

Maths - MP2I

Axel Montlahuc

2024/2025

1	Calculs Algébriques	5
1.20	Somme des carrés et des cubes	6
1.39	Formule de Pascal	7
1.41	Formule du capitaine	7
1.42	Formule du binôme de Newton	7
2	Logique	9
2.17	Equivalence logiques	10
2.17.1	Double négation	10
2.17.2	Commutativité	10
2.17.3	Associativité	10
2.17.4	Loi de Morgan	10
2.17.5	Double implication	11
2.17.6	Distributivité	11
3	Ensembles et applications	12
3.12	Propriétés du produit cartésien	13
3.18	Associativité des relations	13
3.20	Propriétés des relations réciproques	13
3.23	Composition de fonctions	14
3.30	Schémas de raisonnement : montrer l'injectivité/surjectivité/bijektivité	14
3.35	Composée d'injections/surjections	14
3.36	Condition nécessaire pour une composition injective/surjective	15
3.37	Réciproque et bijection	15
3.38	Inverse d'une composée de bijections	15
3.39	Condition nécessaire et suffisante de bijectivité	15
4	Généralités sur les fonctions	16
4.21	Exemple	17
4.23	Remarque	17
4.27	Axe de symétrie	17
4.28	Centre de symétrie	17
4.51	Exemple	17
4.52	Théorème de la bijection dérivable	17
4.61	Primitives d'une fonction sur un intervalle	18
4.62	Exemple	18
4.65	Remarque	18
4.66	Exemple	19
4.69	Intégration par partie	19
4.70	Changement de variable	19
4.72	Exemple	19
4.74	Méthode	20
4.75	Exemple	20
5	Fonctions usuelles	21
5.2	Propriétés du logarithme	22
5.3	Propriété fondamentale du logarithme	22
5.4	Limites usuelles de la fonction logarithme	23
5.8	Propriétés de la fonction exponentielle	24
5.9	Propriété fondamentale de l'exponentielle	24
5.15	Dérivée d'une fonction puissance	24
5.21	Croissances comparées en $+\infty$	24
5.22	Croissances comparées en 0	25
5.43.2	Formule de trigonométrie hyperbolique	25
10	Structures algébriques	26
10.3	Exemple	27
10.6	Exemple	27

11 Matrices	28
11.11Produit matriciel	29
11.12Produit matriciel, lignes par colonnes	29
11.16Produit de deux matrices élémentaires	29
11.17Propriétés du produit matriciel, matrice identité	30
11.24Exemple	30
11.25Produit par bloc	30
11.27Propriétés de la transposition	31
11.31Forme linéaire sur $\mathcal{M}_n(\mathbb{K})$	31
11.33Exemple	31
11.37Stabilité des matrices diagonales ou triangulaires	32
11.41Nilpotence des matrices triangulaires	32
11.44Opérations	32
11.48Caractérisation de $GL_2(\mathbb{K})$	33
11.49Matrices diagonales inversibles	33
11.50Exemple	33
11.51Matrices triangulaires inversibles	33
11.54Exemple	35
11.61Exemple	35
11.65Caractérisation des matrices inversibles par les systèmes linéaires	36
11.74Système équivalents et opérations élémentaires	36
12 Arithmétique	37
12.1 Propriété fondamentale de \mathbb{Z}	38
12.4 Division euclidienne	38
12.9 Divisibilité et multiple	39
12.10Divisibilité et normes	39
12.11Entiers associés	39
12.14Intégrité de la divisibilité	40
12.20Cas d'une divisibilité	40
12.21Préparation à l'algorithme d'Euclide	40
12.23Algorithme d'Euclide étendu ou théorème de Bézout	40
12.24Application basique	41
12.26Théorème de Bézout	41
12.28Proposition	42
12.29Proposition	42
12.30Théorème de Gauss	43
12.31Equation de Bézout	43
12.32Proposition	43
12.37Lien avec les idéaux	44
12.38Préparation au calcul pratique d'un <i>pgcd</i>	44
12.39Caractérisation du <i>pgcd</i>	44
12.40Propriétés du <i>pgcd</i>	45
12.44Définition du PPCM	46
12.45Caractérisation du <i>ppcm</i>	46
12.46Propriétés du <i>ppcm</i>	47
12.50Propriétés	48
12.51Petit théorème de Fermat	48
12.52Décomposition en produit de facteurs premiers	49
12.54Caractérisation de la valuation	50
12.55Valuation et décomposition en produit de facteurs premiers	50
12.56Propriétés de la valuation	50
13 Polynômes	52
13.6 Produit de deux polynômes	53
13.7 Structure d'anneau de $\mathbb{A}[X]$	53
13.11Monômes	54
13.12Expression d'un polynôme à l'aide de l'indéterminée formelle	54
13.26Dérivée de produits	55
13.28Dérivée d'une composition	55
13.34Degré d'une somme, d'un produit, d'une dérivée	56

13.36	Théorème de permanence de l'intégrité	57
13.39	Propriété de stabilité	57
13.42	Corollaire du degré d'une dérivée dans $\mathbb{K}[X]$, avec $\mathbb{K} = \mathbb{R}$ ou \mathbb{C}	58
14	Suites numériques	59
14.18	Premier théorème de comparaison	60
14.22	Unicité de la limite	60
14.23	Limite et inégalité	60
14.24	Convergence et bornitude	61
14.29	Minoration d'une extraction	61
14.30	Extraction d'une suite convergente	61
14.32	Pair, impair et convergence	61
14.34	Opérations usuelles sur les limites	62
14.35	Conservation des inégalités larges par passage à la limite	63
14.37	Théorème d'encadrement	63
14.38	Produit d'une suite bornée par une limite nulle	63
14.39	Exemple	63
14.40	Comparaison puissance factorielle	64
14.41	Caractérisation séquentielle de la borne supérieure	64
14.42	Caractérisation séquentielle de la borne supérieure	65
14.48	Théorème de comparaison	65
14.49	Limites infinies et opérations	66
14.50	Théorème de la limite monotone	67
14.54	Exemple	67
14.55	Convergence des suites adjacentes	68
14.56	Théorème de Bolzano-Weierstrass	68
14.63	Exemple	69
14.64	Exemple	69
14.66	Monotonie d'une suite récurrente définie par une relation $u_{n+1} = f(u_n)$	70
14.68	Exemple	70
14.69	Exemple	71
14.72	Convergence et parties réelles et imaginaires	71
14.73	Théorème de Bolzano-Weierstrass pour les suites complexes	71
15	Limites et continuité	73

Chapitre 1

Calculs Algébriques

1.20 Somme des carrés et des cubes

— Somme des carrés :

Pour tout $n \in \mathbb{N}$, on note la proposition :

$$P(n) : \ll \sum_{k=1}^n k^2 = \frac{n(n+1)(2n+1)}{6} \gg$$

Démontrons-la par récurrence.

Initialisation : Pour $n = 0$, on a :

$$\sum_{k=1}^0 k^2 = 0$$

et :

$$\frac{0 \times (0+1) \times (2 \times 0 + 1)}{6} = 0$$

Donc $P(0)$ est vraie.

Hérédité : On suppose $P(n)$ vraie pour un n fixé dans \mathbb{N} . On a :

$$\begin{aligned} \sum_{k=1}^{n+1} k^2 &= \sum_{k=1}^n k^2 + (n+1)^2 \\ &= \frac{n(n+1)(2n+1)}{6} + (n+1)^2 \\ &= \frac{n+1}{6} (n(2n+1) + 6(n+1)) \\ &= \frac{n+1}{6} (2n^2 + 7n + 6) \\ &= \frac{(n+1)(n+2)(2n+3)}{6} \end{aligned}$$

Donc $P(n+1)$ est vraie aussi.

Conclusion : D'après le principe de récurrence,

$$\forall n \in \mathbb{N}, \sum_{k=1}^n k^2 = \frac{n(n+1)(2n+1)}{6}$$

— Somme des cubes :

Pour tout $n \in \mathbb{N}$, on note la proposition :

$$P(n) : \ll \sum_{k=1}^n k^3 = \frac{n^2(n+1)^2}{4} \gg$$

Démontrons-la par récurrence.

Initialisation : Pour $n = 0$, on a :

$$\sum_{k=1}^0 k^3 = 0$$

et :

$$\frac{0 \times (0+1)^2}{4} = 0$$

Donc $P(0)$ est vraie.

Hérédité : On suppose $P(n)$ vraie pour un n fixé dans \mathbb{N} . On a :

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

Donc $P(n+1)$ est vraie aussi.

Conclusion : D'après le principe de récurrence,

$$\forall n \in \mathbb{N}, \sum_{k=1}^n k^2 = \frac{n^2(n+1)^2}{4}$$

1.39 Formule de Pascal

Démontrons pour tout $(n, p) \in (\mathbb{N}^*)^2$ la relation :

$$\ll \binom{n}{p} = \binom{n-1}{p-1} + \binom{n-1}{p} \gg$$

La relation est vraie si $p > n$ (on a $0 = 0 + 0$) et si $p = n$ (qui donne $1 = 0 + 1$).

Soit $1 \leq p \leq n$:

$$\begin{aligned} \binom{n-1}{p} + \binom{n-1}{p-1} &= \frac{(n-1)!}{p!(n-1-p)!} + \frac{(n-1)!}{(p-1)!(n-p)!} \\ &= \frac{(n-1)!}{(p-1)!(n-1-p)!} \left(\frac{1}{p} + \frac{1}{n-p} \right) \\ &= \frac{(n-1)! \times n}{(p-1)!(n-1-p)! \times p(n-p)} \\ &= \frac{n!}{p!(n-p)!} \\ &= \binom{n}{p} \end{aligned}$$

1.41 Formule du capitaine

Démontrons pour n et p deux entiers tels que $1 \leq p \leq n$ la relation :

$$\ll n \binom{n-1}{p-1} = p \binom{n}{p} \gg$$

On a :

$$n \binom{n-1}{p-1} = n \times \frac{(n-1)!}{(p-1)!(n-p)!} = p \times \frac{n!}{p!(n-p)!} = p \binom{n}{p}$$

1.42 Formule du binôme de Newton

Soit $(x, y) \in \mathbb{C}^2$. Pour tout $n \in \mathbb{N}$, on note la proposition :

$$P(n) : \ll (x+y)^n = \sum_{k=0}^n x^k y^{n-k} \gg$$

Démontrons-la par récurrence.

Initialisation : Pour $n = 0$, on a :

$$(x + y)^0 = 1$$

et

$$\sum_{k=0}^0 \binom{0}{k} x^k y^{0-k} = \binom{0}{0} x^0 y^0 = 1$$

Donc $P(0)$ est vraie.

Hérédité : On suppose $P(n)$ vraie pour un n fixé dans \mathbb{N} . On a :

$$\begin{aligned} (x + y)^{n+1} &= (x + y)(x + y)^n \\ &= (x + y) \sum_{k=0}^n \binom{n}{k} x^k y^{n-k} && \text{(hypothèse de récurrence)} \\ &= \sum_{k=0}^n \binom{n}{k} (x^{k+1} y^{n-k} + x^k y^{n+1-k}) && \text{(linéarité)} \\ &= \sum_{k=0}^n \binom{n}{k} x^{k+1} y^{n-k} + \sum_{k=0}^n \binom{n}{k} x^k y^{n+1-k} \\ &= \sum_{k=1}^{n+1} \binom{n}{k-1} x^k y^{n-k} + \sum_{k=0}^n \binom{n}{k} x^k y^{n+1-k} && \text{(translation)} \\ &= x^{n+1} + \sum_{k=1}^n x^k y^{n+1-k} \left(\binom{n}{k-1} + \binom{n}{k} \right) + y^{n+1} \\ &= x^{n+1} + \sum_{k=1}^n \binom{n+1}{k} x^k y^{n+1-k} + y^{n+1} && \text{(formule de Pascal)} \\ &= \sum_{k=0}^{n+1} x^k y^{n+1-k} \end{aligned}$$

Donc $P(n + 1)$ est vraie aussi.

Conclusion : D'après le principe de récurrence,

$$\forall n \in \mathbb{N}, (x + y)^n = \sum_{k=0}^n \binom{n}{k} x^k y^{n-k}$$

Chapitre 2

Logique

2.17 Equivalence logiques

2.17.1 Double négation

p	$\neg p$	$\neg(\neg p)$
V	F	V
F	V	F

On remarque que la première et la deuxième colonne sont identiques, on a donc :

$$p \Longleftrightarrow \neg(\neg p)$$

2.17.2 Commutativité

p	q	$p \wedge q$	$q \wedge p$
V	V	V	V
V	F	F	F
F	V	F	F
F	F	F	F

On remarque que la troisième et la quatrième colonne sont identiques, on a donc :

$$p \wedge q \Longleftrightarrow q \wedge p$$

Raisonnement analogue pour la disjonction \vee .

2.17.3 Associativité

p	q	r	$p \wedge q$	$(p \wedge q) \wedge r$	$q \wedge r$	$p \wedge (q \wedge r)$
V	V	V	V	V	V	V
V	V	F	V	F	F	F
V	F	V	F	F	F	F
V	F	F	F	F	F	F
F	V	V	F	F	V	F
F	V	F	F	F	F	F
F	F	V	F	F	F	F
F	F	F	F	F	F	F

On remarque que la cinquième et la septième colonne sont identiques, on a donc :

$$(p \wedge q) \wedge r \Longleftrightarrow p \wedge (q \wedge r)$$

Raisonnement analogue pour la disjonction \vee .

2.17.4 Loi de Morgan

p	q	$p \wedge q$	$\neg(p \wedge q)$	$\neg p$	$\neg q$	$(\neg p) \vee (\neg q)$
V	V	V	F	F	F	F
V	F	F	V	F	V	V
F	V	F	V	V	F	V
F	F	F	V	V	V	V

On remarque que la quatrième et la septième colonne sont identiques, on a donc :

$$\neg(p \wedge q) \Longleftrightarrow (\neg p) \vee (\neg q)$$

Raisonnement analogue pour $\neg(p \vee q) \Longleftrightarrow (\neg p) \wedge (\neg q)$

2.17.5 Double implication

p	q	$p \Leftrightarrow q$	$p \Rightarrow q$	$q \Rightarrow p$	$(p \Rightarrow q) \wedge (q \Rightarrow p)$
V	V	V	V	V	V
V	F	F	F	V	F
F	V	F	V	F	F
F	F	V	V	V	V

On remarque que la troisième et la sixième colonne sont identiques, on a donc :

$$(p \Leftrightarrow q) \iff ((p \Rightarrow q) \wedge (q \Rightarrow p))$$

2.17.6 Distributivité

p	q	r	$p \wedge q$	$r \vee (p \wedge q)$	$r \vee p$	$r \vee q$	$(r \vee p) \wedge (r \vee q)$
V	V	V	V	V	V	V	V
V	V	F	V	V	V	V	V
V	F	V	F	V	V	V	V
V	F	F	F	F	V	F	F
F	V	V	F	V	V	V	V
F	V	F	F	F	F	V	F
F	F	V	F	V	V	V	V
F	F	F	F	F	F	F	F

On remarque que la cinquième et la huitième colonne sont identiques, on a donc :

$$r \vee (p \wedge q) \iff (r \vee p) \wedge (r \vee q)$$

Chapitre 3

Ensembles et applications

3.12 Propriétés du produit cartésien

Soit x et y . On a :

1.

$$(x, y) \in E \times F \Leftrightarrow x \in E \text{ et } y \in F$$

$$\text{Donc } (x, y) \notin E \times F \Leftrightarrow x \notin E \text{ ou } y \notin F$$

2.

$$E \times F \neq \emptyset \Leftrightarrow \exists (x, y) \in E \times F$$

$$\Leftrightarrow \exists x \in E \text{ et } \exists y \in F$$

$$\Leftrightarrow E \neq \emptyset \text{ et } F \neq \emptyset$$

$$\Leftrightarrow \text{non } (E = \emptyset \text{ ou } F = \emptyset)$$

3.

$$E \times F = F \times E \Leftrightarrow \begin{cases} E \times F = F \times E \text{ et } E = \emptyset \\ E \times F = F \times E \text{ et } F = \emptyset \\ E \times F = F \times E \text{ et } E \neq \emptyset \text{ et } F \neq \emptyset \end{cases}$$

$$\Leftrightarrow \begin{cases} E = \emptyset \text{ ou } F = \emptyset \\ E \neq \emptyset \text{ et } F \neq \emptyset \text{ et } \forall (x, y) \in E \times F, (x, y) \in F \times E \text{ et } \forall (a, b) \in F \times E, (a, b) \in E \times F \end{cases}$$

$$\Leftrightarrow \begin{cases} E = \emptyset \text{ ou } F = \emptyset \\ E \neq \emptyset \text{ et } F \neq \emptyset \text{ et } \forall x \in E, x \in F \text{ et } \forall y \in F, y \in E \end{cases}$$

$$\Leftrightarrow \begin{cases} E = \emptyset \text{ ou } F = \emptyset \\ E = F \end{cases}$$

4.

$$(x, y) \in (E \times F) \cup (F \times G) \Leftrightarrow (x, y) \in E \times F \text{ ou } (x, y) \in F \times G$$

$$\Leftrightarrow (x \in E \text{ et } y \in F) \text{ ou } (x \in F \text{ et } y \in G)$$

$$\Leftrightarrow x \in E \text{ et } y \in F \cup G$$

5.

$$(x, y) \in (E \times F) \cap (G \times H) \Leftrightarrow (x, y) \in E \times F \text{ et } (x, y) \in G \times H$$

$$\Leftrightarrow x \in E \text{ et } y \in F \text{ et } x \in G \text{ et } y \in H$$

$$\Leftrightarrow x \in E \cap G \text{ et } y \in F \cap H$$

$$\Leftrightarrow (x, y) \in (E \cap G) \times (F \cap H)$$

3.18 Associativité des relations

Les ensembles de départ et d'arrivée sont bien égaux (à E et H respectivement). Soit $(x, y) \in E \times H$

$$x(\mathcal{T} \circ \mathcal{S}) \circ \mathcal{R}y \Leftrightarrow \exists z \in F, x(\mathcal{T} \circ \mathcal{S})z \text{ et } z\mathcal{R}y$$

$$\Leftrightarrow \exists z \in F, \exists v \in G, (x\mathcal{T}v \text{ et } v\mathcal{S}z) \text{ et } z\mathcal{R}y$$

$$\Leftrightarrow \exists z \in F, \exists v \in G, x\mathcal{T}v \text{ et } (v\mathcal{S}z \text{ et } z\mathcal{R}y)$$

$$\Leftrightarrow \exists v \in G, x\mathcal{T}v \text{ et } v(\mathcal{S} \circ \mathcal{R})y$$

$$\Leftrightarrow x\mathcal{T} \circ (\mathcal{S} \circ \mathcal{R})y$$

3.20 Propriétés des relations réciproques

— RAF

— Les ensembles de départ sont égaux respectivement à E et à G .

