

Anneaux et Corps

I Anneaux

I. A Structure d'anneau

Définition 1.1

On appelle **anneau** un triplet $(A, +, \times)$ où A est un ensemble et $+, \times$ deux lois de composition interne dans A telles que :

- $(A, +)$ est un groupe abélien, son élément neutre est noté 0_A ;
- \times est associative ;
- \times admet un élément neutre noté 1_A , distinct de 0_A , appelé élément unité de A ;
- \times est distributive par rapport à $+$.

Si de plus \times est commutative, l'anneau est dit commutatif.

Exemples 1.2 : • $(\mathbb{Z}, +, \times)$, $(\mathcal{F}(X, \mathbb{R}), +, \times)$ et $(\mathbb{R}[X], +, \times)$ sont des anneaux commutatifs ;

- $(\mathcal{M}_n(\mathbb{K}), +, \times)$ et $(\mathcal{L}(E), +, \circ)$ sont des anneaux non commutatifs si $n \geq 2$ et $\dim(E) \geq 2$.

Notation : Pour $a, b \in A$, on note $a - b = a + (-b)$. La loi \times est distributive par rapport à la loi $-$ ainsi définie.

Proposition 1.3

Soit $(A, +, \times)$ un anneau.

- $\forall a \in A, a \times 0_A = 0_A \times a = 0_A$, on dit que 0_A est absorbant.
- pour $a, b \in A$ et $n \in \mathbb{N}$, si **a et b commutent**, alors :

$$(a + b)^n = \sum_{k=0}^n \binom{n}{k} a^{n-k} b^k \quad (\text{Formule du binôme})$$

et

$$\begin{aligned} a^n - b^n &= (a - b) \left(\sum_{k=0}^{n-1} a^{n-1-k} b^k \right) \\ &= \left(\sum_{k=0}^{n-1} a^{n-1-k} b^k \right) (a - b) \quad (4^{\text{ième}} \text{ identité remarquable}). \end{aligned}$$

Définition 1.4

Soit $(A, +, \times)$ un anneau. On appelle **sous-anneau** de A une partie B de A stable par les lois $+$ et \times et qui, munie des lois induites, est encore un anneau, avec le même élément unité 1_A .

Proposition 1.5 (Caractérisation des sous-anneaux)

Soit $(A, +, \times)$ un anneau, B est un sous-anneau de A si et seulement si :

- $B \subset A$;
- $1_A \in B$;
- $\forall (x, y) \in B^2, x - y \in B$;
- $\forall (x, y) \in B^2, xy \in B$.

Exemple 1.6 : \mathbb{Z} est un sous-anneau de \mathbb{R} .

Définition 1.7

Soit A et B deux anneaux. On appelle **morphisme d'anneau** de A dans B une application f de A dans B telle que :

- $f(1_A) = 1_B$;
- $\forall (x, y) \in A^2, f(x + y) = f(x) + f(y)$;
- $\forall (x, y) \in A^2, f(xy) = f(x)f(y)$.

Remarque 1.8 : De même que pour les morphismes de groupes, un endomorphisme d'anneau de A est un morphisme de A dans A , un isomorphisme d'anneau est un morphisme bijectif et un automorphisme d'anneau est un endomorphisme bijectif.

Proposition 1.9

L'image d'un morphisme d'anneau est un sous-anneau.

Remarque 1.10 : Le noyau d'un morphisme d'anneau f n'est jamais un sous-anneau ! (car $f(1_A) = 1_B \neq 0_B$).

I. B Produit fini d'anneaux

Définition 1.11

Soit $(A_i)_{i \in \llbracket 1; n \rrbracket}$ une famille finie d'anneaux, alors $(A, +, \times)$ avec :

- $A = \prod_{i=1}^n A_i$;
 - $\forall x = (x_i)_{i \in \llbracket 1; n \rrbracket}, y = (y_i)_{i \in \llbracket 1; n \rrbracket} : x + y = (x_i + y_i)_{i \in \llbracket 1; n \rrbracket}$;
 - $\forall x = (x_i)_{i \in \llbracket 1; n \rrbracket}, y = (y_i)_{i \in \llbracket 1; n \rrbracket} : x \times y = (x_i \times y_i)_{i \in \llbracket 1; n \rrbracket}$;
- est un anneau, appelé **anneau produit**.

