Chapitre 16

Anneaux et corps

Résumé -

Après les groupes, deux nouvelles structures jouent un rôle important en mathématiques : les anneaux et les corps. Ils possèdent chacun deux lois internes et quelques régularités.
L'exemple type d'anneau est l'ensemble $\mathbb{Z}$. Nous baserons notre étude des anneaux sur ce que l'on a pu faire en arithmétique. En retour, nous verrons que le second exemple de l'année $\mathbb{K}[X]$ (anneau intégre des polynômes) possède beaucoup de points commun (notion de PGCD, primamlité...).
Les corps sont des anneaux où tous les éléments sont inversibles pour la seconde loi. C'est un ensemble fréquent : $\mathbb{Q}$, $\mathbb{R}$ ou $\mathbb{C}$, et il sera important pour l'étude des espaces vectoriels...

Sommaire

1. Problèmes 322
2. Structures d'anneau 322
2.1. Définitions et propriétés premières 322
2.2. Construction d'anneaux 325
2.3. Idéaux 327
2.4. Anneau euclidien. Anneau principal 329
3. Structures de corps 330
3.1. Corps 330
3.2. Idéaux maximaux 331
3.3. Sous-corps. Morphisme (de corps) 332
4. Bilan 332

1. Problèmes

? Problème 75 - Structures fondamentales associées à $\mathbb{Z}$

Les deux chapitres précédents nous ont prouvé qu'il est possible de faire beaucoup de chose avec une structure aussi limitée que $\mathbb{Z}$.
Pouvons-nous généraliser? Quelles sont les propriétés fondamentales vérifiées par $\mathbb{Z}$?
Rappelons que $\mathbb{Z}$ est créé par addition $+1$. Mais que très vite, c'est la multiplication qui nous intéresse et en particulier la décomposition (unique) en facteurs premiers.

? Problème 76 - Théorème de Bézout et le lemme de Gauss dans un anneau

Notons (a) et (b), l'ensemble des multiples de a et b respectivement.
Nous avons vu que le théorème de Bézout était d'une importance capitale. Il exprime que $\mathbb{Z} = (a) + (b)$ lorsque $a \wedge b = 1$.
Plus généralement, comment s'exprime-t-il pour des anneaux? Et le lemme de Gauss?

? Problème 77 - Quotienter un anneau

Considérons A, un anneau et munissons le d'une relation d'équivalence $\mathscr{R}$.
A quelle condition suffisante (nécessaire) sur $\mathscr{R}$, peut-on transformer l'ensemble des classes d'équivalence $\frac{A}{\mathscr{R}}$ (avec les lois induites) en anneau voire en corps?

2. Structures d'anneau

2.1. Définitions et propriétés premières

Définition d'un anneau

Définition - Anneaux
Soit A un ensemble muni de deux lois de composition internes notées $+$ et $\star$. On dit que $(A,+,\star)$ est un anneau si :
- $(A,+)$ est un groupe commutatif, son neutre est noté 0;
- la loi $\star$ est associative;
- la loi $\star$ est distributive par rapport à la loi $+$:

$$\forall (x,y,z) \in A^3,\ x \star (y+z) = x \star y + x \star z \quad \text{(distibutive à gauche)}$$

$$\forall (x,y,z) \in A^3,\ (x+y) \star z = x \star z + y \star z \quad \text{(distibutive à droite)}$$

- A possède un élément neutre pour $\star$, noté 1.

Si de plus la loi $\star$ est commutative, on dit que $(A,+,\star)$ est un anneau commutatif.

Exemple - Anneaux classiques

Remarque - Dans le « Gourdon »
Gourdon adopte une autre convention.
Pour lui les anneaux n'ont pas nécessairement de neutre pour la seconde loi $\star$. Ceux qui ont un neutre sont alors qualifié d'anneau unitaire.
L'intérêt est que selon cette convention, les idéaux sont des sous-anneaux.

Règles de calcul immédiates

Proposition - Lien $+$ et $\star$
On a les relations suivantes :
- $\forall x \in A,\ x \star 0 = 0 \star x = 0$ (on dit que 0 est absorbant).
- $\forall (x,y) \in A^2,\ (-x) \star y = x \star (-y) = -(x \star y)$
- $\forall (x,y) \in A^2,\ (-x) \star (-y) = x \star y$

Démonstration

Intégrité

Définition - Diviseur de 0 et anneau intègre
Soit $(A,+,\star)$ un anneau.
- $a \in A \setminus \{0\}$ est un diviseur de 0 si il existe $b \in A \setminus \{0\}$ tel que $a \star b = 0$ ou $b \star a = 0$.
- A est dit intègre s'il est commutatif et sans diviseurs de 0.

