La famille $(\text{Id}, u, u^2, \dots, u^{d-1})$ est libre.

CAYLEY-HAMILTON

Théorème 12.3 : CAYLEY-HAMILTON

Si u est un endomorphisme d'un espace vectoriel fini, alors le polynôme caractéristique χ_u est un polynôme annulateur de u .
Le polynôme caractéristique est donc un multiple du polynôme minimal.

6.8 Lemme de décomposition des noyaux

Théorème 12.4 : Théorème de décomposition des noyaux

Soient deux polynômes P et Q de $\mathbb{K}[X]$. Pour P et Q premiers entre eux :

$$(6.13a) \quad \text{Ker}[(PQ)(u)] = \text{Ker}[P(u)] \oplus \text{Ker}[Q(u)]$$

Maintenant, on va voir le théorème dans une forme plus générale, qu'on déduit par récurrence sur le théorème précédent.

Théorème 12.5 : Théorème de décomposition des noyaux

Soit E un \mathbb{K} -espace vectoriel, et u un endomorphisme de E .

Si A_1, \dots, A_p sont des polynômes de $\mathbb{K}[X]$ premiers deux à deux, alors :

$$(6.13b) \quad \text{Ker}\left((A_1 \times A_2 \times \dots \times A_p)(u)\right) = \bigoplus_{i=1}^p \text{Ker}(A_i(u))$$

6.9 Polynômes annulateurs et diagonalisabilité

Définition 13 : Polynôme minimal

Il existe un unique polynôme unitaire Π_φ appelé le polynôme minimal tel que pour tout

└ morphisme φ , $\Pi_\varphi(\varphi) = 0$ CÀD $(\Pi_\varphi) = \text{Ker}(\varphi)$

Théorème 13.1 : Formule de GRASSMAN

Si V et W sont deux espaces vectoriels de dimension finie de E alors :

(6.14)

$$\dim(V + W) = \dim V + \dim W - \dim(V \cap W)$$

6.10 Endomorphismes à polynôme minimal scindé

Chapitre 7

Topologie des espaces vectoriels normés

Méthode

Application continue

Soient E et F deux espaces vectoriels normés. Soit une application continue $f : E \rightarrow F$.

- $f : A \in E \rightarrow F$ conserve :
 - les parties compactes
 - les parties connexes par arcs
- $f^{-1} : F \rightarrow E$ conserve :
 - les parties fermées
 - les parties ouvertes

7.1 Normes et espaces vectoriels normés

7.1.1 Rappels

Définition 14 : Espace vectoriel

Soit \mathbb{K} un corps (\mathbb{R} ou \mathbb{C}).

E est un \mathbb{K} -**espace vectoriel** s'il respecte les conditions suivantes :

- | | | | | |
|-------|-------|--|---|----------------------------------|
| (7.1) | (i) | $(E, +)$ est un | <u>groupe abélien</u> | Groupe pour la loi $+$ |
| | (ii) | $\forall x \in E,$ | $1 \cdot x = x$ | Neutre multiplicatif |
| | (iii) | $\forall (\alpha, \beta) \in \mathbb{K}^2, \forall x \in E,$ | $(\alpha + \beta)x = \alpha x + \beta x$ | Distributivité pour \mathbb{K} |
| | (iv) | $\forall \alpha \in \mathbb{K}, \forall (x, y) \in E^2,$ | $\alpha(x + y) = \alpha x + \alpha y$ | Distributivité pour E |
| | (v) | $\forall \alpha \in \mathbb{K}, \forall (x, y) \in E^2,$ | $\alpha \cdot (\beta \cdot y) = (\alpha \cdot \beta) \cdot x$ | Associativité |

7.1.2 Norme

Définition 15 : Définition de la norme

Soit E un espace vectoriel de \mathbb{K} . Une **norme** est une application $N : E \rightarrow \mathbb{R}^+$ vérifiant :

$$(7.2) \quad \begin{array}{ll} \begin{array}{l} (i) \quad \forall x \in E, N(x) = 0 \implies x = 0 \\ (ii) \quad \forall x \in E, \forall \lambda \in \mathbb{K}, N(\lambda x) = |\lambda|N(x) \\ (iii) \quad \forall (x, y) \in E^2, N(x + y) \leq N(x) + N(y) \end{array} & \begin{array}{l} \text{Séparation} \\ \text{Homogénéité} \\ \text{Inégalité triangulaire} \end{array} \end{array}$$

Et le couple (E, N) est l'**espace vectoriel normé** associé.

Théorème 15.1 : Norme N_2

$$N_2 : f \mapsto \left(\int_{[a,b]} |f|^2 \right)^{\frac{1}{2}} \text{ est une norme sur } \mathcal{C}([a, b], \mathbb{K})$$

7.1.3 Distance

Il y a plusieurs manières de définir la distance. Si on se place dans un espace vectoriel normé, on peut utiliser la norme pour définir la distance, comme dans la définition 17. Sinon, si l'espace est quelconque, la distance peut avoir la définition générale suivante :

Définition 16 : Distance dans un espace quelconque

Soit E un ensemble. On appelle **distance** dans E toute application $d : E \times E \rightarrow \mathbb{R}^+$ telle que :

$$(7.3) \quad \begin{array}{ll} \begin{array}{l} (i) \quad \forall x \in E, \quad d(x, x) = 0 \\ (ii) \quad \forall (x, y) \in E^2, \quad d(x, y) = d(y, x) \\ (iii) \quad \forall (x, y, z) \in E^3, \quad d(x, z) \leq d(x, y) + d(y, z) \end{array} & \begin{array}{l} \text{Séparation} \\ \text{Symétrie} \\ \text{Inégalité triangulaire} \end{array} \end{array}$$

Définition 17 : Distance associée à une norme

Soit $(E, \|\cdot\|)$ un espace vectoriel normé

La **distance** d associée à la norme $\|\cdot\|$ est l'application :

$$(7.4) \quad \begin{array}{l} d : E^2 \rightarrow \mathbb{R}^+ \\ (x, y) \mapsto \|x - y\| \end{array}$$

7.1.4 Boules

Définition 18 : Boule

Dans un espace vectoriel normé (E, N) , on définit les boules centrées en a et de rayon r

Boule ouverte de rayon r centrée en a : $x \in E | N(x - a) < r$
Boule fermée de rayon r centrée en a : $x \in E | N(x - a) \leq r$
Sphère de rayon r centrée en a : $x \in E | N(x - a) = r$

Définition 19 : Convergence d'une suite

On dit que la suite des $(x_n)_n$ converge si l'une des conditions suivantes est vérifiée :

- (7.5)
- (i) $\exists l \in E$ tel que $(N(x_n - l)) \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} 0$
 - (ii) $\forall \varepsilon > 0, \exists n_0$ tel que $(n \geq n_0 \implies N(x_n - l) < \varepsilon)$
 - (iii) $\forall \varepsilon > 0, \exists n_0$ tel que $(n \geq n_0 \implies x_n \in B(l, \varepsilon))$

7.2 Suites d'éléments d'un espace vectoriel normé

7.3 Comparaison des normes

Définition 20 : Normes équivalentes

On dit que deux normes N_1 et N_2 sont équivalentes si

(7.6) $\exists (c, C) \in \mathbb{R}^+, \forall x \in E, cN_1(x) \leq N_2(x) \leq CN_1(x)$

Théorème 20.1 : Dimension finie

Dans un espace vectoriel de dimension finie, toutes les normes sont équivalentes.

7.4 Complets

Définition 21 : Complet

A est un **complet** si toute suite de Cauchy $(c_n)_n \in A$ admet une limite $l \in A$
 CÀD si toute suite de Cauchy est convergente

Remarque : Intuitivement, un espace est complet s'il n'a pas de « trou ». \mathbb{Q} n'est pas complet, car $\sqrt{2}$ n'est pas dans \mathbb{Q} .

Définition 22 : Espace de BANACH

Un **espace de BANACH** est un espace-vectoriel normé et complet.

7.5 Parties compactes d'un espace normé

Théorème 22.1 : BOLZANO-WEIERSTRASS

Toute suite réelle bornée possède au moins une valeur d'adhérence.

Par extension : toute suite bornée dans un espace vectoriel normé de dimension finie possède au moins une valeur d'adhérence.

On va utiliser cette propriété pour définir un compact :

Définition 23 : Compact

A est un **compact** si toute suite d'éléments $(x_n)_n \in A$ a au moins une valeur d'adhérence
CÀD on peut extraire de $(x_n)_n$ une suite $(x_{\varphi(n)})_n$ qui converge dans A

Théorème 23.1

Soit E un espace vectoriel. Les parties compactes de E sont fermées et bornées.

Théorème 23.2 : Compacts en dimension finie

Soit E un espace vectoriel de dimension finie.

Une partie de E est compacte si et seulement si elle est fermée bornée.

Théorème 23.3

Toute partie fermée d'un compact est compact

Théorème 23.4

Soit E un espace vectoriel normé. Soit A un compact de E .

Une suite d'éléments de A converge si et seulement si elle possède une unique valeur d'adhérence :

$$(7.7) \quad \forall (x_n)_n \in A, x_n \text{ converge} \Leftrightarrow \exists ! l, x_n \rightarrow l$$

7.6 Applications continues sur une partie compacte

Théorème 23.5 : Image d'une partie compacte

Soit A une partie d'un espace vectoriel normé E . Soit F un espace vectoriel normé.

Soit $f : A \subset E \rightarrow F$.

Si f est continue, l'image de tout compact de A est un compact de F .

Théorème 23.6

Soit E un espace vectoriel normé. Soit une application $f : E \rightarrow \mathbb{R}$.

Si f est continue, alors elle est bornée et atteint ses bornes.

Théorème 23.7 : Théorème de HEINE

Si (E, N) et (F, N) sont des espaces vectoriels normés, A une partie **compacte** de E , si $f \in \mathcal{C}(A, F)$, alors f est **uniformément continue**.

7.7 Connexité par arcs

7.7.1 Convexité

Définition 24 : Convexe

Un ensemble E est **convexe** si :

$$(7.8) \quad \forall (x, y) \in E^2, \forall t \in [0, 1], \boxed{tx + (1 - t)y \in E}$$

Intuitivement, un ensemble est convexe si on peut relier deux points avec une ligne contenue dans cet ensemble.

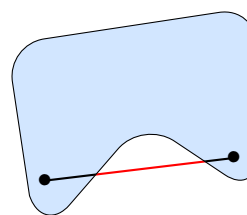


FIGURE 7.1 – Un ensemble non convexe

Définition 25 : Fonction convexe

Une fonction $f : I \mapsto \mathbb{R}$ est dite convexe si :

$$(7.9) \quad \forall (a, b) \in I^2, \forall t \in]0, 1[, \boxed{f(ta + (1 - t)b) \leq tf(a) + (1 - t)f(b)}$$

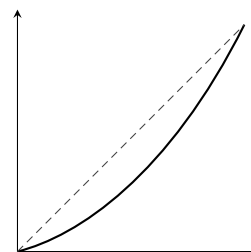


FIGURE 7.2 – Une fonction convexe

Théorème 25.1 : Convexe dans \mathbb{R}

I de \mathbb{R} est convexe si et seulement si I est un intervalle de \mathbb{R}

7.7.2 Connexité

Définition 26 : Connexe par arcs

Une partie A d'un espace vectoriel normé (E, N) est **connexe par arcs** si, pour tous points a et b de E , il existe une fonction $f : [0, 1] \rightarrow E$ continue telle que

(7.10)

$$\begin{cases} f(0) = a \\ f(1) = b \\ f([0, 1]) \subset A \end{cases}$$

Théorème 26.1 : Relation d'équivalence

« Il existe un chemin continu d'un point x à un point y » est une relation d'équivalence sur une partie A de E .

Les **composantes connexes** sont les classes d'équivalences de A .

Théorème 26.2 : Connexe dans \mathbb{R}

A non vide de \mathbb{R} est connexe par arcs si et seulement si A est un intervalle de \mathbb{R}

Théorème 26.3 : Image continue d'une partie connexe

Soient E et F deux espaces vectoriels. Soit l'application $f : A \in E \rightarrow F$.

Si f est continue, alors l'image de toute partie connexe par arcs est connexe par arcs dans F .

Théorème 26.4 : Théorème des valeurs intermédiaires

Soit E un espace vectoriel normé. Soit A une partie connexe par arcs de E .

Soit $f : A \rightarrow \mathbb{R}$ une application continue qui atteint $(c, d) \in \mathbb{R}$. Alors f atteint toute valeur $f(x) \in [c, d]$.

7.8 Topologie

Voici plusieurs définitions utiles à l'étude d'espaces vectoriels normés :

Définition 27 : Ouvert

Une partie E est un **ouvert** si, pour tout élément x de E , il existe une boule centrée en x incluse dans E (cf. FIGURE 7.3)

Définition 28 : Fermé

Un espace vectoriel F est dit **fermé** si son complémentaire \overline{F} est un ouvert

Pour différencier un ouvert d'un fermé, prenons le schéma ci-contre :

La partie en **rouge** est un ouvert noté O , celle en **bleue** est un fermé noté F .

En effet : il n'existe aucun disque centré en $y \in O + F$ inclus dans la partie $O + F$, donc $O + F$ n'est pas un ouvert. Par contre, pour tout point $x \in O$, on peut trouver une boule incluse dans O .

