

Structures algébriques : groupes, anneaux et corps

Table des matières

1	Groupes	2
1.1	Lois de composition interne	2
1.2	Groupes	3
1.3	Sous-groupes	3
1.4	Morphismes de groupes	4
2	Anneaux	5
2.1	Structure d'anneau	5
2.2	Sous-anneaux	6
2.3	Morphismes d'anneaux	6
2.4	Divisibilité	7
2.5	Calculs dans les anneaux	7
3	Corps	8
3.1	Structure de corps	8
3.2	Exemples	9
3.3	Pour la suite	9

1 Groupes

1.1 Lois de composition interne

DEFINITION 1

Soit E un ensemble. Une *loi de composition interne* (LCI) sur E est une application T de $E \times E$ dans E , notée généralement de façon infix : on écrit xTy plutôt que $T(x, y)$, lorsque $(x, y) \in E \times E$.

EXEMPLES 1

- La somme sur $\mathbb{N}, \mathbb{N}^*, \mathbb{Z}, \mathbb{Q}, \mathbb{R}, \mathbb{C}$ (mais pas sur $\mathbb{Z}^*, \mathbb{Q}^*, \mathbb{R}^*, \mathbb{C}^*$).
- Le produit sur $\mathbb{N}, \mathbb{N}^*, \mathbb{Z}, \mathbb{Q}, \mathbb{R}, \mathbb{C} \dots$
- La différence sur \mathbb{R} ou \mathbb{Z} (mais pas sur \mathbb{N}).
- La composition des applications sur F^F (applications de F dans F).
- La loi \oplus définie sur \mathbb{R}^2 par $(x_1, y_1) \oplus (x_2, y_2) = (x_1 + x_2, y_1 + y_2)$.
- La loi \otimes définie sur \mathbb{R}^2 par $(x_1, y_1) \otimes (x_2, y_2) = (x_1x_2 - y_1y_2, x_1y_2 + x_2y_1)$ (vous la reconnaissez ?)
- Les lois \cup, \cap et Δ (réunion, intersection et différence symétrique) définies sur $\mathcal{P}(F)$.

DEFINITION 2

- Une LCI T sur E sera dite *associative* lorsque :

$$\forall x, y, z \in E^3, \quad (xTy)Tz = xT(yTz).$$

- Une LCI T sur E sera dite *commutative* lorsque :

$$\forall x, y \in E^2, \quad xTy = yTx.$$

- Si T est une LCI associative sur E , $e \in E$ est un *neutre* pour T lorsque :

$$\forall x \in E, \quad xTe = eTx = x.$$

PROPOSITION 1 Si T est une LCI associative sur E qui admet un neutre, alors ce neutre est unique. On peut alors parler DU neutre de T .

PREUVE : On suppose e_1 et e_2 neutres pour T , et on considère $e_1Te_2 \dots$ ■

EXEMPLES 2

- La somme et le produit sur \mathbb{C} (**donc sur ses sous-ensembles**) est associative et commutative, et admettent pour neutres respectifs 0 et 1.
- La différence n'est ni associative ni commutative sur \mathbb{R} .
- La loi \circ (composition des fonctions de F dans F) est associative, mais n'est pas commutative (sauf si F est un singleton, auquel cas...). Elle admet un neutre, qui est l'application Id_F .
- Les lois \cup, \cap et Δ sur $\mathcal{P}(F)$ sont associatives et commutatives. Elles admettent pour neutres respectifs \emptyset, F , et \emptyset .
- \oplus et \otimes sont associatives et commutatives sur \mathbb{R}^2 .
- Vue comme LCI sur \mathbb{N}^* , $+$ n'admet pas d'élément neutre.

EXERCICE 1 Montrer que les lois \oplus et \otimes sur \mathbb{R}^2 (cf exemples 1) admettent chacune un neutre.

DEFINITION 3

Si T est une LCI associative sur E qui admet un neutre e et $x \in E$, on dit que x admet un *symétrique* pour T s'il existe $y \in E$ tel que $xTy = yTx = e$.

PROPOSITION 2 Dans la définition précédente, si y existe, il est unique. On peut alors parler DU symétrique de x pour T . On le note généralement x^{-1} .