Soit $(x, y) \in G \times E$. On a :

$$\begin{aligned} x\mathcal{R}^{-1} \circ \mathcal{S}^{-1}y &\Leftrightarrow \exists \alpha \in F, x\mathcal{S}^{-1}\alpha \text{ et } \alpha\mathcal{R}^{-1}y \\ &\Leftrightarrow \exists \alpha \in F, \alpha\mathcal{S}x \text{ et } y\mathcal{R}\alpha \\ &\Leftrightarrow y\mathcal{S} \circ \mathcal{R}x \\ &\Leftrightarrow x(\mathcal{R} \circ \mathcal{S})^{-1}y \end{aligned}$$

3.23 Composition de fonctions

Soit f une fonction de E vers F .

Soit g une fonction de E vers G .

$g \circ f$ est une relation de E vers G

Soit $(x, y, y') \in E \times G \times G$. On suppose

$$\begin{cases} x(g \circ f)y \\ x(g \circ f)y' \end{cases}$$

Donc on choisit α dans F tel que :

$$xf\alpha \text{ et } \alpha gy$$

et β dans F tel que :

$$xf\beta \text{ et } \beta gy'$$

Or f est une fonction, donc $\alpha = \beta$.

Donc αgy et $\alpha gy'$, or g est une fonction, donc $y = y'$. Par définition, $g \circ f$ est une fonction.

3.30 Schémas de raisonnement : montrer l'injectivité/surjectivité/bijektivité

Injectivité :

Soit $(x, x') \in E^2$.

On suppose que $f(x) = f(x')$.

\vdots

Donc $x = x'$.

Surjectivité :

Soit $y \in F$.

\vdots

On choisit ... tel que :

\vdots

Donc $f(x) = y$

Bijektivité :

Pour la bijectivité, on montre l'injectivité et la surjectivité séparément.

3.35 Composée d'injections/surjections

Soit $f : E \rightarrow F$ et $g : F \rightarrow G$.

- On suppose que f et g sont injectives.
Soit $(x, x') \in E^2$.

On suppose que $g \circ f(x) = g \circ f(x')$

Donc $g(f(x)) = g(f(x'))$

Donc $f(x) = f(x')$

(g est injective)

Donc $x = x'$

(f est injective)

- On suppose que f et g sont surjectives.
Soit $y \in G$.
Par surjectivité de g , on choisit $\alpha \in F$ tel que $g(\alpha) = y$.
Par surjectivité de f , on choisit $x \in E$ tel que $f(x) = \alpha$.
Donc $g \circ f(x) = y$.
Donc $g \circ f$ est surjective.

3.36 Condition nécessaire pour une composition injective/surjective

- Soit $(x, x') \in E^2$ tels que :

$$f(x) = f(x')$$

$$\text{Donc } g(f(x)) = g(f(x'))$$

$$\text{Donc } x = x'$$

Donc f est injective.

- On suppose $g \circ f$ surjective.
Soit $y \in G$. Soit $\alpha \in E$ tel que $g \circ f(\alpha) = y$.
On pose $x = f(\alpha) \in F$.
Donc $g(x) = y$ Donc g est surjective.

3.37 Réciproque et bijection

- Soit $f : E \rightarrow F$ et f^{-1} la relation réciproque de f
- f^{-1} est une fonction si et seulement si f est injective.
 - Si f^{-1} est une fonction, c'est une application.
ssi. $\text{Def}(f^{-1}) = F$
ssi. f est surjective.

3.38 Inverse d'une composée de bijections

Propositions (3.35), (3.27) et (3.20)

3.39 Condition nécessaire et suffisante de bijectivité

\Rightarrow

On suppose que f est bijective.
On pose $g = f^{-1}$ sa bijection réciproque.
On a bien $g \circ f = id_E$ et $f \circ g = id_F$.

\Leftarrow

Soit $g : F \rightarrow E$ vérifiant $g \circ f = id_E$ et $f \circ g = id_F$.
En particulier, $g \circ f$ est injective, donc f est injective.
En particulier, $f \circ g$ est surjective, donc f est surjective.
Donc f est bijective.
Or $f \circ g = id_F$.
Donc $f^{-1} \circ f \circ g = f^{-1} \circ id_F$.
Soit $g = f^{-1}$.

Chapitre 4

Généralités sur les fonctions

4.21 Exemple

On suppose que $f \geq g$. Ainsi :

$$|f - g| = f - g \Leftrightarrow \frac{f + g + |f - g|}{2} = f$$

4.23 Remarque

Soit $a \in \mathbb{Q}^*$. Soit $x \in \mathbb{R}$.

— Si $x \in \mathbb{Q}$, alors $x + a \in \mathbb{Q}$, donc $\mathbf{1}_{\mathbb{Q}}(x + a) = 1 = \mathbf{1}_{\mathbb{Q}}(x)$.

— Si $x \notin \mathbb{Q}$, alors $x + a \notin \mathbb{Q}$, donc $\mathbf{1}_{\mathbb{Q}}(x + a) = 0 = \mathbf{1}_{\mathbb{Q}}(x)$.

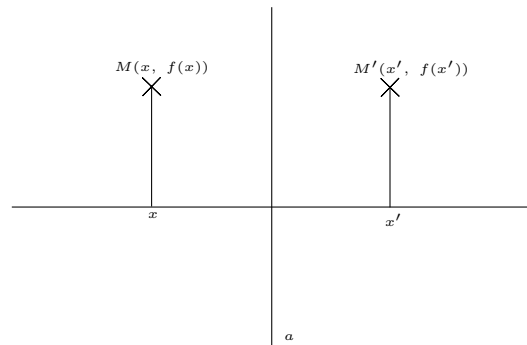
4.27 Axe de symétrie

Soit $f : I \rightarrow \mathbb{R}$ une fonction et \mathcal{C}_f sa courbe représentative.

Soit $(x, x') \in I^2$.

M et M' sont symétriques par rapport $x = a$

$$\begin{aligned} \text{ssi. } & \begin{cases} a = \frac{x+x'}{2} \\ f(x) = f(x') \end{cases} \\ \text{ssi. } & \begin{cases} x' = 2a - x \\ f(x) = f(x') \end{cases} \end{aligned}$$

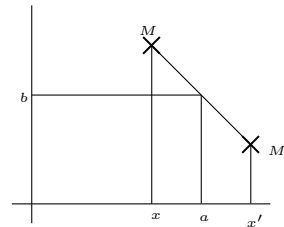


4.28 Centre de symétrie

On reprend les mêmes notations qu'à la (4.27).

M et M' sont symétriques par rapport à $A(a, b)$

$$\begin{aligned} \text{ssi. } & \begin{cases} a = \frac{x+x'}{2} \\ b = \frac{f(x)+f(x')}{2} \end{cases} \\ \text{ssi. } & \begin{cases} x' = 2a - x \\ f(x') = 2b - f(x) \end{cases} \end{aligned}$$



4.51 Exemple

1. $f'(x) = -\frac{2x+1}{(x+x^2)^2}$
2. $f'(x) = -\frac{1}{2x\sqrt{x}}e^{\frac{1}{\sqrt{x}}}$
3. $f'(x) = -3\frac{e^x(x-1)}{x^2}\sin\left(\frac{e^x}{x}\right)\cos^2\left(\frac{e^x}{x}\right)$

4.52 Théorème de la bijection dérivable

On suppose la dérivabilité de f^{-1} . Par définition :

$$f \circ f^{-1} = \text{Id}_I$$

D'après la proposition (4.48.4), on a :

$$\begin{aligned} (f^{-1})' \circ f' \times f^{-1} &= (f \circ f^{-1})' \\ &= \text{Id}'_I \\ &= 1 \end{aligned}$$

Comme f ne s'annule pas sur I , on a :

$$(f^{-1})' = \frac{1}{f' \circ f^{-1}}$$

4.61 Primitives d'une fonction sur un intervalle

— Si F et G sont deux primitives de f sur l'intervalle I , alors :

$$\begin{aligned} \forall n \in I, (F - G)'(x) &= F'(x) - G'(x) \\ &= f(x) - f(x) \\ &= 0 \end{aligned}$$

Comme I est un intervalle, $F - G$ est constante (4.53).

Réciproquement, pour tout $a \in \mathbb{R}$, $F + a$ est aussi une primitive de f sur I .

— Soit G une primitive de f sur I . Soit $a \in \mathbb{R}$ et $x_0 \in I$. Or pour $F = G + a - G(x_0)$, F est une primitive de f sur I et $F(x) = a$.

L'unicité est donnée par le point précédent.

4.62 Exemple

1. Sur $I =]-\frac{\pi}{2}; \frac{\pi}{2}[$.
Pour tout $x \in I$,

$$\begin{aligned} \tan x &= \frac{\sin x}{\cos x} \\ &= -\frac{-\sin x}{\cos x} \end{aligned}$$

La primitive de \tan sur I est : $x \mapsto -\ln |\cos x| = \ln \cos x$.

2. Sur $I =]-\frac{\pi}{2}; \frac{\pi}{2}[$.

$$\forall x \in I, \tan^2 x = \tan^2 x + 1 - 1$$

Une primitive de \tan^2 sur I est : $x \mapsto \tan x - x$.

3. Sur $I = \mathbb{R}$.

$$\begin{aligned} \forall x \in \mathbb{R}, x\sqrt{1+x^2} &= x(1+x^2)^{\frac{1}{2}} \\ &= \frac{1}{2} \times 2x \times (1+x^2)^{\frac{1}{2}} \end{aligned}$$

Une primitive de $x \mapsto x(1+x^2)^{\frac{1}{2}}$ sur \mathbb{R} est : $x \mapsto \frac{1}{2} \times \frac{2}{3}(1+x^2)^{\frac{3}{2}} = \frac{1}{3}(1+x^2)^{\frac{3}{2}}$.

4. Sur $I = \mathbb{R}_+^*$.

$$\forall x > 0, \frac{\ln x}{x} = \frac{1}{x} \ln x$$

Une primitive de $x \mapsto \frac{\ln x}{x}$ sur \mathbb{R}_+^* est : $x \mapsto \frac{1}{2} \ln^2 x$.

4.65 Remarque

$G : y \mapsto yg(y) - F(g(y)) + \lambda, \lambda \in \mathbb{R}$.

$$\begin{aligned} G'(y) &= g(y) + yg'(y) - g'(y)f(g(y)) \\ &= g(y) + \cancel{yg'(y)} - \cancel{g'(y)y} \\ &= g(y) \end{aligned}$$

4.66 Exemple

$$\begin{aligned}
 \left| \int_{-1}^1 \frac{t^n}{1+t^2} dt \right| &\leq \int_{-1}^1 \frac{|t|^n}{1+t^2} dt && \text{(Inégalité triangulaire)} \\
 &\leq \int_{-1}^1 |t|^n dt && (\forall t, \frac{|t|^n}{1+t^2} \leq |t|^n) \\
 &= (-1)^n \int_{-1}^0 t^n dt + \int_0^1 t^n dt && \text{(Relation de Chasles)} \\
 &= (-1)^n \left[\frac{t^{n+1}}{n+1} \right]_{-1}^0 + \left[\frac{t^{n+1}}{n+1} \right]_0^1 \\
 &= -\frac{(-1)^n (-1)^{n+1}}{n+1} + \frac{1}{n+1} \\
 &= \frac{2}{n+1}
 \end{aligned}$$

4.69 Intégration par partie

$$\begin{aligned}
 \int_a^b f'(t)g(t) dt + \int_a^b f(t)g'(t) dt &= \int_a^b (f'(t)g(t) + f(t)g'(t)) dt \\
 &= \int_a^b (fg)'(t) dt \\
 &= [f(t)g(t)]_a^b
 \end{aligned}$$

4.70 Changement de variable

Comme f est une fonction continue sur $[a, b]$, on choisit une primitive F de f sur $[a, b]$. (Théorème fondamental du calcul intégral)
Ainsi :

$$\begin{aligned}
 \int_{u(a)}^{u(b)} f(t) dt &= [F(t)]_{u(a)}^{u(b)} \\
 &= F \circ u(b) - F \circ u(a)
 \end{aligned}$$

Or :

$$\begin{aligned}
 \int_a^b f(u(t))u'(t) dt &= \int_a^b F'(u(t)) \times u'(t) du(t) \\
 &= [F \circ u(t)]_a^b
 \end{aligned}$$

4.72 Exemple

Si $x = \sin t$, alors $dx = \cos t dt$.

Pour $t = 0$, $x = \sin 0 = 0$.

Pour $t = \frac{\pi}{2}$, $x = \sin \frac{\pi}{2} = 1$.

Or $t \mapsto \sin t \in \mathcal{C}^1([0; \frac{\pi}{2}], \mathbb{R})$.

D'après le théorème de changement de variable :

$$\begin{aligned}\int_0^1 \sqrt{1-x^2} dx &= \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sqrt{1-\sin^2 t} \cos t dt \\&= \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sqrt{\cos^2 t} \cos t dt \\&= \int_0^{\frac{\pi}{2}} \cos^2 t dt \\&= \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{1+\cos 2t}{2} dt \\&= \left[\frac{1}{4} \sin 2t \right]_0^{\frac{\pi}{2}} + \frac{\pi}{4} \\&= \frac{\pi}{4}\end{aligned}$$

4.74 Méthode

Pour tout $x \in \mathbb{R} \setminus \{a; b\}$, trouver c et d tel que $\frac{\alpha x + \beta}{(x-a)(x-b)} = \frac{c}{x-a} + \frac{d}{x-b}$:

$$\begin{aligned}\frac{\alpha x + \beta}{(x-b)} &= c + \frac{d(x-a)}{(x-b)} && \text{(On multiplie par } (x-a)) \\c &= \frac{\alpha a + \beta}{a-b} && (x=a) \\d &= \frac{\alpha b + \beta}{b-a} && (x=b)\end{aligned}$$

4.75 Exemple

$$f : x \mapsto \frac{2x-1}{(x+1)(x-3)} = \frac{4}{3(x+1)} + \frac{4}{5(x-3)}$$

Une primitive de f sur $] -1; 3[$ est : $x \mapsto \frac{3}{4} \ln |x+1| + \frac{5}{4} \ln |x-3| = \frac{3}{4} \ln(x+1) + \frac{5}{4} \ln(x-3)$

Chapitre 5

Fonctions usuelles

5.2 Propriétés du logarithme

Par définition, \ln est définie et dérivable sur \mathbb{R}_+^* et :

$$\forall x > 0, \ln'(x) = \frac{1}{x}$$

On montre par récurrence sur $n \geq 1$ que

$$\text{"}\ln \text{ est dérivable } n \text{ fois et } \forall n > 0, \ln^{(n)}(x) = \frac{(-1)^{n-1}(n-1)!}{x^n}\text{"}$$

Initialisation :

La propriété est vraie pour $n = 1$.

Hérédité :

Si elle est vraie pour $n \geq 1$, par théorème d'opérations, $\ln^{(n)}$ est encore dérivable et :

$$\begin{aligned} \forall x > 0, \ln^{(n+1)}(x) &= \left[\ln^{(n)} \right] (x) \\ &= (-1)^n n! x^{-n-1} \end{aligned}$$

Comme $\ln' > 0$ sur \mathbb{R}_+^* , alors \ln est strictement croissante sur \mathbb{R}_+^* .

5.3 Propriété fondamentale du logarithme

On montre seulement la propriété pour $a > 0$ et $b > 0$.

On fixe $b > 0$ et on considère :

$$f : \mathbb{R}_+^* \rightarrow \mathbb{R}; x \mapsto \ln(xb)$$

Par composition, $f \in \mathcal{D}^1(\mathbb{R}_+^*, \mathbb{R})$ et :

$$\forall x > 0, f'(x) = b \times \frac{1}{xb} = \frac{1}{x}$$

Donc f est une primitive de $\frac{1}{x}$ sur \mathbb{R}_+^* .