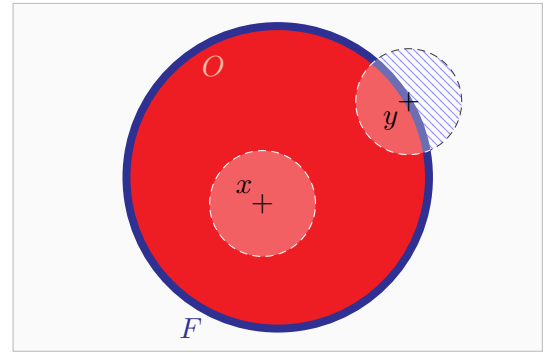


FIGURE 7.3 – Ouvert / Fermé

Théorème 28.1 : Caractérisation d'un fermé

$F \subset E$ est un **fermé ssi** toute suite convergente de F a sa limite dans F

Définition 29 : Intérieur, Adhérence

L'**intérieur** de B , noté $\overset{\circ}{B}$, est la réunion des parties ouvertes contenues dans B .
L'**adhérence** de A , notée \overline{A} est l'intersection des parties fermées contenant A .

Propriétés

- $A \text{ fermé} \Leftrightarrow A = \overline{A}$
- $\underbrace{\text{Fr}(A)}_{\text{frontière}}$ est un fermé
- $\bigcup_{\text{finie}} \text{fermés} = \text{fermé}$
- $\bigcap \text{fermés} = \text{fermé}$

Théorème 29.1

Un **complet** A d'un espace vectoriel normé E est **fermé**.

La réciproque (*Les parties complètes sont les parties fermées*) est vraie si E est un espace de BANACH.

Quatrième partie

Analyse

Chapitre 8

Séries

Méthode

Étude d'une série

Prenons le cas d'étude d'une série : $\sum u_n$

1. Vérifier que $\sum u_n$ est positive.

Si elle ne l'est pas, on peut prendre $N(\sum u_n)$. Dans \mathbb{R} , on prendra $|\sum u_n|$.

2. Utiliser un théorème de comparaison pour ramener à des séries facilement étudiables. On peut :

- Trouver un équivalent (en utilisant des Développements Limités (DLs))
- Trouver une domination en $o(\dots)$ ou en $O(\dots)$
- Majorer/Minorer explicitement, mais c'est rare

8.1 Définitions

Définition 1

La série S de terme général u_n est la suite $(S_n)_{n \in \mathbb{N}}$ où on définit S_n de manière suivante.

$$\underbrace{S_n = \sum_{k=0}^n \underbrace{u_k}_{\text{Terme général de la série}}}_{\text{Somme partielle}}_{\text{Suite des sommes partielles}}$$

Définition 2 : Convergence d'une série

On dit que la série des u_n converge s'il existe l tel que $l = \lim_{n \rightarrow \infty} S_n$ existe.

S'il la suite $(u_n)_n$ ne converge pas vers 0, on dit que sa série S_n **diverge grossièrement**

Théorème 2.1 : Théorème suite-série

La série $S_n = \sum_{k=0}^n (a_{k+1} - a_k)$ converge si et seulement si la suite (a_n) converge.

8.2 Séries à termes positifs

Définition 3 : Série À Termes Positifs

On appelle **Série À Termes Positifs (SATP)** toute série de terme général u_n réel tel que, à partir d'un certain rang, $u_n \geq 0$.

Théorème 3.1 : Convergence des SATP

Si $\sum u_n$ est une SATP, alors :

$$(8.1) \quad \sum u_n \text{ converge} \Leftrightarrow \sum_{k=0}^n u_k \text{ est majorée}$$

8.2.1 Comparaison des SATP

Théorème 3.2 : Théorème de comparaison des SATPs

Si on a deux suites u_n et v_n de $\mathbb{R}^{\mathbb{N}}$ telles qu'on ait une des conditions suivantes :

$$\begin{cases} u_n \leq v_n \\ u_n = o(v_n) \end{cases}, \text{ alors } \sum v_n \text{ converge} \implies \sum u_n \text{ converge.}$$

$$u_n = O(v_n)$$

On a également la contraposée : $\sum u_n \text{ diverge} \implies \sum v_n \text{ diverge}$

Théorème 3.3 : 2^e théorème de comparaison des SATPs

Soient $(a_n)_{n \in \mathbb{N}}$ et $(b_n)_{n \in \mathbb{N}}$ deux suites positives.

Si $u_n \sim v_n$, alors u_n et v_n sont de même nature.

Théorème 3.4 : CÉSARO

Si $\sum \alpha_n$ est une SATP divergente, et que (β_k) est une suite complexe convergente vers β , alors la suite (S_n) de terme général :

$$S_n = \frac{\sum_{k=0}^n \alpha_k \beta_k}{\sum_{k=0}^n \alpha_k}$$

(définie à partir d'un certain rang) converge vers β .

La moyenne de CÉSARO apparait en prenant la suite $\alpha_k = 1 \forall k$, car alors $\sum \alpha_k = n$ et :

$$S_n = \frac{\sum_{k=0}^n \beta_k}{n}$$

C'est la moyenne des termes de la suite β_k , et on sait qu'elle converge si β_k converge.

Preuve 3.4.1 L'idée est de séparer la somme en deux. Prenons $\varepsilon > 0$. Soit l la limite de la suite β_k .

Soit N tel que $\forall n \geq N, |\beta_n - l| < \varepsilon$. Alors :

$$S_n - l = \frac{\sum_{k=0}^N \alpha_k (\beta_k - l)}{\sum_{k=0}^n \alpha_k} + \frac{\sum_{k=N}^n \alpha_k (\beta_k - l)}{\sum_{k=0}^n \alpha_k}$$

La somme allant jusqu'à N ne dépendant plus de n :

$$S_n - l \leq \frac{\text{constante}}{\sum_{k=0}^n \alpha_k} + \frac{\sum_{k=N}^n \alpha_k}{\sum_{k=0}^n \alpha_k} \cdot \varepsilon$$

$$S_n - l \leq \frac{\text{constante}}{\pm\infty} + 1 \cdot \varepsilon$$

On a majoré par quelque chose d'aussi petit qu'on veut, et alors S_n converge \square

8.2.2 Règle de d'ALEMBERT

Lemme

Pour toute suite (u_n) strictement positive, s'il existe une suite (α_n) strictement

$$(8.2) \quad \left\{ \begin{array}{l} \text{positive telle que } \frac{u_{n+1}}{u_n} \leq \frac{\alpha_{n+1}}{\alpha_n}, \text{ alors} \\ u_n \underset{+\infty}{=} O(\alpha_n) \end{array} \right.$$

Théorème 3.5 : Règle de d'ALEMBERT

$$(8.3) \quad \left\{ \begin{array}{l} \text{Si, à partir d'un certain rang, } \left\{ \begin{array}{l} u_n > 0 \\ \frac{u_{n+1}}{u_n} \rightarrow l \end{array} \right. \text{ alors :} \\ \left\{ \begin{array}{l} \text{Si } l > 1, \sum u_n \text{ diverge grossièrement} \\ \text{Si } l < 1, \sum u_n \text{ converge} \end{array} \right. \end{array} \right.$$

Ce théorème est peu utile car il est « trop vrai ».

8.3 Séries alternées

Définition 4 : Série alternée

La série $\sum u_n$ est une **série alternée** s'il existe (α_n) une suite positive et $\varepsilon \in \{-1; 1\}$ tels que $u_n = \varepsilon(-1)^n \alpha_n$

Théorème 4.1 : Théorème spécial des séries alternées (TSSA)

$$\text{Si } \left\{ \begin{array}{l} \sum u_n \text{ est une série alternée} \\ (|u_n|) \text{ est décroissante} \\ (|u_n|) \underset{+\infty}{\rightarrow} 0 \end{array} \right. , \text{ alors } \sum u_n \text{ converge et } \forall n \geq 0, \left| \sum_{k=n}^{+\infty} u_k \right| \leq |u_n|$$

(ATTENTION) Ne pas oublier les valeurs absolues pour l'étude des séries alternées.

8.4 Hors programme

Tous les théorèmes vus ici sont à démontrer.

Théorème 4.2 : Transformation d'ABEL

Soient deux suites (a_n) et (b_n) de $\mathbb{K}^{\mathbb{N}}$. On note $B_n = \sum_{k=0}^n b_k$. Alors :

$$(8.4) \quad \sum_{k=0}^n a_k b_k = a_n B_n + \sum_{i=0}^{n-1} (a_i - a_{i+1}) B_i$$

On peut en déduire, si on a les conditions $\left\{ \begin{array}{l} \sum (a_i - a_{i+1}) \text{ CVA vers } 0 \\ B_n = \sum_{k=0}^n b_k \text{ est bornée} \end{array} \right.$, que $\sum a_k b_k$ converge.

Preuve 4.2.1 On remarque que $b_i = B_i - B_{i-1}$, avec $b_0 = B_0$. Il vient :

$$\begin{aligned} \sum_{k=0}^n a_k b_k &= a_0 b_0 + \sum_{k=1}^n a_k (B_k - B_{k-1}) \\ &= a_0 b_0 + \sum_{k=1}^n a_k B_k - \sum_{k=1}^n a_k B_{k-1} \end{aligned}$$

On change d'indice sur la deuxième somme, et comme $b_0 = B_0$:

$$\begin{aligned} &= a_0 B_0 + \sum_{k=1}^n a_k B_k - \sum_{k=0}^{n-1} a_{k+1} B_k \\ &= \sum_{k=0}^{n-1} a_k B_k + a_n B_n - \sum_{k=0}^{n-1} a_{k+1} B_k \\ &= a_n B_n + \sum_{k=0}^{n-1} (a_k - a_{k+1}) B_k \end{aligned}$$

Chapitre 9

Familles sommables de nombres complexes

9.1 Dénombrément

Définition 5 : Ensemble fini

On dit que E est un **ensemble fini** de cardinal n si E est en bijection avec $\llbracket 0, n \rrbracket$

Définition 6 : Equipotence

Deux ensembles E et F sont dits **équipotents** (ou en bijection) s'il existe une application $\varphi : E \rightarrow F$ telle que φ soit bijective.

Définition 7 : Ensemble dénombrable

On dit que E est un **ensemble dénombrable** s'il est équipotent à \mathbb{N}

Théorème 7.1

Toute partie infinie de \mathbb{N} est dénombrable.

Théorème 7.2

Un ensemble est fini ou dénombrable si et seulement si il est équipotent à une partie de \mathbb{N}

Théorème 7.3

L'ensemble \mathbb{N}^2 est dénombrable.

Preuve 7.3.1 On utilise la fonction de couplage de CANTOR :

$$(9.1) \quad f(p, q) = q + \sum_{i=0}^{p+q} i$$

On montre que cette fonction est bijective.

Théorème 7.4

Une réunion finie ou dénombrable d'ensembles dénombrables est dénombrable.

Ainsi, \mathbb{Q} est dénombrable :

$$\mathbb{Q} = \bigcup_{q \in \mathbb{N}^*} \left\{ \frac{p}{q}, p \in \mathbb{Z} \right\}$$

Théorème 7.5

L'ensemble \mathbb{R} n'est pas dénombrable.

9.2 Familles sommables

9.2.1 Pour les réels positifs

Définition 8 : Famille sommable de réels positifs

Soit une famille $(u_i)_{i \in I}$ de nombres réels positifs. Une famille est **sommable** s'il existe un réel M tel que, pour toute partie finie $J \subset I$, on ait :

$$(9.2a) \quad \sum_{i \in J} u_i \leq M$$

On définit la somme de cette famille par

$$(9.2b) \quad \sum_{i \in I} u_i = \sup_J \sum_{n \in J} u_n$$

Théorème 8.1 : Sommation par paquets

Soit une famille $(u_i)_{i \in I}$ de nombres réels positifs.

Soit $(I_n)_{n \in \mathbb{N}}$ une partition dénombrable de I .

La famille $(u_i)_{i \in I}$ est sommable si et seulement si :

- la sous-famille $(u_i)_{i \in I_n}$ est sommable pour tout n

- la série $\sum_n \left(\sum_{i \in I_n} u_i \right)$ est convergente

Dans ce cas :

$$(9.3) \quad \sum_{n=0}^{+\infty} \left(\sum_{i \in I_n} u_i \right) = \sum_{n \in I} u_n$$

Théorème 8.2 : Sommation triangulaire

Soit $(u_{p,q})_{(p,q) \in \mathbb{N}^2}$ une famille de réels positifs.

$$(9.4) \quad \begin{aligned} (u_{p,q})_{(p,q) \in \mathbb{N}^2} \text{ est sommable} &\Leftrightarrow \sum_n \left(\sum_{p+q=n} u_{p,q} \right) \text{ converge} \\ \sum_{(p,q) \in \mathbb{N}^2} u_{p,q} &= \sum_n \left(\sum_{p+q=n} u_{p,q} \right) \end{aligned}$$

9.2.2 Pour les réels et les complexes

Définition 9 : Famille sommable

Une famille $(u_i)_{i \in I}$ de $\mathbb{K}^{\mathbb{N}}$ est **sommable** si la famille de réels positifs $(|u_i|)_{i \in I}$ est sommable.

Théorème 9.1

$$(u_i)_{i \in I} \text{ est sommable} \Leftrightarrow \sum_{i \in I} u_i \text{ absolument convergente}$$

Théorème 9.2 : Sommation par paquets

Soit une famille $(u_i)_{i \in I}$ de nombres réels positifs.

Soit $(I_n)_{n \in \mathbb{N}}$ une partition **dénombrable** de I .