Remarque 1.12 : On fait les opérations coefficient par coefficient.

I. C Diviseurs de zéro, anneau intègre

Attention : Dans un anneau, il peut exister des éléments non nuls dont le produit est nul.

- Exemples 1.13 :**
- Dans $(\mathcal{F}(\mathbb{R}, \mathbb{R}), +, \times) : f = \dots \neq 0_{\mathcal{F}}$ et $g = \dots \neq 0_{\mathcal{F}}, f \times g = 0_{\mathcal{F}}$.
 - Dans $\mathcal{M}_2(\mathbb{R}), M = \dots \neq 0_2$, mais $M^2 = 0_2$.

Définition 1.14

Soit $(A, +, \times)$ un anneau et $a \in A$. On dit que a est un **diviseur de zéro** lorsque :

$$a \neq 0_A \text{ et } \exists b \in A \setminus \{0_A\} \mid a \times b = 0_A \text{ ou } b \times a = 0_A.$$

Définition 1.15

Un anneau est dit **intègre** lorsqu'il est commutatif et sans diviseur de zéro.

Remarque 1.16 : Dans un anneau intègre, on peut donc simplifier par un élément non nul : si $a \neq 0_A$, alors : $ax = ay \Rightarrow x = y$.

- Exemples 1.17 :**
- $(\mathbb{Z}, +, \times)$ et $(\mathbb{R}[X], +, \times)$ sont des anneaux intègres ;
 - si $n \geq 2$, $(\mathcal{M}_n(\mathbb{R}), +, \times)$ n'est pas intègre (non commutatif et avec diviseurs de zéro) ;
 - $(\mathcal{F}(\mathbb{R}, \mathbb{R}), +, \times)$ n'est pas intègre (commutatif, mais avec diviseurs de zéro).

I. D Groupe des inversibles d'un anneau

Définition/Proposition 1.18

Soit $(A, +, \times)$ un anneau. On note A^* l'ensemble des éléments inversibles (pour la loi \times).

Alors (A^*, \times) un un groupe appelé **groupe des inversibles de $(A, +, \times)$** .

Exemples 1.19 : Donner le groupe des inversibles des anneaux : $(\mathbb{Z}, +, \times)$, $(\mathbb{R}, +, \times)$ et $(\mathcal{M}_n(\mathbb{R}), +, \times)$.

Remarque 1.20 : Les diviseurs de zéro et 0_A sont non-inversibles.

I. E Corps

Définition 1.21

On appelle **corps** un anneau commutatif dont tous les éléments non nuls sont inversibles.

Remarque 1.22 : Un corps est un anneau intègre.

- Exemples 1.23 :**
- \mathbb{R} et \mathbb{C} sont des corps.
 - $\mathbb{R}(X)$ et $\mathbb{C}(X)$ sont des corps (des fractions rationnelles).

Définition 1.24

Soit $(K, +, \times)$ un corps. On appelle **sous-corps** de K une partie L de K stable par $+$ et \times et qui, munie des lois induites, est un corps.

Remarque 1.25 : Pour un sous-corps, on n'a pas besoin de supposer que l'unité de L est l'unité de K , c'est une conséquence du fait que tout élément non nul de K est inversible.

Proposition 1.26

Soit $(K, +, \times)$ un corps, L est un sous-corps de K si et seulement si :

- $L \subset K$;
- $1_K \in L$;
- $\forall x, y \in L, x - y \in L$;
- $\forall x, y \in L, xy \in L$;
- $\forall x \in L \setminus \{0_K\}, x^{-1} \in L$.

Remarque 1.27 : Les quatre premières conditions font de L un sous-anneau de K .

- Exemples 1.28 :**
- \mathbb{Q} est un sous-corps de \mathbb{R} ;
 - \mathbb{R} est un sous-corps de \mathbb{C} ;
 - $\mathbb{Q}[\sqrt{2}] = \{a + b\sqrt{2} ; \text{avec } a, b \in \mathbb{Q}\}$ est un sous-corps de \mathbb{R} .

II Idéaux d'un anneau commutatif

II. A Idéaux d'un anneau commutatif

Définition 2.1

Soit $(A, +, \times)$ un anneau commutatif. On dit que I est un idéal de A lorsque :

- $(I, +)$ est un sous-groupe de $(A, +)$;
- $\forall x \in I, \forall a \in A, a \times x \in I$ (stabilité par multiplication par les éléments de A).