On choisit $c \in \mathbb{R}$ tel que :

$$f = \ln + c$$

En particulier :

$$f(1) = \ln 1 + c$$

Soit :

$$\ln b = c$$

Ainsi :

$$\forall x > 0, \ln(xb) = \ln x + \ln b$$

On a par conséquent :

$$\begin{aligned} \forall x \in \mathbb{R}_+^*, 0 &= \ln 1 \\ &= \ln\left(x \times \frac{1}{x}\right) \\ &= \ln x + \ln \frac{1}{x} \end{aligned}$$

Donc pour $a > 0$ et $b > 0$, on a :

$$\begin{aligned}\ln\left(\frac{a}{b}\right) &= \ln\left(a \times \frac{1}{b}\right) \\ &= \ln a + \ln \frac{1}{b} \\ &= \ln a - \ln b\end{aligned}$$

5.4 Limites usuelles de la fonction logarithme

On commence par montrer que :

$$\ln x \xrightarrow{x \rightarrow +\infty} +\infty$$

On sait que \ln est croissante sur \mathbb{R}_+^* , donc d'après le théorème de la limite monotone :

$$\ln x \xrightarrow{x \rightarrow +\infty} +\infty \quad \text{ou} \quad \ln x \xrightarrow{x \rightarrow +\infty} \lambda$$

Soit $n \geq 1$. On a :

$$\begin{aligned}\ln n &= \int_1^n \frac{dt}{t} \\ &= \sum_{k=1}^{n-1} \int_k^{k+1} \frac{dt}{t} \\ &\geq \sum_{k=1}^{n-1} \int_k^{k+1} \frac{dt}{k+1} \\ &= \sum_{k=1}^{n-1} \frac{1}{k+1} \\ &= \sum_{k=1}^n \left(\frac{1}{k}\right) - 1\end{aligned}$$

Or :

$$\sum_{k=1}^n \left(\frac{1}{k}\right) - 1 \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} +\infty$$

Par théorème de comparaison :

$$\ln n \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} +\infty$$

Donc :

$$\ln x \xrightarrow{x \rightarrow +\infty} +\infty$$

Enfin :

$$\forall x > 0, \ln x = -\ln\left(\frac{1}{x}\right)$$

Donc par composition :

$$\ln x \xrightarrow{x \rightarrow 0^+} -\infty$$

Par taux d'accroissement, en introduisant :

$$\begin{aligned}f : \mathbb{R}_+ &\rightarrow \mathbb{R}; x \mapsto \ln(1+x) \\ f &\in \mathcal{D}^1(\mathbb{R}_+, \mathbb{R}) \\ \frac{\ln(x+1)}{x} &= \frac{f(x) - f(0)}{x - 0} \underset{x \rightarrow 0}{f'(0)} = 1\end{aligned}$$

5.8 Propriétés de la fonction exponentielle

D'après les résultats précédents (5.2), (5.4), on applique le théorème de la bijection dérivable. La fonction exponentielle est dérivable sur \mathbb{R} et :

$$\begin{aligned}\forall x \in \mathbb{R}, \exp' x &= \frac{1}{\ln' \circ \exp x} \\ &= \exp x\end{aligned}$$

On obtient directement que $\exp \in \mathcal{C}^\infty(\mathbb{R}, \mathbb{R}_+^*)$ et que $\exp^{(n)} = \exp n$ pour tout $n \in \mathbb{N}$.

5.9 Propriété fondamentale de l'exponentielle

Soit $(x, y) \in \mathbb{R}^2$. On choisit $(a, b) \in (\mathbb{R}_+^*)^2$ tel que :

$$x = \ln a \text{ et } y = \ln b$$

Ainsi :

$$\begin{aligned}\exp(x + y) &= \exp(\ln a + \ln b) \\ &= \exp(\ln(ab)) \\ &= ab \\ &= \exp x \times \exp y\end{aligned}$$

Ainsi, $\exp 0 = \exp(0 + 0) = \exp^2 0$.

Donc $\exp 0 \in \{0; 1\}$

Or \exp est à valeur dans \mathbb{R}_+^* , donc $\exp 0 = 1$, donc :

$$\forall x \in \mathbb{R}_+^*, \exp 0 = \exp(x - x) = \exp x \times \exp(-x) = 1$$

5.15 Dérivée d'une fonction puissance

Soit $y > 0$. On pose $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}; x \mapsto y^x = \exp(x \ln y)$.

$f \in \mathcal{D}^1(\mathbb{R}, \mathbb{R})$, donc par composition :

$$\begin{aligned}\forall x \in \mathbb{R}, f'(x) &= \ln y \times \exp(x \ln y) \\ &= \ln y \times y^x\end{aligned}$$

5.21 Croissances comparées en $+\infty$

1. On commence par montrer que $\frac{\ln x}{x} \xrightarrow{x \rightarrow +\infty} 0$.

Soit $x \geq 1$. On a :

$$\begin{aligned}0 \leq \frac{\ln x}{x} &= \frac{1}{x} \int_1^x \frac{dt}{t} \\ &\leq \frac{1}{x} \int_1^x \frac{dt}{\sqrt{t}} \\ &= \frac{1}{x} \left[2\sqrt{t} \right]_1^x \\ &= \frac{2(\sqrt{x} - 1)}{x} \\ &= 2 \left(\frac{1}{\sqrt{x}} - \frac{1}{x} \right) \\ &\xrightarrow{x \rightarrow +\infty} 0\end{aligned}$$

D'après le théorème d'encadrement, $\frac{\ln x}{x} \xrightarrow{x \rightarrow +\infty} 0$.

Soit $a > 0$ et $x > 0$:

$$\frac{\ln x}{x^a} = \frac{1}{a} \times \frac{\ln x^a}{x^a} \xrightarrow{x \rightarrow +\infty} 0 \quad (\text{composition et théorème d'opérations})$$

2. On utilise le changement de variable :

$$x = (\ln y)^{\frac{1}{a}}, \text{ soit } y = e^{ax}$$

Ainsi :

$$\frac{x^a}{e^x} = \frac{\ln y}{y^{\frac{1}{a}}} \xrightarrow{x \rightarrow +\infty} \begin{cases} 0 \text{ par composition si } a > 0 \\ 0 \text{ par théorème d'opérations si } a \leq 0 \end{cases}$$

5.22 Croissances comparées en 0

On utilise la proposition (5.21.1) avec $y = \frac{1}{x}$.

5.43.2 Formule de trigonométrie hyperbolique

Soit $(a, b) \in \mathbb{R}^2$.

$$\begin{aligned} ch(a)ch(b) + sh(a)sh(b) &= \frac{(e^a + e^{-a})(e^b + e^{-b})}{4} + \frac{(e^a - e^{-a})(e^b - e^{-b})}{4} \\ &= \frac{2e^{a+b} + 2e^{-(a+b)}}{4} \\ &= ch(a+b) \end{aligned}$$

Chapitre 10

Structures algébriques

10.3 Exemple

Exemple

Soit $E =]-1; 1[$. Pour $(x, y) \in E^2$, on pose : $x \star y = \frac{x+y}{1+xy}$. Montrer que l'on définit ainsi une loi dans E .

On fixe $y \in E$. On note $\varphi : [-1; 1] \rightarrow \mathbb{R}; x \mapsto x \star y = \frac{x+y}{1+xy}$.
 $\varphi \in \mathcal{D}^1([-1; 1], \mathbb{R})$ et :

$$\begin{aligned} \forall x \in E, \varphi'(x) &= \frac{1 + xy - y(x + y)}{(1 + xy)^2} \\ &= \frac{1 - y^2}{(1 + xy)^2} \\ &> 0 \end{aligned}$$

Comme E est un intervalle : φ est strictement croissante sur E et :

$$\forall x \in E, -1 = \varphi(-1) < \varphi(x) < \varphi(1) = 1$$

Donc :

$$\forall (x, y) \in E^2, x \star y \in E$$

10.6 Exemple

Exemple

Soit $E =]-1; 1[$. Pour $(x, y) \in E^2$, on pose $x \star y = \frac{x+y}{1+xy}$. Montrer que \star est associative et commutative.

- Commutativité : RAF
- Associativité :
 Soit $(x, y, z) \in E^3$. On a :

$$\begin{aligned} x \star (y \star z) &= x \star \left(\frac{y + z}{1 + yz} \right) \\ &= \frac{x + \frac{y+z}{1+yz}}{1 + x \frac{y+z}{1+yz}} \\ &= \frac{x(1 + yz) + y + z}{1 + yz + xy + xz} \\ &= \frac{x + y + z + xyz}{1 + yz + xy + xz} \end{aligned}$$

C'est une expression symétrique en x, y et z donc :

$$x \star (y \star z) = (x \star y) \star z$$

Chapitre 11

Matrices

11.11 Produit matriciel

$$AB = \begin{pmatrix} 1 & 2 & -1 \\ -1 & 2 & 5 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 2 & 8 & 4 \\ -1 & -1 & -1 \\ 2 & 0 & 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -2 & 6 & 2 \\ 6 & -10 & -6 \end{pmatrix}$$

11.12 Produit matriciel, lignes par colonnes

$$\text{— } A = (a_{i,j})_{\substack{1 \leq i \leq n \\ 1 \leq j \leq p}} \text{ et } C_i = \begin{pmatrix} 0 \\ \vdots \\ i \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix} = (\delta_{ij})_{1 \leq j \leq p} \in \mathcal{M}_{p,1}(\mathbb{K})$$

$$\begin{aligned} (AC_i)_{k,1} &= \sum_{l=1}^p a_{kl}(C_i)_{l,1} \\ &= \sum_{l=1}^p a_{kl}\delta_{il} \\ &= a_{ki} \end{aligned}$$

$$\text{— } L_j = (0 \quad \dots \quad 1 \quad \dots \quad 0) = (\delta_{ji})_{1 \leq i \leq n}$$

$$\begin{aligned} (L_j A)_{1k} &= \sum_{l=1}^n (L_j)_{1,e} \times a_{ek} \\ &= \sum_{l=1}^n \delta_{je} a_{lk} \\ &= a_{jk} \end{aligned}$$

$$\text{— On note } A = (C_1 \mid \dots \mid C_p) \text{ et } X = \begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_p \end{pmatrix} = \sum_{k=1}^p x_k \begin{pmatrix} 0 \\ \vdots \\ 1 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$AX = \sum_{k=1}^p x_k A \begin{pmatrix} 0 \\ \vdots \\ 1 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix} = \sum_{k=1}^p x_k C_k$$

11.16 Produit de deux matrices élémentaires

Soit $1 \leq k \leq n; 1 \leq l \leq m$

$$\begin{aligned} (E_{ij} \times E_{rs})_{k,l} &= \sum_{p=1}^t (E_{ij})_{kp} \times (E_{rs})_{pl} \\ &= \sum_{p=1}^t \delta_{ik} \delta_{pj} \delta_{rp} \delta_{sl} \\ &= \delta_{rj} \delta_{ik} \delta_{sl} \\ &= \delta_{rj} (E_{is})_{kl} \end{aligned}$$

Donc $E_{ij} \times E_{rs} = \delta_{jr} E_{is}$

11.17 Propriétés du produit matriciel, matrice identité

— Soit $(A, B, C) \in \mathcal{M}_{i,p}(\mathbb{K}) \times \mathcal{M}_{q,r}(\mathbb{K})$

$$\begin{aligned}
 (AB)_{ij} &= \sum_{k=1}^p A_{ik} B_{kj} \\
 [(AB)C]_{il} &= \sum_{t=1}^q (AB)_{it} C_{tl} \\
 &= \sum_{t=1}^q \sum_{k=1}^p A_{ik} B_{kt} C_{tl} \\
 &= \sum_{k=1}^p A_{ik} \sum_{t=1}^q B_{kt} C_{tl} \\
 &= \sum_{k=1}^p A_{ik} (BC)_{kl} \\
 &= (A(BC))_{il}
 \end{aligned}$$

— RAF

— RAF

11.24 Exemple

On écrit $A = I_3 + N$ avec $N = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 2 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$.

$$N^2 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Soit $k \in \mathbb{N}$. Comme I_3 et N commutent,

$$\begin{aligned}
 A^k &= (I_3 + N)^k \\
 &= \sum_{i=0}^k \binom{k}{i} N^i && \text{(Binôme de Newton)} \\
 &= I_3 + \binom{k}{1} N && (N^2 = 0) \\
 &= I_3 + kN \\
 &= \begin{pmatrix} 1 & k & 2k \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}
 \end{aligned}$$

11.25 Produit par bloc

On le fait pour un bloc. Soit $1 \leq i \leq n$ et $1 \leq j \leq s$.

$$\begin{aligned}
 \left[\begin{pmatrix} A & C \\ B & D \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A' & C' \\ B' & D' \end{pmatrix} \right]_{i,j} &= \sum_{k=1}^{p+q} \begin{pmatrix} A & C \\ B & D \end{pmatrix}_{ik} \begin{pmatrix} A' & C' \\ B' & D' \end{pmatrix}_{kj} \\
 &= \sum_{k=1}^p \begin{pmatrix} A & C \\ B & D \end{pmatrix}_{ik} \begin{pmatrix} A' & C' \\ B' & D' \end{pmatrix}_{kj} + \sum_{k=p+1}^{p+q} \begin{pmatrix} A & C \\ B & D \end{pmatrix}_{ik} \begin{pmatrix} A' & C' \\ B' & D' \end{pmatrix}_{kj} \\
 &= \sum_{k=1}^p A_{ik} A'_{kj} + \sum_{k=1}^q C_{ik} B_{kj} \\
 &= (AA' + CB')_{ij}
 \end{aligned}$$

11.27 Propriétés de la transposition

- RAF
- RAF
- Soit $(i, j) \in \llbracket 1, q \rrbracket \times \llbracket 1, n \rrbracket$

$$\begin{aligned}
 [{}^t(AB)]_{ij} &= (AB)_{ji} \\
 &= \sum_{k=1}^p A_{jk} B_{ki} \\
 &= \sum_{k=1}^p [{}^t B]_{ik} [{}^t A]_{kj} \\
 &= [{}^t B {}^t A]_{ij}
 \end{aligned}$$

11.31 Forme linéaire sur $\mathcal{M}_n(\mathbb{K})$

Soit $(A, B) \in \mathcal{M}_n(\mathbb{K})^2$, $\lambda \in \mathbb{K}$.

- Trace d'une somme de matrices :

$$\begin{aligned}
 tr(A + B) &= \sum_{i=1}^n (A + B)_{ii} \\
 &= \sum_{i=1}^n A_{ii} + B_{ii} \\
 &= \sum_{i=1}^n A_{ii} + \sum_{i=1}^n B_{ii} \\
 &= tr(A) + tr(B)
 \end{aligned}$$

- Trace d'un produit par un scalaire :

$$\begin{aligned}
 tr(\lambda A) &= \sum_{i=1}^n (\lambda A)_{ii} \\
 &= \lambda \sum_{i=1}^n A_{ii} \\
 &= \lambda tr(A)
 \end{aligned}$$

- Trace d'un produit de matrices :

$$\begin{aligned}
 tr(AB) &= \sum_{i=1}^n (AB)_{ii} \\
 &= \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^n A_{ik} B_{ki} \\
 &= \sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^n B_{ki} A_{ik} \\
 &= \sum_{k=1}^n (BA)_{kk} \\
 &= tr(BA)
 \end{aligned}$$

11.33 Exemple

On suppose A et B solutions.

Donc $AB - BA = I_n$

Donc $tr(AB - BA) = tr(I_n) = n$

Or $tr(AB - BA) = 0$

Absurde.

11.37 Stabilité des matrices diagonales ou triangulaires

On montre le résultat pour les matrices triangulaires supérieures (ensemble noté $\mathcal{T}_n^+(\mathbb{K})$).
 Soit $(A, B) \in \mathcal{T}_n^+(\mathbb{K})^2$. On a bien $A + B \in \mathcal{T}_n^+(\mathbb{K})$ et aussi $\lambda A \in \mathcal{T}_n^+(\mathbb{K})$ pour tout $\lambda \in \mathbb{K}$.
 Soit $i > j$, on a :

$$(AB)_{ij} = \sum_{k=1}^n A_{ik} B_{kj}$$

— Si $i > j$, $A_{ik} = 0$.

— Si $i = j$, $B_{kj} = 0$.

Donc $(AB)_{ij} = 0$.

Donc $AB \in \mathcal{T}_n^+(\mathbb{K})$.

Si $(AB) \in \mathcal{T}_n^+(\mathbb{K})^2$, alors ${}^t(AB) = \underbrace{{}^tB}_{\in \mathcal{T}_n^+(\mathbb{K})} \times \underbrace{{}^tA}_{\in \mathcal{T}_n^+(\mathbb{K})} \in \mathcal{T}_n^+(\mathbb{K})$

Donc $AB \in \mathcal{T}_n^+(\mathbb{K})$

Le résultat est vrai pour les matrices diagonales, à la fois triangulaires supérieures et inférieures.

11.41 Nilpotence des matrices triangulaires

Soit $T \in \mathcal{T}_n^{++}(\mathbb{K})$.

On va montrer par récurrence sur $k \in \llbracket 1, n \rrbracket$ que :

$${}^" T^k = \begin{pmatrix} O & - & O & - & \Delta \\ & & & & | \\ & & & & O \\ & & & & | \\ & & & & O \end{pmatrix} {}^"$$

C'est-à-dire que pour tout $(i, j) \in \llbracket 1, n \rrbracket^2$, $i + k - 1 \geq j \Rightarrow T_{ij}^k = 0$.

On suppose le résultat vrai pour $k \in \llbracket 1, n - 1 \rrbracket$.

Soit $i + k \geq j$.

$$\begin{aligned} (T^{k+1})_{ij} &= (T^k T)_{ij} \\ &= \sum_{p=1}^n T_{ip}^k T_{pj} \end{aligned}$$

— Si $p \leq i + k - 1$, $T_{ip}^k = 0$

— Si $p \geq i + k$, $T_{pj} = 0$

Donc $(T^{k+1})_{ij} = 0$.

Par récurrence, $P(k)$ est vrai pour tout $k \in \llbracket 1, n \rrbracket$. En particulier, pour $k = n$, on obtient $T^n = 0$.

11.44 Opérations

— ${}^t A \times {}^t (A^{-1}) = {}^t (A^{-1} A) = {}^t I_n = I_n$

— ${}^t (A^{-1}) \times {}^t A = {}^t (A A^{-1}) = {}^t I_n = I_n$

Donc $({}^t A)^{-1} = {}^t (A^{-1})$

11.48 Caractérisation de $GL_2(\mathbb{K})$

On note $M = \begin{pmatrix} a & c \\ b & d \end{pmatrix}$ et $N = \begin{pmatrix} d & -c \\ -b & a \end{pmatrix}$.

$$\begin{aligned} M.N &= \begin{pmatrix} a & c \\ b & d \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d & -c \\ -b & a \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} ad - bc & 0 \\ 0 & ad - bc \end{pmatrix} \\ &= \det(M)I_2 \end{aligned}$$

- Si $\det(M) \neq 0$, alors $M \times \left(\frac{1}{\det(M)}N\right) = I_2$. Donc M est inversible et $M^{-1} = \frac{1}{\det(M)}N$.
- Si $\det(M) = 0$, alors $M.N = 0$ donc M n'est pas inversible.