La famille $(u_i)_{i \in I}$ est sommable **si et seulement si** :

- la sous-famille $(u_i)_{i \in I_n}$ est sommable pour tout n
- la série $\sum_n \left(\sum_{i \in I_n} |u_i| \right)$ est convergente

Dans ce cas :

$$(9.5) \quad \sum_{n=0}^{+\infty} \left(\sum_{i \in I_n} u_i \right) = \sum_{n \in I} u_n$$

Théorème 9.3

Soient $(a_p)_{p \in \mathbb{N}}$ et $(b_q)_{q \in \mathbb{N}}$ deux familles sommables. Alors la famille $(a_p b_q)_{(p,q) \in \mathbb{N}^2}$ som-

mable et

$$(9.6) \quad \sum_{(p,q) \in \mathbb{N}^2} a_p b_q = \left(\sum_{p \in \mathbb{N}} a_p \right) \left(\sum_{q \in \mathbb{N}} b_q \right)$$

Preuve 9.3.1 *Ce théorème est issu du théorème de FUBINI (cf. théorème 25.4 page 59) : les deux suites $(a_p)_{p \in \mathbb{N}}$ et $(b_q)_{q \in \mathbb{N}}$ sont sommables, donc leurs séries convergent absolument, et les hypothèse du théorème de FUBINI sont alors vérifiées.*

Théorème 9.4 : Sommation triangulaire

Soit $(u_{p,q})_{(p,q) \in \mathbb{N}^2}$ une famille de réels positifs.

$$(9.7) \quad \begin{aligned} (u_{p,q})_{(p,q) \in \mathbb{N}^2} \text{ est sommable} &\Leftrightarrow \sum_n \left(\sum_{p+q=n} |u_{p,q}| \right) \text{ converge} \\ \sum_{(p,q) \in \mathbb{N}^2} u_{p,q} &= \sum_n \left(\sum_{p+q=n} u_{p,q} \right) \end{aligned}$$

(ATTENTION) Faire attention à bien mettre des modules partout

Chapitre 10

Probabilités sur un univers au plus dénombrable

10.1 Espace probabilisé

Définition 10 : Univers

Un **univers** Ω est l'ensemble des issues d'une expérience aléatoire.
L'ensemble des parties de l'univers Ω est noté $\mathcal{P}(\Omega)$

Définition 11 : Tribu

Une **tribu** sur un univers Ω est un sous-ensemble \mathcal{T} de $\mathcal{P}(\Omega)$ vérifiant les propriétés :

- $\Omega \in \mathcal{T}$
- $\forall A \in \mathcal{T}, \bar{A} \in \mathcal{T}$
- $\forall (A_n)_{n \in \mathbb{N}} \in \mathcal{T}^{\mathbb{N}}, \bigcup_{n \in \mathbb{N}} A_n \in \mathcal{T}$

Le couple (Ω, \mathcal{T}) est appelé **espace probabilisable**.

Propriétés

Si (Ω, \mathcal{T}) est un espace probabilisable, et A_i un élément de \mathcal{T} :

- $\emptyset \in \mathcal{T}$
- $\bigcup_{\text{finie}} A_i \in \mathcal{T}$
- $\bigcap_{\text{finie}} A_i \in \mathcal{T}$
- $\forall (A_n)_{n \in \mathbb{N}}, \bigcap_{n \in \mathbb{N}} A_i \in \mathcal{T}$

- $\forall (A, B) \in \mathcal{T}^2, A \cap \overline{B} = A \setminus B$

Définition 12 : Incompatibilité, implication

Deux évènements A et B sont incompatibles si $A \cap B = \emptyset$

On dit que $A \xRightarrow{\text{implique}} B$ quand $A \subset B$

(ATTENTION) Ne pas confondre $(A \cap B = \emptyset)$ et $(P(A \cap B) = 0)$

Définition 13 : Système complet d'évènements

Soit (Ω, \mathcal{T}) un espace probabilisable.

Soit I fini ou égal à \mathbb{N}

Un **système complet d'évènements** est une suite d'évènements $(A_i)_{i \in I}$ telle que :

- $\bigcup_{i \in I} A_i = \Omega$
- $\forall (p, q) \in I^2, p \neq q, A_p \cap A_q = \emptyset$

Définition 14 : Probabilité

Soit (Ω, \mathcal{T}) un espace probabilisable. La **probabilité** est l'application $\mathbb{P} : \mathcal{T} \rightarrow [0, 1]$ telle que :

- $\mathbb{P}(\Omega) = 1$
- Pour toute suite $(A_n)_{n \in \mathbb{N}} \in \mathcal{T}^{\mathbb{N}}$ d'éléments deux à deux incompatibles :
 - $\sum \mathbb{P}(A_n)$ converge
 - $\mathbb{P}\left(\bigcup_{n=0}^{+\infty} A_n\right) = \sum_{n=0}^{+\infty} \mathbb{P}(A_n)$
(σ -additivité)

Le triplet $(\Omega, \mathcal{T}, \mathbb{P})$ est appelé **espace probabilisé**

(ATTENTION) Espace probabilisable $(\Omega, \mathcal{T}) \neq$ Espace probabilisé $(\Omega, \mathcal{T}, \mathbb{P})$

La propriété de σ -additivité existe sous forme d'inégalité quand les évènements ne sont pas incompatibles :

Théorème 14.1 : Inégalité de BOOLE

Soit $(\Omega, \mathcal{T}, \mathbb{P})$ un espace probabilisé.

Soit $(A_n)_{n \in \mathbb{N}} \in \mathcal{T}^{\mathbb{N}}$ telle que $\sum \mathbb{P}(A_n)$ converge. Alors :

$$(10.1) \quad \mathbb{P} \left(\bigcup_{n=0}^{+\infty} A_n \right) \leq \sum_{n=0}^{+\infty} \mathbb{P}(A_n)$$

Preuve 14.1.1 On se ramène à une suite d'évènements deux à deux disjoints en introduisant la suite (C_n) telle que :

$$C_0 = A_0 \qquad C_n = A_n \setminus \bigcup_{k=0}^{n-1} A_k$$

Puisque $C_n \subset A_n$, on a :

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

10.2 Conditionnement

10.3 Indépendance

Définition 15 : Évènements indépendants

Deux évènements A et B sont indépendants lorsque

$$(10.2) \quad \mathbb{P}(A \cap B) = \mathbb{P}(A) \times \mathbb{P}(B)$$

Chapitre 11

Variables aléatoires discrètes

11.1 Espérance

11.1.1 Définitions

Définition 16 : Espérance d'une famille finie

Soit X une variable aléatoire prenant un nombre fini de valeurs x_1, x_2, \dots, x_n . L'**espérance** de X est donnée par la somme finie :

$$(11.1) \quad E(X) = \sum_{i=1}^n x_i \mathbb{P}_X(x_i)$$

On peut étendre la définition précédente au cas où les valeurs de X forment une famille sommable :

Définition 17 : Espérance d'une variable aléatoire discrète

Soit X une variable aléatoire réelle discrète. On dit que X est d'**espérance** finie si la famille $(x \mathbb{P}_X(x))_{x \in X(\Omega)}$ est sommable.

11.1.2 Propriétés

Propriétés

- L'ensemble \mathcal{E} des variables aléatoire de Ω dans \mathbb{R} et dont l'espérance est finie est un espace vectoriel
- L'espérance est une forme linéaire sur \mathcal{E}
- $\forall X \in \mathcal{E}, X(\Omega) \subset \mathbb{R}^+ \implies E(X) \geq 0$ (l'espérance est positive)
- Soit Y une variable aléatoire d'espérance finie, si X est une variable aléatoire telle que $|X| \leq Y$, alors X est d'espérance finie.
- Si X et Y sont deux lois indépendantes et admettant chacune une espérance

finie, alors XY est d'espérance finie et

$$E(XY) = E(X) E(Y)$$

11.2 Variance

11.2.1 Moment

Définition 18 : Moment d'ordre n

Soit X une variable aléatoire discrète. On dit que X admet un **moment** d'ordre m si X^m admet une espérance finie.

Théorème 18.1

Si X est une variable aléatoire admettant un moment d'ordre 2, alors X admet une espérance finie.

Théorème 18.2 : Inégalité de CAUCHY-SCHWARZ

Si X et Y sont deux variables aléatoires discrètes de moment d'ordre 2, alors XY a une espérance finie et

$$(11.2) \quad \left(E(XY)\right)^2 \leq E(X^2) E(Y^2)$$

11.2.2 Variance et écart-type

Définition 19 : Variance et Écart-type

Soit X une variable aléatoire discrète admettant un moment d'ordre 2.

On définit la **variance** par :

$$(11.3a) \quad V(X) = E\left((X - E(X))^2\right)$$

et l'**écart-type** par :

$$(11.3b) \quad \sigma(X) = \sqrt{V(X)}$$

Théorème 19.1 : Formule de KÖNIG-HUYGENS

Soit X une variable aléatoire discrète admettant un moment d'ordre 2. Alors :

$$(11.4) \quad V(X) = E(X^2) - E(X)^2$$

11.2.3 Covariance

Définition 20 : Covariance

Soient X et Y deux variables aléatoires discrètes admettant une espérance finie.

Si elle existe, on définit la **covariance** de X et de Y par :

$$(11.5) \quad \text{cov}(X, Y) = E\left((X - E(X))(Y - E(Y))\right)$$

Théorème 20.1 : Existence de la covariance

Soient X et Y deux variables aléatoires admettant un moment d'ordre 2. Alors la covariance de X et de Y existe et on a :

$$(11.6) \quad \text{cov}(X, Y) = E(XY) - E(X)E(Y)$$

Preuve 20.1.1 On a :

$$\text{cov}(X, Y) = E\left((X - E(X))(Y - E(Y))\right)$$

On développe :

$$= E\left(XY - E(X)Y - E(Y)X + E(X)E(Y)\right)$$

Par linéarité de l'espérance :

$$\begin{aligned} &= E(XY) - E(E(X)Y) - E(E(Y)X) + E(E(X)E(Y)) \\ &= ??? \end{aligned}$$

$$\text{cov}(X, Y) = E(XY) - E(X)E(Y)$$

11.3 Lois usuelles

Définition 21 : Loi de BERNOULLI

La **loi de BERNOULLI** est une distribution discrète qui prend la valeur 1 avec une probabilité p et la valeur 0 avec la probabilité $(1 - p)$.

Une variable aléatoire qui suit cette loi est appelée variable de BERNOULLI

11.3.1 Loi binomiale

Définition 22

La loi binomiale, de paramètres n et p , est la loi de probabilité d'une variable aléatoire X égale au nombre de succès rencontrés au cours d'une répétition de n épreuves de Bernoulli, p étant la probabilité de succès d'une épreuve de Bernoulli.

Autrement, c'est une variable aléatoire X telle que

$$X = Y_1 + Y_2 + \cdots + Y_n$$

où les Y_i sont des variables aléatoires indépendantes de loi de BERNOULLI.
La variable aléatoire suit une loi de probabilité :

$$(11.7) \quad \mathbb{P}(X = k) = \binom{n}{k} p^k (1-p)^{n-k}$$

Théorème 22.1 : Espérance et variance

Soit X une variable aléatoire qui suit une loi binômiale. Alors :

$$(11.8) \quad E(X) = np \qquad V(X) = np(1-p)$$

11.4 Fonctions génératrices

Définition 23 : Fonction génératrice

Soit X une variable aléatoire à valeurs dans \mathbb{N} . On définit la **fonction génératrice** G_X de X par :

$$(11.9) \quad G_X(t) = E(t^X) = \sum_k \mathbb{P}(X = k) t^k$$

pour les valeurs de t telles que la variable aléatoire t^X admette une espérance finie.

Chapitre 12

Suites de fonctions

Méthode

En général, pour la convergence simple, on **fixe** x . Pour la convergence uniforme, puisqu'on cherche la norme N_∞ , on **dérive** $f_n(x)$ pour étudier ses variations.

12.1 Convergence de suites de fonctions

Définition 24

Définitions simplifiées des différents types de convergence

(12.1)

La suite des (f_n) converge **simplement** vers $f \Leftrightarrow \forall x, (f_n(x))_n \rightarrow f(x)$

La suite des (f_n) converge **uniformément** vers $f \Leftrightarrow N_\infty^A \left(\underbrace{f_n - f}_{\in B(A, F)} \right) \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} 0$

$(f_n(x))_n$ vérifie le **critère de Cauchy de CU** $\Leftrightarrow \exists \varepsilon > 0 | n \geq n_0(\varepsilon) \Rightarrow N_\infty^A((f_n - f)) < \varepsilon$

Le critère de Cauchy de convergence uniforme est équivalent à la convergence uniforme.