Exemples 2.2 : • Soit A un anneau commutatif, $\{0\}$ et A sont des idéaux de A .

De plus si I est un idéal de A et $1_A \in A$, alors $I = A$.

- $2\mathbb{Z}$ est un idéal de l'anneau \mathbb{Z} .
- L'ensemble des suites réelles presque nulles est un idéal de l'anneau des suites réelles.
- Déterminer les idéaux de $(\mathbb{R}, +, \times)$; d'un corps K .

Proposition 2.3 (Noyau d'un morphisme d'anneaux commutatifs)

Soit A et B des anneaux commutatifs et f un morphisme de A dans B . Alors le noyau de f est un idéal de A .

Définition/Proposition 2.4

Soit $(A, +, \times)$ un anneau commutatif et $x \in A$. L'ensemble $xA = \{xa; \text{avec } a \in A\}$ est un idéal appelé **idéal engendré par x** .

Exemples 2.5 : • $2\mathbb{Z}$ est un idéal de \mathbb{Z} engendré par 2 ;

- l'idéal des suite presque nulles dans $\mathbb{R}^{\mathbb{N}}$ n'est pas un idéal engendré.

Proposition 2.6

Soit A un anneau commutatif et $(I_i)_{i \in [1; n]}$ une famille d'idéaux de A .

- L'intersection $\bigcap_{i \in [1; n]} I_i$ est un idéal de A .
- La somme $\sum_{i=1}^n I_i = \left\{ \sum_{i=1}^n x_i; \text{avec } \forall i \in [1; n], x_i \in I_i \right\}$ est un idéal de A .

II. B Divisibilité dans un anneau intègre

Définition 2.7

Soit A un anneau intègre et $a, b \in A$. On dit que

- a **divise** b lorsqu'il existe $c \in A$ tel que : $b = ac$;
- a et b sont **associés** lorsque : a divise b et b divise a .

Proposition 2.8

Soit A un anneau intègre et $a, b \in A$, alors :

$$a \text{ et } b \text{ sont associés} \Leftrightarrow \exists x \in A^* \mid b = ax$$

Exemple 2.9 : Dans l'anneau $\mathbb{K}[X]$, quels sont les polynômes de $\mathbb{K}[X]$ associés à un polynôme $P \in \mathbb{K}[X]$?

Proposition 2.10

Soit A un anneau intègre et $x, y \in A$. Alors :

- x divise y si et seulement si $yA \subset xA$;
- x et y sont associés si et seulement si $xA = yA$.

II. C Idéaux de \mathbb{Z} et arithmétique dans \mathbb{Z}

Proposition 2.11

Les idéaux de \mathbb{Z} sont les $n\mathbb{Z}$ avec $n \in \mathbb{Z}$.

Définition/Proposition 2.12

Soit $a, b \in \mathbb{Z}$, alors il existe un unique $d \in \mathbb{N}$ tel que $a\mathbb{Z} + b\mathbb{Z} = d\mathbb{Z}$, on l'appelle **PGCD** de a et b et on note $d = a \wedge b$.

Soit $(a_i)_{i \in [1; n]}$ une famille d'entiers relatifs. Alors il existe un unique $d \in \mathbb{N}$ tel que $\sum_{i=1}^n a_i \mathbb{Z} = d\mathbb{Z}$, on l'appelle le **PGCD** de la famille $(a_i)_{i \in [1; n]}$.

Remarques 2.13 : • On vérifie que la définition est cohérente avec la définition vue en première année : $a, b \in a\mathbb{Z} + b\mathbb{Z} = d\mathbb{Z}$, donc d diviseur commun de a et b ; et pour $c \in \mathbb{N}$, $(c \mid a \text{ et } c \mid b) \Rightarrow c \mid d$ (plus petit pour le relation d'ordre de divisibilité).

- $0 \wedge 0 = 0$.
- De même, si $m = a \vee b$, alors $a\mathbb{Z} \cap b\mathbb{Z} = m\mathbb{Z}$.

Théorème 2.14

Soit $a, b, d \in \mathbb{Z}$.

Identité de Bézout : si $a \wedge b = d$, alors il existe deux entiers relatifs x et y tels que : $ax + by = d$.