PREUVE : Partir de $y_1T(xTy_2) = (y_1Tx)Ty_2 \dots$ ■

REMARQUES 1

- On peut avoir $xTy = e_G$ sans avoir $yTx = e_G$. On prendra par exemple $E = \mathbb{N}$, T la loi \circ de composition des fonctions, $y : n \mapsto n + 1$ et $x : n \mapsto \text{Max}(n - 1, 0)$.
- Les lois notées $.$ sont souvent “oubliées” dans l’écriture : $x.y$ devient xy .
- Grâce à l’associativité, on s’autorise à noter $xTyTz$ la valeur commune de $(xTy)Tz$ et $xT(yTz)$.
- Lorsque la loi est additive $+$, le symétrique est noté $-x$ et est appelé “opposé”. Lorsque la loi est multiplicative $.$, le symétrique est appelé “inverse”. On n’utilisera JAMAIS la notation $\frac{1}{x}$ (sauf pour les complexes-réels-entiers), puisqu’alors la notation $\frac{y}{x}$ serait ambiguë dans le cas d’une loi multiplicative non commutative (ce qui sera la règle en algèbre linéaire) : a priori, $y \cdot \frac{1}{x}$ et $\frac{1}{x} \cdot y$ peuvent être distincts. . .

EXERCICE 2 Si x et y admettent un symétrique pour une loi $*$, montrer que $x * y$ admet également un symétrique.

1.2 Groupes

DEFINITION 4

Un *groupe* est un ensemble non vide muni d’une loi de composition interne $(G, *)$ tels que :

- $*$ est associative ;
- $*$ admet un neutre e_G ;
- tout élément de G est symétrisable (admet un symétrique) pour $*$.

Si $*$ est commutative, on dit que $(G, *)$ est commutatif, ou encore *abélien*.

EXEMPLES 3

On fournit d’abord des exemples de groupes : dans les deux premiers cas et le dernier, il s’agit de groupes abéliens. Les deux autres (comme la plupart des groupes fonctionnels) sont non commutatifs.

- $\mathbb{Z}, \mathbb{Q}, \mathbb{R}, \mathbb{C}$ munis de la somme.
- $\mathbb{Q}^*, \mathbb{R}^*, \mathbb{C}^*, \mathbb{U}, \mathbb{U}_n$ munis du produit.
- L’ensemble des homothéties et translations du plan, muni de la loi \circ .
- L’ensemble des permutations (bijections) de $\llbracket 1, n \rrbracket$ muni de la loi \circ .
- L’ensemble $\mathcal{P}(E)$ muni de la différence symétrique Δ .

EXEMPLES 4

Pour diverses raisons (à déterminer), les couples suivants ne sont pas des groupes :

- $(\mathbb{N}, +), (\mathbb{R}, .)$.
- $(\mathbb{U}, +)$.
- (E^E, \circ) .
- $(\mathcal{P}(E), \cup), (\mathcal{P}(E), \cap)$.

EXERCICE 3 Montrer que (\mathbb{R}^2, \oplus) et $(\mathbb{R}^2 \setminus \{(0, 0)\}, \otimes)$ sont des groupes commutatifs.

1.3 Sous-groupes

DEFINITION 5

Un *sous-groupe* d’un groupe $(G, *)$ est une partie *non vide* H de G telle que :

- $*$ induit sur H une loi de composition interne.
- Muni de cette loi, H est un groupe.

On note alors : $H < G$.

REMARQUES 2

- En pratique, pour montrer qu’une partie non vide H de G en constitue un sous-groupe, il suffit de vérifier :
 - $e_G \in H$;

- H est stable par $*$;
- pour tout $x \in H$, le symétrique x , a priori dans G , est en fait dans H .
- L'intérêt principal de la remarque précédente tient dans le fait que dans bien des cas, on peut montrer que $(H, *)$ est un groupe en montrant grâce au critère précédent que c'est un *sous-groupe d'un groupe connu*. Il est alors inutile de montrer l'associativité, la commutativité et même l'existence d'un neutre : il n'y a que des VERIFICATIONS à faire.

EXEMPLES 5

- Pour la loi $+$, on a la “tour de groupe” (inclusions successives de sous-groupes/groupes) suivante :

$$\{0\} < 1515\mathbb{Z} < \mathbb{Z} < \mathbb{Q} < \mathbb{R} < \mathbb{C}$$

- Pour la multiplication usuelle :

$$\{1\} < \mathbb{U}_n < \mathbb{U} < \mathbb{C}^*$$

mais aussi :

$$\{1\} < \{-1, 1\} < \mathbb{Q}^* < \mathbb{R}^* < \mathbb{C}^*$$

- Si G est un groupe, $\{e_G\}$ et G en constituent des sous-groupes (dits triviaux)

EXERCICE 4 Soient H_1 et H_2 deux sous-groupes de $(G, .)$. Montrer que $H_1 \cap H_2$ est également un sous-groupe de G .