Pour aller plus loin - Commutativité
Il arrive que certains mathématiciens n'exigent pas la commutativité comme condition à l'intégrité (ex : cours d'Algèbre de Roger Godement), mais c'est une exception à la tradition largement adoptée.

Proposition - Simplification (division)
Si A est un anneau intègre, tout élément non nul a de A est régulier pour $\star$, c'est-à-dire que l'on peut simplifier par a :

$$a \star b = a \star c \Rightarrow b = c.$$

Démonstration

Exemple - $\mathbb{Z}$ et $\mathcal{M}_n(\mathbb{K})$

Savoir faire - Exploiter l'intégrité

On exploite l'intégrité dans son sens contraposée :

$$a \neq 0 \text{ et } b \neq 0 \Longrightarrow ab \neq 0.$$

En particulier, si on sait qu'un ensemble est un corps (comme $\frac{\mathbb{Z}}{p\mathbb{Z}}$), alors il est intègre.

Règles fréquentes

Proposition - Quelques règles de calcul

Les règles de calculs fréquentes :

— $(a_i)_{1\leqslant i\leqslant n}$ et $(b_j)_{1\leqslant j\leqslant p}$ deux familles d'éléments de A. Alors on peut écrire :

$$\left(\sum_{i=1}^{n} a_i\right)\left(\sum_{j=1}^{p} b_j\right) = \sum_{(i,j)\in[\![1,n]\!]\times[\![1,p]\!]} a_i b_j$$

— formule du binôme : si a et b **commutent pour** $\star$ alors

$$(a+b)^n = \sum_{k=0}^{n} \binom{n}{k} a^k b^{n-k}$$

— factorisation : si a et b **commutent pour** $\star$ alors

$$a^n - b^n = (a-b)\sum_{k=0}^{n-1} a^{n-k-1} b^k$$

en notant $xy = x \star y$ et les puissances étant au sens de la loi $\star$.

Remarque - Démonstration ?

Il s'agit exactement des mêmes démonstrations que celles vues pour les nombres réels en début d'année.

En effet, les seules hypothèses qui ont été mobilisées étaient celles de commutativité des nombres (objets).

Un groupe pour $\star$: le groupe des inversibles

Proposition - Groupe des inversibles

L'ensemble des éléments inversibles de $(A, \star)$ est un groupe pour la loi $\star$.
Classiquement, ce groupe est noté $A^\times$.

Démonstration

Exemple - $\mathbb{Z}^*$

Exemple - $(\mathcal{M}_n(\mathbb{K}))^*$

2.2. Construction d'anneaux

Sous-anneaux

Définition - Sous-anneau
Soit $(A,+,\star)$ un anneau. $B \subset A$ est un sous-anneau de A si B est stable pour les lois internes $+$ et $\star$ et si ces lois induites munissent B d'une structure d'anneau, donc, avec $1 \in B$.

$(B,+)$ est nécessairement un groupe, stable également pour $\star$: la réciproque est suffisante :

Savoir faire - Caractérisation des sous-anneaux
Soit B une partie de A. B est un sous-anneau de A si et seulement si il vérifie :
- $1 \in B$
- $\forall (x,y) \in B^2,\ x-y \in B$
- $\forall (x,y) \in B^2,\ x \star y \in B$

Démontrons que ce savoir-faire est juste.

Démonstration

Pour aller plus loin - Anneau engendré
Pour $\alpha \in \mathbb{R}$, on appelle anneau engendré par α, le sous-anneau de $\mathbb{R}$, ensemble des combinaisons linéaires des puissances de α. Ce sont les $P(\alpha)$, pour $P \in \mathbb{Z}[X]$. On le note classiquement $\mathbb{Z}[\alpha]$.
Si α est algébrique d'ordre m, on a même $\mathbb{Z}[\alpha] = \mathbb{Z}_{m-1}[\alpha]$.

