

## TD 5 Applications, relations

### 1 Exercices corrigés en classe

**Exercice 1.** *Quelques exemples.* ●○○

1. Déterminer l'image de  $] -1, 3]$  et l'image réciproque de  $[-1, 2]$  par l'application  $x \mapsto \sqrt{x^2 + x + 1}$ .  
On ne demande pas de justification.

#### Correction

On étudie la fonction  $f : x \mapsto x^2 + x + 1$ , dérivable sur  $\mathbb{R}$  de dérivée  $x \mapsto 2x + 1$ , s'annulant en  $-\frac{1}{2}$ . Donc  $f$  est décroissante sur  $] -\infty, -\frac{1}{2}]$  et croissante sur  $[-\frac{1}{2}, +\infty[$ .  
Or,  $f(] -1, 3]) = f\left(\left[-1, -\frac{1}{2}\right] \cup \left[-\frac{1}{2}, 3\right]\right) = f\left(\left[-1, -\frac{1}{2}\right]\right) \cup f\left(\left[-\frac{1}{2}, 3\right]\right)$  (cette égalité est démontrée dans l'exercice 5). Par continuité et stricte monotonie de  $f$  sur  $]-1, -\frac{1}{2}]$  (i.e. par le TVI strictement monotone), on obtient  $f\left(\left[-1, -\frac{1}{2}\right]\right) = \left[\frac{3}{4}, 1\right]$ .  
De même,  $f\left(\left[-\frac{1}{2}, 3\right]\right) = \left[\frac{3}{4}, 13\right]$ . Donc  $f(] -1, 3]) = \left[\frac{3}{4}, 13\right]$ .

2. Soit  $f = \sin$ ,  $I = \left[\frac{1}{2}, \frac{3}{2}\right]$ . Déterminer  $f(f^{-1}(I))$ .
3. Soit  $g$  l'application exponentielle de  $\mathbb{C}$  dans  $\mathbb{C}$ . Déterminer  $g^{-1}\left(g\left(\left\{0, i\frac{\pi}{2}\right\}\right)\right)$ .

**Exercice 2.** *Images, images réciproques.* ●●○○ Soient  $E$  et  $F$  deux ensembles,  $f : E \rightarrow F$  une application,  $A, A'$  des parties de  $E$ ,  $B, B'$  des parties de  $F$ . Comparer les ensembles suivants (y a-t-il inclusion ? inclusion réciproque ? égalité ?) Dans les cas où il n'y a pas, en général, égalité, exhiber un contre-exemple.

1.  $f^{-1}(f(A))$  et  $A$ .

#### Correction

**Cours :** on a  $A \subset f^{-1}(f(A))$ .

2.  $f(f^{-1}(B))$  et  $B$ .

#### Correction

**Cours :** on a  $f(f^{-1}(B)) \subset B$ .

3.  $f(A \cap A')$  et  $f(A) \cap f(A')$ .

#### Correction

On montre qu'on a l'inclusion directe.

**Soit**  $y \in f(A \cap A')$ . Alors on dispose de  $x$  dans  $A \cap A'$  tel que  $y = f(x)$ . Comme  $x \in A$  et

$x \in A'$ ,  $f(x) \in f(A)$  et  $f(x) \in f(A')$  donc  $f(x) \in f(A) \cap f(A')$  donc  $y \in f(A) \cap f(A')$ .  
D'où l'inclusion directe.  
L'inclusion réciproque est fautive en général : on prend  $f : x \mapsto x^2$ ,  $A = [-2, -1]$  et  $A' = [1, 2]$ . On sait que  $A \cap A' = \emptyset$  donc  $f(A \cap A') = \emptyset$ , mais  $f(A) \cap f(A') = [1, 4] \cap [1, 4] = [1, 4]$ .  
Donc on a l'inclusion directe, mais pas réciproque.

4.  $f(A \cup A')$  et  $f(A) \cup f(A')$ .

**Correction**

On montre qu'il y a égalité.

$\subset$  Soit  $y \in f(A \cup A')$ . Alors on dispose de  $x \in A \cup A'$  tel que  $y = f(x)$ . Si  $x \in A$ , alors  $y \in f(A) \subset f(A) \cup f(A')$ . Si  $x \in A'$ , alors  $y \in f(A') \subset f(A) \cup f(A')$ . Dans tous les cas  $y \in f(A) \cup f(A')$ . D'où l'inclusion directe.

$\supset$  Soit  $y \in f(A) \cup f(A')$ . Si  $y \in f(A)$ , on dispose de  $x$  dans  $A$  tel que  $y = f(x)$ . Donc  $x \in A \cup A'$  donc  $y \in f(A \cup A')$ . De même si  $y \in f(A')$ . D'où l'inclusion réciproque.

D'où l'égalité !

5.  $f^{-1}(B \cap B')$  et  $f^{-1}(B) \cap f^{-1}(B')$ .