Théorème de Bézout : a et b sont premiers entre eux si et seulement s'il existe deux entiers relatifs x et y tels que : $ax + by = 1$.

III Anneaux $\mathbb{Z}/n\mathbb{Z}$

Dans cette partie on suppose $n \in \mathbb{N}$ avec $n \geq 2$.

III. A Structure d'anneau de $\mathbb{Z}/n\mathbb{Z}$

Proposition 3.1

La loi de composition interne \times sur $\mathbb{Z}/n\mathbb{Z}$:

$$\begin{aligned} \mathbb{Z}/n\mathbb{Z} \times \mathbb{Z}/n\mathbb{Z} &\longrightarrow \mathbb{Z}/n\mathbb{Z} \\ (\alpha, \beta) &\longmapsto \overline{(a \times b)} \text{ avec } a, b \in \mathbb{Z} \text{ tels que } \bar{a} = \alpha, \bar{b} = \beta \end{aligned}$$

est bien définie.

Théorème 3.2

$(\mathbb{Z}/n\mathbb{Z}, +, \times)$ est un anneau commutatif.

Exemples 3.3 : Calculs dans $\mathbb{Z}/6\mathbb{Z}$ et inversibles de $\mathbb{Z}/6\mathbb{Z}$.

Remarque 3.4 : Pour $k, p \in \mathbb{Z}$, $p \cdot \bar{k} = \overline{p \times k} = \bar{p} \times \bar{k}$.

III. B Inversibles de $\mathbb{Z}/n\mathbb{Z}$

Théorème 3.5

Soit $\bar{m} \in \mathbb{Z}/n\mathbb{Z}$:

$$\bar{m} \text{ est inversible dans } \mathbb{Z}/n\mathbb{Z} \Leftrightarrow m \wedge n = 1.$$

Remarque 3.6 : Les éléments inversibles de l'anneau $\mathbb{Z}/n\mathbb{Z}$ sont les générateurs du groupe $\mathbb{Z}/n\mathbb{Z}$.

Théorème 3.7

Soit $p \in \mathbb{N}^*$, $\mathbb{Z}/p\mathbb{Z}$ est un corps si et seulement si p est un nombre premier. Dans ce cas on le note \mathbb{F}_p .

Exemple 3.8 : résolution de $x^2 = \bar{1}$ dans $\mathbb{Z}/p\mathbb{Z}$ avec p premier, puis dans $\mathbb{Z}/12\mathbb{Z}$.

III. C Théorème chinois

On note pour $a \in \mathbb{Z}$ et $n \in \mathbb{N}^*$: $\bar{a}^{[n]}$ la classe de a modulo n .

Théorème 3.9 (chinois (Qin Jiushao))

Soit m et n des entiers naturels tels que $m \wedge n = 1$. L'application :

$$\begin{aligned} \Phi : \mathbb{Z}/mn\mathbb{Z} &\longrightarrow \mathbb{Z}/m\mathbb{Z} \times \mathbb{Z}/n\mathbb{Z} \\ \bar{a}^{[mn]} &\longmapsto (\bar{a}^{[m]}, \bar{a}^{[n]}) \end{aligned}$$

est un isomorphisme d'anneaux.

Corollaire 3.10

Soit m, n deux entiers naturels tels que $m \wedge n = 1$.

$\forall (a, b) \in \mathbb{Z}^2, \exists c \in \mathbb{Z}$ tel que :

$$\begin{cases} x \equiv a [m] \\ x \equiv b [n] \end{cases} \Leftrightarrow x \equiv c [mn]$$

Méthode 3.11

Pour résoudre un tel système, on cherche une solution "évidente" dans de la forme $a + km$ ou de la forme $b + k'n$ (existence assurée par le corollaire), puis :

$$\begin{cases} x \equiv a [m] \\ x \equiv b [n] \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} x \equiv c [m] \\ x \equiv c [n] \end{cases} \Leftrightarrow x \equiv c [mn]$$

Si on ne trouve pas de solution évidente (donc $b \neq a$),

$$\begin{cases} x \equiv a [m] \\ x \equiv b [n] \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} x = a + km; & \text{avec } k \in \mathbb{Z} \\ x = b + k'n; & \text{avec } k' \in \mathbb{Z} \\ b - a = km - k'n \end{cases}$$

on part d'une relation de Bézout : $um + vn = 1$ que l'on multiplie par $(b - a)$ pour trouver $k, k' \in \mathbb{Z}$ qui conviennent.