On verra en TD que ça se passe moins bien pour la *réunion* de deux sous-groupes.

EXERCICE 5 On définit l'ensemble :

$$\mathbb{Z}[\sqrt{2}] = \{k + l\sqrt{2} \mid k, l \in \mathbb{Z}\}.$$

Montrer que $(\mathbb{Z}[\sqrt{2}], +)$ constitue un groupe ($+$ est l'addition usuelle des réels).

1.4 Morphismes de groupes

DEFINITION 6

- Soient $(G, *)$ et (H, T) deux groupes. Une application de G dans H est un “*morphisme de groupes*” lorsque :

$$\forall x, y \in G, \quad f(x * y) = f(x) T f(y).$$

- Si $G = H$ et $* = T$, on parle d'*endomorphisme*.
- Si f est bijective, on parle d'*isomorphisme*.
- Si f est un endomorphisme bijectif, on parle d'*automorphisme*.

EXEMPLES 6

- $x \mapsto 2^x$ réalise un isomorphisme de $(\mathbb{R}, +)$ sur $(\mathbb{R}_+^*, .)$;
- $x \mapsto 2x$ réalise un automorphisme de $(\mathbb{R}, +)$;
- $x \mapsto 3 \ln x$ réalise un isomorphisme de $(\mathbb{R}_+^*, .)$ sur $(\mathbb{R}, +)$;
- $z \mapsto |z|$ réalise un morphisme de $(\mathbb{C}^*, .)$ dans $(\mathbb{R}^*, .)$.
- Si G est un groupe **abélien**, $x \mapsto x^2$ et $x \mapsto x^{-1}$ réalisent des endomorphismes de G .
- $\theta \mapsto e^{i\theta}$ réalise un morphisme de $(\mathbb{R}, +)$ dans $(\mathbb{C}^*, .)$, et même sur $(\mathbb{U}, .)$.

EXERCICE 6 Si f est un morphisme de $(G, *)$ dans (H, \circ) et g un morphisme de (H, \circ) dans (K, T) , montrer que $g \circ f$ réalise un morphisme de $(G, *)$ dans (K, T) .

EXERCICE 7 Montrer que si f est un isomorphisme de $(G, *)$ sur (H, \circ) , alors son application réciproque f^{-1} réalise un isomorphisme de (H, \circ) sur $(G, *)$.

PROPOSITION 3 Quelques propriétés élémentaires des morphismes de groupes : f est ici un morphisme de $(G, *)$ dans (H, T) .

- $f(e_G) = e_H$.
- Si f est un isomorphisme, alors son application réciproque réalise un isomorphisme de (H, T) sur $(G, *)$.
- Si $G_1 < G$, alors $f(G_1) < H$.
- Si $H_1 < H$, alors $f^{-1}(H_1) < G$.

PREUVE : Élémentaire, donc à savoir faire seul! ■

DEFINITION 7

Soit f un morphisme de G dans H .

- Le noyau de f , noté $\text{Ker } f$ est l'ensemble des antécédents par f de e_H :

$$\text{Ker } f = \{x \in G; f(x) = e_H\} = f^{-1}(e_H)$$

(attention, f n'est pas supposée bijective ; il n'est donc pas question de la bijection réciproque de f).

- L'image de f , noté $\text{Im } f$ est $f(G)$ (ensemble des images par f des éléments de G).

D'après les deux derniers points de la proposition 3, le noyau et l'image de f sont des sous-groupes respectifs de G et H .

EXERCICE 8 Montrer que $(\mathbb{U}, .)$ est un groupe, en le voyant successivement comme image et noyau d'un morphisme de groupe.

Bien entendu, et c'est une trivialité, un morphisme de G dans H est surjectif si et seulement si son image est égale à H . Ce résultat est d'ailleurs sans intérêt ... Le résultat suivant est bien plus intéressant, puisqu'il réduit énormément le travail, pour montrer qu'un morphisme est injectif.

PROPOSITION 4 Soit f un morphisme de $(G, *)$ dans (H, T) . Alors f est injectif si et seulement si son noyau est réduit à $\{e_G\}$.

