



Chapitre 1 Notions de logique, ensembles

■ Notions de logique

- ▶ **Vocabulaire** : « assertion » (ou « proposition mathématique »)

Il s'agit d'une phrase non ambiguë à laquelle est associée une valeur de vérité « vrai » ou « faux » dans le cadre d'une théorie axiomatique.

- ▶ **Définitions** :

- La négation ;
- Les connecteurs logiques (binaires) : il existe 16 connecteurs logiques binaires ; parmi ceux-ci on présente : « \wedge » (conjonction), « \vee » (disjonction), « \Rightarrow » et « \iff ».

- ▶ **Propriétés** : Le « ou » est inclusif; on peut écrire « $A \Rightarrow B$ » sous la forme « $(\neg A) \vee B$ ».

- ▶ **Définition** : La réciproque de l'implication « $A \Rightarrow B$ » est l'implication « $B \Rightarrow A$ » (à ne pas confondre ni avec la contraposée, ni avec la négation).

Propriétés (connecteurs logiques) :

- Associativité de « \wedge » et « \vee » ;
- Transitivité de « \Rightarrow » ;
- Distributivité de « \wedge » sur « \vee » ;
- Distributivité de « \vee » sur « \wedge ».

Propriétés (Lois de De Morgan) :

Soit A et B deux assertions. On a :

$$\begin{aligned} \neg(A \wedge B) &\iff (\neg A) \vee (\neg B) \\ \neg(A \vee B) &\iff (\neg A) \wedge (\neg B) \end{aligned}$$

■ Ensembles

- ▶ **Notations** : \in , \exists , \subset et \supset ; $x \in E \iff \{x\} \subset E$. Famille des parties d'un ensemble E : $\mathcal{P}(E)$; $F \subset E \iff F \in \mathcal{P}(E)$.
- ▶ **Définition (opérations usuelles dans $\mathcal{P}(E)$)** : Si A et B sont deux parties d'un ensemble E , on définit :
 - La réunion : $A \cup B = \{x \in E \mid (x \in A) \vee (x \in B)\}$;

- L'intersection : $A \cap B = \{x \in E \mid (x \in A) \wedge (x \in B)\}$;
- Le complémentaire dans E : $E \setminus A = \{x \in E \mid x \notin A\}$;
- La différence de A et B : $A \setminus B = A \cap (E \setminus B)$.

Chapitre 2 Divers modes de raisonnement

- ▶ **Raisonnement par déduction** : $A \Rightarrow B$, exemples.
- ▶ **Raisonnement par équivalence** : $A \iff B$, exemples.
- ▶ **Raisonnement par analyse-synthèse** : Propriétés du type « $\exists! x \in E, \mathcal{P}(x)$ », exemples.
- ▶ **Raisonnement par contraposée** : $(\neg B \Rightarrow \neg A) \iff (A \Rightarrow B)$, exemples.

- ▶ **Raisonnement par l'absurde** : $\neg A$ faux $\iff A$ vrai, exemples.
- ▶ **Raisonnement par disjonction de cas** : Si $(A_1 \wedge A_2 \dots) \iff A$, il suffit de montrer A_1, A_2, \dots , exemples.
- ▶ **Raisonnement par récurrence** : Cf. chapitre 6.

Chapitre 3 Applications

■ Correspondances, fonctions, applications

- ▶ **Définition** : Produit cartésien ; $\text{card}(E \times F) = \text{card}(E) + \text{card}(F)$; Produit cartésien d'un nombre fini d'ensembles.
- ▶ **Définition** : Une application f de E vers F est la donnée d'un triplet (E, F, Γ) où Γ est une partie de $E \times F$ telle que :
 $\forall (x, y, y') \in E \times F \times F, [(x, y) \in \Gamma \text{ et } (x, y') \in \Gamma] \implies y = y'$.
 On écrit $y = f(x)$ plutôt que $(x, y) \in \Gamma$.

- ▶ **Définition** : Une application est une fonction dont l'ensemble de définition est égal à l'ensemble de départ. En pratique, on tolère l'utilisation de « fonction » et « application » indifféremment. On note l'ensemble des fonctions de E dans F par $\mathcal{F}(E, F)$ ou F^E .
- ▶ **Définition** : L'ensemble de définition de f est :
 $\{x \in E \mid \exists y \in F, (x, y) \in \Gamma\}$.