Critère de Cauchy \Leftrightarrow Convergence Uniforme

Pour illustrer, on peut faire les schémas suivants :

Propriétés de la simple convergence

- $\left\{ \begin{array}{l} f : A \subset \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R} \\ (f_n(x))_n \text{ est croissante} \Leftrightarrow f \text{ est croissante} \\ (f_n(x))_n \xrightarrow[x \in A]{CVS} f \end{array} \right.$
- (autres propriétés analogues de f_n appliquées à f par CVS)

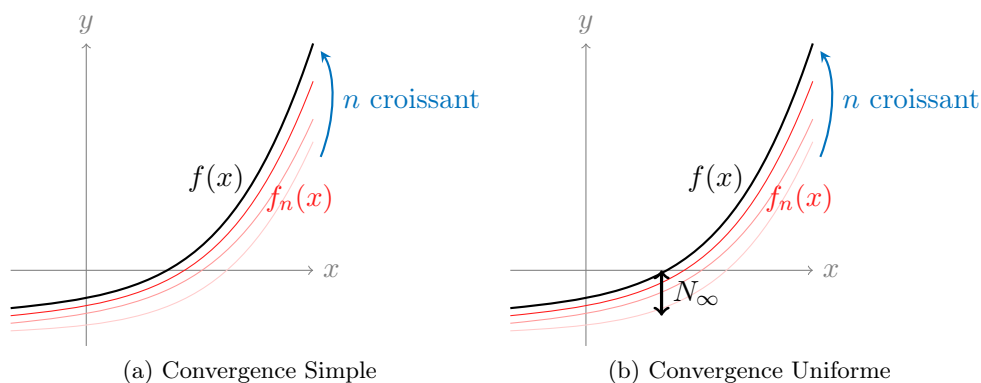


FIGURE 12.1 – Les différents types de convergence de fonction

Théorème 24.1 : Convergence par changement de base

Si $(f_n(x))_n$ converge simplement ou uniformément ssi $(f_{n,i}(x))_n$ converge de la même manière dans la base $\mathcal{B} = (e_i)$

Théorème 24.2 : Conditions nécessaire de CU^a

$$\left. \begin{array}{l} (f_n(x))_{n \in \mathbb{N}} \xrightarrow{\text{CU}} f \\ (f_n(x))_n \text{ est bornée} \end{array} \right\} \implies f \text{ est uniformément convergente bornée}$$

Théorème 24.3 : Conditions nécessaire de Non-CU

Il suffit que : $\exists (x_n)$ tel que $f(x_n) \not\rightarrow 0$ as $x \rightarrow \infty$

^{a.} CU pour Convergence Uniforme

On notera les fonctions f dont la dérivée est continue de $A \rightarrow B$ comme appartenant à l'ensemble $\mathcal{C}(A, B)$

Théorème 24.4 : Continuité par convergence

$$\left. \begin{array}{l} (f_n(x))_n \text{ continue en } a \\ (f_n(x))_n \text{ converge uniformément vers } f \end{array} \right\} \implies f \text{ est continue en } a$$

$$\left. \begin{array}{l} (f_n(x))_n \in \mathcal{C}(A, F) \\ (f_n(x))_n \text{ converge uniformément vers } f \text{ sur tout compact } \subset A \end{array} \right\} \implies f \in \mathcal{C}(A, F)$$

Théorème 24.5 : Théorème de la double limite

Si $f_n(x)$ **converge uniformément**

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \left(\lim_{x \rightarrow a} f_n(x) \right) = \lim_{x \rightarrow a} \left(\lim_{n \rightarrow \infty} f_n(x) \right)$$

Théorème 24.6 : Théorème d'approximation de WEIERSTRASS

Toute fonction $f \in \mathcal{C}([a, b], \mathbb{C})$ est **limite uniforme** d'une suite $(\mathcal{P}_n(X))_n$ de fonctions polynômes.

Le même théorème existe pour les fonctions (T-périodiques à valeurs complexes) limites d'une suite de polynômes trigonométriques.

12.2 Convergence des Séries

Définition 25

Définitions simplifiées des convergences de Séries de fonctions :

$$(12.2) \quad \begin{aligned} \sum f_n \text{ converge } \mathbf{simplemment} & \quad \text{si } \forall x \in A, \text{ la série } \sum f_n(x) \text{ converge} \\ \sum f_n \text{ converge } \mathbf{uniformément} & \quad \text{si } \left\{ \begin{array}{l} x \in A, \text{ la série } (S_n) = \sum_0^n f_n(x) \\ \text{converge uniformément} \\ x \in A, \text{ la série } (R_n) = \sum_n^\infty f_n(x) \\ \text{converge uniformément} \end{array} \right. \\ \sum f_n \text{ converge } \mathbf{normalement} & \quad \text{si } \sum N_\infty(f_n) \text{ converge} \end{aligned}$$

Pour les définitions de convergence de fonctions, se référer aux définitions 12.1.

On retrouve certaines propriétés des fonctions :

Théorème 25.1

$$\left. \begin{array}{l} (u_n(x))_n \in \mathcal{C}(A, F) \\ (u_n(x))_n \text{ converge uniformément sur } A \end{array} \right\} \implies \sum u_n \text{ est continue sur } A$$

Théorème 25.2 : Théorème de la double limite

Si $\sum f_n$ **converge uniformément**, et qu'il existe (v_n) telle que $v_n = \lim_{x \rightarrow a} f_n(x)$, alors

$\sum v_n$ converge et on a :

$$\sum_{n=0}^{\infty} \underbrace{\left(\lim_{x \rightarrow a} f_n(x) \right)}_{=v_n} = \lim_{x \rightarrow a} \sum_{n=0}^{\infty} (f_n(x))$$

Preuve 25.2.1 C'est le théorème 24.5 de la double limite de suites de fonctions appliqué aux séries

12.3 Propriétés de la somme

Théorème 25.3 : Intégration sous le signe somme

$$(12.3) \quad \left\{ \begin{array}{l} u_k \in \mathcal{CM}(I, \mathbb{C}) \text{ et intégrable sur } I \\ S \in \mathcal{CM}(I, \mathbb{C}) \\ \sum u_n \rightarrow S \\ \boxed{\sum |u_n| \text{ converge}} \end{array} \right. \Rightarrow \begin{array}{l} S \text{ est intégrable, et} \\ \int_I S = \sum_{n=0}^{+\infty} \left(\int_I u_n \right) \end{array}$$

12.4 Séries doubles

Théorème 25.4 : Intersion des sommations de FUBINI

$$(12.4) \quad \text{Si } \left\{ \begin{array}{l} (u_{p,q})_{p,q} \text{ est une suite double complexe} \\ \forall q \in \mathbb{C}, \left(\sum |u_{p,q}| \right)_{p,q} \text{ converge} \\ \forall q \in \mathbb{C}, \sum \left(\sum_{p=0}^{+\infty} |u_{p,q}| \right) \text{ converge} \end{array} \right. , \text{ alors :}$$

$$\sum_{q=0}^{+\infty} \left(\sum_{p=0}^{+\infty} u_{p,q} \right) = \sum_{p=0}^{+\infty} \left(\sum_{q=0}^{+\infty} u_{p,q} \right)$$

Avec les deux séries $\left(\sum \left(\sum_{p=0}^{+\infty} u_{p,q} \right) \right)_q$ et $\left(\sum \left(\sum_{q=0}^{+\infty} u_{p,q} \right) \right)_p$ qui convergent

Chapitre 13

Séries Entières

Certains objets mathématiques ont des développements de Taylor exacts. C'est le cas notamment des polynômes, qui sont déjà des développements de Taylor. Les séries géométriques par exemple ont également un développement de Taylor exact : pour la série de terme général q^k , on a $\sum_0^\infty q^k = \frac{1}{1-q}$. Sinon, la plupart du temps, le développement de Taylor est précis jusqu'à un dernier terme qu'on ne peut calculer, mais qu'on peut quand même approximer en $o(\dots)$ ou en $O(\dots)$

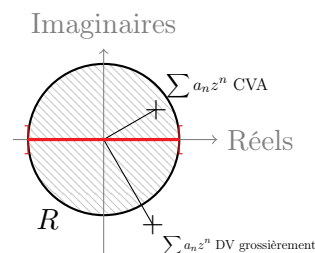
13.1 Généralités

Définition 26

Soit $(a_n)_n$ une suite de nombres complexes. On appelle **série entière** de la variable complexe z la série de fonctions $\sum a_n z^n$.

Le **rayon de convergence** est la borne supérieure de $I = \{z \in \mathbb{R}_+, \sum |a_n| z^n \text{ converge}\}$. C'est en fait la valeur maximale de z pour laquelle la série converge.

Pour calculer le rayon de convergence, il importera peu de l'étudier pour les valeurs absolues, les nombres imaginaires, etc... car c'est seulement un rayon. Dans les réels, on appellera l'intervalle $]-R, R[$ l'intervalle ouvert de convergence.



Lemme d'ABEL

S'il existe ρ tel que la suite $(a_n \rho^n)$ soit bornée, alors

$$(13.1) \quad \forall z < \rho, |a_n z^n| \leq M \left(\frac{|z|}{\rho} \right)^n \quad \text{et} \quad \sum a_n z^n \text{ converge absolument}$$

13.1.1 Rayon de Convergence

Théorème 26.1 : Relations de comparaisons

Si $\sum a_n z^n$ et $\sum b_n z^n$ sont deux séries entières de rayons de convergence respectifs R_a et R_b , alors :

- i. Si $|a_n| \leq |b_n|$, alors $R_a \geq R_b$
- ii. Si $a_n = O(b_n)$, alors $R_a \geq R_b$
- iii. Si $a_n = o(b_n)$, alors $R_a \geq R_b$
- iv. Si $a_n \sim b_n$, alors $R_a = R_b$

Théorème 26.2

Sur le disque ouvert D_R de convergence $] - R, R[$, la série entière $\sum a_n z^n$ converge **absolument**.

Théorème 26.3

Sur le disque ouvert D_R de convergence $] - R, R[$, la série entière $\sum a_n z^n$ converge **uniformément** et sa somme est une fonction **continue**.

Théorème 26.4

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

Pour déterminer le rayon, il existe plusieurs méthodes, mais on se servira principalement du théorème suivant étant une conséquence de la règle de d'ALEMBERT :

13.1.2 D'ALEMBERT

Théorème 26.5 : Règle de d'ALEMBERT

Pour la série entière $\sum a_n z^n$ non nulle à partir d'un certain rang, et qu'il existe l tel que

$$\left| \frac{a_{n+1}}{a_n} \right| \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} l \quad \text{alors} \quad l = \frac{1}{R}$$

La réciproque est fautive : si on connaît R , on n'a pas $\left| \frac{a_{n+1}}{a_n} \right|$

Sinon, on a aussi $\sqrt[n]{|a_n|} \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} l$

Preuve 26.5.1 Il suffit d'appliquer d'Alembert (cf. théorème 3.5 page 43) à la série de terme général $|a_n z^k|$ (qui est une SATP) qu'on prend à partir d'un certain rang tel que $a_n \neq 0$. Donc il existe une limite l telle que

$$\frac{|a_{n+1} z^{n+1}|}{|a_n z^n|} \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} l|z|$$

Donc $|a_n z^n|$ converge si $l|z| < 1$, et diverge si $l|z| > 1$.

Puisque toute série entière de rayon de convergence $R > 0$ est absolument convergente dans son disque ouvert de convergence.

(ATTENTION)

En général, il vaut mieux utiliser le théorème original (théorème 3.5 page 43). En effet, ce théorème ne s'applique que pour des séries entières fonctions de z^n . Pour une série entière du type $\sum a_n z^{n^2}$, il n'est plus valable !

13.2 Série entière d'une variable réelle

13.2.1 Primitivation

Théorème 26.6

Soit $\sum a_n z^n$ une série entière de rayon de convergence R . Sa primitive est :

$$(13.2) \quad \forall z \in]-R; R[, \quad \int_0^x \left(\sum_{n=0}^{+\infty} a_n t^n \right) dt = \sum_{n=0}^{+\infty} \frac{a_n x^{n+1}}{n+1}$$

Et la série entière $\sum \frac{a_n x^{n+1}}{n+1}$ a le même rayon de convergence R .

13.2.2 Dérivation

Théorème 26.7

La somme d'une série entière est C^∞ sur l'intervalle ouvert de convergence.

Théorème 26.8 : Dérivation terme à terme

Soit $\sum a_n z^n$ une série entière de rayon de convergence R . Sa dérivée est :

$$(13.3) \quad \forall z \in]-R; R[, \quad \left(\sum_{n=0}^{+\infty} a_n z^n \right)' = \sum_{n=1}^{+\infty} n a_n z^{n-1}$$

Et la série entière $\sum_{n=1}^{+\infty} n a_n z^{n-1}$ a le même rayon de convergence.

(ATTENTION) Le théorème de dérivation n'est valable qu'à l'intérieur du disque de convergence!

13.3 Fonctions développables en série entière

Définition 27 : Fonction développable en série entière

$f : \mathbb{K} \rightarrow \mathbb{K}$ admet un DSE en 0 s'il existe une série entière $\sum a_n z^n$ telle que

(13.4) $\forall z \in V, f(z) = \sum a_n z^n$

Cette boule ouverte de centre 0 est incluse dans le disque de convergence du Développement en Série Entière (DSE) : $V \subset]-R; R[$.

Théorème 27.1 : CNS d'un DSE

$$f : \mathbb{R} \rightarrow K \text{ est un DSE en } 0 \Leftrightarrow \int_0^x \frac{(x-t)^n}{n!} f^{n+1}(t) dt \xrightarrow{n \rightarrow \infty} 0$$

13.4 Propriétés de la somme

Continuité

Théorème 27.2

La somme d'une série entière est continue sur son disque ouvert de convergence R

Dérivabilité

Théorème 27.3 : Dérivées successives

Les dérivées successives d'une série entière de rayon de convergence $R > 0$ ont toutes le même rayon de convergence R

Théorème 27.4

Pour des séries entières avec $R = \min(R_a, R_b)$, alors :

$$\forall x \in]-R, R[, \sum a_n x^n = \sum b_n x^n \implies \forall n \in \mathbb{N}, a_n = b_n$$

Chapitre 14

Calcul Différentiel et Intégral

14.1 Dérivation

Définition 28 : Dérivabilité

$f : I \rightarrow \mathbb{R}$ est dérivable en $a \in I$ si $\lim_{x \rightarrow a} \frac{f(x) - f(a)}{x - a}$ existe.

On notera $\mathcal{D}(I, \mathbb{R})$ l'ensemble des applications dérivables de I dans \mathbb{R} .