PREUVE : Élémentaire, donc à savoir faire seul... ■

EXERCICE 9 L'application $\varphi : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^2, (x, y) \mapsto (2x - y, 3x + 2y)$ est-elle injective ?

2 Anneaux

2.1 Structure d'anneau

DEFINITION 8

Un anneau est un ensemble muni de deux LCI $(A, +, .)$ tels que :

- $(A, +)$ est un groupe commutatif de neutre noté 0_A .
- La loi $.$ est une LCI sur A associative et distributive à gauche et à droite par rapport à $+$:

$$\forall x, y, z \in A, \quad x.(y + z) = x.y + x.z \quad \text{et} \quad (x + y).z = x.z + y.z$$

- La loi $.$ admet un neutre différent de 0_A , noté 1_A .

Si la loi $.$ est commutative, l'anneau est dit commutatif ou abélien.

EXERCICE 10 Si $x \in A$, montrer que $0_A.x = 0_A$ (considérer $0_A.x + 0_A.x$).

EXEMPLES 7

- $(\mathbb{Z}, +, .), (\mathbb{Q}, +, .), (\mathbb{R}, +, .)$ et $(\mathbb{C}, +, .)$ sont des anneaux bien connus.
- $(\mathcal{P}(E), \Delta, \cap)$ est un anneau plus anecdotique.
- $(\mathbb{R}^2, \oplus, \otimes)$ est un anneau... connu sous une autre identité!

- L'ensemble des suites réelles, muni de l'addition et du produit des suites, est un anneau. Même chose pour l'ensemble des fonctions de I dans \mathbb{R} . On déterminera précisément les neutres de ces anneaux.

REMARQUES 3

- Il est nécessaire d'imposer la distributivité à droite et à gauche. Par exemple, $(\mathbb{R}^{\mathbb{R}}, +, \circ)$ n'est pas un anneau : on a bien $(f + g) \circ h = f \circ h + g \circ h$ pour tout f, g, h , mais pas nécessairement $f \circ (g + h) = f \circ g + f \circ h$.
- Lorsqu'on travaille dans un anneau, de nombreux calculs se passent "comme dans \mathbb{R} ". Cela dit, il faut faire attention par exemple à ne pas diviser. Le meilleur moyen pour ne pas dire d'ânerie consiste en fait à "faire comme dans \mathbb{Z} ".

2.2 Sous-anneaux

DEFINITION 9

Soit $(A, +, \cdot)$ un anneau. Une partie non vide A_1 de A est un *sous-anneau* de A lorsque :

- $1_A \in A_1$;
- les lois $+$ et \cdot induisent des LCI sur A_1 , et, muni de ces lois, $(A_1, +, \cdot)$ est un anneau.

REMARQUE 4 Contrairement aux sous-groupes, on ne peut pas se passer de la condition $1_A \in A_1$, qui ne découle pas des autres conditions¹. On verra en exercice un contre-exemple.

Comme pour les sous-groupes, il est assez moyennement intéressant de montrer à nouveau les associativités et même la distributivité. Fort heureusement, on a le résultat (quasi-évident) suivant :

PROPOSITION 5 Une partie A_1 de A est un sous-anneau si et seulement si

- $(A_1, +)$ est un sous-groupe de $(A, +)$;
- $1_A \in A_1$;
- \cdot induit une LCI sur A_1 .

EXEMPLES 8

- Bien entendu, \mathbb{Z} est un sous-anneau de \mathbb{Q} qui est un sous-anneau de \mathbb{R} .
- L'ensemble des fonctions dérivables sur I constitue un sous-anneau des fonctions continues sur I , qui constitue lui-même un sous-anneau de l'ensemble des fonctions de I dans \mathbb{R} .
- L'ensemble des suites réelles stationnaires est un sous-anneau de $(\mathbb{R}^{\mathbb{N}}, +, \cdot)$, qui est un sous-anneau de $(\mathbb{C}^{\mathbb{N}}, +, \cdot)$.

EXERCICE 11 Montrer que $\mathbb{Z}[\sqrt{2}]$ est un sous-anneau de \mathbb{R} .

EXERCICE 12 Montrer que si A_1 et A_2 sont deux sous-anneaux d'un anneau A , alors $A_1 \cap A_2$ est également un sous-anneau de A .