- **Propriété :** Soient E et F deux ensembles non vides. Soit $u = (\Gamma, E, F)$ une application, avec Γ le graphe de u . On a alors : $\forall x \in E, \exists !y \in F, (x, y) \in \Gamma$.

- **Définition :** L'ensemble image de f , noté $\text{Im}(f)$ ou $f(E)$ est l'ensemble $\{f(x) \mid x \in E\}$.
 ► **Définition :** Restriction, prolongement.

■ Applications injectives, surjectives et bijectives

► Définitions :

- f injective : $\forall (x_1, x_2) \in E^2, x_1 \neq x_2 \implies f(x_1) \neq f(x_2)$.
- f surjective : $\forall y \in F, \exists x \in E, y = f(x)$.
- f bijective : injective et surjective.

► Propriété (caractérisation des injections) :

Les propositions suivantes sont équivalentes :

- (i) L'application f est injective.
- (ii) Tout élément de F possède au plus un antécédent par f .
- (iii) Pour tout $y \in F$, l'équation $f(x) = y$ possède au plus une solution.
- (iv) $\forall (x_1, x_2) \in E^2, (f(x_1) = f(x_2) \implies x_1 = x_2)$.

► Propriété (caractérisation des surjections) :

Les propositions suivantes sont équivalentes :

- (i) L'application f est surjective.
- (ii) Tout élément de F a au moins un antécédent par f .
- (iii) Pour tout $y \in F$, l'équation $f(x) = y$ possède au moins une solution.
- (iv) $\forall y \in F, \exists x \in E, y = f(x)$.

► Propriété (caractérisation des bijections) :

Les propositions suivantes sont équivalentes :

- (i) L'application f est bijective.
- (ii) Tout élément de F a un et un seul antécédent par f .
- (iii) Pour tout $y \in F$, l'équation $f(x) = y$ possède une unique solution.
- (iv) $\forall u \in F, \exists !x \in E, y = f(x)$.

■ Composition des applications

► Définition :

L'application $h : E \rightarrow G$ définie par : $\forall x \in E, h(x) = g[f(x)]$ est appelée *composée* de f par g et notée $g \circ f$.

► Définition et propriétés :

La composition des applications « \circ » est une opération associative mais non commutative en général : $(f \circ g) \circ h = f \circ (g \circ h)$ mais $g \circ f \neq f \circ g$ en général.

► Exemple :

Composition des translations de vecteur du plan.

Propriétés (composée d'injections, surjections, bijections) : Soient $f \in F^E$ et $g \in G^F$.

1. Si f et g sont injectives, alors $g \circ f$ est injective.
2. Si f et g sont surjective, alors $g \circ f$ est surjective.
3. Si f et g sont bijectives, alors $g \circ f$ est bijective.

Propriétés : Soient $f : E \rightarrow F$ et $g : F \rightarrow G$ des applications.

1. Si $g \circ f$ est injective, alors f est injective.
2. Si $g \circ f$ est surjective, alors g est surjective.

■ Application réciproque

► Définition :

Application identité $\text{Id}_E : E \rightarrow E$: $\text{Id}_E(x) = x$.

Définition (caractérisation de la fonction réciproque) : Si $f : E \rightarrow F$ est une application, les deux propriétés suivantes sont équivalentes :

1. f est bijective de E sur F ;
2. Il existe une application $g : F \rightarrow E$ telle que $g \circ f = \text{Id}_E$ et $f \circ g = \text{Id}_F$.

De plus, si l'une des conditions est vérifiée, la fonction g est unique et est appelée *fonction réciproque de f* , notée f^{-1} .

Remarque : On peut avoir $f \circ g = \text{Id}_F$ ou $g \circ f = \text{Id}_E$ sans que f et g soient bijectives.

► Corollaire :

1. Si $f \in F^E$ est bijective, alors u^{-1} est bijective et $(u^{-1})^{-1} = u$.
2. Si $u \in F^E$ et $v \in G^F$ sont deux applications bijectives, alors $(v \circ u)^{-1} = u^{-1} \circ v^{-1}$.

■ Images directes et réciproques d'ensembles

► Définition (Images directe et réciproque d'une partie) :

Si $f \in F_E$, on définit :

- $\forall A \in \mathcal{P}(E), f(A) = \{f(x) \mid x \in A\}$.
- $\forall B \in \mathcal{P}(F), f^{-1}(B) = \{x \in E \mid f(x) \in B\}$.