**Correction**

On montre qu'il y a égalité. Soit  $x \in E$ . Alors

$$x \in f^{-1}(B \cap B') \Leftrightarrow f(x) \in B \cap B' \Leftrightarrow f(x) \in B \text{ et } f(x) \in B' \Leftrightarrow x \in f^{-1}(B) \cap f^{-1}(B')$$

6.  $f^{-1}(B \cup B')$  et  $f^{-1}(B) \cup f^{-1}(B')$ .

**Correction**

On montre qu'il y a égalité. On montre qu'il y a égalité. Soit  $x \in E$ . Alors

$$x \in f^{-1}(B \cup B') \Leftrightarrow f(x) \in B \cup B' \Leftrightarrow f(x) \in B \text{ ou } f(x) \in B' \Leftrightarrow x \in f^{-1}(B) \cup f^{-1}(B')$$

**Exercice 3.** ●●● Soient  $E$  et  $F$  deux ensembles,  $f : E \rightarrow F$  une application.

1. Déterminer une condition nécessaire et suffisante sur  $f$  pour que  $\forall A \subset E$ ,  $f^{-1}(f(A)) = A$ .

**Correction**

On montre que  $\forall A \subset E$ ,  $f^{-1}(f(A)) = A$  si et seulement si  $f$  est injective.

$\Rightarrow$  Supposons  $\forall A \subset E$ ,  $f^{-1}(f(A)) = A$ . Montrons que  $f$  est injective. **SOIENT**  $x$  et  $x'$  dans  $E$  tels que  $f(x) = f(x')$ .

*Il faut passer des ensembles en éléments !*

$$\text{Alors } f(\{x\}) = f(\{x'\}).$$

Donc  $f^{-1}(f(\{x\})) = f^{-1}(f(\{x'\}))$ .  
Donc, par hypothèse,  $\{x\} = \{x'\}$ . Donc  $x = x'$ .  
Donc  $f$  est injective.

⇐ Supposons  $f$  injective, et montrons que  $\forall A \subset E, f^{-1}(f(A)) = A$ . Soit  $A \subset E$ . On sait déjà que  $A \subset f^{-1}(f(A))$ . Montrons l'inclusion réciproque, i.e.  $f^{-1}(f(A)) \subset A$ .  
**Soit**  $x$  dans  $f^{-1}(f(A))$ . Alors  $f(x) \in f(A)$ , i.e. on dispose de  $x' \in A, f(x) = f(x')$ . Par injectivité de  $f, x = x'$ . Donc  $x \in A$ . D'où l'inclusion réciproque et l'égalité!

2. Déterminer une condition nécessaire et suffisante sur  $f$  pour que  $\forall B \subset F, f(f^{-1}(B)) = B$ .

### Correction

On montre que  $\forall B \subset F, f(f^{-1}(B)) = B$  si et seulement si  $f$  est surjective.

⇒ Supposons  $\forall B \subset F, f(f^{-1}(B)) = B$ . Montrons que  $f$  est surjective. Soit  $y$  dans  $B$ . On sait que  $f(f^{-1}(\{y\})) = \{y\}$ . En particulier, cela signifie que  $f^{-1}(\{y\})$  n'est pas vide. Posons  $x$  un élément de  $f^{-1}(\{y\})$ . Alors  $f(x) \in \{y\}$ . Donc  $f(x) = y$ . Donc  $f$  est surjective.

⇐ Supposons  $f$  surjective. Soit  $B \subset F$ . Montrons que  $f(f^{-1}(B)) = B$ . On sait par le cours que l'inclusion directe est vraie. Montrons l'inclusion réciproque. **Soit**  $y$  dans  $B$ . Par surjectivité de  $f$ , on dispose de  $x$  dans  $E$  telle que  $f(x) = y$ . Donc  $x \in f^{-1}(B)$ . Donc  $f(x) \in f(f^{-1}(B))$  donc  $y \in f(f^{-1}(B))$ . D'où l'inclusion réciproque. D'où l'implication réciproque!

3. Déterminer une condition nécessaire et suffisante sur  $f$  pour que  $\forall (A, A') \in \mathcal{P}(E)^2, f(A \cap A') = f(A) \cap f(A')$ .

**Exercice 4.** ●●○ Soient  $E$  un ensemble et  $f : E \rightarrow E$  telle que  $f \circ f \circ f = f$ .  
Montrer que  $f$  est injective si, et seulement si,  $f$  est surjective.

### Correction

Il s'agit de montrer une équivalence, faisons-le par double implication.

**Si  $f$  est injective,** montrons qu'elle est surjective.

Soit  $y$  dans  $E$ . Alors  $f \circ f \circ f(y) = f(y)$ , i.e.

$$f(f \circ f(y)) = f(y).$$

Par injectivité de  $f, f \circ f(y) = y$ , donc  $f(y)$  est un antécédent de  $y$  par  $f$ . Donc  $f$  est surjective.