Exercice
Montrer que l'intersection de deux sous-anneaux de A est un sous-anneau de A.
(On pourrait étendre à une intersection d'une famille de sous-anneaux

Exemple - $2\cdot\mathbb{Z}$ est-il un sous-anneau de $(\mathbb{Z},+,\times)$

Pour aller plus loin - Idéal
On dit que I $(\subset A)$ est un idéal de A, si $(I,+) < (A,+)$ et $\forall\ x \in I, y \in A,\ x \star y \in I$ et $y \star x \in I$ (propriété d'absorbance. Voir plus loin…

Morphisme (et image) d'anneaux

Définition - Morphisme d'anneaux
Soient $(A, +_A, \star_A)$ et $(A', +_{A'}, \star_{A'})$ deux anneaux. Un morphisme d'anneaux de A dans A' est une application f de A dans A' vérifiant :
- $\forall (x,y) \in A^2$, $f(x +_A y) = f(x) +_{A'} f(y)$
- $\forall (x,y) \in A^2$, $f(x \star_A y) = f(x) \star_{A'} f(y)$
- $f(1_A) = 1_{A'}$

Exemple - Projection canonique

Exemple - Sur $\mathbb{C}$

Exemple - Morphisme de Fröbenius

Proposition - Transfert par morphisme d'anneaux
Soit $f : A \to A'$ un morphisme d'anneaux. Alors
- $f(0_A) = 0_{A'}$
- $\forall\, x \in A$, $f(-x) = -f(x)$ et $\forall\, x \in A^*$, $f(x)$ est inversible avec $f(x^{-1}) = f(x)^{-1}$.

Démonstration

Corollaire - Morphisme du groupe $(A^x, \star)$
Soit $f : A \to A'$ un morphisme d'anneaux. Alors $f^\times : A^\times \to A'^\times$, $x \mapsto f(x)$ est un morphisme de groupes.

Démonstration

Application - Lemme chinois

Exercice
A démonter

Proposition - Image directe et image réciproque
Soit $f : A \to A'$, un morphisme d'anneau.
Si B est un sous-anneau de A, alors $f(B)$ est un sous-anneau de A'.
Si B' est un sous-anneau de A', alors $f^{-1}(B')$ est un sous-anneau de A.

En particulier Im f est un sous-anneau de A' et Ker f est un sous-anneau de A.

Démonstration

2.3. Idéaux

Dans la suite les anneaux sont considérés commutatifs.

Extension de la congruence

on étend à tous les anneaux, la notion de congruence vu dans $\mathbb{Z}$.

Définition - Multiple dans un anneau
Soit a un élément d'un anneau A. On appelle multiple de a, les éléments de l'ensemble $(a) = \{a \times d, d \in A\}$, (parfois noté aA).
On dit que a divise b (noté $a|b$ si b est un multiple de a.

Pour aller plus loin - Cas A non commutatif
Si A n'est pas commutatif, il faut étudier les multiples à droite et les multiples à gauche...

Définition - Congruence dans un anneau
Soit m un éléments d'un anneau A. Soient a, b deux éléments de A.
On dit que a est congru à b modulo m, noté $a \equiv b[m]$ ssi $b - a \in (m)$ (ou $m|b-a$).

Remarque - Notation multiple
On peut écrire au choix : $m|n$ ou $n \in (m)$ ou encore $(n) \subset (m)$.

Proposition - Relation d'équivalence
Dans un anneau, la relation de congruence modulo m est une relation d'équivalence

Exercice
Faire la démonstration

Compatibilité

Théorème - Compatibilité
Si A est un anneau (commutatif) et $m \in A$.
Alors l'addition et la multiplication sont compatibles pour la relation d'équivalence $\equiv [m]$.
Autrement écrit, l'addition et la multiplication sont indépendants du choix du représentant de la classe d'équivalence ; on peut donc définir une addition et une multiplication sur les classes d'équivalence :

$$\overline{x}+\overline{x'} = \overline{x+x'} \qquad \overline{x}\times\overline{x'} = \overline{x\times x'}$$

Démonstration

Idéaux

Analyse - Ce qui a marché

Pour aller plus loin - Cas A non commutatif
Si A n'est pas commutatif, il faut étudier les idéaux à droite ($ba \in I$ si $a \in I$) et les idéaux à gauche ($ab \in I$ si $a \in I$)...

Définition - Idéal de A
Soit A un anneau.
On appelle idéal de A, toute partie I de A tel que :
- $0 \in I$
- $(I,+)$ est un sous-groupe de $(A,+)$ (noté $I < A$)
- $\forall\, a \in I, \forall\, b \in A, ab \in I$

On se souvient que l'on a déjà rencontré $2\cdot\mathbb{Z}$ qui est un idéal mais pas un sous-anneau de $\mathbb{Z}$. Exercice
Quels sont les idéaux de $\mathbb{Z}$?