► Propriétés :

Soit $f : E \rightarrow F$ une application et soient A et B deux parties de E , C et D deux parties de F .
 On a alors :

1. $f(A \cup B) = f(A) \cup f(B)$.
2. $f(A \cap B) \subset f(A) \cap f(B)$.
3. $f^{-1}(C \cap D) = f^{-1}(C) \cap f^{-1}(D)$.
4. $f^{-1}(C \cup D) = f^{-1}(C) \cup f^{-1}(D)$.
5. $f(f^{-1}(C)) \subset C$.
6. $f^{-1}(f(A)) \supseteq A$.

À suivre...

Chapitre 21 Divisibilité dans \mathbb{Z}

■ Diviseurs d'un entier relatif

- **Définition (Divisibilité dans \mathbb{Z})** : Soient $a \in \mathbb{Z}$ et $b \in \mathbb{Z}^*$. On dit que b divise a si et seulement si

$$\exists k \in \mathbb{Z}, \quad a = b \times k.$$

Lorsque b divise a , on note $b|a$.

L'ensemble des diviseurs de a , noté $\text{Div}(a)$ est défini par

$$\text{Div}(a) = \{b \in \mathbb{Z}^* \mid b|a\} = \{b \in \mathbb{Z}^* \mid a = b \times k, k \in \mathbb{Z}\}.$$

► **Remarque :**

- Lorsque b divise a , on dit aussi que b est un diviseur de a , ou bien, a est un multiple de b .
- $\text{Div}(0) = \mathbb{Z}$.
- Par contre, aucun entier relatif non nul est divisible par 0.

- **Exemple** : L'ensemble des entiers relatifs n tels que $2n+5$ divise 7 est $\{-6, -3, -2, 1\}$.

- **Propriété** : Quel que soit $a \in \mathbb{Z}$, $\text{Div}(a) = \text{Div}(|a|)$.

- **Remarque** : Cette proposition permet, dans la recherche des diviseurs d'un entier relatif a , de restreindre la détermination de $\text{Div}(a)$ à $\text{Div}(|a|)$, avec $|a| \in \mathbb{N}$.

- **Algorithme (de recherche brute des diviseurs d'un entier naturel)** :

```
1 def diviseurs(n) :
2     L=[]
3     for k in range(1,n+1) :
4         if n%k==0 :
5             L.append(k)
6     return L
```

Propriété : La relation « divise » est une relation d'ordre dans \mathbb{Z} , c'est-à-dire qu'elle est réflexive, antisymétrique et transitive.

■ Division euclidienne dans \mathbb{Z}

- **Axiome du plus petit élément** : Toute partie B non vide de \mathbb{N} admet un plus petit élément p , ce qui signifie

$$\exists p \in \mathbb{N}, \forall b \in B, \quad (b \geq p) \wedge (p \in B).$$

Lemme d'Archimède : Quels que soient les entiers naturels x et y , avec $x \neq 0$, il existe un entier naturel n tel que

$$nx > y.$$

► **Remarques** :

- Ce résultat est encore vrai lorsque $(x,y) \in \mathbb{R}_+^* \times \mathbb{R}_+$. On dit que \mathbb{R} est archimédien.
- Ce lemme est faux si x est nul.

Propriété (Division euclidienne dans \mathbb{N}) : Quels que soient $a \in \mathbb{N}$ et $b \in \mathbb{N}^*$, il existe un couple unique d'entiers naturels (q,r) satisfaisant à

$$a = bq + r, \quad \text{avec } 0 \leq r < b.$$

► **Remarques** :

- La relation $|$ est une relation d'ordre partiel car deux entiers relatifs ne sont pas toujours comparables pour $|$, par opposition à la relation \leq qui est d'ordre total dans \mathbb{Z} .

- Nous avons $\{-1,1, -a,a\} \subset \text{Div}(a)$.

- **Propriété (Lien entre $|$ et \leq)** : Soient a et b deux entiers relatifs non nuls.

$$b|a \implies |b| \leq |a|.$$

► **Remarques** :

- Lorsque $b = 0$, la proposition est fausse.
- La réciproque est évidemment fausse.