11.49 Matrices diagonales inversibles

Soit $D = \text{Diag}(\lambda_1, \dots, \lambda_n)$.



On suppose que :

$$\forall i \in \llbracket 1, n \rrbracket, \lambda_i \neq 0$$

$$\begin{aligned} D \times \text{Diag}(\lambda_1^{-1}, \dots, \lambda_n^{-1}) &= \text{Diag}(\lambda_1 \times \lambda_1^{-1}, \dots, \lambda_n \times \lambda_n^{-1}) \\ &= \text{Diag}(1, \dots, 1) \\ &= I_n \end{aligned}$$

Donc D est inversible et

$$D^{-1} = \text{Diag}(\lambda_1^{-1}, \dots, \lambda_n^{-1})$$



Par contraposée, soit $i \in \llbracket 1, n \rrbracket$ tel que $\lambda_i = 0$.

$$D \times \text{Diag}(0, \dots, \underbrace{1}_{i^{\text{ème place}}, \dots, 0) = 0$$

Donc D est un diviseur de 0, donc D n'est pas inversible.

11.50 Exemple

On a :

$$\begin{pmatrix} 1 & & & a_{1n} \\ & \ddots & & \vdots \\ & & \ddots & a_{n-1,n} \\ & & & 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 1 & & & -a_{1n} \\ & \ddots & & \vdots \\ & & \ddots & -a_{n-1,n} \\ & & & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & & & 0 \\ & \ddots & & \vdots \\ & & \ddots & 0 \\ & & & 1 \end{pmatrix}$$

11.51 Matrices triangulaires inversibles

On raisonne par récurrence forte sur $n \in \mathbb{N}^*$.

Pour $n = 1$ RAF.

Pour $n = 2$, RAS (11.48).

On suppose le résultat vrai pour $n \in \mathbb{N}^*$.

Soi $T \in \mathcal{T}_{n+1}^+(\mathbb{K})$. Donc T est de la forme :

$$T = \begin{pmatrix} \mathcal{U} & X \\ 0 & a \end{pmatrix} \quad \text{avec } \mathcal{U} \in \mathcal{T}_n^+(\mathbb{K}), X \in \mathcal{M}_{n,1}(\mathbb{K}) \text{ et } a \in \mathbb{K}$$

\Rightarrow

On suppose que la diagonale de T ne contient aucun 0.

Donc \mathcal{U} est inversible d'après l'hypothèse de récurrence.

On choisit $V \in \mathcal{T}_n^+(\mathbb{K})$ tel que (Hypothèse de récurrence).

$$\mathcal{U}V = I_n$$

On a :

$$\begin{aligned} T \times \begin{pmatrix} V & 0 \\ 0 & \underbrace{a^{-1}}_{a \neq 0} \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} \mathcal{U} & X \\ 0 & a \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V & 0 \\ 0 & a^{-1} \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} U_n & a^{-1}X \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \end{aligned}$$

Donc (11.50) :

$$T \times \begin{pmatrix} V & 0 \\ 0 & a^{-1} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_n & -a^{-1}X \\ & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & & \\ & \ddots & \\ & & 1 \end{pmatrix}$$

Donc T est inversible d'inverse dans $\mathcal{T}_{n+1}^+(\mathbb{K})$.

\Leftarrow

On suppose que la diagonale de T contient un 0.

— Si $T_{11} = 0$, alors $T = \begin{pmatrix} 0 & L \\ & W \end{pmatrix}$

Et $T \times \underbrace{E_{11}}_{\neq 0} = 0$

Donc $T \notin GL_{n+1}(\mathbb{K})$

— On suppose que le premier 0 apparait à T_{kk} avec $k \geq 2$.

Donc

$$T = \begin{pmatrix} A & C \\ 0 & B \end{pmatrix} \text{ avec } A = \begin{pmatrix} F & G \\ 0 & 0 \end{pmatrix}, F \in \mathcal{T}_{k-1}^+(\mathbb{K})$$

La diagonale de F ne contient aucun 0 donc $F \in GL_{k-1}(\mathbb{K})$ et :

$$\begin{aligned} A \times \begin{pmatrix} 0 & -F^{-1}G \\ 0 & 1 \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} F & G \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 & -F^{-1}G \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \end{aligned}$$

Alors :

$$T \times \underbrace{\begin{pmatrix} H & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}}_{\neq 0} = 0$$

Donc $T \notin GL_{n+1}(\mathbb{K})$.

11.54 Exemple

Soit $X \in \mathbb{K}^2$.

$$\begin{aligned}
 X \in \ker A &\Leftrightarrow AX = 0 \\
 &\Leftrightarrow \begin{pmatrix} 1 & 2 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix} \\
 &\Leftrightarrow \begin{cases} x + 2y = 0 \\ y = 0 \end{cases} \\
 &\Leftrightarrow X = 0
 \end{aligned}$$

Donc $\ker A = \{0\}$.

$$\begin{aligned}
 X \in \ker B &\Leftrightarrow BX = 0 \\
 &\Leftrightarrow \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix} \\
 &\Leftrightarrow \begin{cases} x + y = 0 \\ x + y = 0 \end{cases} \\
 &\Leftrightarrow x + y = 0 \\
 &\Leftrightarrow X \in \left\{ \begin{pmatrix} x \\ -x \end{pmatrix}, x \in \mathbb{K} \right\} \\
 &\Leftrightarrow X \in \mathbb{K} \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \end{pmatrix}
 \end{aligned}$$

Donc $\ker B = \mathbb{K} \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \end{pmatrix}$.

11.61 Exemple

$$\begin{aligned}
 &\begin{cases} x + 2y - z = 1 \\ 2x + 5y + z = 2 \end{cases} \\
 &\Leftrightarrow \begin{cases} x + 2y - z = 1 \\ 3x + 7y = 3 \end{cases} \\
 &\Leftrightarrow \begin{cases} x - z = 1 - 2y \\ 3x = 3 - 7y \end{cases} \\
 &\Leftrightarrow \begin{cases} -3z = y \\ x = 1 - \frac{7}{3}y \end{cases} \\
 &\Leftrightarrow \begin{cases} x = 1 - \frac{7}{3}y \\ z = -\frac{1}{3}y \end{cases} \\
 &\Leftrightarrow X = \begin{pmatrix} 1 - \frac{7}{3}y \\ y \\ -\frac{1}{3}y \end{pmatrix} \\
 &= \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} + y \begin{pmatrix} -\frac{7}{3} \\ 1 \\ -\frac{1}{3} \end{pmatrix}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Donc } \mathcal{S} &= \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} + \mathbb{K} \begin{pmatrix} -\frac{7}{3} \\ 1 \\ -\frac{1}{3} \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} + \mathbb{K} \begin{pmatrix} 7 \\ -3 \\ 1 \end{pmatrix} \end{aligned}$$

11.65 Caractérisation des matrices inversibles par les systèmes linéaires

\Rightarrow

RAF : (11.63)

\Leftarrow

Pour tout $i \in \llbracket 1, n \rrbracket$, on note $Y_i \in \mathcal{M}_{n,1}(\mathbb{K})$ définie par :

$$Y_i = \begin{pmatrix} 0 \\ \vdots \\ 1 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix}$$

Par hypothèse, on choisit $X_i \in \mathbb{K}^n$ tel que :

$$AX_i = Y_i$$

On pose $B = (X_1 \ \dots \ X_n)$ et on remarque que :

$$(Y_1 \ \dots \ Y_n) = I_n$$

Par construction :

$$AB = I_n$$

11.74 Système équivalents et opérations élémentaires

Soit Σ un système et Σ' un système obtenu après avoir effectué une opération élémentaire.

Soit $A \in \mathcal{M}_{n,p}(\mathbb{K})$ la matrice du système Σ et $B \in \mathbb{K}^n$ son second membre.

Soit $X \in \mathbb{K}^p$. Effectuer une opération élémentaire revient à choisir une matrice P de la forme P_{ij} , $Q_i(\lambda)$, $R_{ij}(\lambda)$.

Ainsi :

$$\begin{aligned} X \in \mathcal{S}(\Sigma) &\Leftrightarrow AX = B \\ &\stackrel{P \in GL_n(\mathbb{K})}{\Leftrightarrow} PAX = PB \\ &\Leftrightarrow X \in \mathcal{S}(\Sigma') \end{aligned}$$

Donc $\boxed{\mathcal{S}(\Sigma) = \mathcal{S}(\Sigma')}$.

Chapitre 12

Arithmétique

12.1 Propriété fondamentale de \mathbb{Z}

Théorème 12.1

Toute partie non vide et minorée de \mathbb{Z} admet un plus petit élément.

Soit A une partie non vide et minorée de \mathbb{Z} .

On note \mathcal{M} l'ensemble des minorants de A .

Par hypothèse, $\mathcal{M} \neq \emptyset$.

Supposons par l'absurde que :

$$\forall a \in \mathbb{Z}, a \in \mathcal{M} \Rightarrow a + 1 \in \mathcal{M}$$

D'après le principe de récurrence, si $a_0 \in \mathcal{M}$ est fixé :

$$\forall n \geq a_0, n \in \mathcal{M}$$

En particulier, pour $n \in A$ ($A \neq \emptyset$) on a :

$$n \geq a_0 \text{ (} a_0 \text{ est un minorant)}$$

Donc $n \in \mathcal{M}$.

Donc $n + 1 \in \mathcal{M}$.

Donc $n + 1$ est un minorant de A .

Donc $n + 1 \leq n$.

Absurde.

Ainsi, on choisit $a \in \mathbb{Z}$ avec $a \in \mathcal{M}$ et $a + 1 \notin \mathcal{M}$.

On choisit donc $n \in A$ tel que :

$$a \leq n < a + 1$$

Donc $n = a \in A$.

Donc $a = \min(A)$.

12.4 Division euclidienne

Théorème 12.4

Soit $(a, b) \in \mathbb{Z} \times \mathbb{Z}^*$. Il existe un unique couple $(q, r) \in \mathbb{Z} \times \mathbb{N}$ tel que :

$$a = bq + r$$

avec $0 \leq r < |b|$. Cette égalité est appelée **division euclidienne de a par b** , l'entier q est alors appelé **quotient** et l'entier r le **reste**, tandis que a porte le nom de dividende et b celui de diviseur.

Existence :

On suppose dans un premier temps que $b > 0$.

Soit $a \in \mathbb{Z}$.

On note $A = \{n \in \mathbb{Z}, bn \leq a\}$.

A est un sous-ensemble non vide de \mathbb{Z} et majoré.

Il admet donc un plus grand élément, noté q . On a donc $q \in A$ et $q + 1 \notin A$.

$$bq \leq a < b(q + 1)$$

$$\text{donc } 0 \leq a - bq < b$$

On pose alors $r = a - bq$. L'existence est alors prouvée pour $b > 0$.

Si $b < 0$, alors $-b > 0$ et on choisit $(q, r) \in \mathbb{Z}^2$ tel que :

$$a = -b \times q + r \text{ avec } 0 \leq r < -b$$

Le couple $(-q, r)$ convient.

Unicité :

On suppose $a = bq + r = bq' + r'$ avec $0 \leq r, r' < |b|$.

Donc $b(q - q') = r' - r$.

Donc $\underbrace{|b|}_{>0} \times |q - q'| = |r' - r| < \underbrace{|b|}_{>0}$.

Donc $|q - q'| < 1$.

Donc $q = q'$.

Puis $r = r'$.

12.9 Divisibilité et multiple

Proposition 12.9

Soit a et b deux entiers. Alors a est divisible par b si et seulement si a est un multiple de b .

\Rightarrow

Si $b|a$, alors :

$$\begin{aligned} a &= bq + 0 \\ &= bq \\ &\in b\mathbb{Z} \end{aligned}$$

\Leftarrow

Si $a \in b\mathbb{Z}$, $a = b \times n = b \times n + 0$.

Par unicité de la division euclidienne, $b|a$.

12.10 Divisibilité et normes

Proposition 12.10

Soit a et b deux entiers avec $a \neq 0$ et $b|a$. Alors $|b| \leq |a|$.

Si $b|a$, alors $a = b \times n$ avec $n \neq 0$ var $a \neq 0$. Donc :

$$\begin{aligned} |a| &= |b| \times |n| \\ &\geq |b| \times 1 \end{aligned}$$

12.11 Entiers associés

Proposition 12.11

Soit a et b deux entiers. Alors

$$a\mathbb{Z} = b\mathbb{Z} \Leftrightarrow a = \pm b$$

On dit alors que a et b sont associés.

\Leftarrow

Si $a = \pm b$, alors $a\mathbb{Z} = b\mathbb{Z}$.

\Rightarrow

Si $a = 0$ et $a\mathbb{Z} = b\mathbb{Z}$, alors $b = 0$.

Si $a \neq 0$ et $a\mathbb{Z} = b\mathbb{Z}$, alors $b \neq 0$ et d'après (12.0) :

$$|a| \leq |b| \text{ et } |b| \leq |a|$$

Donc $|a| = |b|$

12.14 Intégrité de la divisibilité

Proposition 12.14

Soit a, b et c trois entiers, avec $c \neq 0$. Si $nb|na$, alors $n|a$.

Si $cb|ca$, alors $ca = ncb$.

Or c est régulier dans \mathbb{Z} donc :

$$a = nb$$

Donc $b|a$.

12.20 Cas d'une divisibilité

Lemme 12.20

Si $a|b$, alors

$$\mathcal{D}_{a,b} = \mathcal{D}_a$$

Si $a|b$, si $c|a$, alors $c|b$.

Donc $\mathcal{D}_b \supset \mathcal{D}_a$.

Ainsi, $\mathcal{D}_a \cap \mathcal{D}_b = \mathcal{D}_a$

12.21 Préparation à l'algorithme d'Euclide

Lemme 12.21

Soit a, b et q trois entiers, alors

$$\mathcal{D}_{a,b} = \mathcal{D}_{a-bq,b}$$



Soit $n \in \mathcal{D}_{a,b}$, alors :

$$n|a \text{ et } n|b$$

$$\text{donc } n|a - bq$$

$$\text{donc } n \in \mathcal{D}_{a-bq,b}$$



Soit $n \in \mathcal{D}_{a-bq,b}$

$$n|a - bq \text{ et } n|b$$

$$\text{donc } n|a - bq + bq$$

$$\text{soit } n|a$$

$$\text{donc } n \in \mathcal{D}_{a,b}$$

12.23 Algorithme d'Euclide étendu ou théorème de Bézout

Lemme 12.23

Soit a et b deux entiers. Soit r le dernier reste non nul dans l'algorithme d'Euclide appliqué à a et b . Il existe deux entiers u et v tels que

$$au + bv = r$$

On utilise les notations du lemme (12.22).

On démontre par récurrence double que :

$$\forall n, \exists (u_n, v_n) \in \mathbb{Z}^2, au_n + bv_n = r_n$$

Initialisation :

Pour $n = 0$ il s'agit de la division euclidienne de a par b ($u_0 =$ et $v_0 = -q$).

Pour $n = 1$:

$$\begin{aligned} a &= bq + r \\ b &= r \times q_1 + r_1 \\ \text{donc } r &= b - rq_1 \\ &= b - q_1(a - bq) \\ &= -q_1a + b(1 + q_1q) \end{aligned}$$

Hérédité :

On suppose le résultat vrai aux rangs n et $n + 1$.

$$\begin{aligned} a_n &= b_n q_n + r_n \\ b_n &= r_n q_{n+1} + r_{n+1} \\ r_n &= r_{n+1} q_{n+2} + r_{n+2} \end{aligned}$$

Donc :

$$\begin{aligned} r_{n+2} &= r_n - r_{n+1} q_{n+2} \\ &= au_n + bv_n - (au_{n+1} + bv_{n+1})q_{n+2} \\ &= a \underbrace{(u_n - u_{n+1} q_{n+2})}_{\in \mathbb{Z}} + b \underbrace{(v_n - v_{n+1} q_{n+2})}_{\in \mathbb{Z}} \end{aligned}$$

On utilise le principe de récurrence avec la dernière étape de l'algorithme.

12.24 Application basique

Exemple 12.24

Appliquer l'algorithme d'Euclide aux entiers 121 et 26.

$$\begin{aligned} 121 &= 26 \times 4 + 17 \\ 26 &= 17 \times 1 + 9 \\ 17 &= 9 \times 1 + 8 \\ 9 &= 8 \times 1 + 1 \\ 8 &= 1 \times 8 + 0 \end{aligned}$$

On remonte l'algorithme :

$$\begin{aligned} 1 &= 9 - 8 \\ &= 9 - (17 - 9) \\ &= 2 \times 9 - 17 \\ &= 2 \times (26 - 17) - 17 \\ &= 2 \times 26 - 3 \times 17 \\ &= 2 \times 26 - 3 \times (121 - 4 \times 26) \\ &= 14 \times 26 - 3 \times 121 \end{aligned}$$

12.26 Théorème de Bézout

Théorème 12.26

Soit a et b deux entiers. Alors a et b sont premiers entre eux si et seulement si il existe $(u, v) \in \mathbb{Z}^2$ tel que

$$au + bv = 1$$

\Rightarrow

On suppose a et b premiers entre eux.

Donc $\mathcal{D}_{a,b} = \{\pm 1\}$.