Théorème 28.1

f dérivable $\Leftrightarrow \exists l$ tel que $f(x) \underset{x \rightarrow a}{=} f(a) + (x - a)l + (x - a)\varepsilon(x)$
Alors, l est la dérivée en a de f

Propriétés

Continuité f dérivable $\implies f$ continue

Linéarité $(f + \alpha g)' = f' + \alpha g'$

Dérivées usuelles

Application linéaire u linéaire, f dérivable ; $(u \circ f)'(x) = u \circ f'(x)$

Application multi-linéaire φ une application n -linéaire ;

$$\left(\varphi(f_1, \dots, f_n) \right)'(x) = \sum_{i=0}^n \varphi \left(f_1(x), \dots, f_{i-1}(x), f'_i(x), f_{i+1}(x), \dots, f_n(x) \right)$$

Quotient u et v dérivables ; $\left(\frac{u}{v} \right)' = \frac{u'v - uv'}{v^2}$

Composition f et g dérivables ; $(f \circ g)' = f' g'(f)$

Définition 29 : Application \mathcal{C}^1

$f \in \mathcal{C}^1(E, F)$ si l'application $f' : a \mapsto f'(a)$ existe et est continue.

Définition 30 : Dérivée k -ième

On définit récursivement la dérivée k -ième $f^{(k)}$:

$$(14.1) \quad f^{(k)} = (f^{(k-1)})'$$

Définition 31 : Application de classe \mathcal{C}^k

f est \mathcal{C}^k si f est k fois dérivable et si $f^{(k)}$ est continue.

Théorème 31.1 : LEIBNIZ

Soit φ une application bilinéaire, alors :

$$(Leibniz) \quad \varphi^{(n)}(f, g) = \sum_{k=0}^n \binom{n}{k} \varphi(f^{(k)}, g^{(n-k)})$$

14.2 Intégration

Inégalité de la moyenne

Théorème 31.2 : Cas réel

Si f est **continue** sur un intervalle $[a, b]$ et qu'il existe m et M tels que :

$$m \leq f(x) \leq M$$

Alors

$$(14.2) \quad m(b-a) \leq \int_a^b f(x) dx \leq M(b-a)$$

14.3 Primitive

Définition 32 : Primitive

F est une **primitive** de f si $\forall x, F'(x) = f(x)$.

Théorème 32.1

Si F est la primitive de f ,

$$(14.3) \quad \int_a^x f(t) dt = F(x) - F(a)$$

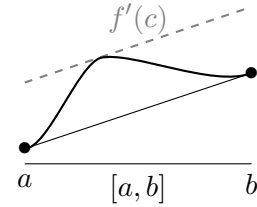
14.4 Accroissements finis

14.4.1 Cas réel

Théorème 32.2 : Accroissements finis

(14.4) $f \in \mathcal{D}(]a, b[, \mathbb{R})$, alors

$$\exists c \in]a, b[\text{ tel que } \boxed{f(b) - f(a) = (b - a)f'(c)}$$

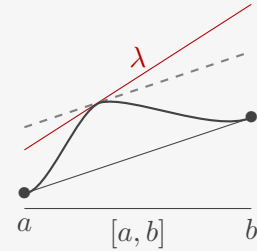


14.4.2 Cas vectoriel

Théorème 32.3 : Accroissements finis

(14.5) $f \in \mathcal{C}(]a, b[, \mathbb{R})$
Si $\exists \lambda$ tel que $\forall t \in]a, b[, N(f'(t)) \leq \lambda$, alors

$$\boxed{N(f(b) - f(a)) \leq \lambda(b - a)}$$



14.5 Formules de Taylor

Théorème 32.4 : Formules de Taylor

$f \in \mathcal{C}^{k+1}(I, E)$, avec $(a, b) \in I^2$

Taylor-Young $f(x) \underset{x \rightarrow a}{=} \sum_{k=0}^n \frac{(x-a)^k}{k!} f^{(k)}(a) + o((x-a)^n)$

Taylor-Laplace $f(x) = \overbrace{\sum_{p=0}^k \frac{(x-a)^p}{p!} f^{(p)}(a)}^{T_k(x)} + \overbrace{\int_a^x \frac{(x-t)^k}{k!} f^{(k+1)}(t) dt}^{\text{Reste intégral } R_k(x)}$

$$= (x-a)^{k+1} \int_0^1 \frac{(1-u)^k}{k!} f^{(k+1)}((1-u)a + ux) du$$

Taylor-Lagrange $f(x) = N \left(f(b) - f(a) - \sum_{p=1}^k \frac{(b-a)^p}{p!} f^{(p)}(a) \right) \leq \frac{|b-a|^{k+1}}{(k+1)!} N_{\infty}^{[a,b]}(f^{(k+1)})$

Chapitre 15

Intégrales sur un intervalle

Méthode

Définitions rapides

Intégrabilité $f(x)$ intégrable si $\int |f(x)| < +\infty$

Norme de la convergence en moyenne

$$N_1 : \int_I |f|$$

Norme de la convergence en moyenne quadratique

$$N_2 : f \rightarrow (f|f)^{\frac{1}{2}} \text{ (cf théorème 36.1 de la page 72)}$$

Pour prouver l'intégrabilité

1. Vérifier la continuité sur l'intervalle étudié
2. Remplacer la fonction par sa valeur absolue
3. Étudier les problèmes aux bornes
 - Trouver un équivalent
 - Trouver un $o(\dots)$
 - Avoir une primitive finie
4. Comparer la fonction
On pourra utiliser :
 - La fonction **exponentielle**

- L'intégrale de **Riemann** : $\frac{1}{t^\alpha}$
En particulier : f est intégrable si $\exists \alpha < 1$ tel que $f(x) x^\alpha \xrightarrow{x \rightarrow 0} 0$
- L'intégrale de **Bertrand** : $\frac{1}{|\ln(t)|^\beta t^\alpha}$

Pour intégrer

On utilisera

1. Les intégrations par partie
2. Un changement de variable
3. Cauchy-Schwarz
4. L'intégrale d'un polynôme est un polynôme

Souvent, on ne peut intégrer sur tout un intervalle comme $[0; +\infty]$. Pour y remédier, on peut poser $a > 0$ tel que notre fonction soit intégrable sur $[a; +\infty[$. Alors, la fonction est intégrable sur $\cup[a; +\infty[= \mathbb{R}^+$

15.1 Intégrabilité

À l'origine, on donne plusieurs définitions de l'intégrabilité : d'abord pour les fonctions positives, puis pour les autres en disant que c'est si $|f|$ est intégrable. On donne ici une définition plus générale :

Définition 33 : Fonction intégrable

$f(x) \in \mathcal{CM}$ est intégrable sur I si
 $\forall x \in \underbrace{J}_{\text{segment}} \subset I, \exists M \in \mathbb{R}^+ \text{ tel que } \int_J |f| \leq M$

Théorème 33.1 : Comparaison à une série

Si f est une fonction continue par morceaux, **positive** et **décroissante** sur \mathbb{R}^+ , alors la série de terme général $\left(\int_{n-1}^n f \right) - f(n)$ est une SATP convergente.

$$(15.1) \quad f \in \mathcal{L}^1 \Leftrightarrow \sum f(n) \text{ converge}$$

En cas de divergence, $\int f \underset{n \rightarrow +\infty}{\sim} \sum f(n)$

Si f est une fonction continue par morceaux, **positive**, **croissante** et majorée sur

\mathbb{R}^+ , alors la série de terme général $\left(\int_n^{n+1} f\right) - f(n)$ est une SATP convergente.

Théorème 33.2 : CNS de l'intégration

$f(x)$ est intégrable sur I si

$$\forall x \in I, \left[\int_I |f| \leq \varphi \right] \text{ où } \varphi \in \mathcal{L}^1$$

Théorème 33.3

Si f est une fonction intégrable sur I ,

(15.2)

$$\left| \int_I f \right| \leq \int_I |f|$$

15.2 Intégrales classiques

Théorème 33.4

Si $-\infty < a < b < +\infty$, alors $f : t \mapsto \frac{1}{(b-a)^\alpha}$ est intégrable sur $[a, b]$ si et seulement si $\boxed{\alpha < 1}$

Théorème 33.5 : Intégrale de Riemann

$$f : t \mapsto \frac{1}{t^\alpha} \text{ est l'intégrale de Riemann, } \begin{cases} \int_0^1 f(x)dx & \text{existe} \Leftrightarrow \alpha < 1 \\ \int_1^{+\infty} f(x)dx & \text{existe} \Leftrightarrow \alpha > 1 \end{cases}$$

15.3 Espaces vectoriels normés de fonction intégrables

Théorème 33.6 : Convergence dominée

Si $(f_n)_n$ est une suite de fonction de $\mathcal{CM}(I, K)$ convergeant simplement vers une fonction $f \in \mathcal{CM}(I, K)$, et s'il existe $\varphi \in \mathcal{L}^1$ telle que $\boxed{\forall n, |f_n| \leq \varphi}$,

alors $f \in \mathcal{L}$ et $\int_I f = \lim_{n \rightarrow +\infty} \int_I f_n$

Théorème 33.7 : Intégration terme à terme

(15.3)

$$\left. \begin{array}{l} \sum_{n=0}^{+\infty} \underbrace{f_n}_{f_n \in \mathcal{L}^1} \xrightarrow{\text{CVS}} f \\ \sum \int_I \underbrace{|f_n|}_{\text{converge}} \end{array} \right\} \Rightarrow \begin{array}{l} f \in \mathcal{L}^1 \\ \sum f_n \text{ converge} \\ \int_I f = \sum_{n=0}^{+\infty} \int_I f_n \end{array}$$

15.4 Intégrales dépendant d'un paramètre

Théorème 33.8 : Continuité

La fonction $g : x \mapsto \int_I f(x, t)$ est définie et continue sur A si

(15.4)

$$\left\{ \begin{array}{ll} \forall x \in A, & t \mapsto f(x, t) \in \mathcal{CM} \quad (\mathcal{CPM} \text{ pour } t) \\ \forall t \in I, & x \mapsto f(x, t) \in \mathcal{C} \quad (\text{Continue pour } x) \\ \forall (x, t) \in (A \times I) & |f(x, t)| \leq \varphi \quad (\text{Domination}) \\ \exists \varphi \in \mathcal{L}^1 \text{ tel que} & \end{array} \right.$$

On a aussi la version avec \mathcal{C}^k mais ce n'est pas au programme

Théorème 33.9 : Dérivabilité

La fonction $g : x \mapsto \int_I f(x, t)$ est dérivable et continue (\mathcal{C}^1) sur A si

$$\left\{ \begin{array}{l} \forall x \in A, t \mapsto f(x, t) \in \mathcal{CM} \quad (f \text{ intégrable pour } t) \\ f \text{ admet une dérivée partielle qui vérifie} \\ \left\{ \begin{array}{ll} \forall x \in A, t \mapsto \frac{\partial f}{\partial x}(x, t) \in \mathcal{CM} & (\mathcal{CPM} \text{ pour } t) \\ \forall t \in I, x \mapsto \frac{\partial f}{\partial x}(x, t) \in \mathcal{C} & (\text{Continue pour } x) \\ \forall (x, t) \in A \times \underbrace{[a, b]}_{\in I}, \left| \frac{\partial f}{\partial x}(x, t) \right| \leq \varphi(t) \in \mathcal{L}^1 & (\text{Domination}) \end{array} \right. \end{array} \right.$$

Alors, la dérivée de g est $g'(x) = \int_I \frac{\partial f}{\partial x}(x, t) dt$

15.5 Fonction Gamma

Définition 34 : Fonction Gamma

On définit Γ de $]0, +\infty[$ par $\Gamma : x \mapsto \int_0^{+\infty} t^{x-1} e^{-t} dt$

Cette fonction est convexe (comme produit de deux applications $x \mapsto t^{x-1}$ et $x \mapsto e^{-t}$ convexes), donc continue.

Théorème 34.1 : Étude de Γ

Pour tout $n \in \mathbb{N}$ on a :

- $\Gamma(n+1) = n!$
- $\Gamma\left(\frac{1}{2}\right) = \int_0^{+\infty} e^{-t} \frac{dt}{\sqrt{t}} = \dots = \sqrt{\pi}$

Preuve 34.1.1 Vérifions que Γ est une fonction continue. On utilise le théorème de continuité de fonctions paramétrés, $t \mapsto t^{x-1}e^{-t}$ est continue par morceaux, $x \mapsto t^{x-1}e^{-t}$ est continue.

Pour dominer $t^{x-1}e^{-t}$, avec $x \in [a, b]$, on prend $\varphi(t) = e^{-t}(t^{a-1} + t^{b-1})$

Maintenant qu'on a étudié la continuité, on peut faire une intégration par partie de $\Gamma(n+1) = \int_0^\infty t^n e^{-t} dt$ en posant :

$$\begin{aligned} \begin{cases} u(t) = t^n & \implies u'(t) = nt^{n-1} \\ v(t) = -e^{-t} & \implies v'(t) = e^{-t} \end{cases} \\ \implies \Gamma(n+1) = \underbrace{[-t^n e^{-t}]_0^\infty}_{=-0+0} - \underbrace{\int_0^\infty -t^{n-1} e^{-t}}_{\Gamma(n)} \\ \implies \Gamma(n+1) = n\Gamma(n) = n(n-1)\Gamma(n-1) = n! \underbrace{\Gamma(1)}_{=1} \end{aligned}$$

d'où $\Gamma(n+1) = n!$ CQFD.

15.6 Intégrales doubles

Définition 35 : Intégrale double

f une fonction continue de $[\alpha, \beta] \times [a, b]$ dans \mathbb{C} .

$$\text{Alors } \int_\alpha^\beta \left(\int_a^b f(x, t) dt \right) dx = \int_a^b \left(\int_\alpha^\beta f(x, t) dx \right) dt$$

Chapitre 16

Espaces Préhilbertiens réels

Dans cette section, on se placera dans \mathbb{R} .