- **Propriété (Divisibilité et combinaison linéaire)** : Soient a, b et c trois entiers relatifs avec $c \neq 0$. Si $c|a$ et $c|b$, alors, quels que soient les entiers relatifs α et β ,

$$c|\alpha a + \beta b.$$

En particulier, nous avons : $c|a+b$ et $c|a-b$.

- **Remarque** : Comme souvent en arithmétique, la réciproque de cette proposition est fausse.

- **Exemple** : L'ensemble des diviseurs communs aux deux entiers relatifs $a = 6n+5$ et $b = 7n+6$, avec $n \in \mathbb{Z}$, est

$$\text{Div}(a) \cap \text{Div}(b) = \{-1,1\}.$$

Dans ce cas, on dit que a et b sont premiers entre eux.

- **Propriété** : Soient $a \in \mathbb{Z}^*$, $b \in \mathbb{Z}$ et $c \in \mathbb{Z}$. Si $a|b$, alors $a|bc$ et $ac|bc$.

► **Remarques** :

- La réciproque de $(a|b \implies a|bc)$ est fausse, ce qui est justifié par le contre exemple qui suit.
Pour $a = 6$, $b = 4$ et $c = 9$, nous avons $6|4 \times 9$ mais 6 ne divise ni 4, ni 9.
- Lorsque $c \in \mathbb{Z}^*$, la réciproque de $(a|b \implies ac|bc)$ est vraie.

- **Remarque** : La double inégalité $0 \leq r < b$ signifie également

$$r \in \{0,1,2,\dots,b-1\}, \quad \text{c'est-à-dire } r \in [0,b-1].$$

- **Exemple** : La division euclidienne d'un entier naturel par 2 induit une partition de \mathbb{N} qui est constituée par l'union disjointe de l'ensemble des entiers naturels pairs avec l'ensemble des entiers naturels impairs.

- **Remarque** : Plus généralement, lors de la division euclidienne d'un entier naturel n par un entier naturel b non nul, nous définissons une partition de \mathbb{N} en b sous-ensembles disjoints deux à deux, qui sont classifiés selon leur reste dans cette division par b .

- **Exemple** : Nous montrons, quel que soit l'entier naturel n , que l'entier

$$u_n = n(n+1)(2n+1)$$

est divisible par 3, puis par 6.

► **Algorithme** Nous disposons en Python des procédures suivantes :

- $a \% b$ qui restitue le reste de la division euclidienne de a par b .
- $a // b$ qui restitue le quotient de la division euclidienne de a par b .

Ceci permet de proposer la fonction Python

```
1 def divisioneucli(a,b) :  
2     q=a//b  
3     r=a%b  
4     return(q,r)
```

Propriété (Division d'un entier relatif par un entier naturel non nul) : Quels que soient $a \in \mathbb{Z}$ et $b \in \mathbb{N}^*$, il existe un couple unique d'entiers relatifs (q,r) satisfaisant à

$$a = bq + r, \text{ avec } 0 \leq r < b.$$

► **Exemple** : Nous prouvons que tout entier relatif n qui n'est pas divisible par 3 a un carré qui donne 1 pour

reste dans sa division euclidienne par 3.

Propriété (Division d'un entier relatif par un entier relatif non nul) : Quels que soient $a \in \mathbb{Z}$ et $b \in \mathbb{Z}^*$, il existe un couple unique d'entiers relatifs (q,r) satisfaisant à

$$a = bq + r, \text{ avec } 0 \leq r < |b|.$$

► **Exemple** : La division euclidienne de -202 par -13 restitue un quotient $q = 16$ et un reste $r = 6$.

► **Remarque** : La double inégalité $0 \leq r < |b|$ signifie également

$$r \in \{0, 1, 2, \dots, |b| - 1\}, \text{ c'est-à-dire } r \in [0, |b| - 1].$$

► **Exemple** : Tout entier relatif a , dans la division euclidienne par -4 , peut s'écrire par disjonction

$$(a = -4q) \vee (a = -4q + 1) \vee (a = -4q + 2) \vee (a = -4q + 3),$$

avec $q \in \mathbb{Z}$, ce qui définit une partition de \mathbb{Z} .

► Pour les parties désignées par un symbole

Propriété : une démonstration est exigible.

- Une colle comporte une question de cours choisie *a priori* parmi celles indiquées dans le programme de la semaine en cours (normalement, ± 15 min).
- Un cours non appris sera sanctionné par une note inférieure à 10 (même si l'exercice est fait correctement!).