Soit r le dernier reste non nul dans l'algorithme d'Euclide,

$$\mathcal{D}_r = \mathcal{D}_{a,b} = \{\pm 1\}$$

Donc $r = \pm 1$.

D'après le théorème de Bézout, il existe deux entiers u et v tels que :

$$au + bv = 1$$

\Leftarrow

Réciproquement, si $au + bv = 1$, alors pour tout $d \in \mathcal{D}_{a,b}$ $d|au + bv$ donc $d|1$ donc $d = \pm 1$.

Donc $\mathcal{D}_{a,b} = \{\pm 1\}$.

12.28 Proposition

Proposition 12.28

Si a est premier avec b et c , alors a est premier avec bc .

D'après le théorème de Bézout, on écrit :

$$au_1 + bv_1 = 1$$

$$au_2 + cv_2 = 1$$

avec $(u_1, u_2, v_1, v_2) \in \mathbb{Z}^4$.

Donc :

$$\begin{aligned} 1 &= (au_1 + bv_1)(au_2 + cv_2) \\ &= a \underbrace{(au_1u_2 + bv_1u_2 + cu_1v_2)}_{\in \mathbb{Z}} + \underbrace{v_1v_2}_{\in \mathbb{Z}} bc \end{aligned}$$

Donc a et bc sont premiers entre eux d'après le théorème de Bézout.

12.29 Proposition

Proposition 12.29

Si a est premier avec b , que $a|c$ et $b|c$, alors $ab|c$.

D'après le théorème de Bézout :

$$au + bv = 1, (u, v) \in \mathbb{Z}^2$$

Donc :

$$auc + bvc = c$$

Or $a|c$ et $b|c$, donc :

$$c = ka \text{ et } c = pb$$

Donc :

$$ab \underbrace{[pu + vk]}_{\in \mathbb{Z}} = c$$

Donc $ab|c$.

12.30 Théorème de Gauss

Théorème 12.30

Si $a|bc$ et que a est premier avec b , alors $a|c$.

D'après le théorème de Bézout :

$$au + bv = 1 \text{ avec } (u, v) \in \mathbb{Z}^2$$

Donc $auc + bvc = c$.

Or $a|bc$ donc $a|auc + bvc$.

Soit $a|c$.

12.31 Equation de Bézout

Exemple 12.31

Résoudre l'équation d'inconnue $(x, y) \in \mathbb{Z}^2$, $3x - 2y = 7$.

On remarque que 3 et 2 sont premiers entre eux.

$$\begin{aligned} 3 - 2 &= 1 \\ \text{donc } 3 \times 7 - 2 \times 7 &= 7 \\ \text{donc } (7, 7) &\in \mathcal{S} \end{aligned}$$

On note (x_0, y_0) cette solution.

Soit $(x, y) \in \mathcal{S}$.

Donc :

$$\begin{aligned} 7 &= 3x - 2y \\ 7 &= 3x_0 - 2y_0 \\ \text{donc } 3(x - x_0) &= 2(y - y_0) \end{aligned}$$

Or $3|3(x - x_0)$ et 3 premier avec 2.

Donc $3|y - y_0$.

Donc $y - y_0 = 3k$, avec $k \in \mathbb{Z}$. (Théorème de Gauss)

De la même manière, $x - x_0 = 2l$, avec $l \in \mathbb{Z}$. (Théorème de Gauss)

Réciproquement, soit $x = x_0 + 2l$ et $y = y_0 + 3k$.

$$\begin{aligned} (x, y) \in \mathcal{S} &\Leftrightarrow 7 = 3x - 2y = 3x_0 - 2y_0 + 6l - 6k \\ &\Leftrightarrow 6l - 6k = 0 \\ &\Leftrightarrow k = l \end{aligned}$$

Donc $\mathcal{S} = \{(x_0 + 2k, y_0 + 3k), k \in \mathbb{Z}\}$

12.32 Proposition

Proposition 12.32

Si $ar \equiv br \pmod{n}$ et si r et n sont premiers entre eux, alors $a \equiv b \pmod{n}$.

Si $ar \equiv br \pmod{n}$, alors $n|r(a - b)$.

Donc $n|a - b$ (n premier avec r et théorème de Gauss).

Donc $a \equiv b \pmod{n}$.

12.37 Lien avec les idéaux

Proposition 12.37

Soit a et b deux entiers, alors d est le pgcd de a et b si et seulement si $a\mathbb{Z} + b\mathbb{Z} = d\mathbb{Z}$.

Soit $(a, b) \in \mathbb{Z}^2$. $a\mathbb{Z}$ et $b\mathbb{Z}$ sont des idéaux de \mathbb{Z} .

Donc $a\mathbb{Z} + b\mathbb{Z}$ est un idéal de \mathbb{Z} , donc en particulier un sous-groupe de \mathbb{Z} .

On choisit donc $d \geq 0$ tel que $a\mathbb{Z} + b\mathbb{Z} = d\mathbb{Z}$.

Montrons que $d = \text{pgcd}(a, b) = a \wedge b$.

D'une part :

$$\begin{array}{ll} d \in d\mathbb{Z} & \text{donc } d = au + bv \text{ (avec } (u, v) \in \mathbb{Z}^2) \\ \in a\mathbb{Z} + b\mathbb{Z} & \\ \text{or } a \wedge b | a \text{ et } a \wedge b | b & \text{donc } a \wedge b | au + bv \\ & \text{soit } a \wedge b | d \end{array}$$

D'autre part, $a \wedge b$ est le dernier reste non nul de l'algorithme d'Euclide, donc (12.23) :

$$\begin{array}{l} a \wedge b = au + bv \text{ (avec } (u, v) \in \mathbb{Z}^2) \\ \in a\mathbb{Z} + b\mathbb{Z} \\ \in d\mathbb{Z} \end{array}$$

Donc $d | a \wedge b$.

Ainsi, d et $a \wedge b$ sont positifs et associés, donc égaux.

12.38 Préparation au calcul pratique d'un pgcd

Lemme 12.38

Si a et b sont tous les deux non nuls, alors pour tout $q \in \mathbb{Z}$, $\text{pgcd}(a, b) = \text{pgcd}(a - bq, b)$.

$$\begin{aligned} \mathcal{D}_{\text{pgcd}(a,b)} &= \mathcal{D}_{a,b} \\ &\stackrel{(12.21)}{=} \mathcal{D}_{a-bq,b} \\ &= \mathcal{D}_{\text{pgcd}(a-bq,b)} \end{aligned}$$

Les deux pgcd sont associés, donc égaux car positifs.

12.39 Caractérisation du pgcd

Proposition 12.39

Soit a et b deux entiers et $d \in \mathbb{N}$. Alors $d = \text{pgcd}(a, b)$ si et seulement si il existe $(u, v) \in \mathbb{Z}^2$ avec u et v premiers entre eux, tels que $a = du$ et $b = dv$.

\Rightarrow

On suppose que $d = a \wedge b$.

Donc $d | a$ et $d | b$.

On écrit donc $a = du$ et $b = dv$ avec $(u, v) \in \mathbb{Z}^2$.

Notons $n = u \wedge v$. On écrit $u = n \times u'$ et $v = n \times v'$ avec $(u', v') \in \mathbb{Z}^2$.

Donc $a = d \times n \times u'$ et $b = d \times n \times v'$.

Donc $dn \in \mathcal{D}_{a,b} = \mathcal{D}_d$.

Donc $dn | d$.

Donc $n = 1$.



On suppose que $a = du$ et $b = dv$ avec $u \wedge v = 1$.

D'après le théorème de Bézout :

$$uu' + vv' = 1 \text{ (avec } (u', v') \in \mathbb{Z}^2)$$

Donc $duu' + dvv' = d$.

Soit $au' + bv' = d$.

Donc $d \in a\mathbb{Z} + b\mathbb{Z} = (a \wedge b)\mathbb{Z}$.

Donc $a \wedge b \mid d$.

Par ailleurs, $d \in \mathcal{D}_{a,b} = \mathcal{D}_{a \wedge b}$.

Donc $d \mid a \wedge b$.

Ainsi, $a \wedge b$ et d sont associés (et positifs) donc égaux.

12.40 Propriétés du pgcd

Proposition 12.40

Soit a et b deux entiers tous deux non nuls.

1. pour tout $n \in \mathbb{Z}$, si $n \mid a$ et $n \mid b$, alors $n \mid \text{pgcd}(a, b)$;
2. pour tout $k \in \mathbb{N}^*$, $\text{pgcd}(ka, kb) = k \text{pgcd}(a, b)$;
3. pour tout $n \in \mathbb{N}$, $\text{pgcd}(a^n, b^n) = \text{pgcd}(a, b)^n$;
4. si a et c sont premiers entre eux, alors $\text{pgcd}(a, bc) = \text{pgcd}(a, b)$.

1. RAF (définition)

2. Soit $k \in \mathbb{N}^*$. On écrit (12.39) :

$$\begin{aligned} a &= (a \wedge b)u \\ b &= (a \wedge b)v \text{ (avec } u \wedge v = 1) \end{aligned}$$

Donc :

$$\begin{aligned} ka &= [k(a \wedge b)]u \\ kb &= [k(a \wedge b)]v \end{aligned}$$

Donc (12.39) :

$$\text{pgcd}(ka, kb) = k(a \wedge b)$$

3. Avec une partie des notations de 2. :

$$\begin{aligned} a^n &= (a \wedge b)^n u^n \\ b^n &= (a \wedge b)^n v^n \end{aligned}$$

Avec $(u^n) \wedge (v^n) = 1$.

Donc (12.39) :

$$\text{pgcd}(a^n, b^n) = (a \wedge b)^n$$

4.

$$\begin{aligned} a &= (a \wedge b)u \\ b &= (a \wedge b)v \text{ (avec } u \wedge v = 1) \end{aligned}$$

Donc

$$bc = (a \wedge b) \times vc$$

Or, puisque $a \wedge c = 1$ et que $u \mid a$, alors :

$$u \wedge c = 1$$

Donc (12.28) :

$$u \wedge (vc) = 1$$

Donc (12.39) :

$$\text{pgcd}(a, bc) = a \wedge b$$

12.44 Définition du PPCM

Proposition 12.44

Soit a et b deux entiers non nuls. On appelle **PPCM** (plus petit commun multiple) l'unique entier $m \in \mathbb{N}$ tel que

$$(a\mathbb{Z}) \cap (b\mathbb{Z}) = m\mathbb{Z}.$$

Cet entier est noté $\text{ppcm}(a, b)$ ou encore $a \vee b$.

$a\mathbb{Z}$ et $b\mathbb{Z}$ ont des idéaux de \mathbb{Z} .

Donc $a\mathbb{Z} \cap b\mathbb{Z}$ est un idéal de \mathbb{Z} , donc un sous-groupe de \mathbb{Z} .

Donc il existe un unique entier $m \in \mathbb{N}$ tel que :

$$a\mathbb{Z} \cap b\mathbb{Z} = m\mathbb{Z}$$

Comme $a \neq 0$ et $b \neq 0$, alors $m \neq 0$.

12.45 Caractérisation du ppcm

Proposition 12.45

Soit a et b deux entiers, et $m \in \mathbb{N}$. Alors $m = \text{ppcm}(a, b)$ si et seulement si il existe $(u, v) \in \mathbb{Z}^2$, premiers entre eux tels que $m = au = bv$.

\Rightarrow

On suppose que $m = a \vee b$.

Donc $m \in a\mathbb{Z} \cap b\mathbb{Z}$.

Donc $m = au = bv$.

On note $d = \text{pgcd}(u, v)$.

On écrit donc :

$$u = da'$$

$$v = db'$$

Donc :

$$ada' = bdb'$$

Donc :

$$aa' = bb' = m'$$

Donc :

$$\begin{aligned} m' &\in a\mathbb{Z} \cap b\mathbb{Z} \\ &\in m\mathbb{Z} \end{aligned}$$

Donc :

$$dm' = m|m'$$

Donc :

$$d = 1$$

\Leftarrow

On suppose que $m = au = bv$ avec $\text{pgcd}(u, v) = 1$.

D'une part :

$$m \in a\mathbb{Z} \cap b\mathbb{Z} = \text{ppcm}(a, b)\mathbb{Z}$$

Donc :

$$\text{ppcm}(a, b) | m$$

D'autre part, d'après le théorème de Bézout :

$$uu' + vv' = 1 \text{ avec } (u', v') \in \mathbb{Z}^2$$

Donc :

$$uu' \underbrace{ppcm(a, b)}_{ka} + vv' \underbrace{ppcm(a, b)}_{qb} = ppcm(a, b)$$

Donc :

$$m(u'k + vq') = ppcm(a, b)$$

Donc $m | ppcm(a, b)$.

12.46 Propriétés du $ppcm$

Proposition 12.46

Soit a et b deux entiers non nuls, alors :

1. pour tout $n \in \mathbb{Z}$, si $a|n$ et $b|n$, alors $ppcm(a, b)|n$;
2. si a et b sont premiers entre eux, alors $ppcm(a, b) = |ab|$;
3. pour tout $k \in \mathbb{N}^*$, $ppcm(ka, kb) = kppcm(a, b)$;
4. $ppcm(a, b) \times pgcd(a, b) = |ab|$;
5. pour tout $n \in \mathbb{N}$, $ppcm(a^n, b^n) = ppcm(a, b)^n$.

1. RAF (12.44)
2. On suppose que $a > 0$ et $b > 0$.

$$ab = ba$$

avec $a \wedge b = 1$.

D'après (12.45) :

$$ppcm(a, b) = ab$$

3. On écrit (12.45) :

$$ppcm(a, b) = au = bv \text{ (avec } u \wedge v = 1)$$

Alors :

$$\begin{aligned} b \wedge ppcm(a, b) &= (ak)u \\ &= (bk)v \end{aligned}$$

Donc (12.45) :

$$ppcm(ak, bk) = kppcm(a, b)$$

5. Avec les mêmes notations :

$$\begin{aligned} ppcm(a, b)^n &= a^n u^n \\ &= b^n v^n \text{ (avec } u^n \wedge v^n = 1) \end{aligned}$$

Donc (12.45) :

$$ppcm(a^n, b^n) = ppcm(a, b)^n$$

4. D'après (12.39) (avec $a > 0$ et $b > 0$) :

$$\begin{aligned} a &= pgcd(a, b)u \\ b &= pgcd(a, b)v \text{ (avec } u \wedge v = 1) \\ pgcd(a, b) \times ppcm(a, b) &= pgcd(a, b)ppcm(pgcd(a, b)u, pgcd(a, b)v) \\ &\stackrel{(3.)}{=} pgcd(a, b)^2 ppcm(u, v) \\ &\stackrel{(2.)}{=} pgcd(a, b)^2 uv \\ &= ab \end{aligned}$$

12.50 Propriétés

Proposition 12.50

1. Si $p \in \mathbb{P}$, alors pour tout $n \in \mathbb{Z}$, soit $p|n$ soit $\text{pgcd}(n, p) = 1$.
2. Si $n \geq 2$, alors n possède au moins un diviseur premier.
3. L'ensemble \mathbb{P} est infini.
4. Si $n > 1$ n'a pas de diviseur dans $[2; \sqrt{n}]$, alors n est premier.
5. Si $p \in \mathbb{P}$, alors pour tout a et b entiers, on a $(a + b)^p \equiv a^p + b^p \pmod{p}$.

1. On suppose que $p \nmid n$.

Soit $d \in \mathcal{D}_p \cap \mathcal{D}_n$.

$d > 0$ et $d \neq p$.

Donc $d = 1$.

Donc $p \wedge n = 1$.

2. On raisonne par récurrence forte \rightarrow cf. (2.41).
3. On suppose par l'absurde que :

$$\mathbb{P} = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$$

On pose :

$$m = \prod_{i=1}^n (p_i) + 1$$

Soit $p_i \in \mathbb{P}$ tel que $p_i | m$ (12.50.2).

Donc $p_i | 1$.

Absurde.

4. On suppose $n \notin \mathbb{P}$.
Soit $n = ab$ avec $a \geq 2$ et $b \geq 2$.
Si $a > \sqrt{n}$ et $b > \sqrt{n}$, alors $ab = n > \sqrt{n}^2 = n$.
Absurde.
5. D'après le binôme de Newton :

$$\begin{aligned} (a + b)^p &= \sum_{k=0}^p \binom{p}{k} a^k b^{p-k} \\ &= a^p + b^p + \sum_{k=1}^{p-1} \binom{p}{k} a^k b^{p-k} \end{aligned}$$

Or, pour $k \in [1; p-1]$, $p \binom{p-1}{k-1} = k \binom{p}{k}$ (formule du capitaine).

Or $k \wedge p = 1$ et $p \mid p \binom{p-1}{k-1}$ soit $p \mid \binom{p}{k}$.

Donc :

$$p \mid \binom{p}{k}$$

Donc :

$$(a + b)^p \equiv a^p + b^p \pmod{p}$$

12.51 Petit théorème de Fermat

Théorème 12.51

Pour tout $n \in \mathbb{Z}$ et $p \in \mathbb{P}$, on a $n^p \equiv n \pmod{p}$. En outre, si $\text{pgcd}(n, p) = 1$, alors $n^{p-1} \equiv 1 \pmod{p}$.

Soit $p \in \mathbb{P}$. On montre le résultat pour $n \geq 0$ par récurrence.

On a bien $0^p = 0 \equiv 0 \pmod{p}$. Si $n^p \equiv n \pmod{p}$, alors :

$$\begin{aligned} (n + 1)^p &\equiv n^p + 1^p \pmod{p} \quad (12.50.5). \\ &\equiv n + 1 \pmod{p} \quad (\text{Hypothèse de récurrence}) \end{aligned}$$

Soit $n \in \mathbb{N}$.

— Si $p \geq 3$ (donc p est impair), alors :

$$\begin{aligned} n^p &\equiv n \pmod{p} \\ (-n)^p &\equiv -n^p \pmod{p} \\ &\equiv -n \pmod{p} \end{aligned}$$

— Si $p = 2$, $-1 \equiv 1 \pmod{2}$.