**Si  $f$  est surjective,** montrons qu'elle est injective.

Soient  $x$  et  $x'$  dans  $E$  tels que  $f(x) = f(x')$ .  $f$  est surjective, on dispose donc de  $z$  et  $z'$  tels que  $x = f(z)$  et  $x' = f(z')$ . Alors

$$f \circ f(z) = f \circ f(z'),$$

a fortiori

$$f \circ f \circ f(z) = f \circ f \circ f(z'),$$

soit

$$f(z) = f(z'),$$

d'où  $x = x'$ . Donc  $f$  est injective.

**Exercice 5.** ●●● On veut montrer qu'il n'existe pas de surjection d'un ensemble dans l'ensemble de ses parties.

1. Pourquoi est-ce évident dans le cas d'un ensemble fini ?

**Correction**

Si  $E$  est un ensemble fini, alors  $\mathcal{P}(E)$  possède  $2^{|E|}$  éléments, toujours strictement supérieur à  $|E|$ , donc il n'existe pas de surjection de  $E$  dans  $\mathcal{P}(E)$ .

2. Soit  $E$  un ensemble,  $f : E \rightarrow \mathcal{P}(E)$ . On pose

$$A = \{x \in E, x \notin f(x)\}.$$

Montrer que  $A$  n'a pas d'antécédent par  $f$  et conclure.

**Correction**

Raisonnons par l'absurde.

Supposons que  $A$  ait un antécédent par  $f$ , nommons-le  $a$ .

**Si**  $a \in A$ , alors, comme  $A = f(a)$ , on a  $a \in f(a)$ , absurde.

**Si**  $a \notin A$ , alors, comme  $A = f(a)$ , on a  $a \notin f(a)$ , donc  $a \in A$ , absurde.

Donc  $A$  n'a pas d'antécédent par  $f$ .

**Remarque :** ce genre de raisonnement est associé au paradoxe dit du barbier.

(extrait wikipedia)

Le conseil municipal d'un village arrête une ordonnance qui enjoint à son barbier (masculin) de raser tous les habitants masculins du village qui ne se rasent pas eux-mêmes et seulement ceux-ci.

Le barbier, qui est bien un habitant du village, n'a pas pu respecter cette règle car :

- (a) S'il se rase lui-même, il enfreint la règle, car le barbier ne peut raser que les hommes qui ne se rasent pas eux-mêmes ;
- (b) S'il ne se rase pas lui-même - qu'il se fasse raser ou qu'il conserve la barbe - il est en tort également, car il a la charge de raser les hommes qui ne se rasent pas eux-mêmes.

Cette règle est donc inapplicable.

Ce n'est pas un paradoxe, c'est juste qu'on a supposé l'existence d'un objet qui n'existait pas ! Nous sommes dans le cadre de l'exercice avec  $f$  l'application qui à un homme associe **l'ensemble des personnes rasées par cet homme**. L'ensemble  $A$  est donc l'ensemble des hommes  $h$  qui n'appartiennent pas à  $f(h)$ , donc qui ne se rasent pas eux-mêmes.

**Exercice 6.** ●○○ Soit  $\mathcal{R}$ , la relation binaire définie sur  $\mathbb{R}$  par  $x\mathcal{R}y$  si et seulement si  $x.e^{-y} = y.e^{-x}$ . Montrer que  $\mathcal{R}$  est bien une relation d'équivalence sur  $\mathbb{R}$  et préciser, selon les valeurs de  $x$ , le nombre d'éléments de la classe d'équivalence de  $x$ .

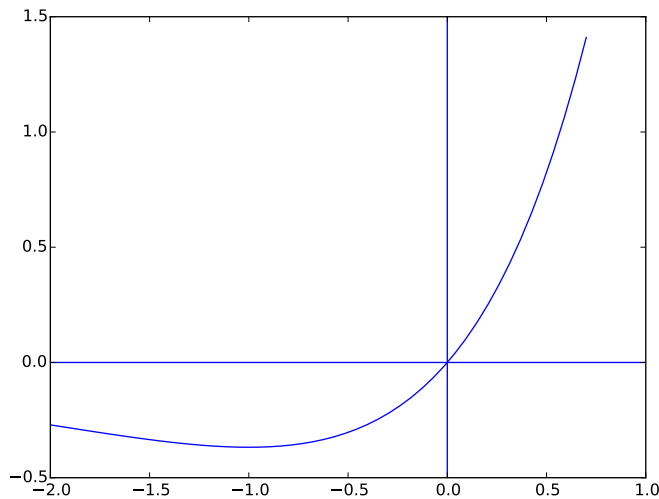
**Correction**

Posons  $f$  la fonction définie pour tout  $t$  de  $\mathbb{R}$  par  $f(t) = te^t$ . Alors pour tous  $x$  et  $y$  dans  $\mathbb{R}$ ,  $x\mathcal{R}y$  si et seulement si  $f(x) = f(y)$ . On montre que cette relation est une relation d'équivalence.

