

Découverte des maths
Résumé de cours
L1, année 2017-2018

5 décembre 2017

0.1 État du document

Le chapitre 1 est quasiment fini, les chapitres 2 à 5 sont vides ou presque, le chapitre 6 est en train d'être rédigé. Le prochain chapitre à être rédigé sera le chapitre 5, puis le 4.

Les chapitres 1 à 3 ont été faits en cours de façon complète, ils seront rédigés en dernier.

Si vous détectez ce qui vous paraît être une faute **dans les chapitres 1 et 6**, vérifiez auprès de plusieurs camarades, puis prévenez-moi par mail.

Table des matières

0.1	État du document	2
1	Logique et raisonnements	5
1.0.1	Préambule : vocabulaire et ensembles classiques	5
1.0.2	Propositions / assertions logiques	5
1.0.3	Construction de propositions	6
1.0.4	Quantificateurs	7
1.0.5	Méthodes de démonstration	7
1.0.6	Résolution des équations	9
2	Ensembles	11
3	Applications	13
4	Entiers et ensembles finis, combinatoire	15
4.1	L'ensemble \mathbb{N} et la récurrence	15
4.2	Ensembles finis et cardinal	15
4.3	Coefficients binomiaux et combinatoire	15
5	Arithmétique	17
5.1	Préliminaires	17
5.1.1	Division euclidienne	17
5.1.2	Idéaux de \mathbb{Z}	17
5.2	Pgcd	18
5.2.1	Algorithme d'Euclide	19
5.2.2	Nombres premiers entre eux, lemmes de Gauss	20
5.2.3	Résolution des équations diophantiennes du type $ax + by = c$	21
5.3	Nombres premiers	21
5.3.1	Définition	21
5.3.2	Factorisation en produit d'irréductibles	22
5.4	Ppcm	22
5.5	Compléments	22
5.5.1	Petit théorème de Fermat	22
5.5.2	Théorème chinois	22
5.5.3	Indicatrice d'Euler	22

6	Relations d'ordre et d'équivalence	23
6.0.1	Relations binaires	23
6.1	Relations d'ordre	23
6.1.1	Vocabulaire sur les ensembles ordonnés	24
6.1.2	Éléments remarquables dans un ensemble ordonné	24
6.1.3	Ordre produit et ordre lexicographique	25
6.2	Relations d'équivalence	25
6.2.1	Définitions	25
6.2.2	Partition en classes d'équivalence	25

Chapitre 1

Logique et raisonnements

1.0.1 Préambule : vocabulaire et ensembles classiques

Afin de pouvoir illustrer les notions de ce chapitre dans le contexte des mathématiques, on part du principe qu'un certain nombre de choses sont connues :

1. Les ensembles classiques : \mathbb{N} , \mathbb{Z} , \mathbb{Q} , \mathbb{R} , \mathbb{C} , les mêmes privés de zéro : \mathbb{N}^* , ..., \mathbb{C}^* . Les lois de composition classiques sur ces ensembles : addition, multiplication, avec leurs règles de calcul.
2. L'égalité dans ces ensembles, la relation d'ordre dans \mathbb{R} : $x < y$ se lit « x est strictement inférieur à y », $x \leq y$ se lit « x est inférieur à y » (on précise parfois « inférieur ou égal » même si sans précision, une inégalité est toujours prise au sens large).
3. La relation de divisibilité dans \mathbb{Z} : la suite de symboles $a|b$ se lit « a divise b ».
4. Les notations d'appartenance d'un élément à un ensemble : on écrit $x \in E$ pour dire que x est un élément de l'ensemble E et $x \notin E$ sinon. Par exemple, $\frac{2}{3} \in \mathbb{Q}$, mais $\sqrt{2} \notin \mathbb{Q}$ (cela sera prouvé dans la suite du chapitre).
5. Les notations \mathbb{R}_+ , \mathbb{Q}_- , etc pour des contraintes de signe (au sens large : 0 appartient à \mathbb{Q}_+ par exemple). On peut combiner : l'ensemble \mathbb{R}_+^* est l'ensemble des réels strictement positifs.
6. Les fonctions classiques, comme la racine carrée et la valeur absolue.

Tout ceci sera revu en détail de toutes façons.

1.0.2 Propositions / assertions logiques

Définition 1.0.1. Une proposition est une phrase à laquelle on peut attribuer le statut « VRAI » ou « FAUX ». La phrase peut en outre comporter des symboles qui désignent des objets mathématiques (comme des chiffres) et d'autres symboles qui désignent des relations mathématiques entre objets (par exemple l'égalité, inégalité, divisibilité, appartenance à un ensemble...)

Par exemple « $2 + 2 = 3$ » et « $2 + 3 = 5$ » sont des propositions (la première est fausse, la seconde vraie). La phrase « le nombre complexe i est positif » (ou encore « quelle heure est-il ? ») ne sont pas des propositions, on ne peut pas leur affecter de statut : la première n'a pas de sens (un nombre complexe n'a pas de signe), la seconde a un sens mais on ne peut pas lui affecter de statut VRAI ou FAUX.

Variables, paramètres, assertions ouvertes et fermées Une proposition peut dépendre d'un ou plusieurs paramètres, ou variables. Un paramètre est un symbole qui désigne un élément (explicité ou pas) d'un ensemble.

Les symboles nouveau doivent **toujours** être définis (ou déclarés) avec leur type (l'ensemble auquel appartient l'objet), de sorte à pouvoir être sûr du fait que la phrase est bien une assertion, c'est-à-dire possède un statut VRAI ou FAUX.

Par exemple : Dans « $x \geq 0$ », le symbole x n'est pas défini, on ne peut pas être sûr que la phrase ait un sens. Si x était un nombre complexe par exemple, la phrase n'aurait aucun sens. Le symbole x pourrait désigner beaucoup d'autres objets mathématiques, par exemple ... un cercle, les coordonnées d'un point du plan, auquel cas la phrase n'a pas non plus de sens.

D'autre part si x est un nombre naturel, la phrase a un sens mais elle est trivialement vraie car tous les naturels sont positifs. Tout ceci montre qu'il est crucial de déclarer clairement les variables et leur type *avant* de commencer à les utiliser.