Le théorème chinois se généralise à plus de deux facteurs :

Théorème 3.12

Soit $(n_i)_{i \in [1; N]}$ avec $N \geq 2$, tels que le PGCD de $(n_i)_{i \in [1; N]}$ est 1. On pose

$$n = \prod_{i=1}^N n_i. \text{ Alors } \mathbb{Z}/n\mathbb{Z} \text{ et } \prod_{i=1}^N (\mathbb{Z}/n_i\mathbb{Z}) \text{ sont isomorphes.}$$

Exemple 3.13 : (Qin Jiushao 1247)

Le général Han Xin a entre 900 et 1000 soldats. Si on les range par 3, il en reste 2 ; si on les range par 5, il en reste 3 et si on les range par 7, il en reste 2. Combien sont-ils ?

III. D Fonction indicatrice d'Euler

Définition 3.14

On appelle **indicatrice d'Euler** de l'entier $n \in \mathbb{N}^*$ le nombre $\varphi(n)$ d'entier de $\llbracket 0; n-1 \rrbracket$ premiers avec n .

Remarques 3.15 : • $\varphi : \mathbb{N}^* \rightarrow \mathbb{N}^*$ et $\forall n \in \mathbb{N}^* :$

$$\varphi(n) = \text{Card} \{k \in \llbracket 0; n-1 \rrbracket \mid k \wedge n = 1\}$$

- si $n \geq 2$, $\varphi(n)$ est donc le nombre d'éléments inversibles de l'anneau $(\mathbb{Z}/n\mathbb{Z}, +, \times)$;
- $\varphi(n)$ est le nombre d'éléments générateurs du groupe $(\mathbb{Z}/n\mathbb{Z}, +)$.

Exemples 3.16 : $\varphi(2) = \dots$, $\varphi(7) = \dots$, $\varphi(12) = \dots$.

Remarque 3.17 : Si p est premier, alors $\varphi(p) = \dots$.

Proposition 3.18

Soit $m, n \in \mathbb{N}^*$, si $m \wedge n = 1$, alors $\varphi(m \times n) = \varphi(m) \times \varphi(n)$.

Proposition 3.19

Si p est premier et $\alpha \in \mathbb{N}^*$, alors $\varphi(p^\alpha) = p^\alpha - p^{\alpha-1}$.

Théorème 3.20

Soit $n \geq 2$, si la décomposition en facteurs premiers de n est $n = \prod_{i=1}^r p_i^{\alpha_i}$, alors :

$$\varphi(n) = n \times \prod_{i=1}^r \left(1 - \frac{1}{p_i}\right).$$

Théorème 3.21 (Euler)

Soit $n \in \mathbb{N}^*$ et $a \in \mathbb{Z}$ tels que $a \wedge n = 1$:

$$a^{\varphi(n)} \equiv 1 [n].$$

Théorème 3.22 (Petit théorème de Fermat)

Si p un un nombre premier alors pour tout entier a :

$$a^p \equiv a [p].$$

Exemple 3.23 : Cryptage RSA

IV Anneaux $\mathbb{K}[X]$

Dans cette partie \mathbb{K} est un sous-corps de \mathbb{C} .

IV. A Rappels

Théorème 4.1

L'anneau $(\mathbb{K}[X], +, \times)$ est intègre et muni d'une division euclidienne : $\forall A, B \in \mathbb{K}[X]$ avec $B \neq 0$, $\exists!(Q, R) \in \mathbb{K}[X]^2$ tel que :

$$A = BQ + R \text{ et } \deg R < \deg B.$$

Remarque 4.2 : Les éléments inversibles de l'anneau $(\mathbb{K}[X], +, \times)$ sont _____

IV. B Idéaux de $\mathbb{K}[X]$

Théorème 4.3

Tout idéal I de $\mathbb{K}[X]$ est de la forme $P_0\mathbb{K}[X]$ avec $P_0 \in \mathbb{K}[X]$.

De plus si l'idéal n'est pas $\{0\}$, alors il existe un unique polynôme unitaire P_0 tel que $I = P_0\mathbb{K}[X]$.