- Réflexivité. Soit  $x$  dans  $\mathbb{R}$ . Alors  $f(x) = f(x)$  donc  $x\mathcal{R}x$ .
- Symétrie. Soient  $x$  et  $y$  dans  $\mathbb{R}$  tels que  $f(x) = f(y)$ . Alors  $f(y) = f(x)$  donc  $y\mathcal{R}x$ .
- Soient  $x, y$  et  $z$  dans  $\mathbb{R}$  tels que  $x\mathcal{R}y$  et  $y\mathcal{R}z$ . Alors  $f(x) = f(y)$  et  $f(y) = f(z)$ . Donc  $f(x) = f(z)$  donc  $x\mathcal{R}z$ .

Donc  $\mathcal{R}$  est une relation d'équivalence.

Pour les classes d'équivalence, on étudie la fonction  $f$ . J'en donne le graphe et la réponse finale :



La fonction est décroissante avec un minimum en  $-1$ . On conclut que

- si  $x \geq 0$  ou  $x = -1$ ,  $\bar{x}$  n'a qu'un élément :  $\bar{x} = \{x\}$ .
- sinon,  $\bar{x}$  a deux éléments.

**Exercice 7.** ●●○ On considère  $(\mathcal{P}(\mathbb{R}), \subset)$ . Soit

$$E = \left\{ \left[ -\frac{1}{n}, n \right], n \in \mathbb{N}^* \right\}.$$

L'ensemble  $E$  possède-t-il un plus grand élément ? Possède-t-il un majorant ?

**Correction**

Montrons que  $E$  ne possède pas de plus grand élément. Supposons qu'il en possède un. Alors on aurait un  $n_0$  entier tel que

$$\forall A \in E, A \subset \left[ -\frac{1}{n_0}, n_0 \right].$$

En particulier,

$$[-1, 1] \subset \left[ -\frac{1}{n_0}, n_0 \right].$$

Donc, nécessairement,  $n_0 = 1$  car  $\forall k > 1, -1 < \frac{-1}{n_0}$ . Mais  $\left[-\frac{1}{2}, 2\right]$  n'est pas inclus dans  $[-1, 1]$ , contradiction.  
En revanche,  $E$  possède des majorants.  $\mathbb{R}$  par exemple.

**Stratégie** Les exercices corrigés en classe sont fondamentaux (je ne le répèterai jamais assez). Dans ce TD, **ne sautez pas de questions sans les avoir rédigées**. Ensuite, il faut faire

- des exercices sur les applications : faire par exemple l'exercice 9. Ensuite faire l'exercice 11 pour manipuler des images de fonctions. Enfin, faire le 13, **fondamental**.
- un peu d'exercices sur les relations : l'exercice 20 (1.) et le début du problème 25.
- pour aller plus loin, des exercices très intéressants comme le 14, le 15 ou le 25

## 2 Applications

**Exercice 8.** *Un exemple arithmétique.* ●●○ Soit  $\varphi$  l'application de  $\mathbb{N}$  dans  $\mathbb{N}$  telle que pour tout  $n$  dans  $\mathbb{N}$ ,  $\varphi(n)$  est le reste de la division euclidienne de  $n$  par 3.

1. La fonction  $\varphi$  est-elle injective ?

**Correction**

Non ! En effet,  $\varphi(3) = 0 = \varphi(0)$  mais  $3 \neq 0$ .

2. Déterminer  $\varphi^{-1}(\{1\})$ .

**Correction**

$\varphi^{-1}(\{1\}) = \{n \in \mathbb{N}, \varphi(n) = 1\} = \{3k + 1, k \in \mathbb{Z}\}$ .

Soit  $\psi$  l'application de  $\mathbb{N}^2$  dans  $\mathbb{N}$  définie par

$$\forall (n, m) \in \mathbb{N}^2, \psi(n, m) = 2^n 3^m.$$

3. Démontrer que  $\psi$  est injective.

**Correction**

Soient  $(n, m)$  et  $(n', m')$  dans  $\mathbb{N}^2$  tels que  $\psi(n, m) = \psi(n', m')$ . Alors  $2^n 3^m = 2^{n'} 3^{m'}$ . Alors, si  $n \neq n'$ , on peut supposer  $n' > n$ . Donc  $3^m = 2^{n'-n} 3^{m'}$ . Or, 2 divise  $2^{n'-n} 3^{m'}$  donc 2 divise  $3^m$ , absurde ! Donc  $n = n'$  et  $m = m'$ . Donc  $\psi$  est injective.

4.  $\psi$  est-elle surjective ?

**Correction**

$\psi$  n'est en revanche pas surjective car, par exemple 5 n'a pas d'antécédent.

**Exercice 9.** Deux exemples complexes. ●●○

1. Soit  $\theta \in \mathbb{R}$ , et  $\varphi_\theta$  l'application de  $\mathbb{N}$  dans  $\mathbb{C}$  définie par

$$\forall n \in \mathbb{N}, \varphi_\theta(n) = (e^{i\theta})^n.$$

Démontrer que  $\varphi_\theta$  n'est pas injective si, et seulement si  $\frac{\theta}{2\pi} \in \mathbb{Q}$ .