Donc :

$$\begin{aligned} (-n)^2 &\equiv n^2 \pmod{2} \\ &\equiv n \pmod{2} \\ &\equiv -n \pmod{2} \end{aligned}$$

12.52 Décomposition en produit de facteurs premiers

Théorème 12.52

Soit $n \in \mathbb{Z} \setminus \{-1, 0, 1\}$, alors il existe des nombres premiers p_1, \dots, p_r tous distincts, et $(\alpha_1, \dots, \alpha_r) \in (\mathbb{N}^*)^r$ et $\epsilon \in \{\pm 1\}$ tels que

$$n = \epsilon p_1^{\alpha_1} \times \dots \times p_r^{\alpha_r}$$

Cette décomposition est unique à l'ordre près.

Existence :

On montre l'existence par récurrence forte sur $\mathbb{N} \setminus \{0, 1\}$.

— RAF si $n = 2$.

— On suppose le résultat vrai pour tout $k \in \llbracket 2; n \rrbracket$.

— Si $n + 1 \in \mathbb{P}$: RAF

— Si $n + 1 \notin \mathbb{P}$, on écrit :

$$n + 1 = k \times q \text{ avec } (k, q) \in \llbracket 2, n \rrbracket^2$$

Donc k et q sont des produits de facteurs premiers.

Donc $n + 1 = kq$ est aussi un produit de facteurs premiers.

Le résultat est donc vrai pour tout $n \in \mathbb{N}$ et par extension pour $-n$ ($\epsilon = -1$).

Unicité :

On suppose que :

$$n = \epsilon p_1^{\alpha_1} \times \dots \times p_r^{\alpha_r} = \epsilon' q_1^{\beta_1} \times \dots \times q_s^{\beta_s}$$

Nécessairement, $\epsilon = \epsilon'$.

Soit $p_i \in \{p_1, \dots, p_r\}$.

On a $p_i | n$ donc $p_i \mid q_1^{\beta_1} \times \dots \times q_s^{\beta_s}$.

Il existe $p_i \in \mathbb{P}$ donc $j \in \llbracket 1; s \rrbracket$ tel que $p_i | q_j$.

Donc $p_i = \underbrace{q_j}_{\in \mathbb{P}}$.

Ainsi :

$$\{p_1, \dots, p_r\} \subset \{q_1, \dots, q_s\}$$

Par symétrie :

$$\{p_1, \dots, p_r\} = \{q_1, \dots, q_s\}$$

Donc $r = s$ et quitte à renommer q_j , on peut supposer que :

$$\forall i \in \llbracket 1; r \rrbracket, p_i = q_i$$

$$\begin{aligned} p_i^{\alpha_i} | n &\text{ donc } p_i^{\alpha_i} \mid \prod_{j=1}^r p_j^{\beta_j} \\ &\text{ donc } \alpha_i \leq \beta_i \end{aligned}$$

Par symétrie, $\alpha_i = \beta_i$.

L'unicité est prouvée.

12.54 Caractérisation de la valuation

Théorème 12.54

Soit $n \in \mathbb{Z}^*$ et $p \in \mathbb{P}$ et $d \in \mathbb{N}$. Alors $d = v_p(n)$ si et seulement si $n = p^d u$, avec $u \wedge p = 1$.

On a :

$$\begin{aligned} d = v_p(n) &\Leftrightarrow (p^d | n \text{ et } p^{d+1} \nmid n) \\ &\Leftrightarrow \exists u \in \mathbb{Z}, n = p^d u \text{ et } p^{d+1} \nmid u \\ &\Leftrightarrow \exists u \in \mathbb{Z}, n = p^d u \text{ et } p \nmid u \\ &\stackrel{(p \in \mathbb{P})}{\Leftrightarrow} \exists u \in \mathbb{Z}, n = p^d u \text{ et } u \wedge p = 1 \end{aligned}$$

12.55 Valuation et décomposition en produit de facteurs premiers

Théorème 12.55

Si $p|n$, alors $v_p(n)$ est la puissance de p intervenant dans la décomposition en produit de facteurs premiers de n .

On écrit la décomposition :

$$n = \epsilon \prod_{i=1}^r p_i^{\alpha_i}$$

Soit $k \in \llbracket 1, r \rrbracket$.

$$n = \epsilon \times p_k^{\alpha_k} \times \underbrace{\prod_{i \neq k} p_i^{\alpha_i}}_{:=u \text{ (avec } u \wedge p_k = 1)}$$

Donc (12.54) :

$$\boxed{v_{p_k}(n) = \alpha_k}$$

12.56 Propriétés de la valuation

Proposition 12.56

Pout tout $(n, m) \in \mathbb{Z}^2$ et $p \in \mathbb{P}$, on a

1. $p|n$ si et seulement si $v_p(n) > 0$;
2. $v_p(mn) = v_p(m) + v_p(n)$;
3. $v_p(n + m) \geq \min(v_p(n), v_p(m))$ avec égalité si les valuations sont distinctes ;
4. $n|m \Leftrightarrow (\forall q \in \mathbb{P}, v_q(n) \leq v_q(m))$;
5. si de plus n et m sont non nuls alors

$$v_p(n \wedge m) = \min(v_p(n), v_p(m)) \text{ et } v_p(n \vee m) = \max(v_p(n), v_p(m)).$$

1. RAF

2. On écrit $m = p^{v_p(m)} \times u$ et $n = p^{v_p(n)} \times v$ avec $u \wedge p = 1 = v \wedge p$ (12.54).

Donc $mn = p^{v_p(m)+v_p(n)} \times uv$.

Or $p \wedge (uv) = 1$.

Donc (12.54) :

$$\boxed{v_p(mn) = v_p(m) + v_p(n)}$$

3. On suppose que $v_p(m) \leq v_p(n)$.

Ainsi :

$$\begin{aligned} n + m &= p^{v_p(n)} \times v + p^{v_p(m)} \times u \\ &= p^{v_p(m)} \left[u + v_p^{v_p(n)-v_p(m)} \right] \end{aligned}$$

Ainsi, $p^{v_p(m)} | n + m$.

Par définition :

$$\boxed{v_p(m + n) \geq v_p(m) = \min(v_p(m), v_p(n))}$$

.

Si on suppose de plus que $v_p(m) \neq v_p(n)$, alors

$$p \wedge (u + v \times p^{v_p(n)-v_p(m)}) = p \wedge u = 1$$

Donc (12.54) :

$$\boxed{v_p(n + m) = v_p(m) = \min(v_p(m), v_p(n))}$$

4. On a :

$n|m$ ssi la décomposition en produit de facteurs premiers de n se retrouve dans celle de m .

(12.55) ssi pour tout $p \in \mathbb{P}$ tel que $p|n$, alors $v_p(n) \leq v_p(m)$.

(si $p \nmid n, v_p(n) = 0 \leq v_p(m)$) ssi pour tout $\boxed{p \in \mathbb{P}, v_p(n) \leq v_p(m)}$.

5. On a $(n \wedge m) | n$ et $(n \wedge m) | m$.

Donc (12.56.4) $\boxed{v_p(n \wedge m) \leq \min(v_p(n), v_p(m))}$.

On suppose par exemple que $v_p(n) \leq v_p(m)$.

Donc $p^{v_p(n)} | n$ et $p^{v_p(n)} | m$.

Donc $p^{v_p(n)} | n \wedge m$.

Par définition $\boxed{v_p(n \wedge m) \geq v_p(n)}$.

Donc :

$$\boxed{v_p(n \wedge m) = \min(v_p(n), v_p(m))}$$

On rappelle que $(n \wedge m) \times (n \vee m) = |nm|$.

Donc $v_p((n \wedge m) \times (n \vee m)) = v_p(nm)$.

Donc (12.56.2) :

$$\begin{aligned} v_p(n \vee m) &= v_p(n) + v_p(m) - v_p(n \wedge m) \\ &= v_p(n) + v_p(m) - \min(v_p(n), v_p(m)) \\ &= \boxed{\max(v_p(n), v_p(m))} \end{aligned}$$

Les preuves ont été rédigées avec les hypothèses $n \neq 0$ et $m \neq 0$. Si l'un des entiers est nul, on vérifie les assertions avec la convention $v_p(0) = +\infty$.

Chapitre 13

Polynômes

13.6 Produit de deux polynômes

Définition 13.6

Soit $P = (a_n)$ et $Q = (b_n)$ deux polynômes de $\mathbb{A}[X]$. Soit pour tout $n \in \mathbb{N}$, $c_n = \sum_{k=0}^n a_k b_{n-k}$. Alors la suite $(c_n)_{n \in \mathbb{N}}$ est un polynôme. On définit alors $PQ = (c_n)$. La suite $c = (c_n)$ est appelée **produit de convolution** (ou **produit de Cauchy**) des suites $a = (a_n)$ et $b = (b_n)$ et est parfois noté $c = a \star b$.

Montrons que (c_n) est un polynôme.

Soit N et M dans \mathbb{N} tels que :

$$\begin{cases} \forall n \in \mathbb{N}, n \geq N, a_n = 0 \\ \forall n \in \mathbb{N}, n \geq M, b_n = 0 \end{cases}$$

Soit $n \geq M + N$, on a :

$$c_n = \sum_{k=0}^n a_k b_{n-k}$$

- Si $k \geq N$, $a_k = 0$.
- Si $k \leq N$, $n - k \geq M$, donc $b_{n-k} = 0$.

Donc $c_n = 0$.

13.7 Structure d'anneau de $\mathbb{A}[X]$

Théorème 13.7

La somme et le produit définis ci-dessus munissent $\mathbb{A}[X]$ d'une structure d'anneau commutatif.

suites d'éléments de \mathbb{A}

- $(\mathbb{A}[X], +)$ est un sous-groupe de $(\widehat{\mathbb{A}^{\mathbb{N}}}, +)$ abélien donc est bien un sous-groupe abélien.
- Montrons que \times est associative. Soit $(P, R, Q) \in \mathbb{A}[X]$.
On note $P = (p_k)_{k \in \mathbb{N}}$, $R = (r_k)_{k \in \mathbb{N}}$, $Q = (q_k)_{k \in \mathbb{N}}$.
Soit $n \in \mathbb{N}$.

$$\begin{aligned} (P \times (RQ))_n &= \sum_{k=0}^n p_k (RQ)_{n-k} \\ &= \sum_{i+j=n} p_i (RQ)_j \\ &= \sum_{i+j=n} \left(p_i \sum_{k+l=j} r_k q_l \right) \\ &= \sum_{i+k+l=n} p_i r_k q_l \\ &= ((PR) \times Q)_n \end{aligned}$$

- Notons $E = (1, 0, \dots) = (\delta_{0n})_{n \in \mathbb{N}}$.
On a pour tout $n \in \mathbb{N}$:

$$\begin{aligned} (E \times P)_n &= \sum_{i+j=n} E_i \times P_j \\ &= \sum_{i+j=n} \delta_{0i} \times P_j \\ &= P_n \quad (i = 0, j = n) \\ &= (P \times E)_n \end{aligned}$$

Donc E est l'élément neutre de $\mathbb{A}[X]$.

—

$$\begin{aligned}
[P \times (R + Q)]_n &= \sum_{i+j=n} p_i(R + q)_j \\
&= \sum_{i+j=n} p_i(r_j + a_j) \\
&= \sum_{i+j=n} p_i r_j + \sum_{i+j=n} p_i q_j \\
&= (PR)_n + (PQ)_n \\
&= [PR + PQ]_n
\end{aligned}$$

Donc \times est distributive sur $+$.

— Comme \mathbb{A} est commutatif :

$$\sum_{i+j=n} p_i q_j = \sum_{i+j=n} q_j p_i$$

Donc \times est commutatif.

13.11 Monômes

Proposition 13.11

Pour tout $n \in \mathbb{N}$, on a $X^n = (\underbrace{0, \dots, 0}_n, 1, 0, \dots)$, le 1 est donc à l'indice n (soit $X^n = (\delta_{n,k})_{k \in \mathbb{N}}$)

Pour $n = 0$, on a bien $X^0 = (1, 0, \dots)$

Pour $n = 1$, RAF

On suppose le résultat vrai pour $n \in \mathbb{N}$.

Soit $k \in \mathbb{N}$:

$$\begin{aligned}
[X^{n+1}]_k &= [X^n \times X]_k \\
&= \sum_{i+j=k} [X^n]_i X_j \\
&= \sum_{i+j=k} \delta_{n,i} \times \delta_{j,1} \\
&= \delta_{k,n+1}
\end{aligned}$$

13.12 Expression d'un polynôme à l'aide de l'indéterminée formelle

Corollaire 13.12

Soit $P = (a_n)$ un polynôme de $\mathbb{A}[X]$. Alors $P = \sum_{k=0}^{+\infty} a_k X^k$, cette somme ayant un sens puisqu'elle est en fait finie, les a_k étant nuls à partir d'un certain rang.

$$\begin{aligned}
P &= (a_n)_{n \geq 0} \\
&= (a_0, a_1, a_2, \dots) \\
&= a_0(1, 0, 0, \dots) + a_1(0, 1, 0, \dots) + a_2(0, 0, 1, \dots) + \dots \\
&= a_0 X^0 + a_1 X^1 + a_2 X^2 + \dots
\end{aligned}$$

13.26 Dérivée de produits

Proposition 13.26

— Soit P et Q deux polynômes à coefficients dans \mathbb{A} . Alors

$$(PQ)' = P'Q + Q'P.$$

— Soit P_1, \dots, P_n des polynômes à coefficients dans \mathbb{A} , alors

$$(P_1 \dots P_n)' = \sum_{i=1}^n P_1 \dots P_{i-1} P_i' P_{i+1} \dots P_n.$$

— **Formule de Leibniz** : Soit P et Q deux polynômes à coefficients dans \mathbb{A} et $n \in \mathbb{N}$. Alors

$$(PQ)^{(n)} = \sum_{k=0}^n \binom{n}{k} P^{(k)} Q^{(n-k)}.$$

Soit $P = \sum_{k \geq 0} a_k X^k$, $P' = \sum_{k \geq 1} k a_k X^{k-1}$ et $Q = \sum_{k \geq 0} b_k X^k$, $Q' = \sum_{k \geq 1} k b_k X^{k-1}$.

On a :

$$PQ = \sum_{k \geq 0} \left(\sum_{k=0}^n a_k b_{n-k} \right) X^n$$

Donc :

$$\begin{aligned} (PQ)' &= \sum_{n \geq 1} \left[n \sum_{k=0}^n a_k b_{n-k} \right] X^{n-1} \\ \text{et } P'Q &= \sum_{n \geq 0} \left[\sum_{k=0}^n (k+1) a_{k+1} b_{n-k} \right] X^n \\ \text{et } PQ' &= \sum_{n \geq 0} \left[\sum_{k=0}^n a_k (n-k+1) b_{n-k+1} \right] X^n \\ \text{donc } P'Q + Q'P &= \sum_{n \geq 0} \left[\sum_{k=0}^n (k+1) a_{k+1} b_{n-k} \right] X^n + \sum_{n \geq 0} \left[\sum_{k=0}^n (n-k+1) a_k b_{n-k+1} \right] X^n \\ &= \sum_{n \geq 0} \left[\sum_{k=1}^{n+1} k a_k b_{n-k+1} \right] X^n + \sum_{n \geq 0} \left[\sum_{k=0}^n (n-k+1) a_k b_{n-k+1} \right] X^n \\ &= \sum_{n \geq 0} \left[(n+1) a_{n+1} b_0 + \sum_{k=1}^n (n+1) a_k b_{n-k+1} + (n+1) a_0 b_{n+1} \right] X^n \\ &= \sum_{n \geq 0} \left[(n+1) \sum_{k=0}^{n+1} a_k b_{n-k+1} \right] X^n \end{aligned}$$

13.28 Dérivée d'une composition

Proposition 13.28

Soit P et Q dans $\mathbb{A}[X]$, alors

$$(Q \circ P)' = P' \times (Q' \circ P)$$

Soit $Q = \sum_{k \geq 0} a_k X^k$.

Ainsi $Q \circ P = \sum_{k \geq 0} a_k P^k$.

Donc :

$$\begin{aligned}
 (Q \circ P)' &= \sum_{k \geq 0} a_k (p_k)' \quad (13.24) \\
 &= \sum_{k \geq 1} k a_k p' p^{k-1} \quad (13.27) \\
 &= P' \times \sum_{k \geq 1} k a_k p^{k-1} \\
 &= P' \times Q' \circ P
 \end{aligned}$$

13.34 Degré d'une somme, d'un produit, d'une dérivée

Proposition 13.34

Soit P et Q deux polynômes de $\mathbb{A}[X]$ et $\lambda \in \mathbb{A}$.

1. On a $\deg(P + Q) \leq \max(\deg(P), \deg(Q))$ avec égalité si $\deg(P) \neq \deg(Q)$.
2. Si \mathbb{A} est intègre et si $\lambda \neq 0$, alors $\deg(\lambda P) = \deg(P)$.
3. Si \mathbb{A} est intègre alors $\deg(PQ) = \deg(P) + \deg(Q)$.
4. On a $\deg(P') \leq \deg(P) - 1$.
5. Si \mathbb{A} est intègre alors $\deg(Q \circ P) = \deg(Q) + \deg(P)$, sauf si $P = 0$ ou si $Q = 0$ et $P \in \mathbb{A}_0[X]$.

1. On note $p = \deg(P), q = \deg(Q)$.

$$P = \sum_{k=0}^p a_k X^k, Q = \sum_{k=0}^q b_k X^k$$

Supposons $p \geq q$.