On déclare des objets à l'aide de la locution « Soit ». La phrase « Soit x un réel. » déclare un réel, que l'on note x . La phrase « Soit $k \in \mathbb{Z}$. » déclare un entier relatif (l'usage de \in comme abréviation pour « appartenant à » est toléré dans ce cas-là, même si en général on interdit d'utiliser les symboles mathématiques comme des abréviations).

La phrase « Soit x . » n'est pas une déclaration correcte d'objet mathématique : on doit préciser le type.

Si on précise que x est un nombre réel, « $x \geq 0$ » devient une assertion mathématique bien formée. Le statut de cette proposition dépend de la valeur de x : elle est vraie si $x \in \mathbb{R}_+$, elle est fausse si $x \in \mathbb{R}_-^*$. Le fait ne pas pouvoir connaître explicitement le statut n'est pas un problème. De fait que lorsqu'on déclare un réel x , on ne sait pas a priori lequel c'est.

1.0.3 Construction de propositions

Considérons deux propositions A et B . Dans les exemples qui suivent, sauf précision, x est un nombre réel.

Conjonction : « A et B » La proposition « A et B » est vraie si A et B sont vraies. Elle est fausse dès que l'une au moins des deux est fausse.

Exemple : « $x > 2$ et $x < 5$ » est vraie si $x \in]2, 5[$. Elle est fausse sinon.

Disjonction : « A ou B » La proposition « A ou B » est vraie dès que l'une des deux est vraie, elle est fausse si les deux sont fausses. Lorsqu'on affirme que « A ou B » est vraie, l'un n'exclut pas l'autre.

Exemple : « $x > 2$ ou $x < 5$ » est vraie pour tout nombre réel x .

Négation : « non A » La proposition « non A » est vraie si A est fausse et inversement.

Implication logique : « $A \Rightarrow B$ » La proposition « $A \Rightarrow B$ » signifie par définition « B ou non- A ». Elle est vraie si A est fausse ou si B est vraie.

Exemples : $2+2=4 \Rightarrow 2 \times 2=4$ est vraie. $2+2=5 \Rightarrow 2 \times 2=4$ est vraie. $2+2=5 \Rightarrow 2 \times 2=5$ est vraie. $2+2=4 \Rightarrow 2 \times 2=5$ est fausse. Autre exemple : si x est un nombre réel, la proposition $x > 3 \Rightarrow x > 4$ est vraie pour $x \leq 3$ ou pour $x > 4$. Elle est fausse si $3 < x \leq 4$.

Attention : le symbole \Rightarrow n'est en aucun cas une abréviation pour « donc ». La proposition $A \Rightarrow B$ ne veut pas dire « A est vraie donc B est vraie » !

Équivalence logique : « $A \Leftrightarrow B$ » La proposition « $A \Leftrightarrow B$ » signifie par définition « $A \Rightarrow B$ et $B \Rightarrow A$ ». Elle est vraie si A et B ont même statut, que ce soit vrai ou faux. Elle est fausse si A et B ont des statuts différents.

Exemples : $2 + 2 = 5 \Leftrightarrow 2 \times 3 = 7$ est vraie. $1 > 0 \Leftrightarrow 2 + 2 = 4$ est vraie. Si x est un nombre réel, la proposition $x > 3 \Leftrightarrow x < 4$ est vraie pour $x \in]3, 4[$. Elle est fausse sinon.

1.0.4 Quantificateurs

Soit $A(x)$ une proposition dépendant d'un paramètre x appartenant à un ensemble E (exemple : « $x > 3$ », où $x \in \mathbb{Z}$).

Quantificateur universel : \forall (quelque soit/pour tout)

La proposition « $\forall x \in E, A(x)$ » se lit « pour tout x dans E , $A(x)$ ». Elle est vraie si $A(x)$ est vraie pour toutes les valeurs que peut prendre x dans l'ensemble E . Elle est fausse dès qu'il existe une valeur spéciale de x pour laquelle $A(x)$ est fausse. Attention, contrairement à la proposition $A(x)$, la proposition $\forall x \in E, A(x)$ est une proposition qui ne dépend d'aucun paramètre : elle est soit vraie soit fausse : on dit que x est une variable muette, ou interne. Exemples : $\forall x \in \mathbb{R}, x^2 > 1$ est fausse. La proposition $\forall x \in \mathbb{Z}^*, x^2 \geq 1$ est vraie.

Quantificateur existentiel : \exists (il existe)

La proposition « $\exists x \in E/A(x)$ » se lit « il existe x dans E tel que $A(x)$ ». Elle est vraie s'il y a une valeur de x dans l'ensemble E telle que $A(x)$ soit vraie. Elle est fausse si $A(x)$ est fausse pour toutes les valeurs de x .

Théorème 1.0.2. On a les équivalences suivantes :

$\text{non}(\text{non } A) \Leftrightarrow A$.

$\text{non}(A \text{ ou } B) \Leftrightarrow (\text{non } A) \text{ et } (\text{non } B)$.

$\text{non}(A \text{ et } B) \Leftrightarrow (\text{non } A) \text{ ou } (\text{non } B)$.

$(\forall x \in E, A(x)) \Leftrightarrow (\forall y \in E, A(y))$.

$\text{non}(\forall x \in E, A(x)) \Leftrightarrow \exists x \in E, \text{non}(A(x))$.

$\text{non}(\exists x \in E, A(x)) \Leftrightarrow \forall x \in E, \text{non}(A(x))$.

Démonstration : voir TD.

1.0.5 Méthodes de démonstration

Démonstration directe

Exemple : soit $n \in \mathbb{Z}$; montrer que « n pair $\Rightarrow n^2$ pair ».

Exemple de rédaction:

Si n est pair, il existe $k \in \mathbb{Z}$ tel que $n = 2k$. Alors, $n^2 = 4k^2 = 2(2k^2)$ est pair. (et si n est impair, l'implication est vraie par définition, il n'y a rien à prouver). \square

Démonstration par contraposée

Principe : $(A \Rightarrow B)$ est équivalente à $(\text{non-}B \Rightarrow \text{non-}A)$.