**Correction**

**Supposons** que  $\frac{\theta}{2\pi} \in \mathbb{Q}$  et montrons que  $\varphi_\theta$  n'est pas injective.

$\frac{\theta}{2\pi} \in \mathbb{Q}$  donc on dispose de  $p$  et  $q$  deux entiers tels que  $\theta = 2\pi \frac{p}{q}$ . **Posons**  $n = 0$  et  $m = 2q$ . Alors  $n \neq m$ , mais  $\varphi_\theta(n) = 1$  et  $\varphi_\theta(m) = e^{2iq\pi} = 1$ . Donc  $\varphi_\theta$  n'est pas injective.

**Supposons** que  $\varphi_\theta$  n'est pas injective. Donc on dispose de  $n$  et  $m$  dans  $\mathbb{N}$  tels que  $n \neq m$  et  $\varphi_\theta(n) = \varphi_\theta(m)$ , i.e.

$$e^{in\theta} = e^{im\theta}.$$

Donc on dispose de  $p$  dans  $\mathbb{Z}$  tel que  $n\theta = m\theta + 2p\pi$ . Donc

$$\theta = \frac{2p\pi}{n - m},$$

i.e.  $\frac{\theta}{2\pi} \in \mathbb{Q}$ . D'où l'implication réciproque et l'équivalence.

2. Soient  $P$  le demi-plan complexe  $\{x \in \mathbb{C}, \Im m(z) > 0\}$  et  $D$  le disque unité ouvert  $\{z \in \mathbb{C}, |z| < 1\}$ . Soit  $\varphi$  l'application de  $\mathbb{C} \setminus \{-i\}$  dans  $\mathbb{C}$  définie par

$$\forall z \in \mathbb{C} \setminus \{-i\}, \varphi(z) = \frac{z - i}{z + i}.$$

Montrer que  $\varphi$  réalise une bijection de  $P$  sur  $D$ .

**Correction**

Montrons déjà que  $\varphi(P) \subset D$ .

Soit  $z$  dans  $\varphi(P)$ . Alors on dispose de  $x \in P$  tel que  $z = \varphi(x)$ . Alors

$$z = \frac{x - i}{x + i}.$$

Écrivons  $x = a + ib$ , avec  $a$  réel et  $b > 0$ . Alors

$$\begin{aligned} |z|^2 &= \frac{|x - i|^2}{|x + i|^2} \\ &= \frac{a^2 + (b - 1)^2}{a^2 + (b + 1)^2} \\ &= \frac{a^2 + b^2 + 1 - 2b}{a^2 + b^2 + 1 + 2b}. \end{aligned}$$

Or, comme  $b > 0$ ,  $a^2 + b^2 + 1 - 2b < a^2 + b^2 + 1 + 2b$ . Étant donné que  $a^2 + b^2 + 1 - 2b > 0$ , on en déduit que  $\frac{a^2 + b^2 + 1 - 2b}{a^2 + b^2 + 1 + 2b} < 1$ , donc que  $|z|^2 < 1$ , donc que  $z \in D$ .

Donc  $\varphi(P) \subset D$ .

Soit maintenant  $z$  un complexe de  $D$ , résolvons l'équation en  $x$  :  $\varphi(x) = z$ . L'équation s'écrit

$$z = \frac{x - i}{x + i},$$

donc  $z(x + i) = x - i$ , soit

$$x(z - 1) = -iz - i,$$

ou encore, puisque  $z \neq 1$  ( $|z| < 1$ ),

$$x = \frac{-iz - i}{z - 1} = i \frac{1 + z}{1 - z}.$$

L'unicité de la solution assure l'injectivité de  $\varphi$ . Vérifions maintenant que le  $x$  trouvé est bien dans  $P$ . Écrivons  $z = \alpha + i\beta$ . Alors

$$\begin{aligned} x &= i \frac{1 + \alpha + i\beta}{1 - \alpha - i\beta} \\ &= i \frac{(1 + \alpha + i\beta)(1 - \alpha + i\beta)}{(1 - \alpha)^2 + \beta^2} \\ &= i \frac{1 - \alpha^2 - \beta^2 + 2i\beta}{(1 - \alpha)^2 + \beta^2} \\ &= -\frac{2\beta}{(1 - \alpha)^2 + \beta^2} + i \frac{1 - \alpha^2 - \beta^2}{(1 - \alpha)^2 + \beta^2}. \end{aligned}$$

Or,  $1 - \alpha^2 - \beta^2 > 0$  car  $z \in D$ , donc  $\Im(x) > 0$ . D'où le résultat.