Remarque - Idéal engendré
Comme pour les sous-groupes engendrés (et plus tard les sous-espaces vectoriels engendrés), on définit les idéaux engendrés par une partie B de l'anneau $(A,+,\times)$ comme le plus petit des idéaux contenant B.
On l'obtient comme intersection (décroissante) des tous les idéaux contenant B.
Mais c'est aussi l'ensemble obtenu en faisant agir les éléments de B le plus largement

possible...

Exercice

Montrer que si I et J sont deux idéaux de $(A,+\times)$, alors $I\cap J$ et $I+J(:=\{a+b \mid a\in I, b\in J\})$ sont des idéaux de A.

Sous-anneaux quotients

Heuristique - Quotientage d'un anneau par un idéal

Parmi les sous-groupes, les sous-groupes distingués permettaient de prolonger la loi interne (par compatibilité) à la structure quotiente qui devenait ainsi un groupe (quotient).

Formellement : si $(H,+)\lhd(G,+)$, alors $\left(\frac{G}{H},\overline{+}\right)$ est un groupe.

Il en est de même pour le quotient d'un anneau par un idéal

Proposition - Anneau quotient

Soit $(A,+,\star)$ un anneau (commutatif) et I un idéal.

Alors $\left(\frac{A}{I},\overline{+},\overline{\star}\right)$ est un anneau (quotient).

Rappelons que $\frac{A}{I}$ désigne l'ensemble des classes d'équivalence de A pour la relation $a\equiv b \iff a-b\in I$.

Démonstration

Exercice

Montrer que si f est un morphisme d'anneaux A sur B.

Alors $\operatorname{Ker} f=\{x\in A \mid f(x)=0_B\}$ est un idéal de A.

Puis en déduire que $\frac{A}{\operatorname{Ker} f}$ est un anneau

Nous avons enfin une définition propre d'un ensemble dont on a beaucoup parlé.

Puis, comme $a\mathbb{Z}$ est un idéal :

Corollaire - Anneau quotient de $\mathbb{Z}$

Soit $a\in\mathbb{Z}$, l'ensemble $\left(\frac{\mathbb{Z}}{a\mathbb{Z}},\overline{+},\overline{\times}\right)$ des classes d'équivalence de $\mathbb{Z}$ est un anneau

2.4. Anneau euclidien. Anneau principal

Proposition - Anneau principal

Soit A un anneau.

On dit qu'un idéal I de A est principal si il existe $a\in I$ tel que $I=(a)(=aA)$.

On dit qu'un anneau est principal s'il est intègre et que tous ses idéaux sont principaux.

Pour aller plus loin - Anneau non principal

L'anneau des polynômes à coefficients entiers $\mathbb{Z}[X]$ n'est pas prinicipal.

En effet, l'idéal engendré dans $\mathbb{Z}[X]$ par $<2,X>$ n'est pas principal.

Exemple - $\mathbb{Z}$ est principal

Savoir faire - Montrer qu'un anneau est principal
Une méthode qui ne marche pas toujours est de montrer qu'un tel anneau est d'abord euclidien.

Définition - Anneau euclidien
Soit A un anneau intègre. On dit que A est euclidien s'il existe une application $\varphi : A \setminus \{0\} \to \mathbb{N}$ (appelé **stathme** euclidien) telle que :

$\forall\ (a,b) \in A \times A \setminus \{0\}, \exists\ (q,r) \in A^2$ tel que $a = bq + r$ avec $r = 0$ ou $\varphi(r) < \varphi(b)$

Notons que l'unicité n'est pas demandé.

Proposition - Anneau euclidien ⇒ Anneau principal
Si A est euclidien, alors A est principal

Démonstration

Exemple - Nombreux

Exercice
On note $\mathbb{Z}[i] = \{a + ib; a, b \in \mathbb{Z}\}$, l'ensemble des entiers de Gauss.

1. Trouver une division euclidienne sur $\mathbb{Z}[i]$
   On prendra, le carré de la fonction module comme stathme
2. En déduire que $\mathbb{Z}[i]$ est principal

3. Structures de corps

3.1. Corps

Définition - Corps
Un corps est un anneau commutatif $(\mathbb{K},+,\times)$ dans lequel tous les éléments autres que 0 sont inversibles pour $\times$.
Ainsi $(\mathbb{K},+,\times)$ est un corps si :
- $(\mathbb{K},+)$ est un groupe commutatif;
- $(\mathbb{K}^*,\times)$ est un groupe commutatif, où 0 désigne l'élément neutre de $\mathbb{K}$ pour + et $\mathbb{K}^* = \mathbb{K}\setminus\{0\}$.
- la loi $\times$ est distributive par rapport à la loi +;

Remarque - Autres conventions
Là encore, il existe d'autres conventions; en particulier sans exigence de commutativité.