Définition/Proposition 4.4

- Soit P et Q des polynômes de $\mathbb{K}[X]$ dont au moins un est non nul. Il existe un unique polynôme unitaire $D \in \mathbb{K}[X]$ tel que :

$$D\mathbb{K}[X] = P\mathbb{K}[X] + Q\mathbb{K}[X].$$

Ce polynôme D est appelé le **PGCD** de P et Q , on le note $P \wedge Q$.

- Soit $(P_i)_{i \in \llbracket 1; n \rrbracket}$ une famille de $n \geq 2$ polynômes de $\mathbb{K}[X]$ dont au moins un est non nul. Il existe un unique polynôme unitaire $D \in \mathbb{K}[X]$ tel que :

$$D\mathbb{K}[X] = \sum_{i=1}^n (P_i\mathbb{K}[X]).$$

Ce polynôme D est appelé le **PGCD** des $(P_i)_{i \in \llbracket 1; n \rrbracket}$.

Remarques 4.5 : • Si : $\forall i \in \llbracket 1; n \rrbracket, B \mid P_i$, alors B divise le PGCD des $(P_i)_{i \in \llbracket 1; n \rrbracket}$.

- Si $B \mid D$ et $D \neq 0$, alors $\deg B \leq \deg D$.

Ainsi on retrouve que pour une famille de polynômes non tous nuls, le PGCD est le polynôme unitaire diviseur commun des $(P_i)_{i \in \llbracket 1; n \rrbracket}$ de degré maximal (plus grand pour le degré).

Théorème 4.6 (Bézout)

Soit $(P_i)_{i \in [1;n]}$ une famille de $n \geq 2$ polynômes de $\mathbb{K}[X]$.

- Si D est le PGCD de $(P_i)_{i \in [1;n]}$, alors il existe $(U_i)_{i \in [1;n]} \in (\mathbb{K}[X])^n$ tel que :

$$D = \sum_{i=1}^n P_i U_i.$$

- Les $(P_i)_{i \in [1;n]}$ sont premiers entre eux (de PGCD égal à 1) si et seulement si il existe des polynômes $(U_i)_{i \in [1;n]}$ tels que : $\sum_{i=1}^n (P_i U_i) = 1$.

Méthode 4.7

On obtient une relation de Bézout en appliquant l'algorithme d'Euclide.

Exemple 4.8 : Montrer que les polynômes $A = X^3 + 1$ et $B = X^2 + 1$ sont premiers entre eux et déterminer un couple $(U_0, V_0) \in \mathbb{K}[X]$ tel que $AU + BV = 1$.

Théorème 4.9 (Gauss)

Soit $A, B, C \in \mathbb{K}[X]$:

$$(A \mid BC \text{ et } A \wedge B = 1) \Rightarrow A \mid C.$$

Corollaire 4.10

Soit $A, B, C \in \mathbb{K}[X]$:

$$(A \mid C, B \mid C \text{ et } A \wedge B = 1) \Rightarrow AB \mid C.$$

Exemple 4.11 : Déterminer les couples $(U, V) \in \mathbb{K}[X]$ tels que $AU + BV = 1$.

IV. C Irréductibles de $\mathbb{K}[X]$

Définition 4.12

Un polynôme de $\mathbb{K}[X]$ est dit **irréductible** lorsqu'il est non constant et qu'il n'a pas d'autre diviseur que les polynômes constants et les polynômes qui lui sont associés.

Remarques 4.13 : • Les polynômes associés à $P \in \mathbb{K}[X]$ sont les λP avec $\lambda \in \mathbb{K}^*$.

- Un polynôme unitaire P est irréductible si et seulement si il est non constants et les seuls polynômes unitaires qui divisent P sont 1 et P .

Exemples 4.14 : • $X^2 + 1$ est irréductible dans _____ mais pas dans _____ ;

- $X^2 - 2$ est irréductible dans _____ mais pas dans _____.

Proposition 4.15

Tout polynôme non constant de $\mathbb{K}[X]$ a (au moins) un diviseur irréductible.

Théorème 4.16

Tout polynôme non constant de $\mathbb{K}[X]$ se décompose comme produit de son coefficient dominant et de polynômes irréductibles unitaires. Cette décomposition est unique à l'ordre des facteurs près.