**Exercice 10.** Applications linéaires. ●●○

1. Les applications suivantes sont-elles injectives? surjectives? bijectives?

(a)  $f : \begin{cases} \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^2 \\ (x, y) \mapsto (2x + y, y - x) \end{cases}$

(c)  $f : \begin{cases} \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^3 \\ (x, y) \mapsto (x + 2y, y - x, x + y) \end{cases}$

(b)  $f : \begin{cases} \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R} \\ (x, y) \mapsto x + y \end{cases}$

(d)  $f : \begin{cases} \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}^3 \\ (x, y, z) \mapsto (x + y + z, y - x + 2z, 2y + 3z) \end{cases}$

**Correction**

On résout le premier exemple :

● **Injectivité.** Soient  $(x, y)$  et  $(x', y')$  tels que  $f(x, y) = f(x', y')$ . Alors

$$\begin{cases} 2x + y = 2x' + y' \\ y - x = y' - x' \end{cases}$$

On effectue  $L_2 \leftarrow L_2 - L_1$  et on obtient  $\begin{cases} 2x + y = 2x' + y' \\ -3x = -3x' \end{cases}$ , donc  $x = x'$ , et donc  $y = y'$  dans la première équation. Donc  $f$  est injective!



- **Surjectivité.** Soit  $(a, b)$  dans  $\mathbb{R}^2$ . On cherche  $(x, y)$  dans  $\mathbb{R}^2$  tels que  $f(x, y) = (a, b)$ , i.e.

$$\begin{cases} 2x + y = a \\ y - x = b \end{cases}$$

On effectue  $L_2 \leftarrow L_2 - L_1$  et on obtient  $\begin{cases} 2x + y = a \\ -3x = b - a \end{cases}$ . Donc  $x = \frac{a - b}{3}$  et donc  $y = a - 2x = \frac{a + 2b}{3}$ . Donc  $f$  est surjective.

- Donc  $f$  est bijective.

**Remarque :** en fait il suffit de résoudre le second système, et de regarder si on a au moins/au plus/exactement une solution.

Résoudre à chaque fois un système linéaire inhomogène, comme fait pour le premier exemple. La première application est bijective, la seconde surjective non injective, la troisième injective non surjective et la quatrième ni l'une ni l'autre.

**Exercice 11.** ●●○ Soient  $E$  et  $F$  deux ensembles,  $f : E \rightarrow F$  une application,  $A$  une partie de  $E$  et  $B$  une partie de  $F$ . Montrer, en s'inspirant de la preuve du cours, que

$$f(f^{-1}(f(A))) = f(A).$$

et que

$$f^{-1}(f(f^{-1}(B))) = f^{-1}(B).$$

### Correction

Soyons **formels** !

- Pour la première égalité, on procède par double inclusion.

⊆ **Soit**  $y$  dans  $f(f^{-1}(f(A)))$ . Alors **on dispose de**  $x$  dans  $f^{-1}(f(A))$  tel que  $y = f(x)$ . Mais  $x \in f^{-1}(f(A))$  donc  $f(x) \in f(A)$ . Donc  $y = f(x) \in f(A)$ . Donc  $f(f^{-1}(f(A))) \subset f(A)$ .

⊇ **Soit**  $y$  dans  $f(A)$ . Alors on dispose de  $x$  dans  $A$  tel que  $y = f(x)$ . Mais alors  $x \in f^{-1}(f(A))$ . Donc  $y = f(x) = f(f^{-1}(f(A)))$ , d'où l'inclusion réciproque.

D'où l'égalité désirée.

- Pour la seconde égalité, on fait de même.

⊆ **Soit**  $x$  dans  $f^{-1}(f(f^{-1}(B)))$ . Alors  $f(x) \in f(f^{-1}(B))$  donc on dispose de  $z$  dans  $f^{-1}(B)$  tel que  $f(x) = f(z)$ . Or  $z \in f^{-1}(B)$  donc  $f(z) \in B$  donc  $f(x) \in B$  donc  $x \in f^{-1}(B)$ . D'où l'inclusion directe.

⊇ **Soit**  $x$  dans  $f^{-1}(B)$ . Alors  $f(x) \in f(f^{-1}(B))$ . Donc  $x \in f^{-1}(f(f^{-1}(B)))$ . D'où l'inclusion réciproque.

D'où l'égalité désirée.

**Exercice 12.** ●●○ Soient  $f : E \rightarrow F$  et  $g : F \rightarrow G$  deux applications.

1. On suppose  $g \circ f$  injective. Montrer que  $f$  est injective.

**Correction**

Cours

2. On suppose  $g \circ f$  surjective. Montrer que  $g$  est surjective.

**Correction**

Cours

3. Soient  $f$  et  $g$  les applications de  $\mathbb{N}$  dans  $\mathbb{N}$  définies par

$$\begin{aligned} \forall n \in \mathbb{N}, f(n) &= 2n, \\ \forall k \in \mathbb{N}, g(2k) &= k, \quad g(2k+1) = 0. \end{aligned}$$

Montrer que  $g \circ f = \text{Id}_{\mathbb{N}}$ . A-t-on pour autant  $g$  et  $f$  bijectives ?

**Correction**

**Soit**  $n$  dans  $\mathbb{N}$ . Alors  $g \circ f(n) = g(f(n)) = g(2n) = n$ . Donc  $g \circ f = \text{Id}_{\mathbb{N}}$ . Donc  $g \circ f$  est injective, **MAIS**  $g$  n'est pas injective ! (1 et 3 ont la même image)  
De même,  $g \circ f$  est surjective, **MAIS**  $f$  n'est pas surjective (1 n'a pas d'antécédent).  
Autrement dit, pour vérifier qu'une application est bijective, il faut vraiment calculer  $f \circ g$  et  $g \circ f$ .