Méthode

Définitions rapides

Produit scalaire cf. définition 36 page 72

Éléments orthogonaux x et y sont orthogonaux si $(x|y) = 0$

Famille orthogonale $(e_i|e_j) = \delta_{i,j}$

Distance de x à une partie F $d(x, F) = \|x - p_F(x)\|$

16.1 Produit scalaire

Définition 36 : Produit scalaire

Le produit scalaire est défini comme suit :

- (i) $\forall x \in E \setminus \{0\}, \varphi(x, x) > 0$ (définie positive)
- (ii) $\forall (x, y) \in E^2, \varphi(x, y) = \varphi(y, x)$ (symétrie)
- (iii) $\forall x \in E, y \mapsto \varphi(x, y)$ est linéaire (linéaire à droite)

On peut associer un produit scalaire $(\cdot|\cdot)$ à un espace vectoriel E . L'espace $(E, (\cdot|\cdot))$ est appelé **espace préhilbertien**.

Remarque : La symétrie et la linéarité impliquent la linéarité à gauche, donc la bilinéarité du produit scalaire.

Théorème 36.1 : Norme associée

$x \mapsto \sqrt{(x|x)}$ définit une norme sur E . On la note $\|x\|$, et $\|x\|^2 = (x|x)$.

Théorème 36.2 : Inégalité CAUCHY-SCHWARZ

$$(16.1a) \quad |(x|y)| \leq (x|x)^{\frac{1}{2}} \times (y|y)^{\frac{1}{2}}$$

qu'on peut aussi écrire :

$$(16.1b) \quad |(x|y)| \leq \|x\| \times \|y\|$$

avec égalité si et seulement si (x, y) est une famille liée.

Théorème 36.3 : Pythagore

Si x_1, \dots, x_n sont des éléments de E deux à deux orthogonaux, alors

$$(16.2) \quad \left\| \sum_{i=0}^n x_i \right\|^2 = \sum_{i=0}^n \|x_i\|^2$$

(ATTENTION)

Ce sont bien des normes car x_i au carré n'existe pas (qu'est-ce que le produit de deux vecteurs ?), du coup on utilise $\|\cdot\|^2 = (\cdot|\cdot)$

16.2 Orthogonalité

Définition 37 : Éléments orthogonaux

Deux éléments x et y sont orthogonaux si $(x|y) = 0$

Théorème 37.1 : Procédé d'orthonormalisation de SCHMIDT

Pour toute base de (e_i) , il existe une base (ε_i) telle que :

$$(16.3) \quad \begin{cases} (\varepsilon_i) \text{ est une base orthonormée} \\ \text{Vect}(e_1, \dots, e_n) = \text{Vect}(\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_n) \\ (e_i|\varepsilon_i) > 0 \end{cases}$$

On aura souvent recours à compléter une base $(e_i)_k$ avec $n - k$ vecteurs orthonormaux aux $(\varepsilon_i)_k$ par le théorème de la base incomplète.

Théorème 37.2 : Inégalité de BESSEL

Si (e_i) est une base orthonormée :

$$\sum_i (e_i|x)^2 \leq \|x\|^2$$

16.3 Automorphismes orthogonaux

u est un endomorphisme, donc il est linéaire.

Définition 38

- i. u un endomorphisme, il existe un unique endomorphisme u^* tel que

$$\forall (x, y) \in E, (u(x)|y) = (x|u^*(y))$$

u^* est l'**adjoint** de u .

- ii. u est **autoadjoint** (symétrique) si $u^* = u$

- iii. u est un **automorphisme orthogonal** si $u^* = u^{-1}$. On note $u \in \mathcal{O}(E)$

Propriétés

- i. Si $M_{\mathcal{B}}(u) = A$, alors $M_{\mathcal{B}}(u^*) = {}^t A$
- ii. $\text{Ker}(u^*) = [\text{Im}(u)]^\perp$
- iii. $\text{Im}(u^*) = [\text{Ker}(u)]^\perp$
- iv. $\chi_u = \chi_{u^*}$
- v. $(u \circ v)^* = v^* \circ u^*$

Théorème 38.1 : Caractérisation d'un automorphisme orthogonal

u est un automorphisme orthogonal si les assertions suivantes (équivalentes) sont vérifiées :

- i. u conserve la norme
- ii. u conserve le produit scalaire
- iii. $u(\mathcal{B}_{\text{orthonormée}}) = \mathcal{B}'_{\text{orthonormée}}$
- iv. $\forall \mathcal{B}'_{\text{orthonormée}}, \exists \mathcal{B}_{\text{orthonormée}}$ telle que $u(\mathcal{B}_{\text{orthonormée}}) = \mathcal{B}'_{\text{orthonormée}}$

- v. $\exists \mathcal{B}_{\text{orthonormée}}$ telle que
$$\begin{cases} U^t U = I_n \\ \text{ou} \\ {}^t U U = I_n \end{cases} \text{ où } U = M_{\mathcal{B}}(u)$$

Théorème 38.2 : Théorème spectral

Tout **endomorphisme auto-adjoint** est diagonalisable, et il existe une base orthonormale de vecteurs propres de u .

Toute **matrice symétrique réelle** est diagonalisable. On peut aussi dire :

$$(16.4) \quad \forall A \in S_n, \exists \begin{cases} P \in \mathcal{O}(n) \\ D \in \mathcal{D}_n(\mathbb{R}) \end{cases} \text{ tel que } A = P D P^{-1} = P D^t P$$

Chapitre 17

Espaces Préhilbertiens complexes

17.1 Structure Préhilbertienne complexe

On se place dans \mathbb{C} et on établit de nouveau le produit scalaire comme à la définition 36 page 72 du chapitre précédent. À une différence près, la symétrie est appelée **symétrie hermitienne**

Définition 39 : Produit scalaire

Le produit scalaire est défini comme suit :

- (i) $\forall x \in E \setminus \{0\}, \varphi(x, x) > 0$ (définie positive)
- (ii) $\forall (x, y) \in E^2, \varphi(x, y) = \overline{\varphi(y, x)}$ (symétrie hermitienne)
- (iii) $\forall x \in E, y \mapsto \varphi(x, y)$ est linéaire (linéaire à droite)

On peut associer un produit scalaire $(\cdot|\cdot)$ à un espace vectoriel E . L'espace $(E, (\cdot|\cdot))$ est appelé **espace préhilbertien**.

17.2 Orthogonalité

Théorème 39.1 : Inégalité de BESSEL

Si (e_i) est une base orthonormée : $\sum_i |(e_i|x)|^2 \leq N_2^2(x)$

17.3 Séries de FOURIER

Méthode

Coefficients

Exponentiels $c_n(f) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} e^{-int} f(t) dt$

Trigonométriques

- $a_n(f) = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \cos(nt) f(t) dt$
- $b_n(f) = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \sin(nt) f(t) dt$

On note $\mathcal{C}_{2\pi}$ l'espace vectoriel des applications $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{C}$ **2π -périodiques** et **continues** sur $[0, 2\pi]$.

On note $\mathcal{CM}_{2\pi}$ l'espace vectoriel des applications $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{C}$ **2π -périodiques** et **continues par morceaux** sur $[0, 2\pi]$.

(ATTENTION)

Sur $\mathcal{CM}_{2\pi}$, N_1, N_2 et N_∞ ne sont plus des normes, mais elles fonctionnent toujours de la même manière

Cette sous-section se base sur le théorème suivant :

Théorème 39.2

Pour toute fonction dans $\mathcal{CM}_{2\pi}$, il existe une suite $(f_n)_n$ d'éléments de $\mathcal{C}_{2\pi}$ telle que

$$N_2(f - f_n) \xrightarrow{n \rightarrow \infty} 0$$

L'objectif des séries de FOURIER est de « transposer » une fonction dans une base de $\mathcal{C}_{2\pi}$.

On prendra pour bases $(e^{it}, e^{2it}, \dots, e^{int})$ ou $(\cos(t), \cos(2t), \dots, \cos(nt))$ par exemple, et grâce à un produit scalaire, on obtient la décomposition de notre fonction dans la base. C'est ainsi qu'on définit les coefficients :

Définition 40 : Coefficients exponentiels

Pour une fonction f dans $\mathcal{CM}_{2\pi}$:

$$c_n(f) = \underbrace{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi}}_{\text{on est sur } \mathcal{CM}_{2\pi}} e^{-i \cdot n \cdot t} f(t) dt$$

En effet : $c_n(f) = (e_n | f)$ avec $e_n = e^{int}$. Or le produit scalaire pour des fonctions est $(g | f) = \int_0^{2\pi} \overline{g(t)} f(t) dt$, d'où $(e_n | f) = \int_0^{2\pi} \overline{e^{int}} f(t) dt = \int_0^{2\pi} e^{-int} f(t) dt$

On aurait très bien pu intégrer sur $[-\pi, \pi]$ au lieu de $[0, 2\pi]$. C'est ce qu'on fera plus tard avec les coefficients trigonométriques.

Propriétés

- $g : t \mapsto f(-t), c_n(g) = c_{-n}(f)$

- $f_a : t \mapsto f(t + a)$, $c_n(f_a) = e^{ina} c_n(f)$

Théorème 40.1 : Dérivée de f

$$c_n(f') = in c_n(f)$$

$$\text{d'où, par récurrence : } c_n(f^{(k)}) = (in)^k c_n(f)$$

Définition 41 : Coefficients trigonométriques

Pour une fonction f dans $\mathcal{CM}_{2\pi}$:

$$a_n(f) = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \cos(nt) f(t) dt \quad \text{et} \quad b_n(f) = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \sin(nt) f(t) dt$$

Ici, c'est $\frac{1}{\pi}$ en facteur, car $N_2^2(\cos(n\bullet)) = \frac{1}{2}$

Propriétés

- $a_n(f) = c_n(f) + c_{-n}(f)$ et $b_n(f) = i(c_n(f) - c_{-n}(f))$
- Si f est paire, alors $b_n = 0 \forall n$
- Si f est impaire, alors $a_n = 0 \forall n$

En général, on utilisera ces coefficients si f présente une parité.

Définition 42 : Série de FOURIER

On appelle **série de FOURIER** de f la série $\sum u_n$ où
$$\begin{cases} u_0 &= c_0(f) e_0 \\ u_n &= c_n(f) e_n + c_{-n}(f) e_{-n} \end{cases}$$

 $S_n(f)$ est appelée **somme partielle de rang n de la série de FOURIER**

Théorème 42.1 : Inégalité de Bessel

Si $f \in \mathcal{CM}_{2\pi}$, alors :

$$\sum_{k=-n}^n |c_k(f)|^2 \leq N_2^2(f)$$

Théorème 42.2 : Théorème de convergence PARSEVAL

Si f est une fonction de $\underline{\mathcal{CM}}_{2\pi}$, alors $N_2 \left(f - S_n(f) \right)_n$ converge vers 0

Avec ce nouveau théorème, on trouve le cas d'égalité de l'inégalité de Bessel :

Théorème 42.3 : Égalité de Parseval

Si f est une fonction de $\underline{\mathcal{CM}}_{2\pi}$:

$$\sum_{n \in \mathbb{Z}} |c_n(f)|^2 = N_2^2(f)$$

En réel, cette égalité devient :

$$N_2^2(f) = \left(\frac{a_0(f)}{2} \right)^2 + \frac{1}{2} \sum_{n=1}^{+\infty} [a_n^2(f) + b_n^2(f)]$$

Théorème 42.4 : Calcul des Coefficients

Si on a la suite s_n telle que
$$\begin{cases} s_n = \sum_{k=-n}^n \alpha_k e_k \\ N_2(s_n - f) \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} 0 \end{cases}, \text{ alors } \forall k \in \mathbb{Z}, c_n(f) = \alpha_n$$

Preuve 42.4.1

D'après l'inégalité de CAUCHY-SCHWARZ, $|c_k(s_n - f)| \leq N_2(s_n - f)$. Donc $|c_k(f) - \alpha_k| \leq N_2(s_n - f) \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} 0$, d'où, quand $n \rightarrow +\infty$, $c_n(f) = \alpha_n$.

Théorème 42.5 : Théorème de convergence normale

Si f est $\underline{\mathcal{C}}_{2\pi}$ et de classe \mathcal{C}^1 par morceaux ^a

alors sa série de FOURIER **converge normalement** et sa somme vaut f
sa somme partielle de sa série de FOURIER S_n **converge uniformément**

^a. \mathcal{C}^1 par morceaux c'est à dire que la dérivée est continue par morceaux, à ne pas confondre avec $f \in \mathcal{CM}$

Définition 43 : Noyau de DIRICHLET

On appelle **noyau de DIRICHLET**, et on note $D_p(t)$ la somme :
$$D_p(t) = \sum_{k=-p}^p e^{ikt}$$

Théorème 43.1 : Noyau de DIRICHLET

Si $f \in \mathcal{CM}_{2\pi}$ et \mathcal{C}^1 par morceaux, alors sa série de FOURIER **converge simplement** sur \mathbb{R} .

Sa somme au point x , notée $\tilde{f}(x)$ est égale à $\frac{1}{2} \lim_{h \rightarrow 0^+} [f(x+h) + f(x-h)]$. Si f est **continue**, alors $\tilde{f}(x) = f(x)$.

Cinquième partie

Équations Différentielles

Chapitre 18

Équations Différentielles Linéaire

Méthode

Résoudre une équation différentielle

Scalaire du 1^{er} ordre Méthode algorithmique, cf. preuve 1.1.1 page 81

Vectérielles du 1^{er} ordre

- Avec les coefficients constants
- Avec une matrice Diagonalisable
- Avec une matrice Trigonalisable

Scalaire du second ordre

Définition 1

I un \mathbb{K} -Algèbre

On appelle Équation différentielle l'équation (\mathcal{L}) :

$$(\mathcal{L}) \quad a_0(t)y^{(n)} + a_1(t)y^{(n-1)} + \cdots + a_{n-1}(t)y' + a_n(t)y = b(t)$$

(a_0, \dots, a_n) est dans $(\mathcal{C}(I, \mathbb{R}))^{n+1}$. L'ensemble des solutions de \mathcal{L} dans I est noté $S_I(\mathcal{L})$

18.1 Équations Différentielles **Scalaire**s d'ordre 1

Théorème 1.1 : Solution de l'équation différentielle scalaire

Si $y' = a(t)y + b(t)$, alors $S_I(\mathcal{L})$ est un sous-espace affine

Preuve 1.1.1 (Algorithmique) Par hypothèse, $a \in \mathcal{C}(I, \mathbb{R})$, donc $a(t)$ admet

une primitive $P(t) = \int_{t_0}^t a(s) ds$.