On écrit alors :

$$\begin{aligned}
 Q &= \sum_{k=0}^p b_k X^k \\
 \text{et ainsi } P + Q &= \sum_{k=0}^p (a_k + b_k) X^k \\
 \text{et donc } \deg(P + Q) &\leq p
 \end{aligned}$$

Si de plus $p > q$, alors :

$$\begin{aligned}
 P + Q &= a_p X^p + \sum_{k=0}^{p-1} (a_k + b_k) X^k \quad (b_p = 0) \\
 \text{donc } (a_p \neq 0), \deg(P + Q) &= p
 \end{aligned}$$

- 2.

$$\lambda P = \sum_{k=0}^p \lambda a_k X^k$$

Or $\lambda a_p \neq 0$ car $a_p \neq 0$ et \mathbb{A} intègre.

- 3.

$$P.Q = \sum_{n \geq 0} \left(\sum_{k=0}^n a_k b_{n-k} \right) X^n$$

Si $n > p + q$, alors :

$$\sum_{k=0}^n a_k b_{n-k} = 0 \quad (\text{preuve (13.6)})$$

Or :

$$\begin{aligned}(PQ)_{p+q} &= \sum_{k=0}^{p+q} a_k b_{p+q-k} \\ &= \underbrace{a_p}_{\neq 0} \underbrace{b_q}_{\neq 0} \\ &\neq 0 \text{ car } \mathbb{A} \text{ int\`egre}\end{aligned}$$

4. Si $P \in \mathbb{A}_0[X]$, l'inégalité est vérifiée.
Sinon :

$$\begin{aligned}p' &= \sum_{k=0}^{p-1} (k+1)a_{k+1}X^k \\ \text{et } \deg(P') &\leq d-1 = \deg(P) - 1\end{aligned}$$

5. On a :

$$Q \circ P = \sum_{k=0}^q b_k p_k$$

Or, pour $k \in \llbracket 0, q-1 \rrbracket$, $\deg(b_k p^k) < \deg(\underbrace{b_q}_{\neq 0} p^q)$ ((13.34.2) et (13.34.3) avec \mathbb{A} int\`egre)

Donc :

$$\begin{aligned}\deg(Q \circ P) &= \deg(b_q p^q) \\ &= q \times \deg(P) \\ &= \deg(Q) \times \deg(P)\end{aligned}$$

13.36 Théorème de permanence de l'intégrité

Corollaire 13.36

Si \mathbb{A} est int\`egre, alors $\mathbb{A}[X]$ est int\`egre.

Si $P \neq 0$ et $Q \neq 0$

$$\begin{aligned}\deg(P \times Q) &= \deg(P) + \deg(Q) \text{ (}\mathbb{A} \text{ est int\`egre)} \\ &\geq 0\end{aligned}$$

13.39 Propriété de stabilité

Corollaire 13.39

- $\mathbb{A}_n[X]$ est un sous-groupe additif de $\mathbb{A}[X]$.
- La dérivation $D : \mathbb{A}[X] \rightarrow \mathbb{A}[X]$ induit un homomorphisme de groupe $D_n : \mathbb{A}_n[X] \rightarrow \mathbb{A}_{n-1}[X]$.
- Si \mathbb{K} est un corps de caractéristique nulle, D_n est une surjection. Autrement dit, tout polynôme de $\mathbb{K}_{n-1}[X]$ est primitivable formellement dans $\mathbb{K}_n[X]$.

- RAF
- RAF

- $\text{carac}(\mathbb{K}) = 0$. Soit $P = \sum_{k=0}^{n-1} a_k X^k \in \mathbb{K}_{n-1}[X]$.

Pour $k \in \llbracket 1, n \rrbracket$, $k = k \times 1 \neq 0$ dans \mathbb{K} car \mathbb{K} est de caractéristique nulle.
Donc k^{-1} est bien défini dans \mathbb{K} . On pose :

$$Q = \sum_{k=1}^n k^{-1} q_{k-1} X^k$$

Alors :

$$Q' = \sum_{k=0}^{n-1} (k+1)(k+1)^{-1} a_k X^k = P.$$

13.42 Corollaire du degré d'une dérivée dans $\mathbb{K}[X]$, avec $\mathbb{K} = \mathbb{R}$ ou \mathbb{C} **Corollaire 13.42**

Soit \mathbb{K} un corps de caractéristique nulle et soit P et Q deux polynômes de $\mathbb{K}[X]$. Alors $P' = Q'$ si et seulement si P et Q diffèrent d'une constante.

Soit $P \in \ker(D)$, où $D : \mathbb{K}[X] \rightarrow \mathbb{K}[X], P \mapsto P'$.

Donc $P' = 0$.

Si $\deg(P) > 0$, alors $\deg(P') \geq 0$ (13.41).

Donc nécessairement, $\mathbb{K}_0[X] \subset \ker(D)$.

Donc $\ker(D) = \mathbb{K}_0[X]$.

Chapitre 14

Suites numériques

14.18 Premier théorème de comparaison

Théorème 14.18

Si à partir d'un certain rang on a

$$|u_n - l| \leq v_n$$

avec $v_n \xrightarrow[n \rightarrow +\infty]{} 0$, alors $u_n \xrightarrow[n \rightarrow +\infty]{} l$.

Soit $u_n \in \mathbb{N}$ tel que :

$$\forall n \geq N_1, |u_n - l| \leq v_n$$

Comme $v_n \xrightarrow[n \rightarrow +\infty]{} 0$, pour tout $\epsilon > 0$, on choisit $N_2 \in \mathbb{N}$ tel que :

$$\forall n \geq N_2, |v_n - 0| = |v_n| < \epsilon$$

On pose $N = \max(N_1, N_2)$. Ainsi :

$$\forall n \geq N, |u_n - l| \leq v_n = |v_n| < \epsilon$$

Donc $\boxed{u_n \xrightarrow[n \rightarrow +\infty]{} l}$

14.22 Unicité de la limite

Proposition 14.22

Si u admet une limite $l \in \mathbb{R}$, alors celle-ci est unique.

On suppose que u admet comme limite l et l' dans \mathbb{R} .

Soit $\epsilon > 0$. On choisit N et N' dans \mathbb{N} tels que :

$$\forall n \geq N, |u_n - l| < \epsilon$$

$$\forall n \geq N', |u_n - l'| < \epsilon$$

Pour tout $n \geq \max(N, N')$:

$$\begin{aligned} |l - l'| &= |l - u_n + u_n - l'| \\ &\leq |l - u_n| + |u_n - l'| \quad (\text{Inégalité triangulaire}) \\ &< \epsilon \end{aligned}$$

Nécessairement :

$$|l - l'| = 0$$

14.23 Limite et inégalité

Proposition 14.23

Si u converge vers l et si $\alpha < l$, alors à partir d'un certain rang, $\alpha < u_n$. De la même manière, si $\beta > l$, alors à partir d'un certain rang, $u_n < \beta$.

On suppose que $u_n \xrightarrow[n \rightarrow +\infty]{} l$. Soit $\alpha < l$. On pose $\epsilon = \frac{l - \alpha}{2}$.

D'après la définition, on choisit $N \in \mathbb{N}$ tel que :

$$\forall n \geq N, |u_n - l| < \epsilon$$

Soit :

$$\forall n \geq N, \underbrace{u_n}_{> \alpha} \in]\underbrace{l - \epsilon}_{> \alpha}, l + \epsilon[$$

14.24 Convergence et bornitude

Proposition 14.24

Une suite convergente est bornée.

Soit u une suite convergente. Notons $l = \lim_{n \rightarrow +\infty} u_n$.

On pose $\epsilon =$.

Par définition, soit $N \in \mathbb{N}$ tel que :

$$\forall n \geq N, u_n \in]l - 1, l + 1[$$

Donc $\{u_n, n \geq N\}$ est borné. Donc $\{u_n, n \in \mathbb{N}\} = \underbrace{\{u_n, n \in \llbracket 0, N-1 \rrbracket\}}_{\text{ensemble fini}} \cup \underbrace{\{u_n, n \geq N\}}_{\text{borné}}$ est borné.

14.29 Minoration d'une extraction

Lemme 14.29

Soit $\sigma : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$ une application strictement croissante, alors

$$\forall n \in \mathbb{N}, n \leq \sigma(n).$$

Par récurrence.

Comme $\sigma(0) \in \mathbb{N}$, on a bien $\sigma(0) \geq 0$.

Si $\sigma(n) \geq n$, alors $\sigma(n+1) > \sigma(n) \geq n$.

Donc $\sigma(n+1) \geq n+1$.

14.30 Extraction d'une suite convergente

Proposition 14.30

Toute suite extraite d'une suite qui tend vers $l \in \overline{\mathbb{R}}$ est une suite convergente vers l .

On suppose que $u_n \xrightarrow[n \rightarrow +\infty]{} l \in \mathbb{R}$ (à adapter pour $l = \pm\infty$)

Soit $\sigma : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$ strictement croissante.

On note $v = u \circ \sigma$.

Soit $\epsilon > 0$. Soit $N \in \mathbb{N}$ tel que :

$$\forall n \geq N, |u_n - l| < \epsilon$$

Pour $n \geq N$, on a :

$$\sigma(n) \underset{(14.29)}{\geq} n \geq N$$

$$\text{donc } |u_{\sigma(n)} - l| < \epsilon$$

$$\text{soit } |v_n - l| < \epsilon$$

$$\text{donc } \boxed{v_n \xrightarrow[n \rightarrow +\infty]{} l}$$

14.32 Pair, impair et convergence

Proposition 14.32

Si $\lim u_{2n} = \lim u_{2n+1} = l \in \mathbb{R}$, alors $\lim u_n = l$

Soit $\epsilon > 0$. Soit N_1 et N_2 dans \mathbb{N} telq que :

$$\forall n \geq N_1, |u_{2n} - l| \leq \epsilon$$

$$\forall n \geq N_2, |u_{2n+1} - l| \leq \epsilon$$

Or pour $N = \max(2N_1, 2N_2 + 1)$.

Soit $n \geq N$.

— Si $n = 2p$, alors $p \geq N_1$

$$|u_n - l| = |u_{2p} - l| \leq \epsilon$$

— Si $n = 2p + 1$, alors $p \geq N_2$

$$|u_n - l| = |u_{2p+1} - l| \leq \epsilon$$

Dans tous les cas, $\boxed{|u_n - l| \leq \epsilon}$.

14.34 Opérations usuelles sur les limites

Théorème 14.34

Soit u et v deux suites qui convergent respectivement vers l et l' et soit $\lambda \in \mathbb{R}$, alors

— $u + v$ converge vers $l + l'$

— λu converge vers λl

— uv converge vers ll'

— Si $l \neq 0$, alors à partir d'un certain rang, la suite des termes u_n sont tous nuls et la suite $\frac{1}{u}$ converge vers $\frac{1}{l}$

— Soit $n \in \mathbb{N}$ tel que

$$\forall n \in \mathbb{N}, |u_n - l| \leq \epsilon \text{ et } |v_n - l'| \leq \epsilon$$

Donc :

$$\begin{aligned} \forall n \in \mathbb{N}, |u_n + v_n - (l + l')| &\leq |u_n - l| + |v_n - l'| \text{ (Inégalité triangulaire)} \\ &\leq \epsilon \end{aligned}$$

— RAS ($\lambda = 0$ et $\lambda \neq 0$)

— Comme u converge, u est bornée. Soit $M \in \mathbb{R}_+$ tel que :

$$\forall n \in \mathbb{N}, |u_n| \leq M$$

Pour $n \in \mathbb{N}$:

$$\begin{aligned} |u_n v_n - ll'| &= |u_n v_n - u_n l' + u_n l' - ll'| \\ &\leq |M| |v_n - l'| + |l'| \times |u_n - l| \\ &\leq M \times \epsilon + |l'| \times \epsilon \\ &= (M + |l'|) \times \epsilon \end{aligned}$$

$$\text{Donc } \boxed{u_n v_n \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} ll'}.$$

— On suppose $l \neq 0$. D'après (14.23), à partir d'un certain rang $u_n > 0$ (ou $u_n < 0$). Il existe en outre $N \in \mathbb{N}$ tel que :

$$0 < \frac{l}{2} < u_n \text{ et } |u_n - l| < \epsilon$$

Pour $n \geq N$:

$$\begin{aligned} \left| \frac{1}{u_n} - \frac{1}{l} \right| &= \frac{|l - u_n|}{|u_n l|} \\ &\leq 2 \frac{|l - u_n|}{l^2} \\ &< \frac{2\epsilon}{l^2} \end{aligned}$$

14.35 Conservation des inégalités larges par passage à la limite

Théorème 14.35

Soit u et v deux suites réelles. Si u converge vers l et v converge vers l' et si à partir d'un certain rang $u_n \leq v_n$ alors $l \leq l'$.

On raisonne par l'absurde : $l > l'$.

On pose $\epsilon = \frac{|l'-l|}{2}$.

On choisit $N \in \mathbb{N}$ tel que :

$$\forall n \geq N, u_n \in]l - \epsilon, l + \epsilon[\text{ et } v_n \in]l' - \epsilon, l' + \epsilon[$$

En particulier :

$$\forall n \geq N, u_n > v_n$$

Absurde.

14.37 Théorème d'encadrement

Théorème 14.37

Soit u, v et w trois suites réelles. Si u et v convergent vers l et si à partir d'un certain rang, $u_n \leq w_n \leq v_n$, alors w converge vers l .

Soit $\epsilon > 0$, on choisit $N \in \mathbb{N}$ tel que :

$$\forall n \geq N, u_n \in]l - \epsilon, l + \epsilon[\text{ et } v_n \in]l - \epsilon, l + \epsilon[$$

A partir d'un certain rang M , par connexité de l'intervalle $]l - \epsilon, l + \epsilon[$:

$$\forall n \geq M, w_n \in]l - \epsilon, l + \epsilon[$$

14.38 Produit d'une suite bornée par une limite nulle

Théorème 14.38

Soit u et v deux suites réelles. Si u converge vers 0 et si v est bornée, alors w converge vers 0.

Soit $M \in \mathbb{R}_+$ telq ue :

$$\forall n \in \mathbb{N}, |v_n| \leq M$$

Alors :

$$\forall n \in \mathbb{N}, |u_n v_n| \leq M \times |u_n| \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} 0$$

Donc :

$$|u_n v_n| \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} 0$$

Soit :

$$u_n v_n \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} 0$$

14.39 Exemple

Exemple 14.39

Soit (u_n) une suite strictement positive et $\eta \in]0, 1[$. On suppose qu'à partir d'un certain rang, on a $\frac{u_{n+1}}{u_n} \leq \eta$. Alors $\lim u_n = 0$.

On suppose que :

$$\forall n \geq n_0, \frac{u_{n+1}}{u_n} \leq 2$$

Donc ($u_n > 0$) :

$$\forall n \geq n_0, 0 < u_n < \underbrace{\eta^{n-n_0}}_{\xrightarrow[n \rightarrow +\infty]{} 0} \times u_{n_0}$$

Par encadrement :

$$\boxed{u_n \xrightarrow[n \rightarrow +\infty]{} 0}$$

14.40 Comparaison puissance factorielle

Théorème 14.40

$$\forall x \in \mathbb{R}, \lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{x^n}{n!} = 0.$$

Pour $x \in \mathbb{R}$ fixé, non nul.

On note pour tout $n \in \mathbb{N}$:

$$u_n = \frac{|x|^n}{n!} > 0$$

Or :

$$\frac{u_{n+1}}{u_n} = \frac{|x|}{n+1} \xrightarrow[n \rightarrow +\infty]{} 0$$

A partir d'un certain rang :

$$\frac{u_{n+1}}{u_n} \leq \frac{1}{2}$$

Donc (14.39) :

$$\boxed{u_n \xrightarrow[n \rightarrow +\infty]{} 0}$$

14.41 Caractérisation séquentielle de la borne supérieure

Théorème 14.41

Soit A une partie non vide de \mathbb{R} et soit $M \in \mathbb{R}$. Alors M est la borne supérieure (resp. inférieure) de A si et seulement si M majore (resp. minore) A et s'il existe une suite d'éléments de A qui converge vers M .

\Rightarrow

On suppose que $M = \sup A$. Donc M majore A .

On rappelle que :

$$\forall \epsilon > 0, \exists a \in A, M - \epsilon < a$$

Donc :

$$\forall n \in \mathbb{N}, \exists a \in A, M - \frac{1}{n+1} < a \leq M \text{ (} M \text{ est un majorant)}$$

D'après la suite $(a_n) \in A^{\mathbb{N}}$ étant ainsi définie, d'après le théorème d'encadrement :

$$\boxed{a_n \xrightarrow[n \rightarrow +\infty]{} M}$$



On choisit $(a_n) \in A^{\mathbb{N}}$ telle que :

$$a_n \xrightarrow[n \rightarrow +\infty]{} M \text{ (majorant de } A)$$

Soit $\epsilon > 0$. On choisit $a_n \in A$ tel que :

$$a_n \in]M - \epsilon, M + \epsilon[$$

Donc $M - \epsilon$ ne majore pas A .

Donc :

$$M = \sup A$$

14.42 Caractérisation séquentielle de la borne supérieure

Théorème 14.42

Soit A une partie non vide de \mathbb{R} , alors A est dense dans \mathbb{R} si et seulement si pour tout $x \in \mathbb{R}$, il existe une suite d'éléments de A qui converge vers x .



On suppose que A est dense dans \mathbb{R} .

Soit $x \in \mathbb{R}$.

$$\forall \epsilon > 0, \exists a \in A, a \in]x - \epsilon, x + \epsilon[$$

En particulier :

$$\forall n \in \mathbb{N}, \exists a_n \in A, x - \frac{1}{n+1} < a_n < x + \frac{1}{n+1}$$

La suite $(a_n) \in A^{\mathbb{N}}$ étant fixée ainsi :

$$a_n \xrightarrow[n \rightarrow +\infty]{} x \text{ (théorème d'encadrement)}$$



Soit $]x, y[$ un intervalle non vide de \mathbb{R} .