**Exercice 13.** ●●○ Soit  $f : E \rightarrow E$  une application telle que  $f \circ f = f$ . Montrer que si  $f$  est injective ou surjective, alors  $f = \text{Id}_E$ .

**Correction**

- **Supposons**  $f$  injective. Soit  $x$  dans  $E$ . Alors  $f \circ f(x) = f(x)$  i.e.  $f(f(x)) = f(x)$ . Donc, par injectivité de  $f$ ,  $f(x) = x$ . Donc  $f = \text{Id}_E$ .
- **Supposons**  $f$  surjective. Soit  $x$  dans  $E$ . Par surjectivité de  $f$ , on dispose de  $a$  dans  $E$  tel que  $x = f(a)$ . Or,  $f \circ f(a) = f(a)$ , i.e.  $f(x) = x$ . Donc  $f = \text{Id}_E$ .

Dans les deux cas on a démontré que  $f = \text{Id}_E$ .

**Exercice 14.** ●●○ Soit  $E$  un ensemble,  $A$  et  $B$  deux parties de  $E$ .

1. À quelle CNS sur  $A$  l'application  $\varphi_A : \begin{array}{l} \mathcal{P}(E) \rightarrow \mathcal{P}(E) \\ X \mapsto X \cap A \end{array}$  est-elle injective ? Surjective ?
2. À quelle CNS sur  $A$  l'application  $\psi_A : \begin{array}{l} \mathcal{P}(E) \rightarrow \mathcal{P}(E) \\ X \mapsto X \cup A \end{array}$  est-elle injective ? Surjective ?
3. À quelle CNS sur  $A$  et  $B$  l'application  $\theta_{A,B} : \begin{array}{l} \mathcal{P}(E) \rightarrow \mathcal{P}(E) \times \mathcal{P}(E) \\ X \mapsto (X \cap A, X \cap B) \end{array}$  est-elle injective ? Surjective ?

**Exercice 15.** ●●○ Soit  $E$  un ensemble non vide et  $a$  un élément de  $E$ .

On définit des ensembles  $F$ ,  $M$  et  $N$  et une application  $g$  de la façon suivante :

- $F = E \setminus \{a\}$ ;
- $M = \{X \in \mathcal{P}(E) \mid a \in X\}$ ;
- $N = \mathcal{P}(F)$ ;
- $g : \begin{cases} M \rightarrow \mathcal{P}(E) \\ X \mapsto X \cap F \end{cases}$

1. Montrer que  $M$  et  $N$  sont non vides et constituent une partition de  $\mathcal{P}(E)$  (c'est-à-dire que  $M \cap N = \emptyset$  et que  $M \cup N = \mathcal{P}(E)$ ).

**Correction**

Supposons que  $M \cap N \neq \emptyset$ . Alors on dispose de  $X \in M \cap N$ , i.e. de  $X \in \mathcal{P}(E)$  tel que  $a \in X$  et que  $X \in \mathcal{P}(F)$ , i.e.  $a \notin X$  et  $X \in \mathcal{P}(E \setminus \{a\})$ , absurde. Donc  $M \cap N = \emptyset$ .  
Ensuite, soit  $X \in \mathcal{P}(E)$ . Ou bien  $a \in X$ . Alors  $X \in M$ . Ou bien  $a \notin X$ . Donc  $X \subset E \setminus \{a\}$ .  
Donc  $X \subset F$  donc  $X \in \mathcal{P}(F) = N$ . Donc  $\mathcal{P}(E) \subset M \cup N$ . L'inclusion réciproque étant évidente, on a l'égalité.

2. Montrer que  $\text{Im}(g) \subset N$ .

**Correction**

Soit  $Y \in \text{Im}(g)$ . Alors on dispose de  $X \in M$  tel que  $Y = g(X) = X \cap F = X \cap (E \setminus \{a\})$ .  
Donc  $a \notin Y$ . Donc  $Y \subset N$ . D'où le résultat.

3. Démontrer que  $g$  est une bijection de  $M$  sur  $N$  et donner une expression de sa bijection réciproque.

**Correction**

Pour trouver la bijection réciproque, on peut faire une analyse-synthèse. **Soit**  $Y$  dans  $N$ .  
**Analyse.** On suppose qu'il existe  $X$  dans  $M$  tel que  $g(X) = Y$ . Déjà,  $X \cap F = Y$  donc  $X \setminus \{a\} = Y$ .  
Ensuite  $X \in M$ , donc  $a \in X$ , donc  $X = X \setminus \{a\} \cup \{a\} = Y \cup \{a\}$ .  
**Synthèse.**  $Y \cup \{a\}$  est clairement solution!  
D'où la bijectivité de  $g$  et  $g^{-1} : Y \mapsto Y \cup \{a\}$ .