Preuve du principe : $(\text{non-}B \Rightarrow \text{non-}A) \Leftrightarrow (\text{non-}A \text{ ou } \text{non-} \text{non-}B) \Leftrightarrow (B \text{ ou } \text{non-}A) \square$.

Exemple d'application : soit $n \in \mathbb{Z}$; montrer que n^2 pair $\Rightarrow n$ pair.

Exemple de rédaction:

On va montrer la contraposée, autrement dit on va montrer « n impair $\Rightarrow n^2$ impair », qui est

équivalente, mais plus facile à montrer. Supposons donc n impair. Alors il existe $k \in \mathbb{Z}$ tel que $n = 2k + 1$. Mais alors $n^2 = 4k^2 + 4k + 1 = 2(2k^2 + 2k) + 1$ est impair.

En combinant avec le résultat précédent, on a donc prouvé : « n^2 pair $\Leftrightarrow n$ pair » \square

Démonstration par l'absurde

Principe : Si F désigne n'importe quelle proposition fausse, on a $A \Leftrightarrow (\text{non-}A \Rightarrow F)$.

Preuve du principe : $(\text{non-}A \Rightarrow F) \Leftrightarrow (F \text{ ou non-non-}A) \Leftrightarrow A$.

Donc pour montrer A , il suffit de supposer A faux et d'en déduire une contradiction (c'est-à-dire n'importe quelle proposition fausse).

Exemple d'application : Montrer que $\sqrt{2}$ n'est pas rationnel.

Exemple de rédaction :

Par l'absurde, supposons $\sqrt{2} \in \mathbb{Q}$. Alors il existe deux entiers p et q premiers entre eux tels que $\sqrt{2} = p/q$. Donc $p = q\sqrt{2}$ et donc $p^2 = 2q^2$, donc p^2 est pair, donc par l'exemple précédent p est pair. Donc il existe $k \in \mathbb{Z}$ tel que $p = 2k$, d'où en remplaçant $4k^2 = 2q^2$, donc en simplifiant q^2 est pair donc q est pair. Donc p et q sont tous les deux pairs, contradiction car ils sont premiers entre eux. Finalement cette contradiction prouve que $\sqrt{2} \notin \mathbb{Q}$. \square

Démonstrations de propositions avec quantificateur universel

Pour démontrer $\forall x \in E, A(x)$, on écrit :

« Soit $x \in E$ un élément quelconque ».

Puis, on démontre $A(x)$.

Puis, pour conclure, on écrit : « x étant pris quelconque dans E , la propriété est bien démontrée ».

Exemple 1.0.3. Montrer que $\forall x \in \mathbb{R}, x^2 + x + 1 > 0$ ».

Exemple de rédaction :

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

(déclaration de x)

On a $x^2 + x + 1 = (x + \frac{1}{2})^2 + \frac{3}{4}$.

(Début preuve de $A(x)$)

Comme un carré est toujours positif, on a $(x + \frac{1}{2})^2 \geq 0$

et donc $x^2 + x + 1 > 0$.

(fin preuve de $A(x)$)

Ceci montre donc bien $\forall x \in \mathbb{R}, x^2 + x + 1 > 0$

(Conclusion)

Exemple : Démontrer que $\forall x \in \mathbb{R}, x^2 + \cos(x) > 0$.

Exemple de rédaction :

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

On distingue deux cas possibles suivant la valeur de x .

Si $0 \leq |x| < \pi/2$, alors $x^2 \geq 0$ et $\cos(x) > 0$ donc $x^2 + \cos(x) > 0$.

Si $\pi/2 \leq |x|$, alors $x^2 + \cos(x) \geq \pi^2/4 - 1 > 0$.

Comme x est quelconque, on a bien montré la propriété pour tout $x \in \mathbb{R}$. \square

Cas particulier : démonstrations par récurrence Dans le cas particulier où le quantificateur universel porte sur l'ensemble \mathbb{N} , on peut utiliser une méthode de preuve spécifique, la récurrence. Cette méthode de démonstration s'appuie sur le fait que toute partie non vide de \mathbb{N} admet un plus petit élément (ce qui est faux pour la plupart des autres ensembles classiques). Il suffit alors de montrer d'une part que $A(0)$ est vraie, ce qui est généralement facile, puis de montrer que pour tout $n \in \mathbb{N}$, on a $A(n) \Rightarrow A(n+1)$. La première étape est cruciale et le raisonnement est faux si on l'omet.

Démonstrations de propositions avec quantificateur existentiel

Pour démontrer « $\exists x \in E/A(x)$, il faut soit construire un élément x tel que $A(x)$ soit vrai, soit utiliser un théorème qui affirme l'existence d'un tel objet, ou qui affirme l'existence d'un objet à partir duquel on peut obtenir l'existence de x .

Exemple 1 : soit f une fonction croissante de $[0, 1]$ dans \mathbb{R} . Montrer que f est majorée, autrement dit montrer que $(\exists M \in \mathbb{R}/(\forall x \in [0, 1], f(x) \leq M))$.

Exemple de rédaction:

Posons $M = f(1)$. On a bien $\forall x \in [0, 1], f(x) \leq f(1) = M$, car f est croissante. \square

Exemple 2 : Montrer qu'il existe deux irrationnels a et b tels que a^b soit rationnel.

Exemple de rédaction:

Considérons le nombre réel $\sqrt{2}^{\sqrt{2}}$. Il est soit rationnel, soit irrationnel. Dans le premier cas, il suffit de poser $a = b = \sqrt{2}$ (irrationnels, voir exemple plus haut) et la preuve est terminée. Dans le second cas, il suffit de poser $a = \sqrt{2}^{\sqrt{2}}$ (qui est supposé irrationnel) et $b = \sqrt{2}$. On a alors

$$a^b = \left(\sqrt{2}^{\sqrt{2}} \right)^{\sqrt{2}} = \sqrt{2}^2 = 2 \in \mathbb{Q}. \square$$

Ce deuxième exemple montre que parfois, on n'a pas besoin de construire explicitement l'objet, seulement de montrer que ça existe, soit par l'analyse de cas de figure complémentaires, soit en utilisant un théorème qui affirme l'existence d'un certain objet sans forcément l'expliciter. Cela dit, la plupart du temps, il faut construire l'objet.