Exemple - Nombreux

Proposition - Tout élément est régulier
Un corps n'a pas de diviseurs de 0. Tout élément autre que 0 est donc régulier (on peut simplifier).

Démonstration

3.2. Idéaux maximaux

Analyse - A quel condition un anneau quotient est-il un corps?

Définition - Idéal maximal
Soit I un idéal de A.
On dit que I est maximal s'il $I \neq A$ et A est le seul idéal distinct de I, contenant I

Proposition - Corps
Soit I un idéal maximal de A. Alors $\left(\frac{A}{I},\overline{+},\overline{\times}\right)$ est un corps.

Pour aller plus loin - Idéal engendré
Si I_1 et I_2 sont deux idéaux, alors $I_1+I_2=\{a_1+a_2; a_1\in I_1, a_2\in I_2\}$ est un idéal; c'est le plus petit des idéaux qui contient à la fois I_1 et I_2.

Remarque - Réciproque
Comme le montre l'analyse la réciproque est vrai.

Exemple - $6\mathbb{Z}$ n'est pas maximal

Pour aller plus loin - Idéal premier
On dit que I est premier ssi $x\notin I$ et $y\notin I \Rightarrow xy\notin I$.
On a, par exemple, $n\mathbb{Z}$ est premier ssi n est premier.
Et plus généralement, $\frac{A}{I}$ est un anneau intègre ssi I idéal premier.

Démonstration

Exemple - $\frac{\mathbb{Z}}{p\mathbb{Z}}$ avec p premier

3.3. Sous-corps. Morphisme (de corps)

Définition - Sous-corps, morphisme
On peut généraliser les définitions précédentes.
- Un sous-corps est un sous-anneau muni d'une structure de corps.
- Un morphisme de corps est un morphisme d'anneaux.
- L'image d'un corps par un morphisme de corps est un corps.

Le dernier point est un exercice à démontrer.

4. Bilan

Synthèse

- ⇝ Les anneaux sont les structures naturelles pour deux lois internes (addition, et multiplication, ou composition). Nous avons de nombreux exemples : $\mathbb{Z}$, $\mathbb{K}[X]$, $\mathcal{M}_n(\mathbb{K})\dots$
  Avec l'inversibilité de tous les éléments non nuls, la structure est encore plus riche, elle s'appelle un corps. Les exemples classiques sont $\mathbb{R}$, $\mathbb{Q}$, $\mathbb{C}$, voire $\frac{\mathbb{Z}}{p\mathbb{Z}}$ (p premier)
- ⇝ Mais pour ce dernier exemple, il faut commencer par s'assurer de la bonne définition des lois $\overline{+}$ et $\overline{\times}$, lorsqu'on passe de $\mathbb{Z}$ à $\frac{\mathbb{Z}}{n\mathbb{Z}}$.
  Nous avons vu qu'il fallait que l'ensemble $n\mathbb{Z}$, soit un d'abord un idéal pour que le calcul ait un sens.
  Mieux pour que $\frac{\mathbb{Z}}{n\mathbb{Z}}$ soit un corps, (il faut et)il suffit que $n\mathbb{Z}$ soit un idéal maximal (équivalent à idéal premier, dans ce contexte)
- ⇝ Les structures d'anneaux ou de corps, se transfère par morphisme (d'anneaux) ou par restriction.

Savoir-faire et Truc & Astuce du chapitre

- Savoir-faire - Caractérisation des sous-anneaux
- Savoir-faire - Montrer qu'un anneau est principal

Notations

	Propriétés	*Remarques*
	$(A,+)$ groupe ; $\star$ l.c.i. associative et unifère ; distributivité	Exemples courants : $\mathbb{Z}$, $\mathbb{K}[X]$, $\mathcal{M}_n(\mathbb{K})$, $\frac{\mathbb{Z}}{n\mathbb{Z}}$
	$(I,+) < (A,+)$ & $\forall\ a \in A, x \in I,\ ax \in I$	
	$(\mathbb{K},+,\star)$ anneau, tout élément non nul inversible	Exemples courants : $\mathbb{Q}$, $\mathbb{R}$, $\mathbb{C}$, $F_p = \frac{\mathbb{Z}}{p\mathbb{Z}}$

Retour sur les problèmes

75. Cours
76. Bézout : $(a)+(b)=A$ et lemme de Gauss : $bc \in (a)$ et $(b)+(a)=A$ (a et b étrangers) alors $c \in (a)$.
77. Cours