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} (e^{-P(t)} y(t)) &= -P'(t) e^{-P(t)} y(t) + e^{-P(t)} y'(t) \\ &= \overbrace{-a(t)} y(t) e^{-P(t)} + e^{-P(t)} \left(\overbrace{a(t) y(t) + b(t)} \right) \\ &= e^{-P(t)} b(t) \end{aligned}$$

Si c'est intégrable, $\exists C$ tel que :

$$\begin{aligned} e^{-P(t)} y(t) &= \int_{t_0}^t (e^{-P(u)} b(u) du + C) \\ y(t) &= \int_{t_0}^t (e^{-P(u)} b(u) du + C) e^{P(t)} \end{aligned}$$

est solution de l'équation.

18.2 Équations Différentielles Vectorielles d'ordre 1

Définition 2 : Équation Différentielle Vectorielle

C'est une équation sous la forme

$$(\mathcal{L}) \quad x'(t) = a(t)x(t) + b(t)$$

où $a \in \mathcal{C}(I, \mathcal{L}(F))$, $b \in \mathcal{C}(I, F)$. Le **Problème de CAUCHY** revient à trouver, pour tout (t_0, x_0) dans $I \times F$, une solution φ de (\mathcal{L})

(ATTENTION) a est une application de I dans $\mathcal{L}(F)$. Donc $a(t)$ est une application linéaire, pas un scalaire

Théorème 2.1 : Théorème de CAUCHY-LIPSCHITZ linéaire

Soit l'équation différentielle

$$(E) \quad x'(t) = a(t)x(t) + b(t)$$

où $a \in \mathcal{C}(I, \mathcal{L}(F))$, $b \in \mathcal{C}(I, F)$, alors

$$\forall (t_0, x_0) \in (I, F), \exists ! \varphi \text{ telle que } \left| \begin{array}{l} \varphi \text{ soit solution de l'équation (E)} \\ \varphi(t_0) = x_0 \end{array} \right.$$

Système fondamental

Définition 3 : Système Fondamental

Un système fondamental de solutions est une base dans l'espace $S_I(\mathcal{H})$ des solutions.

Propriétés

- Si $(\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_n)$ est une base de $S_I(\mathcal{L})$, alors, $\forall t \in I$, $(\varphi_1(t), \varphi_2(t), \dots, \varphi_n(t))$ est une base dans F

Définition 4 : Wronskien

Le Wronskien est le déterminant d'un système fondamental de solution.

(Wronskien)

$$W(t) = \det_B \left(\varphi_1(t), \dots, \varphi_n(t) \right)$$

(ATTENTION)

Le Wronskien est une fonction de t

Propriétés

- $W'(t) = \text{tr}(a) W(t)$
- $W(t) = W(t_0) e^{\int_{t_0}^t \text{tr}(s) ds}$

Théorème 4.1 : Variation des constantes

Soit $(\varphi_1(t), \dots, \varphi_n(t))$ une base de $S_I(\mathcal{H})$.

Alors, $\forall \varphi \in \mathcal{C}^1(I, F)$, $\left\{ \begin{array}{l} \text{Il existe une unique famille } \overbrace{(\lambda_1, \dots, \lambda_n)}^{\text{dans } \mathcal{C}^1(I, F)} \text{ telle que } \varphi = \sum_{i=1}^n \lambda_i \varphi_i \\ \varphi \in S_I(\mathcal{H}) \Leftrightarrow \forall t \in I, \sum_{i=1}^n \lambda_i'(t) \varphi_i(t) = b(t) \end{array} \right.$

Pour une équation à coefficients a et b constants $x' = ax + b(t)$, la solution générale est

$$y(t) = e^{(t-t_0)a} x_0 + \int_{t_0}^t e^{(t-s)a} b(s) ds$$

18.3 Équations Différentielles linéaires du second ordre

Définition 5 : Équation Différentielle Vectorielle

C'est une équation sous la forme

(\mathcal{L})

$$y''(t) + a(t)y'(t) + a(t)y(t) = \gamma(t)$$

L'équation homogène est

$$(H) \quad y''(t) + a(t)y'(t) + b(t)y(t) = 0$$

On note $f(r) = r^2 + a \times r + b$ son polynôme caractéristique

18.3.1 Coefficients constants

Théorème 5.1 : Résolution de l'équation

Dans le cas de l'équation homogène (H), on calcule le discriminant Δ du polynôme caractéristique. Suivant les cas, on a la solution $y(t)$ pour l'équation homogène :

$$\frac{\Delta \neq 0}{\Delta = 0} \left| \begin{array}{l} y(t) = Ae^{r_1 t} + Be^{r_2 t} \\ y(t) = (A + Bt)e^{rt} \end{array} \right.$$

Ou encore :

$$\frac{\Delta > 0}{\Delta < 0}{\Delta = 0} \left| \begin{array}{l} r_{\pm} = \alpha \pm \beta \quad y(t) = e^{\alpha t} (A \cdot \cosh(\beta t) + B \cdot \sinh(\beta t)) \\ r_{\pm} = \alpha \pm i\beta \quad y(t) = e^{\alpha t} (A \cdot \cos(\beta t) + B \cdot \sin(\beta t)) \\ r \text{ double} \quad y(t) = (A + Bt)e^{rt} \end{array} \right.$$

Théorème 5.2

Si dans (L), $\gamma(t) = P(t)e^{\lambda t}$, $P \in \mathbb{C}[X]$, alors on peut donner une solution :

$$(18.2) \quad t \mapsto t^{\omega(\lambda)} Q(t)e^{\lambda t}$$

où $\omega(\lambda)$ est la multiplicité de λ en tant que racine du polynôme caractéristique de f et $Q \in \mathbb{C}[X]$ est de même degré que P .

18.3.2 Cas général

Théorème 5.3 : Théorème de CAUCHY-LIPSCHITZ linéaire

Soit l'équation différentielle

$$(L) \quad y''(t) + a(t)y'(t) + b(t)y(t) = \gamma(t)$$

où $a \in \mathcal{C}(I, \mathcal{L}(F))$, $b \in \mathcal{C}(I, F)$, alors

$$\forall (t_0, (x_0, x'_0)) \in (I, \mathbb{K}^2), \exists ! \varphi \text{ telle que } \left| \begin{array}{l} \varphi \text{ soit solution de l'équation (E)} \\ \varphi(t_0) = x_0 \\ \varphi'(t_0) = x'_0 \end{array} \right.$$

Preuve 5.3.1

Le théorème est une conséquence du théorème 2.1 si on résout plutôt $\begin{pmatrix} x \\ x' \end{pmatrix}' =$

$$\begin{pmatrix} a \\ a' \end{pmatrix} (t) \begin{pmatrix} x \\ x' \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} b \\ b' \end{pmatrix}$$

Définition 6 : Wronskien

Si u et v sont des I -solutions, le **Wronskien** est l'application définie par

$$W = uv' - u'v$$

Propriétés

Dans l'équation $(\mathcal{H}) : x'' + a(t)x' + b(t)x = 0$,

- $W + aW = 0$
- (u, v) libre $\Leftrightarrow \exists t_0$ tel que $W(t_0) \neq 0 \Leftrightarrow \forall t, W(t) \neq 0$

Théorème 6.1 : Méthode de variation des constantes

En connaissant (u, v) un système fondamental de solutions, on cherche une solution de la forme $y(t) = c_1(t)u(t) + c_2(t)v(t)$. On détermine c_1 et c_2 avec :

$$(18.3) \quad c_1' \begin{pmatrix} u \\ u' \end{pmatrix} + c_2' \begin{pmatrix} v \\ v' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ \gamma \end{pmatrix}$$

Chapitre 19

Équations Différentielles non linéaires

19.1 Équations autonomes

Définition 7 : Champ de Vecteur

On appelle **champ de vecteurs** l'application qui à un point $M \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}$ associe $\overrightarrow{V(M)} \begin{pmatrix} f(x, y) \\ g(x, y) \end{pmatrix}$:

$$\begin{array}{ccc} U \in \mathbb{R}^2 & \xrightarrow{\mathcal{C}^1} & \mathbb{R}^2 \\ M \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} & \mapsto & \overrightarrow{V(M)} \begin{pmatrix} f(x, y) \\ g(x, y) \end{pmatrix} \end{array}$$

Définition 8 : Système Autonome

On appelle **système autonome** associé au champ de vecteur $\overrightarrow{V(M)}$ le système différentiel

$$\boxed{\frac{dM}{dt} = \overrightarrow{V(M)}}$$

Le mot *autonome* témoigne de la non-dépendance en t du champ de vecteur $\overrightarrow{V(M)}$

Théorème 8.1 : CAUCHY-LIPSCHITZ (*admis*)

Avec les données précédentes, pour tout couple $(t_0, (x_0, y_0)) \in (I \times U)$, il existe une unique I -solution maximale $\varphi : t \mapsto M(t) = \begin{pmatrix} x(t) \\ y(t) \end{pmatrix}$, telle que $\left| \begin{array}{lcl} x(t_0) & = & x_0 \\ y(t_0) & = & y_0 \end{array} \right.$

Une **solution maximale** est une solution qui n'est la restriction d'aucune autre. Son intervalle de définition est l'intervalle maximal.

19.2 Équations non autonomes

Dans cette section on appelle **équation différentielle** :

$$(\mathcal{E}) \quad x' = f(t, x)$$

où f est une fonction de $\mathcal{C}^1(U, \mathbb{R})$

Théorème 8.2 : CAUCHY-LIPSCHITZ (*admis*)

U un intervalle ouvert de \mathbb{R}^2 , et en reprenant l'équation (\mathcal{E}) :

$$\forall (t_0, x_0) \in U, \exists! \varphi \text{ telle que } \left\{ \begin{array}{l} \varphi \text{ soit } \textbf{solution maximale} \text{ de l'équation } (\mathcal{E}) \\ \varphi(t_0) = x_0 \end{array} \right.$$

Chapitre 20

Fonctions de plusieurs variables

Méthode

Étude d'une fonction à deux variables

Passer en polaire

Dans ce chapitre, on se place dans (E, N) et (F, P) , des espaces vectoriels normés de dimension finie. U est un ouvert de E

$$\begin{aligned} f &: U \rightarrow F \\ a &\mapsto f(a) \end{aligned}$$

20.1 Différentielle, dérivée

20.1.1 Différentielle

Définition 9 : Différentielle

Il existe au plus un élément φ de $\mathcal{L}(E, F)$ tel que

$$f(a+h) \underset{h \rightarrow 0}{=} f(a) + \varphi(h) + o(h)$$

φ est appelée la **différentielle** de f . On la note $df(a)$

Remarque : a et h sont des vecteurs. Donc sous la forme $a = \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_n \end{pmatrix}$. De plus, $\varphi(h)$

est une application linéaire : $\varphi(h) \in \mathcal{L}(E, F)$

20.1.2 Dérivée selon un vecteur

Définition 10 : Dérivée en un point

On note $\varphi_h : t \mapsto f(a + th)$.

f admet une dérivée en a selon h si φ_h est dérivable en 0.

Alors, on note cette dérivée $D_h f(a) = \varphi'_h$. Si elle existe :

$$D_h f(a) = \lim_{\substack{t \rightarrow 0 \\ t \neq 0}} \frac{f(a + th) - f(a)}{t}$$

On a alors la dérivée pour tout a définie par la fonction $D_h f : a \mapsto D_h f(a)$

Définition 11 : Application de classe \mathcal{C}^1

f est de classe \mathcal{C}^1 sur U si $\forall j \in [1, n], D_j f$ existe et est continue sur U

Définition 12 : \mathcal{C}^k -difféomorphisme

f (bijective) est un **\mathcal{C}^k -difféomorphisme** si elle et son inverse sont \mathcal{C}^k . C'est-à-dire :

$$\begin{cases} f \in \mathcal{C}^1(U, V) \\ f^{-1} \in \mathcal{C}^1(V, U) \end{cases}$$

Définition 13 : Jacobienne, Jacobien

On définit la **Jacobienne** $\mathcal{J}_a(f)$ comme la matrice de terme général $j_{i,j} = \frac{\partial f_i}{\partial x_j} = D_j f_i(a)$.

Le **Jacobien** est le déterminant de cette matrice.