1.0.6 Résolution des équations

Soit $A(x)$ une proposition portant sur $x \in E$. Résoudre $A(x)$, c'est déterminer exactement l'ensemble des x tels que $A(x)$ soit vrai. Cet ensemble est un sous-ensemble de E , on l'appelle l'ensemble des solutions. Il peut parfois être vide (aucune solution) ou égal à E (équation triviale).

Méthode par équivalence

$A(x) \Leftrightarrow B(x) \Leftrightarrow \dots \Leftrightarrow C(x)$ et on sait facilement résoudre $C(x)$. Cette méthode ne s'applique que rarement, essentiellement qu'aux (systèmes d') équations linéaires.

Exemple 1.0.4. Résoudre $2x + 3 = 5$, d'inconnue $x \in \mathbb{R}$.

Exemple de rédaction :

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

$$\begin{aligned} 2x + 3 = 5 &\iff 2x = 5 \\ &\iff x = 5/2. \end{aligned}$$

Méthode par conditions nécessaires et suffisantes

Lorsque $A(x) \Rightarrow B(x)$, on dit que $B(x)$ est une condition nécessaire à $A(x)$, et $A(x)$ est une condition suffisante pour $B(x)$.

Dans la pratique, on écrit $A(x) \Rightarrow B(x) \Rightarrow \dots x \in \Omega$. Ensuite, parmi les éléments de Ω , on détermine ceux qui sont solution.

Exemple : résoudre $|x - 1| = 2x + 3$, d'inconnue $x \in \mathbb{R}$.

Exemple de rédaction:

Soit $x \in \mathbb{R}$. On a la chaîne d'implications $|x-1| = 2x+3 \Rightarrow |x-1|^2 = (2x+3)^2 \Leftrightarrow x^2 - 2x + 1 = 4x^2 + 12x + 9 \Leftrightarrow 3x^2 + 14x + 8 = 0 \Leftrightarrow (x \in \{-4; -2/3\})$. Réciproquement, on vérifie que -4 n'est pas solution mais que $-2/3$ est solution. Finalement, l'équation a une unique solution, $-2/3$. \square

Chapitre 2

Ensembles

Définition 2.0.1 (Restriction d'un ensemble).

Définition 2.0.2 (Union, intersection et complémentaire de parties).

Chapitre 3

Applications

Définition 3.0.1 (Applications entre ensembles).

Définition 3.0.2. Soient A et B deux ensembles, et $f : A \rightarrow B$ une application. On dit que f est injective si

$$\forall (x, y) \in A^2, \quad f(x) = f(y) \Rightarrow x = y,$$

autrement dit si (contraposée)

$$\forall (x, y) \in A^2, \quad x \neq y \Rightarrow f(x) \neq f(y),$$

autrement dit si deux éléments distincts ont toujours des images distinctes. On dit aussi que f « sépare les points ».

Définition 3.0.3. On dit que f est surjective si

$$\forall b \in B, \quad \exists a \in A / f(a) = b,$$

autrement dit tout élément $b \in B$ a (au moins) un antécédent par f .

Définition 3.0.4. On dit que f est bijective si elle est injective et surjective.

Exemple 3.0.5. La fonction $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}, x \mapsto x^2$ n'est ni injective, ni surjective. Elle n'est pas injective car bien que 1 soit différent de -1 , ils ont la même image. Elle n'est pas surjective car -2 n'a pas d'antécédent dans \mathbb{R} : on ne peut pas trouver de réel x tel que $x^2 = -2$.

Exemple 3.0.6. La fonction $g : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}_+, x \mapsto x^2$ n'est pas injective pour les mêmes raisons que f , mais elle est surjective : l'ensemble d'arrivée est cette fois \mathbb{R}_+ , et tout nombre réel positif $y \geq 0$ a au moins un antécédent, par exemple $-\sqrt{y}$.

Exemple 3.0.7. La fonction $h : \mathbb{R}_+ \rightarrow \mathbb{R}_+, x \mapsto x^2$ est injective et surjective, donc bijective. Elle est surjective pour la même raison que g , elle est injective, car si x et y sont des réels positifs ayant même carré, ils sont forcément égaux (ils sont positifs donc il n'y a pas l'ambiguïté de signe).

En général, la surjectivité est plus dure à montrer que l'injectivité, car il faut résoudre une équation à paramètre : l'équation $f(x) = y$, de paramètre y , et d'inconnue x , et ce pour tous les paramètres y . La non surjectivité est en revanche souvent plus facile à montrer, il suffit de trouver un élément qui n'a pas d'antécédent, en général ça se voit (éventuellement après un petit calcul / majoration / développement d'expression).

Remarque 3.0.8. Si $f : A \rightarrow B$ est injective, alors on peut « identifier » A à un sous-ensemble de B grâce à f : un élément $a \in A$ est identifié à $f(a) \in B$. Cette identification n'est pas abusive grâce à la propriété d'injectivité. La formulation correcte de cette identification est que f induit une bijection de A sur $f(A)$. Ceci n'est qu'une remarque.

Définition 3.0.9 (Restriction et prolongement d'une application).

Chapitre 4

Entiers et ensembles finis, combinatoire

Chapitre vide.

4.1 L'ensemble \mathbb{N} et la récurrence

4.2 Ensembles finis et cardinal

4.3 Coefficients binomiaux et combinatoire

Chapitre 5

Arithmétique

Attention, la présentation qui suit diffère sans doute beaucoup de celle vue en terminale : il faut faire l'effort de l'étudier en détail même si l'ordre dans lequel les notions sont introduites semble « mauvais » : en fait, c'est le « bon » ordre.

Le cours d'arithmétique des polynômes suivra le même canevas (définitions semblables, mêmes lemmes aux mêmes endroits, mêmes preuves), de même que le cours d'algèbre générale sur les anneaux par la suite.

5.1 Préliminaires

5.1.1 Division euclidienne

Proposition 5.1.1 (Division euclidienne). Soit $a \in \mathbb{N}$ et $b \in \mathbb{N}^*$. Il existe un unique couple $(b, r) \in \mathbb{N}^2$ vérifiant les deux propriétés suivantes :

1. $a = bq + r$;
2. $r < b$.