On pose $z = \frac{x+y}{2}$. On pose $\epsilon = \frac{|y-x|}{2}$.

On choisit $(a_n) \in A^{\mathbb{N}}$ telle que :

$$a_n \xrightarrow[n \rightarrow +\infty]{} z$$

On choisit $N \in \mathbb{N}$ tel que :

$$a_n \in]z - \epsilon, z + \epsilon[=]x, y[$$

Donc :

$$A \cap]x, y[\neq \emptyset$$

14.48 Théorème de comparaison

Théorème 14.48

Soit u et v deux suites réelles.

1. Si $\lim u = +\infty$ et si à partir d'un certain rang on a $u_n \leq v_n$, alors $\lim v = +\infty$;
2. Si $\lim v = -\infty$ et si à partir d'un certain rang on a $u_n \leq v_n$, alors $\lim u = -\infty$;
3. Si $\lim u = +\infty$ (resp. $-\infty$) et si v est minorée (resp. majorée), alors $\lim u + v = +\infty$ (resp. $-\infty$).

1. Soit $A \geq 0$. On choisit $n \in \mathbb{N}$ tel que :

$$\forall n \geq N, A \leq u_n \text{ et } u_n \leq v_n$$

Donc :

$$v_n \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} +\infty$$

2. RAS

3. Si (v_n) est minorée, alors à partir d'un certain rang :

$$m + u_n \leq u_n + v_n$$

En adaptant le premier point ($A' = A - m$), on a :

$$u_n + v_n \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} +\infty$$

14.49 Limites infinies et opérations

Théorème 14.49

Soit u et v deux suites réelles de limites respectives l et l' dans $\overline{\mathbb{R}}$ et soit $\lambda \in \mathbb{R}$. On a

- $\lim u + v = l + l'$ (sauf si $l = +\infty$ et $l' = -\infty$ ou inversement)
- $\lim \lambda u = \lambda l$ sauf si $\lambda = 0$ auquel cas la suite λu est la suite nulle.
- $\lim u \times v = l \times l'$ sauf si $\lambda = 0$ et $l' = \pm\infty$ ou inversement
- Si à partir d'un certain rang, la suite u ne s'annule pas, alors la suite $\frac{1}{u}$:
 - si $l \in \mathbb{R}^*$, tend vers $\frac{1}{l}$;
 - si $l = \pm\infty$, tend vers 0 ;
 - si $l = 0$ et $u_n > 0$, tend vers $+\infty$;
 - si $l = 0$ et $u_n < 0$, tend vers $-\infty$;
 - n'a pas de limite dans les autres cas.

- On suppose $l' \in \mathbb{R}$ et $l = +\infty$. Donc v est bornée.

Donc (14.48) :

$$u_n + v_n \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} +\infty$$

- $\lambda \neq 0, \lambda > 0$ et $l = +\infty$. Pour $A \in \mathbb{R}$, on choisit un rang à partir duquel $u_n > \frac{A}{\lambda}$.
- On suppose $l > 0$ et $l' = +\infty$.

Comme $u_n \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} l$, alors à partir d'un certain rang, $u_n > m$ avec $m = \begin{cases} 1 & \text{si } l = +\infty \\ \frac{l}{2} & \text{sinon} \end{cases}$

$$u_n v_n > m v_n \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} +\infty$$

Donc :

$$u_n v_n \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} +\infty \quad (14.48)$$

- $l = +\infty$.

Soit $\epsilon > 0$, à partir d'un certain rang :

$$u_n > \frac{1}{\epsilon} > 0$$

Donc :

$$0 < \frac{1}{u_n} < \epsilon$$

$$\frac{1}{u_n} \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} 0$$

Si $l = 0$ et $u_n > 0$ à partir d'un certain rang.

Pour $A \in \mathbb{R}_+^*$, à partir d'un certain rang :

$$\begin{aligned} u_n &> 0 \text{ et } u_n < \frac{1}{A} \\ \text{donc } \frac{1}{u_n} &> A \\ \frac{1}{u_n} &\xrightarrow{n \rightarrow +\infty} +\infty \end{aligned}$$

14.50 Théorème de la limite monotone

Théorème 14.50

Si u est une suite croissante et majorée (resp. décroissante et minorée), alors u converge vers $\sup_{n \in \mathbb{N}}(u_n)$ (resp. vers $\inf_{n \in \mathbb{N}}(u_n)$).

Si u est une suite croissante et non majorée (resp. décroissante et non minorée) alors u tend vers $+\infty$ (resp. vers $-\infty$).

— On suppose u croissante et majorée.

L'ensemble $A = \{u_n | n \in \mathbb{N}\}$ est non vide et majoré. Cet ensemble possède une borne supérieure notée l (propriété fondamentale de \mathbb{R}).

Soit $\epsilon > 0$. Comme $l - \epsilon < u_n$ ne majore pas A , on choisit $N \in \mathbb{N}$ tel que $l - \epsilon < u_N$.

Or (u_n) est croissante donc :

$$\forall n \geq N, l - \epsilon < u_N \leq u_n \leq l$$

Donc :

$$\forall n \geq N, u_n \in]l - \epsilon, l + \epsilon[$$

Soit :

$$\boxed{u_n \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} l}$$

— On suppose u croissante et non majorée.

Soit $A \in \mathbb{R}_+$. Soit $N \in \mathbb{N}$ tel que :

$$u_N \geq A \text{ (} u \text{ non majorée)}$$

Donc :

$$\forall n \geq N, A \leq u_N \leq u_n \text{ (} u \text{ croissante)}$$

Soit :

$$\boxed{u_n \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} +\infty}$$

14.54 Exemple

Exemple 14.54

Soit u et v les suites définies par

$$\forall n \in \mathbb{N}^*, u_n = \sum_{k=0}^n \frac{1}{k!} \text{ et } v_n = u_n + \frac{1}{n \times n!}$$

Ces deux suites sont adjacentes.

—

$$\forall n \in \mathbb{N}^*, u_{n+1} - u_n = \frac{1}{(n+1)!} \geq 0$$

Donc (u_n) est croissante.

$$\begin{aligned}
\forall n \in \mathbb{N}^* v_{n+1} - v_n &= u_{n+1} - u_n + \frac{1}{(n+1)(n+1)!} - \frac{1}{nn!} \\
&= \frac{1}{(n+1)!} + \frac{1}{(n+1)(n+1)!} - \frac{1}{nn!} \\
&= \frac{1}{n!} \left[\frac{1}{n+1} + \frac{1}{(n+1)^2} - \frac{1}{n} \right] \\
&= \frac{1}{n!(n+1)^2 n} [(n+1)n + n - (n+1)^2] \\
&= -\frac{1}{n!(n+1)^2 n} \\
&\leq 0
\end{aligned}$$

$$\forall n \in \mathbb{N}^*, v_n - u_n = \frac{1}{n \times n!}$$

Donc :

$$v_n - u_n \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} 0$$

Donc u et v sont adjacentes et convergent alors vers une limite commune. (TCSA)

14.55 Convergence des suites adjacentes

Théorème 14.55

Deux suites adjacentes convergent vers une limite commune.

Soit u et v deux suites adjacentes avec u croissante et v décroissante.

Soit $w = v - u$. Par opération, w est décroissante.

Par hypothèse :

$$w_n \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} 0$$

Donc $w \leq 0$, soit $u \leq v$.

La suite u est donc majorée par v_0 , et croissante donc convergente d'après le théorème de la limite monotone.

Pour les mêmes raisons, v converge.

Or, par théorème d'opérations :

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} v_n - \lim_{n \rightarrow +\infty} u_n = \lim_{n \rightarrow +\infty} (v_n - u_n) = 0$$

14.56 Théorème de Bolzano-Weierstrass

Théorème 14.56

On peut extraire de toute suite réelle bornée une suite convergente.

Soit u une suite bornée. On note a et b un minorant et majorant de u . On construit deux suites (a_n) et (b_n) par récurrence de la manière suivante :

— On initialise $a_0 = a$ et $b_0 = b$.

— Si l'intervalle $\left[a_0, \frac{a_0+b_0}{2}\right]$ contient une infinité de valeurs de la suite (u_n) , alors $a_1 = a_0$ et $b_1 = \frac{a_0+b_0}{2}$.

Sinon, l'intervalle $\left[\frac{a_0+b_0}{2}, b_0\right]$ contient une infinité de valeurs, alors $a_1 = \frac{a_0+b_0}{2}$ et $b_1 = b_0$.

On note $\sigma(0) = 0$ et comme $[a_1, b_1]$ contient une infinité de valeurs, on dit $u_{n_1} \in [a_1, b_1]$ avec $n_1 > 0$.

On pose alors $\sigma(1) = n_1$.

— Supposons construits (a_n) , (b_n) et σ avec le principe précédent :

$$\forall n \in \mathbb{N}, \begin{cases} a_{n+1} = a_n \text{ et } b_{n+1} = \frac{a_n+b_n}{2} \\ \text{ou} \\ a_{n+1} = \frac{a_n+b_n}{2} \text{ et } b_{n+1} = b_n \end{cases}$$

Selon que $\left[a_n, \frac{a_n+b_n}{2}\right]$ contient une infinité de valeurs ou $\left[\frac{a_n+b_n}{2}, b_n\right]$ et $v(n+1) > v(n)$ et $u_{\sigma(n+1)} \in [a_{n+1}, b_{n+1}]$.

$$\begin{aligned} \forall n \in \mathbb{N}, a_n &\leq u_{\sigma(n)} \leq b_n \\ \forall n \in \mathbb{N}, |b_{n+1} - a_{n+1}| &= \frac{|b_n - a_n|}{2} \\ \forall n \in \mathbb{N}, |b_n - a_n| &= \frac{|b_0 - a_0|}{2^n} \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} 0 \end{aligned}$$

Donc (a_n) et (b_n) sont adjacentes donc convergent vers la même limite (TCSA) donc $(u_{\sigma(n)})$ converge (TE).

14.63 Exemple

Exemple 14.63

La suite (u_n) définie par $u_0 = 1$ et pour tout $n \in \mathbb{N}, u_{n+1} = u_n + e^{u_n}$ diverge vers $+\infty$.

\mathbb{R}_+ est stable par $f : x \mapsto x + e^x$.

Comme $0 \in \mathbb{R}_+$, la suite (u_n) est bien définie.

$$\forall n \in \mathbb{N}, u_{n+1} = f(u_n) = u_n + e^{u_n} \geq u_n$$

Donc (u_n) est croissant.

Supposons que $u_n \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} l \in \mathbb{R}_+$.

Par théorème d'opération, $l = l + e^l$.

Absurde.

Donc d'après le TLM :

$$u_n \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} +\infty$$

14.64 Exemple

Exemple 14.64

La suite (u_n) définie par $u_0 = 1$ et pour tout $n \in \mathbb{N}, u_{n+1} = \frac{u_n}{1+u_n^2}$ converge vers 0.

$[0, 1]$ est stable par $f : x \mapsto \frac{x}{x^2+1}$ et $1 \in [0, 1]$.

Donc (u_n) est bien définie et est minorée.

Or :

$$\forall n \in \mathbb{N}, u_{n+1} = f(u_n) = \frac{u_n}{u_n^2 + 1} \leq u_n$$

Donc (u_n) est décroissante donc converge vers $l \in [0, 1]$ d'après le TLM.

Par théorème d'opération :

$$\begin{aligned} l &= \frac{l}{l^2 + 1} \\ \text{donc } l^2 &= 0 \\ \text{donc } l &= 0 \end{aligned}$$

14.66 Monotonie d'une suite récurrente définie par une relation $u_{n+1} = f(u_n)$

Théorème 14.66

Soit D une partie de \mathbb{R} , $u_0 \in D$ et $f : D \rightarrow D$ une fonction (autrement dit, D est stable par f). On note (u_n) l'unique suite définie sur \mathbb{N} par $u_{n+1} = f(u_n)$.

1. Si pour tout $x \in D$, $f(x) \geq x$, alors (u_n) est croissante. Si pour tout $x \in D$, $f(x) \leq x$, alors (u_n) est décroissante. Le signe de la fonction $x \mapsto f(x) - x$ renseigne donc sur la monotonie de la suite (u_n) .
2. Si f est croissante, alors (u_n) est monotone. Son sens de variation dépend alors du signe de $u_1 - u_0$.
3. Si f est décroissante, alors (u_{2n}) et (u_{2n+1}) sont monotones et de sens contraires. Leur sens de variation est entièrement déterminé par le signe de $u_2 - u_0$.

1. Si :

$$\forall n \in D, f(x) \geq x$$

Alors :

$$\forall n \in \mathbb{N}, f(u_n) = u_{n+1} > u_n$$

Donc (u_n) est croissante.

2. On suppose f croissante et $u_0 \leq u_1$. Alors :

$$u_1 = f(u_0) \leq f(u_1) = u_2$$

On termine par récurrence.

3. Si f est décroissante, alors $f^2 = f \circ f$ est croissante. Or :

$$\begin{aligned} \forall n \in \mathbb{N}, u_{2n+2} &= f^2(u_{2n}) \\ u_{2n+1} &= f^2(u_{2n-1}) \end{aligned}$$

Donc (14.66.2) (u_{2n}) et (u_{2n+1}) sont monotones.

Or, si $u_2 \leq u_0$, alors $u_3 = f(u_2) \leq f(u_0) = u_1$

14.68 Exemple

Exemple 14.68

On note (u_n) la suite définie par $u_0 = 1$ et pour tout $n \in \mathbb{N}$, $u_{n+1} = u_n^2 + u_n$ et notons $f : x \mapsto 1 + \frac{1}{x}$. Etudier la convergence de la suite (u_n) .

\mathbb{R}_+ est stable par $f : x \mapsto x^2 + x$ et $1 \in \mathbb{R}_+$.

Donc (u_n) est bien définie.

Comme :

$$\forall x \in \mathbb{R}_+, f(x) - x \geq 0$$

(u_n) est croissante.

On suppose que :

$$u_n \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} l \geq 1 = u_0$$

Comme $f \in \mathcal{C}^\infty(\mathbb{R}_+, \mathbb{R}_+)$.

On a $f(l) = l$ donc $l^2 = 0$.

Absurde.

Donc, d'après le TLM :

$$u_n \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} +\infty$$

14.69 Exemple

Exemple 14.69

On note (u_n) la suite définie par $u_0 = 1$ et pour tout $n \in \mathbb{N}$, $u_{n+1} = 1 + \frac{1}{u_n}$, et notons $f : x \mapsto 1 + \frac{1}{x}$.
Etudier la convergence de la suite (u_n) .

$[1, 2]$ est stable par $f : x \mapsto 1 + \frac{1}{x}$ et $1 \in [1, 2]$.

Donc (u_n) est bien définie et est bornée.

Comme f est décroissante sur $[1, 2]$, (u_{2n}) et (u_{2n+1}) sont monotones de monotonies contraires.

Comme $u_0 = 1 = \min([1, 2])$, (u_{2n}) est croissante et (u_{2n+1}) décroissante, puis convergentes (TLM) vers des points fixes de f^2 (car f^2 est continue sur $[1, 2]$)

Soit $x \in [1, 2]$.

$$\begin{aligned} f^2(x) = x &\Leftrightarrow 1 + \frac{1}{1 + \frac{1}{x}} = x \\ &\Leftrightarrow x + 1 + x = x(x + 1) \\ &\Leftrightarrow x^2 - x - 1 = 0 \\ &\Leftrightarrow \left(x - \underbrace{\frac{1 + \sqrt{5}}{2}}_{\in [1, 2]} \right) \left(x - \underbrace{\frac{1 - \sqrt{5}}{2}}_{\notin [1, 2]} \right) = 0 \\ &\Leftrightarrow x = \frac{1 + \sqrt{5}}{2} \end{aligned}$$

Donc (u_{2n}) et (u_{2n+1}) convergent nécessairement vers $\frac{1 + \sqrt{5}}{2}$.

Donc :

$$u_n \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} \frac{1 + \sqrt{5}}{2}$$

14.72 Convergence et parties réelles et imaginaires

Théorème 14.72

Soit u une suite complexe et $l \in \mathbb{C}$. Alors la suite u converge vers l si et seulement si la suite $(\operatorname{Re}(u_n))$ converge vers $\operatorname{Re}(l)$ et $(\operatorname{Im}(u_n))$ converge vers $\operatorname{Im}(l)$.

\Rightarrow

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

$$\begin{aligned} |\operatorname{Re}(u_n) - \operatorname{Re}(l)| &\leq |u_n - l| \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} 0 \\ |\operatorname{Im}(u_n) - \operatorname{Im}(l)| &\leq |u_n - l| \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} 0 \end{aligned}$$

Ainsi, $\operatorname{Im}(u_n) \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} \operatorname{Im}(l)$ et $\operatorname{Re}(u_n) \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} \operatorname{Re}(l)$.

\Leftarrow On a :

$$\begin{aligned} |u_n - l| &= \sqrt{(\operatorname{Im}(u_n) - \operatorname{Im}(l))^2 + (\operatorname{Re}(u_n) - \operatorname{Re}(l))^2} \\ &\xrightarrow{n \rightarrow +\infty} 0 \text{ (théorème d'opérations)} \end{aligned}$$

14.73 Théorème de Bolzano-Weierstrass pour les suites complexes

Remarque 14.73

Si u est bornée, on peut en extraire une suite convergente (Bolzano-Weierstrass).

$u_n = a_n + b_n$ bornée.
 (a_n) et (b_n) sont bornés.
 (a_n) borné donc $(a_{\sigma(n)})$ converge.
 $(b_{\sigma(n)})$ bornée donc $(b_{\sigma \circ \varphi(n)})$ converge.
 $(a_{\sigma \circ \varphi(n)})$ extraite de $(a_{\sigma(n)})$ donc converge.
 $(u_{\sigma \circ \varphi(n)})$ converge.

Chapitre 15

Limites et continuité