2.3 Morphismes d'anneaux

DEFINITION 10

Soient $(A, +, \cdot)$ et $(B, +, \cdot)$ deux anneaux (on note de la même façon les lois de A et B ...). Un *morphisme d'anneaux* de A vers B est une application de A vers B telle que :

- $f(1_A) = 1_B$;
- pour tout $x, y \in A$, $f(x + y) = f(x) + f(y)$ et $f(x \cdot y) = f(x) \cdot f(y)$.

EXEMPLES 9

- $z \mapsto \bar{z}$ réalise un automorphisme d'anneaux de \mathbb{C} .
- $f \mapsto f(\pi)$ réalise un morphisme d'anneaux de $\mathbb{R}^{\mathbb{R}}$ sur² \mathbb{R} .

¹on se rappelle que dans le cas d'un sous-groupe H de G , la relation $e_G \in H$ est une conséquence de la définition

²comme pour les fonctions, on dit "de E sur F " plutôt que "de E dans F ", lorsque le morphisme est surjectif

- $u \mapsto u_{1515}$ réalise un morphisme d'anneaux surjectif (pourquoi ?) de $\mathbb{C}^{\mathbb{N}}$ sur \mathbb{C} .

REMARQUES 5

- La relation $f(1_A) = 1_B$ ne découle pas des autres relations³ ; on ne peut donc pas s'en passer dans la définition.
- A fortiori, un morphisme d'anneaux est un morphisme de groupe (pour la première loi). A ce titre, on peut parler de son image et de son noyau. Malheureusement, si l'image est un sous-anneau de l'anneau d'arrivée (le montrer), le noyau n'est pas nécessairement un sous-anneau de l'anneau de départ, ce qui limite l'intérêt des morphismes d'anneaux. Cependant, on garde l'équivalence entre l'injectivité de f et le fait que $\text{Ker } f = \{0_A\}$.

EXERCICE 13 Montrer que la composée de deux morphismes d'anneaux est un morphisme d'anneaux.

EXERCICE 14 Montrer que si f est un isomorphisme d'anneaux, alors son application réciproque également.

2.4 Divisibilité

DEFINITION 11

Soit $(A, +, \cdot)$ un anneau commutatif.

- On dit que $x \in A$ est *inversible* s'il admet un symétrique pour la loi \cdot .
- On dit que a *divise* b s'il existe $c \in A$ tel que $b = ca$. On note $a|b$.
- On dit que a est un *diviseur de 0* s'il existe $b \neq 0$ tel que $ab = 0$.
- Un anneau est dit *intègre* s'il ne contient pas de diviseur de 0 autre que 0 lui-même.

Les faits suivants sont faciles à montrer :

PROPOSITION 6 Dans un anneau commutatif $(A, +, \cdot)$:

- 0_A n'est jamais inversible.
- Si x est inversible, alors ce n'est pas un diviseur de 0.
- Si $x_1, x_2, y \in A$ intègre, avec $y \neq 0$ et $x_1y = x_2y$, alors $x_1 = x_2$. On dit qu'"on peut simplifier" (ce qui ne veut pas dire diviser) par $y \neq 0$.

EXEMPLES 10

- \mathbb{Z} est intègre, et ses éléments inversibles sont 1 et -1 .
- \mathbb{Q}, \mathbb{R} et \mathbb{C} sont des anneaux intègres dont tous les éléments non nuls sont inversibles.
- L'ensemble des fonctions de \mathbb{R} dans \mathbb{R} n'est pas intègre : toute application f qui s'annule est diviseur de 0 (le montrer). Les éléments inversibles sont les fonctions qui ne s'annulent pas.

EXERCICE 15 Montrer que $\mathbb{Z}[i] = \{a + bi \mid a, b \in \mathbb{Z}\}$ est un sous-anneau intègre de \mathbb{C} , dont les inversibles sont 1, i , -1 et $-i$.

2.5 Calculs dans les anneaux

- On rappelle la formule du *binôme de Newton*, qui s'étend de \mathbb{Z} aux anneaux commutatifs, mais aussi (et cela sert effectivement⁴) dans un anneau quelconque, avec deux éléments qui commutent :

PROPOSITION 7 Soient $a, b \in A$, avec $ab = ba$, et $n \in \mathbb{N}^*$. Alors :

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

PREUVE : Récurrence sur \mathbb{N} et formule du triangle de Pascal. ■

³contrairement aux morphismes de groupes, pour lesquels la relation $\varphi(e_G) = e_H$ est une conséquence de la définition

⁴en particulier dans les anneaux de matrices

- Si $x, y \in A$ commutent et $n \in \mathbb{N}^*$, alors $x - y | x^n - y^n$, et plus précisément :

$$x^n - y^n = (x - y) \sum_{k=0}^{n-1} x^k y^{n-1-k}.$$

BIEN ENTENDU, pour les deux derniers résultats, l'hypothèse essentielle $xy = yx$ ne sera jamais oubliée...