L'entier b est le *quotient* de la division euclidienne de a par b , et r est le *reste*. Effectuer la division euclidienne de a par b , c'est écrire $a = bq + r$ avec b et q comme plus haut.

Exemple : $17 = 5 \times 3 + 2$ est la division euclidienne de 17 par 5. Le quotient est 3 et il reste 2. Par contre, l'écriture $17 = 5 \times 2 + 7$ bien que correcte n'est pas une division euclidienne, car le reste *doit* être strictement inférieur à 5, dans une division euclidienne.

5.1.2 Idéaux de \mathbb{Z}

Soit α un entier. On rappelle que $\alpha\mathbb{Z} = \{\alpha k \mid k \in \mathbb{Z}\} = \{\dots, -2\alpha, -\alpha, 0, \alpha, 2\alpha, 3\alpha, \dots\}$. Les ensembles $\alpha\mathbb{Z}$ et $(-\alpha)\mathbb{Z}$ sont identiques.

Exemples : $3\mathbb{Z} = \{-6, -3, 0, 3, 6, 9, 12, \dots\}$. Si $\alpha = 0$, alors $\alpha\mathbb{Z} = \{0\}$. On a $\alpha\mathbb{Z} = \mathbb{Z}$ ssi α est égal à 1 ou -1 .

Une partie de \mathbb{Z} de la forme $\alpha\mathbb{Z}$ contient zéro, est stable par addition, et par opposé. Réciproquement, on peut s'intéresser aux parties qui vérifient ces trois propriétés et se demander si elles sont toutes de la forme $\alpha\mathbb{Z}$.

Définition 5.1.2. Soit $I \subseteq \mathbb{Z}$ une partie de \mathbb{Z} . On dit que I est un *idéal* de \mathbb{Z} si

1. C'est un *sous-groupe* de \mathbb{Z} , c'est-à-dire I contient 0 et est stable par addition et opposé :

$$\forall x, y \in I, x + y \in I \text{ et } -x \in I.$$

2. Il est *absorbant pour la multiplication* c'est-à-dire :

$$\text{Si } x \in I \text{ et } n \in \mathbb{Z}, \text{ alors } n \cdot x \in I.$$

Proposition 5.1.3. Tout idéal de \mathbb{Z} est de la forme $\{k\alpha \mid k \in \mathbb{Z}\}$, avec $\alpha \in \mathbb{N}$. (Un tel ensemble est noté $\alpha\mathbb{Z}$.)

Démonstration. On va montrer que les sous-groupes de \mathbb{Z} sont de cette forme, et que ce sont des idéaux.

Soit $G \subseteq \mathbb{Z}$ un sous-groupe. Soit $G_+^* = G \cap \mathbb{N}^*$. Il y a deux cas :

1. Si G_+^* est vide, cela signifie que G ne possède aucun élément strictement positif. Comme G est stable par opposé, il ne peut pas non plus contenir d'éléments strictement négatifs. Cela signifie que $G = \{0\}$.
2. Sinon, c'est une partie non vide de \mathbb{N} , qui possède donc un plus petit élément, notons-le α . Par définition, G est stable par somme et opposé, donc $2\alpha \in G$ et $-\alpha \in G$ et plus généralement, pour tout $k \in \mathbb{Z}$, on a $k\alpha \in G$. Donc $\alpha\mathbb{Z} \subseteq G$. Montrons l'inclusion inverse. Soit $x \in G$, positif. Écrivons la division euclidienne de x par α . On a $x = \alpha q + r$, avec $r < \alpha$. Comme G est stable par somme et différence et que $\alpha q \in G$, on en déduit que $r = x - \alpha q$ est également dans G . Or, $r < \alpha$, donc par minimalité de α , $r = 0$, ce qui montre que $x = \alpha q$, donc que $x \in \alpha\mathbb{Z}$. Si x est négatif, ce qui précède montre que $-x \in \alpha\mathbb{Z}$, donc que $x \in \alpha\mathbb{Z}$.

On vérifie ensuite sans peine que tous les sous-groupes de \mathbb{Z} sont en fait des idéaux de \mathbb{Z} . \square

L'entier α dans la définition est appelé le *générateur principal* de G .

5.2 Pgcd

Proposition 5.2.1. Soient a et b deux entiers. L'ensemble $\{ak + bl \mid k, l \in \mathbb{Z}\}$ noté par définition $a\mathbb{Z} + b\mathbb{Z}$ ou $\langle a, b \rangle$, est un idéal de \mathbb{Z} .

Démonstration. Appliquer la définition de sous-groupe, ce qui prouve que c'est un idéal par la section précédente. \square

Définition 5.2.2. Soient a et b des entiers. Le générateur principal de $a\mathbb{Z} + b\mathbb{Z}$ est appelé le *pgcd* de a et b , il est noté $\text{pgcd}(a, b)$ ou bien $a \wedge b$.

Proposition 5.2.3. Soient a et b des entiers, et $d = \text{pgcd}(a, b)$. On a les propriétés suivantes

1. L'entier a est dans $a\mathbb{Z} + b\mathbb{Z}$, donc d divise a . De même, d divise b .
2. L'entier d est dans $d\mathbb{Z}$, donc il existe k et l dans \mathbb{Z} , tels que $d = ak + bl$. On dit que (k, l) est un couple (ou paire, par abus de langage) de Bézout pour a et b . L'égalité $d = ak + bl$ est appelée *relation de Bézout*.
3. Au sens de la divisibilité, d est le plus grand diviseur commun de a et b . Ceci explique le nom (*plus grand commun diviseur* de d). Cette propriété est précisée dans la proposition suivante.
4. Si $d = 0$, alors $a = b = 0$.

5. On a $\text{pgcd}(a, b) = \text{pgcd}(a, b) = \text{pgcd}(a, -b)$, car $a\mathbb{Z} + b\mathbb{Z} = b\mathbb{Z} + a\mathbb{Z} = a\mathbb{Z} + (-b)\mathbb{Z}$.
6. $\text{pgcd}(a, 0) = |a|$.
7. $\text{pgcd}(a, 1) = 1$.