IV. D irréductibles de $\mathbb{C}[X]$ et $\mathbb{R}[X]$

Théorème 4.17 (d'Alembert-Gauss)

Tout polynôme non constant de $\mathbb{C}[X]$ a au moins une racine dans \mathbb{C} .

Théorème 4.18

Les polynômes irréductibles de $\mathbb{C}[X]$ sont les polynômes de degré 1.

Théorème 4.19

Les polynômes irréductibles de $\mathbb{R}[X]$ sont :

- les polynômes de degré 1 ;
- les polynômes de degré 2 de discriminant strictement négatif.

Remarque 4.20 : Pour tout $n \geq 2$, $X^n - 2$ est irréductibles.

Il existe donc des polynômes irréductibles dans $\mathbb{Q}[X]$ de tout degré $n \geq 1$.

V Algèbre

V. A Structure d'algèbre

Définition 5.1

On appelle **\mathbb{K} -algèbre** ou algèbre sur le corps \mathbb{K} un quadruplé $(\mathcal{A}, +, \times, \cdot)$ tel que :

- $(\mathcal{A}, +, \times)$ est un anneau ;
- $(\mathcal{A}, +, \cdot)$ est un \mathbb{K} -espace vectoriel ;
- $\forall x, y \in \mathcal{A}, \forall \lambda \in \mathbb{K} : \lambda \cdot (x \times y) = (\lambda \cdot x) \times y = x \times (\lambda \cdot y)$.

L'algèbre est dite commutative (respectivement intègre) si l'anneau est commutatif (resp. intègre).

Exemples 5.2 : • Si \mathbb{K} est un corps, alors \mathbb{K} est une algèbre ($\dim_{\mathbb{K}}(\mathbb{K}) = 1$) ;

- \mathbb{C} est une \mathbb{R} -algèbre de dimension 2.
- $(\mathbb{K}[X], +, \times, \cdot)$, $(\mathcal{L}(E), +, \circ, \cdot)$, $(\mathcal{M}_n(\mathbb{K}), +, \times, \cdot)$ et $(\mathcal{F}(X, \mathbb{K}), +, \times, \cdot)$ sont des \mathbb{K} -algèbres.

V. B Sous-algèbres

Définition 5.3

Soit \mathcal{A} une algèbre, on dit que \mathcal{B} est une sous-algèbre de \mathcal{A} lorsque \mathcal{B} est un sous-espace vectoriel et un sous-anneau de \mathcal{A} .

Proposition 5.4

Soit \mathcal{A} une \mathbb{K} -algèbre, \mathcal{B} est une sous-algèbre de \mathcal{A} si et seulement si :

- $\mathcal{B} \subset \mathcal{A}$;
- $1_{\mathcal{A}} \in \mathcal{B}$;
- $\forall \lambda, \mu \in \mathbb{K}, \forall x, y \in \mathcal{B}, \lambda x + \mu y \in \mathcal{B}$;
- $\forall x, y \in \mathcal{B}, x \times y \in \mathcal{B}$.

Exemples 5.5 : • L'ensemble des matrices diagonales d'ordre n est une sous-algèbre de $\mathcal{M}_n(\mathbb{K})$;

- L'ensemble des fonctions continues sur un intervalle I à valeurs dans \mathbb{K} : $\mathcal{C}(I, \mathbb{K})$ est une sous-algèbre de $\mathcal{F}(I, \mathbb{K})$.

V. C Morphismes d'algèbres

Définition 5.6

Soit \mathcal{A} et \mathcal{B} deux \mathbb{K} -algèbres, on dit que f est un **morphisme d'algèbres** de \mathcal{A} dans \mathcal{B} lorsque f est un morphisme d'anneau de \mathcal{A} dans \mathcal{B} et une application linéaire de \mathcal{A} dans \mathcal{B} (morphisme d'espace vectoriel).

Exemples 5.7 : • L'application $f \mapsto f(0)$ est un morphisme d'algèbre de $\mathcal{F}(\mathbb{R}, \mathbb{R})$ dans \mathbb{R} ;

- L'application $\varphi \mapsto \text{Mat}_{\mathcal{B}_E}(\varphi)$ est un morphisme d'algèbre de $\mathcal{L}(E)$ dans $\mathcal{M}_n(\mathbb{K})$ où E est un \mathbb{K} -espace vectoriel de dimension n muni d'une base \mathcal{B}_E .