- Cas particulier de ce qui précède : si $1 - x$ est inversible (ce qui n'est pas EQUIVALENT à $x \neq 1$), on peut calculer $\sum_{k=0}^{n-1} x^k$ grâce à la formule :

$$1 - x^n = (1 - x) \sum_{k=0}^{n-1} x^k.$$

1_A commute en effet avec tous les éléments de l'anneau.

- On verra en TD de Maple l'algorithme d'*exponentiation rapide*, qui permet de calculer a^n en $O(\ln n)$ multiplications. L'idée apparaît dans l'exemple suivant :

$$a^{53} = a.(a^2)^{26} = a.(a^4)^{13} = a.a^4.(a^8)^6 = a.a^4.(a^{16})^3 = a.a^4.a^{16}.a^{32}.$$

Il suffit donc de calculer les a^{2^k} , et d'en tenir compte dans le résultat final lorsque la puissance en cours est impaire (si $(a^4)^{13}$ apparaît en cours de calcul, alors a^4 interviendra dans le résultat). Au vu de cet exemple, on peut formaliser l'algorithme d'exponentiation rapide de la façon suivante :

Fonction Expo_rapide(x,n)

Debut

```
Res<-1; # Contiendra à la fin le résultat
Puis<-x; # Contiendra les puissances successives de x
N<-n; # Puissance à laquelle Puis doit encore être évalué
Tant_que N>0
  Si N est impair Alors Res<-Res*Puis Fsi;
  Puis<-Puis^2;
  N<-N/2 # en fait, le quotient dans la division euclidienne
Fin_Tant_que;
RETOURNER(Res)
```

Fin

Mise en oeuvre en TD Maple...où on verra une seconde version récursive plus rapide à écrire, mais qui semble un peu magique!

Pour prouver la validité de cet algorithme, on peut noter (là encore au vu de l'exemple) PUIS prouver que la quantité $\text{Res} * \text{Puis}^N$ reste égale à x^n en cours d'exécution⁵. Quand on veut frimer, on parle d'*invariant de boucle*.

3 Corps

3.1 Structure de corps

DEFINITION 12

- Un *corps* est un anneau commutatif dans lequel tout élément non nul est inversible.
- Si $(\mathbb{K}, +, \cdot)$ est un corps, un *sous-corps* de \mathbb{K} est un sous-anneau \mathbb{K}_1 de \mathbb{K} tel que pour tout élément non nul x de \mathbb{K}_1 , on a $x^{-1} \in \mathbb{K}_1$; $(\mathbb{K}_1, +, \cdot)$ est alors un corps.

⁵au début et à la fin de chaque tour de boucle

REMARQUE 6 Si on enlève l'hypothèse de commutativité, on obtient ce que les anglo-saxons appellent “*division ring*”, traduit piteusement par “*anneau à division*”. En taupe, dans les temps anciens, le terme de *corps* désignait d'ailleurs ces anneaux à divisions.

En anglais, les corps se nomment “*fields*”. Pourquoi ? mystère...

3.2 Exemples

- \mathbb{Q} , \mathbb{R} et \mathbb{C} sont des corps, mais pas \mathbb{Z} (2 n'est pas inversible).
- On verra plus tard le *corps des fractions rationnelles* (quotients de polynômes).
- $\mathbb{Q}[\sqrt{2}]$ et $\mathbb{Q}[i]$ sont des sous-corps respectifs de \mathbb{R} et \mathbb{C} .
- Si on reprend les lois \oplus et \otimes des exemples 1, $(\mathbb{R}^2, \oplus, \otimes)$ est un corps... qui ressemble fortement à \mathbb{C} .

3.3 Pour la suite

Il n'existe en Spé (hors MP/MP*) que 2, 5 corps : \mathbb{R} , \mathbb{C} , et (accessoirement...) \mathbb{Q} .

Bien entendu, si on passe l'X (et si on n'a pas trop de chance...), il ne faudra rien ignorer des corps finis \mathbb{F}_q , mais c'est une autre histoire !