Proposition 5.2.4. Si $x > 0$, $x|a$ et $x|b$, et $\forall m, m|a$ et $m|b \implies m|x$, alors $x = d$.

Démonstration. Si $x|a$ et $x|b$, alors $x|d$. D'autre part, $d|a$ et $d|b$, donc $d|x$. Donc finalement, $d = x$. Attention, la condition $x > 0$ est indispensable pour ce raisonnement. Deux entiers relatifs peuvent se diviser l'un l'autre, comme 1 et -1 , sans être égaux. \square

Proposition 5.2.5. Soit $k > 0$. On a $\text{pgcd}(ka, kb) = k \text{pgcd}(a, b)$.

Démonstration. Notons provisoirement $d_1 = \text{pgcd}(a, b)$ et $d_2 = \text{pgcd}(ka, kb)$.

Comme $d_1|a$ et $d_1|b$, on a $kd_1|ka$ et $kd_1|kb$ donc finalement $kd_1|d_2$. En particulier, $k|d_2$ donc $\frac{d_2}{k}$ est un entier.

D'autre part, $d_2|ka$ et $d_2|kb$, donc en divisant par k et en utilisant la remarque précédente, on a $\frac{d_2}{k}|a$ et $\frac{d_2}{k}|b$ donc $\frac{d_2}{k}|d_1$, d'où $d_2|kd_1$.

Comme kd_1 et d_2 sont positifs, on en déduit $d_2 = kd_1$. \square

5.2.1 Algorithme d'Euclide

Lemme 5.2.6 (d'Euclide). Soient a, b et k des entiers relatifs. Alors :

$$\text{pgcd}(a, b) = \text{pgcd}(a + kb, b).$$

Démonstration. Ils y a au moins deux façons de prouver le résultat : on peut montrer que les idéaux $a\mathbb{Z} + b\mathbb{Z}$ et $(a + kb)\mathbb{Z} + b\mathbb{Z}$ sont les mêmes, ce qui implique qu'ils ont le même générateur principal, ou alors on peut montrer que (a, b) et $(a + kb, b)$ ont les mêmes diviseurs communs, donc le même plus grand diviseur commun.

Première preuve (mêmes idéaux). D'une part, $(a + kb)\mathbb{Z} + b\mathbb{Z} \subseteq a\mathbb{Z} + b\mathbb{Z}$ car si i et j sont des entiers, alors $i(a + kb) + jb = ia + (iK + j)b \in a\mathbb{Z} + b\mathbb{Z}$. D'autre part, $a\mathbb{Z} + b\mathbb{Z} \subseteq (a + kb)\mathbb{Z} + b\mathbb{Z}$ car si i et j sont des entiers, alors $ia + jb = i(a + kb) + (j - ik)b \in (a + kb)\mathbb{Z} + b\mathbb{Z}$. Finalement, les idéaux $a\mathbb{Z} + b\mathbb{Z}$ et $(a + kb)\mathbb{Z} + b\mathbb{Z}$ sont identiques donc ont le même générateur principal.

Deuxième preuve (mêmes diviseurs). Si $m|a$ et $m|b$, alors $m|a + kb$ et $m|b$.

Si $m|a + kb$ et $m|b$, alors $m|a + kb - kb$ et $m|b$, donc m divise a et b .

On en déduit que les couples (a, b) et $(a + kb, b)$ ont les mêmes diviseurs communs. Ils ont donc le même pgcd. \square

Corollaire 5.2.7. En particulier, si $a = bq + r$ est la division de a par $b \neq 0$, alors

$$\text{pgcd}(a, b) = \text{pgcd}(b, r).$$

Théorème 5.2.8 (Algorithme d'Euclide). Appliquer l'algorithme d'Euclide aux entiers naturels a et b , c'est effectuer une suite de divisions euclidiennes :

$$\begin{aligned} a &= q_1b + r_1 \\ b &= q_2r_1 + r_2 \\ r_1 &= q_3r_2 + r_3 \\ &\dots \\ r_{n-2} &= q_nr_{n-1} + r_n \end{aligned}$$

en continuant tant que r_n n'est pas nul. Alors, on a les résultats suivants :

1. (terminaison de l'algorithme) Au bout d'un certain nombre d'étapes, on a $r_n = 0$, donc l'algorithme termine en un nombre fini d'étapes.
2. Le dernier reste non nul r_{n-1} est le pgcd de a et b .

Démonstration. 1. (Preuve de terminaison) Il s'agit de montrer que l'on ne peut pas continuer indéfiniment à faire des divisions euclidiennes. Par définition de ce qu'est une division euclidienne, on a : $b > r_1$, $r_1 > r_2$ et plus généralement $r_i > r_{i+1}$. La suite des restes est une suite strictement décroissante d'entiers positifs, elle ne peut pas être infinie.

2. (Preuve de correction du calcul de pgcd) Par le lemme d'Euclide et son corollaire appliqués à chaque étape, on a

$$\text{pgcd}(a, b) = \text{pgcd}(b, r_1) = \text{pgcd}(r_1, r_2) = \dots = \text{pgcd}(r_{n-1}, r_n) = \text{pgcd}(r_{n-1}, 0) = r_{n-1}.$$

□

On remarque qu'il n'est pas nécessaire que $a > b$ dans l'algorithme : si ce n'est pas le cas, l'algorithme les replace dans le bon ordre au cours de la première étape.

L'algorithme d'Euclide permet également d'obtenir une relation de Bézout en « remontant » les étapes de l'algorithme :

$$d = r_{n-1} = r_{n-3} - q_{n-1}r_{n-2} = r_{n-3} - q_{n-1}(r_{n-4} - q_{n-2}r_{n-3}) \dots = au + bv.$$

5.2.2 Nombres premiers entre eux, lemmes de Gauss

Définition 5.2.9. Deux nombres relatifs a et b sont premiers entre eux si $\text{pgcd}(a, b) = 1$. On note : $a \wedge b = 1$.

Proposition 5.2.10. Soient a et b des entiers. On a

$$a \wedge b = 1 \iff (\exists u, v \in \mathbb{Z} \mid au + bv = 1)$$

Démonstration. Sens \implies : il existe une relation de Bézout.