Exemple : La Jacobienne de la fonction polaire (qui à (r, θ) associe $(r \cdot \cos \theta, r \cdot \sin \theta)$) est $\begin{pmatrix} \cos \theta & -r \sin \theta \\ \sin \theta & r \cos \theta \end{pmatrix}$. Son Jacobien est donc $r (\sin^2 \theta + \cos^2 \theta) = r$

20.2 Inversion locale

Théorème 13.1 : Théorème d'inversion locale (*admis*)

$$\begin{aligned} f \in \mathcal{C}(U, F) \text{ injective est } \mathcal{C}^k\text{-difféomorphisme} \\ \Leftrightarrow \\ \forall a \in U, df(a) \text{ isomorphisme de } E \text{ dans } F \end{aligned}$$

20.3 Complément sur les courbes planes

Théorème 13.2 : Formule de GREEN-RIEMANN

Un compact D délimitée par une courbe plane Γ positivement orientée et \mathcal{CM}^1 . Soient P et Q deux fonctions de classe \mathcal{C}^1 sur un ouvert dans lequel Γ est tracé. On admet la formule de GREEN-RIEMANN :

$$(20.2) \quad \iint_D \left[\frac{\partial Q}{\partial x} - \frac{\partial P}{\partial y} \right] (x, y) \, dx \, dy = \int_{\Gamma} P dx + Q dy$$

Sixième partie

Géométrie

20.4 Arcs Paramétrés

Définition 1 : Arc Paramétré

On appelle **arc paramétré** de classe \mathcal{C}^k un couple (I, f) avec $\begin{cases} I & \text{un intervalle de } \mathbb{R} \\ f & \text{une application de } \mathcal{C}^k(I, E) \end{cases}$

Définition 2

Quelques autres définitions :

Valeur Régulière	t_0	$— f'(t_0) \neq 0$
Valeur Birégulière	t_0	$— (f'(t_0), f''(t_0))$ est libre
Abscisse Curviligne	s	$— s' = N_2(f'(t))$ sur un intervalle
Paramétrage normal	(J, g)	$—$

Exemple d'abscisse curviligne : $s : t \mapsto \sinh(t)$ car $N_2(s(t)) = \sqrt{\int |\sinh(t)|^2} = \sinh'(t) = \cosh(t)$. L'avantage d'une abscisse curviligne est de pouvoir simplifier l'étude d'une courbe.

20.5 Courbes Planes

20.5.1 En polaire

Définition 3 : Fonction arg

$\theta \mapsto e^{i\theta}$ est une bijection de $] -\pi, \pi[$ sur $\mathbb{U} \setminus \{-1\}$ où $\mathbb{U} = \{z \in \mathbb{C} \mid |z| = 1\}$
 Sa réciproque est l'application $u \mapsto \arg(u)$
 Si on prend $u \in \mathbb{U}$, en notant $u = x + iy$, alors $\arg(u) = 2 \arctan\left(\frac{y}{x+1}\right)$

Théorème 3.1 : Théorème du Relèvement

Soit $f \in \mathcal{C}^n(I, \mathbb{U})$ (avec $n \neq 0$).
 $\exists \theta \in \mathcal{C}^n(I, \mathbb{R})$ tel que $f(t) = e^{i\theta(t)}$. θ est appelé **relèvement** de f .

Preuve 3.1.1 Si elle existe, θ n'est pas unique ($t \mapsto \theta(t) + 2\pi$ convient aussi).

Donc $f'(t) = i\theta' f(t) \Leftrightarrow \theta'(t) = -i \frac{f'(t)}{f(t)}$.

On peut alors intégrer : $\theta(t) = C - i \int_{t_0}^t \frac{f'(u)}{f(u)} du$, et il ne reste plus qu'à prouver l'existence en ayant cette expression de $\theta(t)$

Définition 4 : Tangente

Si θ est une valeur régulière, on note V l'angle $\left(\vec{u}_\theta, \frac{d\vec{M}_\theta}{d\theta}\right)$, et on définit $\tan(V) = \frac{\rho(\theta)}{\rho'(\theta)}$

20.5.2 Étude d'une courbe paramétrée

Méthode

Étude de courbes paramétrées

Quelques conseils :

- On essaye, si possible, de passer en polaire
- Ne pas oublier de vérifier les ensembles de définition
- Lors de l'étude **au voisinage d'un point**, il suffit d'étudier les dérivées successives grâce à un développement limité

On a l'expression de x et y en fonction de t : $x = f(t)$ et $y = g(t)$. Pour étudier la courbe :

1. Ensemble de **définition** $\mathcal{D} = \mathcal{D}_f \cup \mathcal{D}_g$
2. Étude des **variations** : on étudie x' , y' et $\frac{y'}{x'}$
3. **Branches infinies**
 - $x = \lim f$ ou $y = \lim g$ sont des asymptotes (avec $\lim f$ et $\lim g$ des limites finies)
 - Si, pour $t_0 \in \mathbb{R}$ les deux fonctions tendent simultanément vers l'infini, on étudie $\lim_{t \rightarrow t_0} \frac{y}{x}$

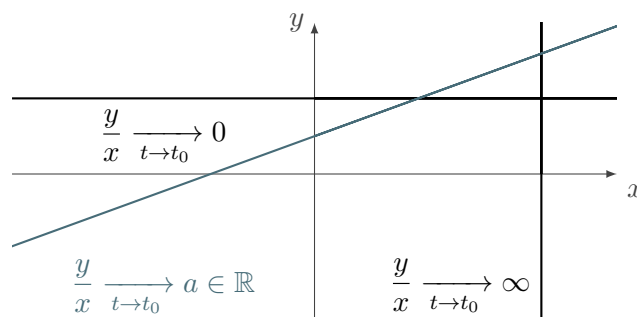


FIGURE 20.1 – Différents types d'asymptotes en fonction de $\frac{y}{x}$

Dans le cas où $\frac{y}{x} \xrightarrow{t \rightarrow t_0} a \in \mathbb{R}$, on peut déterminer b de l'équation $y = ax + b$ en examinant $y - ax$

Septième partie

Annexe

20.6 Équivalences

Pour une définition de l'équivalence, *cf.* définition 4 page 11

Formule de STIRLING
$$n! = \left(\frac{n}{e}\right)^n \sqrt{2\pi n}$$

Équivalence de \ln
$$\frac{\ln(u)}{t^\alpha} \sim t^{\frac{\alpha+1}{2}}$$

Équivalents usuels en 0

$\sin(u) \underset{0}{\sim} u$	$\cos(u)-1 \underset{0}{\sim} -\frac{u^2}{2}$	$\ln(1+u) \underset{0}{\sim} u$
$\sinh(u) \underset{0}{\sim} u$	$\cosh(u)-1 \underset{0}{\sim} \frac{u^2}{2}$	$e^u-1 \underset{0}{\sim} u$

20.7 Trigonométrie

20.7.1 Définition

$$(20.3) \quad \begin{cases} \cos x &= \frac{e^{ix} + e^{-ix}}{2} \\ \sin x &= \frac{e^{ix} - e^{-ix}}{2i} \end{cases} \quad (20.4) \quad \begin{cases} \cosh x &= \frac{e^x + e^{-x}}{2} \\ \sinh x &= \frac{e^x - e^{-x}}{2} \end{cases}$$

20.7.2 Addition / Produit

$$(20.5) \quad \begin{array}{l|l} \begin{array}{l} \cos(a+b) = \cos a \cos b - \sin a \sin b \\ \cos(a-b) = \cos a \cos b + \sin a \sin b \\ \sin(a+b) = \sin a \cos b + \cos a \sin b \\ \sin(a-b) = \sin a \cos b - \cos a \sin b \end{array} & \begin{array}{l} \cos(a+b) + \cos(a-b) = 2 \cos a \cos b \\ \cos(a+b) - \cos(a-b) = 2 \sin a \sin b \\ \sin(a+b) + \sin(a-b) = 2 \sin a \cos b \\ \sin(a+b) - \sin(a-b) = 2 \cos a \sin b \end{array} \end{array}$$

20.7.3 Dérivation

Dérivées des fonctions trigonométriques :

$$\begin{aligned} \tan' x &= \frac{1}{1 + \cos^2 x} = 1 + \tan^2 x \\ \arcsin' x &= \frac{1}{\sqrt{1-x^2}} \\ \arccos' x &= -\frac{1}{\sqrt{1-x^2}} \\ \arctan' x &= \frac{1}{1+x^2} \end{aligned}$$

20.7.4 Formule de MOIVRE

$$(20.6) \quad (\cos x + i \sin x)^n = \cos(nx) + i \sin(nx)$$

Généralités

Conjugué $z = -\bar{z} \Leftrightarrow z \in \mathbb{R}$

Convexité La fonction **exponentielle** est **convexe**, la fonction **logarithme** est **concave**

Inégalités

Modules	$\left\ \sum_i x_i \right\ \leq \sum_i \ x_i\ $	
Module d'intégrales	$\left \int_I f \right \leq \int_I f $	(15.2)
Inégalité de la Moyenne	$m(b-a) \leq \int_a^b f(x)dx \leq M(b-a)$ (14.2)	

20.8 Formules usuelles

$$\begin{array}{l}
 a^k - b^k = (a-b) \left(\sum_{p=0}^{k-1} a^p b^{k-1-p} \right) \\
 \sum_{k=1}^n k^2 = \frac{n(n+1)(2n+1)}{6}
 \end{array}
 \left|
 \begin{array}{l}
 \sum_{k=1}^n k = \frac{n(n+1)}{2} \\
 \sum_{k=1}^n k^3 = \frac{n^2(n+1)^2}{4}
 \end{array}
 \right.$$

20.9 Espaces vectoriels

Espaces vectoriels normés usuels :
 $\mathbb{R}^n, \mathbb{C}^n, \mathbb{R}_n[X], \mathbb{C}_n[X], \mathcal{M}_n(\mathbb{R}), \mathcal{M}_n(\mathbb{C}), \mathcal{C}^n(I, \mathbb{R}),$ _____

20.10 Astuces

Primitives de 1 Dans une IPP, on peut primitiver 1 par $1+x$ pour enlever un terme au dénominateur. *Exemple* : $(\ln(1+x))^n$

Fontion k -lipschitzienne Il suffit de montrer que $\exists k \in \mathbb{R}$ tq $|f'(t)| \leq k$

Inverse d'une Matrice 2×2 Si $M = \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix}$, alors $M^{-1} = \frac{1}{da-bc} \begin{pmatrix} d & -b \\ -c & a \end{pmatrix}$

Dérivée de a^x On a $a^x = e^{x \ln(a)}$, donc sa dérivée est $\boxed{\ln(a) \times a^x}$

Liste des acronymes

DL	Développement Limité. 40
DSE	Développement en Série Entière. 63
LCI	Loi de Composition Interne. 17
s-ep	sous-espace propre. 25, 26
SATP	Série À Termes Positifs. 3, 41, 42, 61, 68

Index

- Abscisse curviligne, 92
- Accroissements finis, 66
- Adhérence, 38
- Adjoint, 74
- Arc paramétré, 92
- Autoadjoint, 74
- Automorphisme orthogonal, 74

- BANACH
 - Espace, 34
- BERNOULLI, 54
- BOLZANO
 - WEIERSTRASS, 35

- CANTOR, 46
- CAUCHY-LIPSCHITZ, 82, 84, 86, 87
- CAYLEY-HAMILTON, 30
- CÉSARO, 42
- C^k -difféomorphisme, 89
- Compact, 35
- Complet, 34
- Complexe, 13
- Composante connexe, 37
- Connexe par arcs, 36
- Variation des Constantes, 83
- Convergence
 - dominée, 69
 - série, 40
- Convexe, 36
- Covariance, 54

- Dérivabilité, 64
- Développement en Série Entière, 63
- Diagonalisable, 28
- Différentielle, 88
- DIRICHLET
 - Noyau, 78
- Distance, 33
- Diverge
 - grossièrement, 40
- Droite
 - stable, 25

- Écart-type, 53
- Endomorphisme
 - induit, 24
- Ensemble
 - dénombrable, 45
 - équipotent, 45
 - fini, 45
- Équation Différentielle, 81
 - du 2^e ordre, 83
 - scalaire, 81
 - vectorielle, 82
- Équivalence, 11
- Espace
 - normé, 33
 - préhilbertien, 72, 75
 - probabilisable, 49
 - probabilisé, 50
 - vectériel, 32
- Espérance, 52
- EULER, 20

- Famille
 - sommable, 46, 47
- Fermé, 37, 38
- Fonction génératrice, 55
- Série de FOURIER, 77
- FUBINI, 59

- Gamma, 70
- GRASSMAN, 31
- GREEN-RIEMANN, 90
- Groupe, 17
 - de KLEIN, 17
 - monogène, 18
 - produit, 17

- HEINE, 36

- Inégalité
 - de BESSEL, 73, 75, 77
 - de CAUCHY-SCHWARZ, 53, 73
 - triangulaire, 33

- Intérieur, 38
- Isomorphisme, 19
- Jacobien(ne), 89
- k -lipschitzienne, 96
- Matrice
 - semblable, 23
- Module, 13
- Moment(Probabilités), 53
- Monogène, 18
- Morphisme
 - de groupe, 19
- Nilpotent, 20, 29
- Norme, 33
 - Euclidienne, 33
- Ouvert, 37
- PARSEVAL
 - théorème de convergence, 78
 - égalité, 78
- Polynôme
 - caractéristique, 27
 - d'un endomorphisme, 29
- Polynôme
 - caractéristique(Équation différentielle), 84
- Primitive, 65
- Probabilité, 50
- Problème de CAUCHY, 82
- Procédé
 - d'Orthonormalisation de SCHMIDT, 73
- Produit scalaire, 72, 75
- Rayon de convergence, 60
- Relèvement, 92
- SATP, 41
- Série
 - alternée, 43
 - entière, 60
- Solution
 - maximale, 86
- Sous-espace
 - propre, 25
- Sous-groupe, 17
 - engendré, 18
- STIRLING, 95
- Système
 - autonome, 86
 - fondamental de solutions, 82
- Système complet(probabilités), 50
- Tangente, 93
- Taylor
 - (Formules), 66
 - Lagrange, 66
 - Laplace, 66
 - Young, 66
- Tribu, 49
- TSSA, 43
- univers, 49
- Valeur
 - birégulière, 92
 - propre, 25, 26
 - régulière, 92
- Variance, 53
- Vecteur
 - propre, 25, 26
- Champ de Vecteur, 86
- WEIERSTRASS
 - approximation, 58
- Wronskien, 83, 85