Sens \impliedby : si $au + bv = 1$, alors $\text{pgcd}(a, b)$ divise 1, donc vaut 1.

□

Proposition 5.2.11. Soient a et b des entiers. Si $a \wedge b = 1$ et $a \wedge c = 1$, alors $a \wedge bc = 1$.

Démonstration. Si $au + bv = 1$ et $au' + cv' = 1$ sont des relations de Bézout, on a en multipliant les deux :

$$1 = (au + bv)(au' + cv') = a(auu' + bvu' + ucv') + bcvv'.$$

□

Corollaire 5.2.12. Soient a , b et $n > 0$, $m > 0$ des entiers. Si $a \wedge b = 1$, alors $a^n \wedge b^m = 1$.

Démonstration. On a $a \wedge b = 1 \implies a \wedge b^2 = \dots = a \wedge b^m = 1$, puis $b^m \wedge a1 \implies b^m \wedge a^2 = \dots = b^m \wedge a^n = 1$.

□

Attention, ceci n'est **pas** un résultat de passage au produit avec le symbole \wedge ! Si on a $a \wedge b = 1$ et $c \wedge d = 1$, on n'a **pas** $ac \wedge bd = 1$. Exemple : $2 \wedge 3 = 1$ et $3 \wedge 2 = 1$ et pourtant $6 \wedge 6 \neq 1$.

Théorème 5.2.13 (« théorème/lemme de Gauss »). Soient a , b et c des entiers. Si $a \wedge b = 1$ et $a \mid bc$, alors $a \mid c$.

Démonstration. Soit $ak + bl = 1$ une relation de Bézout pour a et b . Si a divise bc , alors il divise également bkc . D'autre part, a divise akc . Donc $a \mid (bl + ak)c$ c'est-à-dire $a \mid c$.

□

5.2.3 Résolution des équations diophantiennes du type $ax + by = c$

Définition 5.2.14. Une équation diophantienne est une équation du type $F(x_1, x_2, \dots, x_k) = 0$, les inconnues x_1, \dots, x_k appartiennent à \mathbb{Z} , ou une partie de \mathbb{Z} .

Exemples :

$12x + 3y = 8$, d'inconnues x et y dans \mathbb{Z} .

$2^n - 3^m = 7$ d'inconnues n et m dans \mathbb{N} .

$x^n + y^n = z^n$ d'inconnues x, y, z, n dans \mathbb{N} . (C'est l'équation de Fermat ; il a été démontré en 1994 après trois siècles d'efforts que l'équation n'admet des solutions que si $n = 2$.)

Dans ce cours, on s'intéresse aux équations du type $ax + by = c$ d'inconnues x et y dans \mathbb{Z} , et avec a, b et c des paramètres entiers.

Géométriquement, cela revient à trouver les points à coordonnées entières de la droite du plan d'équation cartésienne $ax + by = c$.

La méthode de résolution (prouvée plus bas) consiste¹ à trouver une solution particulière de l'équation, puis à y ajouter les solutions de l'équation homogène associée, qui est par définition l'équation obtenue en remplaçant le second membre par zéro : $ax + by = 0$.

Proposition 5.2.15 (Résolution des équations homogènes). Soient a, b des entiers non tous deux nuls, et notons $d = \text{pgcd}(a, b)$. L'équation $ax + by = 0$ d'inconnue $(x, y) \in \mathbb{Z}^2$ a pour ensemble de solutions :

$$\left\{ k \left(\frac{-b}{d}, \frac{a}{d} \right), k \in \mathbb{Z} \right\}$$

(Remarque : si a et b sont nuls, alors l'ensemble des solutions est \mathbb{Z}^2 tout entier...)

Démonstration. (de la proposition) Écrivons $a = da'$ et $b = db'$. L'équation s'écrit donc $da'x + db'y = 0$ et en simplifiant par d qui est non nul, on obtient l'équation équivalente $a'x + b'y = 0$, avec $a' \wedge b' = 1$.

Si un des deux entiers a ou b est nul, le résultat est facile.

Sinon, le théorème de Gauss donne alors $a' | y$ donc il existe $k \in \mathbb{Z}$ tel que $y = ka'$. On trouve alors $x = -kb'$ en simplifiant par a' . \square

Proposition 5.2.16. 5.3 Nombres premiers

5.3.1 Définition

Définition 5.3.1. Un entier naturel p est dit *premier* s'il possède exactement deux diviseurs positifs distincts : 1 et p . En particulier, un nombre premier est toujours ≥ 2 . Un entier naturel ≥ 2 qui n'est pas premier est dit *composé*.

Le nombre 1 n'est pas premier. Les nombres premiers sont 2, 3, 5, 7, 11, 13, 17, 19, 23 etc.

1. comme pour les équations différentielles, ou les systèmes linéaires

5.3.2 Factorisation en produit d'irréductibles

5.4 Ppcm

5.5 Compléments

5.5.1 Petit théorème de Fermat

5.5.2 Théorème chinois

5.5.3 Indicatrice d'Euler

Chapitre 6

Relations d'ordre et d'équivalence

6.0.1 Relations binaires

Définition 6.0.1. Soit E un ensemble. Une *relation binaire* R sur E est une application de $E \times E$ dans $\{\text{vrai}, \text{faux}\}$.

On notera xRy au lieu de $R(x, y) = \text{vrai}$.

6.1 Relations d'ordre

Définition 6.1.1. Soit E un ensemble. Une relation binaire R sur E est

1. réflexive ssi $\forall x \in E, xRx$;
2. transitive ssi $\forall x, y, z \in E, xRy \text{ et } yRz \implies xRz$;
3. antisymétrique ssi $\forall x, y \in E, xRy \text{ et } yRx \implies x = y$.

Une relation est une *relation d'ordre* ssi elle est réflexive, transitive et antisymétrique.

Exemples 6.1.2. \leq est une relation d'ordre sur \mathbb{N} , ou sur \mathbb{Z} , \mathbb{Q} , \mathbb{R} . (Mais pas sur \mathbb{C} : la relation \leq n'est même pas *définie* sur \mathbb{C} .) \subset est une relation d'ordre sur $\mathcal{P}(E)$. $|$ (« divise ») est une relation d'ordre sur \mathbb{N}^*

Attention : $<$ n'est pas une relation d'ordre, et $|$ n'est pas une relation d'ordre sur \mathbb{Z}^* . Pourquoi ?

Définition 6.1.3. Si R est une relation d'ordre sur E , on peut lui associer une relation *d'ordre strict*, définie par « xRy et $x \neq y$ ». (Remarque : une relation d'ordre strict n'est pas une relation d'ordre puisqu'elle n'est pas réflexive.)

Un ensemble E muni d'une relation d'ordre R est appelé ensemble ordonné. Par exemple, (\mathbb{R}, \leq) est un ensemble ordonné. S'il n'y a pas de confusion possible sur la relation d'ordre, on peut simplement dire que E est ordonné. (Cependant, il y a en général plusieurs relations d'ordre sur un ensemble.)

Dans ce cours, on notera souvent \leq_E au lieu de R une relation d'ordre sur E , même si la relation n'a rien à voir avec \leq sur \mathbb{R} .

6.1.1 Vocabulaire sur les ensembles ordonnés

Définition 6.1.4. Une relation d'ordre \leq_E sur un ensemble E est *totale* si :

$$\forall x, y \in E, x \leq_E y \text{ ou } y \leq x.$$

Exemples 6.1.5. La relation d'ordre \leq sur \mathbb{R} (ou \mathbb{N} , \mathbb{Q} , \mathbb{Z}) est totale. Par contre, \subset et $|$ ne sont pas totales. Par exemple, dans $\mathcal{P}(\mathbb{R})$, les parties \mathbb{R}_+ et $] -3, 6]$ ne sont pas comparables pour l'inclusion. Dans \mathbb{N}^* , les éléments 2 et 3 ne sont pas comparables pour la divisibilité.

Définition 6.1.6. Soient (E, \leq_E) et (F, \leq_F) des ensembles ordonnés, et $f : E \rightarrow F$. On dit que f est *croissante* si :

$$\forall x, y \in E, x \leq_E y \implies f(x) \leq_F f(y),$$

et *décroissante* si :

$$\forall x, y \in E, x \leq_E y \implies f(y) \leq_F f(x).$$

(Remarque : dans cette situation, il est crucial de distinguer les relations d'ordre sur E et sur F .)

Exemple 6.1.7.

1. L'application $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}, x \mapsto x + e^x$ est croissante pour l'ordre usuel \leq sur \mathbb{R} .
2. Si E est fini, l'application $f : \mathcal{P}(E) \rightarrow \mathbb{N}, A \mapsto \text{Card}(A)$ est croissante entre les ensembles ordonnés $(\mathcal{P}(E), \subset)$ et (\mathbb{N}, \leq) .
3. L'application $f : \mathcal{P}(E) \rightarrow \mathcal{P}(E), A \mapsto A^c$ est décroissante pour l'inclusion, car $A \subset B \implies B^c \subset A^c$.

Comme d'habitude, après les définitions viennent les propositions et théorèmes.

Proposition 6.1.8.

1. La composée de deux applications croissantes est croissante.
2. La composée de deux applications décroissantes est décroissante.
3. La composée d'une application décroissante et d'une décroissante est décroissante.

Démonstration. Application directe de la définition. □

6.1.2 Éléments remarquables dans un ensemble ordonné

Soit (E, \leq_E) un ensemble ordonné et $A \subset E$ une partie non vide. Un élément $m \in E$ est un *majorant* de A si $\forall a \in A, a \leq_E m$.

La partie A est *majorée* si elle possède des majorants.

La partie A possède un *plus grand élément* s'il existe un élément $m \in A$ qui majore A .

Exemple 6.1.9. La partie $[0, 1]$ est majorée dans \mathbb{R} car 1, 2, π sont des majorants. Elle possède un plus grand élément : 1.

La partie $[0, 1[$ est majorée dans \mathbb{R} (pour les mêmes raisons). Par contre, elle n'a pas de plus grand élément. Elle possède par contre un plus petit majorant réel, à savoir 1, mais il n'appartient pas à A .

Proposition 6.1.10. Si $A \subset E$ possède un plus grand élément, il est unique.

Démonstration. Soient m et m' deux plus grands éléments de A . Comme m est un plus grand élément, on a par définition $\forall x \in A, x \leq_E m$ et donc en particulier $m' \leq_E m$. De même, comme m' est un plus grand élément, on a $m \leq_E m'$. Par antisymétrie de la relation d'ordre, on a $m = m'$. □

Si A possède un plus grand élément (unique par ce qui précède), on le note $\max(A)$.

On définit de même la notion de minorant, de plus petit élément, et on montre que s'il existe un plus petit élément d'une partie A , il est unique. On le note alors $\min(A)$.

Définition 6.1.11. La partie $A \subset E$ admet une borne supérieure $s \in E$ ssi :

1. s est un majorant de A ;
2. tout majorant de A majore s .

(En d'autres termes, s est le plus petit des majorants de A , ou encore : l'ensemble de tous les majorants de A possède un plus petit élément s .)

Attention, contrairement à un plus grand élément, la borne supérieure de A , si elle existe, n'appartient pas forcément à A .

Exemple 6.1.12. La partie $A = [0, 1[\subset \mathbb{R}$ possède une borne supérieure à savoir 1.

Démonstration. D'une part, il est clair que 1 est un majorant de $[0, 1[$, c'est-à-dire que $\forall x \in [0, 1[, x \leq 1$.

Vérifions la seconde partie de la définition. Soit m un majorant de $[0, 1[$ et supposons par l'absurde que $m < 1$. On doit forcément avoir $0 \leq m$ puisque $0 \in [0, 1[$. Donc $m + \frac{1-m}{2} = 1 + \frac{m}{2} \in [0, 1[$.



Comme m est un majorant, on doit avoir $1 + \frac{m}{2} \leq m$, donc $1 + m \leq 2m$ donc $m \geq 1$, absurde. \square

Proposition 6.1.13. Si A possède une borne supérieure, elle est unique et on la note $\sup(A)$.

6.1.3 Ordre produit et ordre lexicographique

6.2 Relations d'équivalence

6.2.1 Définitions

6.2.2 Partition en classes d'équivalence