4. Soit  $h$  l'application de  $\mathcal{P}(E)$  dans  $\mathcal{P}(E)$  définie comme suit :  
Pour tout  $X \in \mathcal{P}(E)$ ,  $h(X) = g(X)$  si  $X \in M$  et  $h(X) = g^{-1}(X)$  si  $X \in N$ .  
Montrer que  $h$  est une bijection de  $\mathcal{P}(E)$  sur  $\mathcal{P}(E)$ .

**Correction**

Remarquons que  $h$  envoie les éléments de  $M$  sur  $N$  et réciproquement.  
Montrons que  $h$  est injective. Soient  $X$  et  $X'$  tels que  $h(X) = h(X')$ . Si  $h(X) \in M$ ,

nécessairement  $X \in N$ , et  $X' \in N$  et l'égalité  $h(X) = h(X')$  s'écrit  $g^{-1}(X) = g^{-1}(X')$ , donc  $X = X'$ . On fait de même dans l'autre cas, d'où l'injectivité.

$h$  est surjective : si  $Y \in \mathbb{P}(E)$  :

- si  $Y \in N$ , alors on pose  $X = g^{-1}(Y) \in M$ . Alors  $g(X) = g(g^{-1}(Y)) = Y$ .
- de même si  $Y \in M$ .

5. En déduire que, dans tout ensemble fini non vide, il y a autant de parties ayant un nombre pair d'éléments que de parties ayant un nombre impair d'éléments.

**Correction**

En posant ce qui est indiqué, on remarque que  $h$  ajoute ou retire un élément, i.e. change la parité du nombre d'éléments.

- Exercice 16.** ●●○ Déterminer les applications  $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$  croissantes telles que  $f \circ f = \text{Id}_{\mathbb{R}}$ .

**Correction**

Raisonnons par analyse-synthèse.

**Analyse.** Soit  $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$  croissante, telle que  $f \circ f = \text{Id}_{\mathbb{R}}$ . Soit  $x$  un réel. Alors

- Si  $x \leq f(x)$ , alors, par croissance de  $f$ ,  $f(x) \leq f(f(x))$ , i.e.  $f(x) \leq x$ , donc  $f(x) = x$ .
- Si  $f(x) \leq x$ , alors, par croissance de  $f$ ,  $f(f(x)) \leq f(x)$ , i.e.  $x \leq f(x)$ , donc  $f(x) = x$ .

Donc nécessairement  $f = \text{Id}_{\mathbb{R}}$ .

**Synthèse.** Bien évidemment,  $f = \text{Id}_{\mathbb{R}}$  fonctionne.

- Exercice 17.** ●●○ Déterminer toutes les injections  $f : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$  telles que pour tout entier naturel  $f(n) \leq n$ .

**Correction**

**Analyse.** Soit  $f$  une telle injection. Alors montrons par récurrence que pour tout entier naturel  $k$ ,  $\mathcal{P}_k : \forall j \leq k, f(j) = j$  est vraie.

**Initialisation.**  $f(0) \in \mathbb{N}$  et  $f(0) \leq 0$ , donc  $f(0) = 0$ .

**Hérédité.** Supposons que pour un certain  $k$ , on ait

$$\forall j \leq k, f(j) = j.$$

On a alors  $f(k+1) \leq k+1$  et, par injectivité de  $f$ ,  $f(k+1) \neq f(j)$  pour tout  $j \leq k$ . Donc  $f(k+1) = k+1$ .

**Conclusion.** Héréditaire et vraie au rang 0, la proposition est vraie pour tout  $k$  en vertu du principe de récurrence.

- Exercice 18.** Sur les applications de  $\mathbb{N}$  dans  $\mathbb{N}$ . ●●○

1. Existe-t-il une application de  $\mathbb{N}$  dans  $\mathbb{N}$  qui soit strictement décroissante ?

**Correction**

La réponse est non, raisonnons par l'absurde ! Posons  $f(0) = a$ . Par stricte décroissance de  $f$ , pour tout  $n$  dans  $\mathbb{N}$ ,  $f(n+1) < f(n)$  donc par récurrence immédiate, pour tout  $k$  dans  $\mathbb{N}$ ,  $f(k) \leq a - k$ . Mais alors  $f(a+1) \leq -1$ , absurde car  $f$  est à valeurs dans  $\mathbb{N}$  !

2. Existe-t-il une application injective de  $\mathbb{N}$  dans  $\mathbb{N}$  qui ne soit pas croissante ?

**Correction**

Oui ! il suffit de poser  $f(0) = 1$ ,  $f(1) = 0$  et pour tout  $n \geq 2$ ,  $f(n) = n$ . Ou pire, pour tout  $n$  dans  $\mathbb{N}$ ,  $f(2n) = 2n + 1$  et  $f(2n + 1) = f(2n)$ .

3. (●●●) Que dire de la limite, lorsque  $n$  tend vers  $+\infty$ , de  $f(n)$ , où  $f$  est une application injective de  $\mathbb{N}$  dans  $\mathbb{N}$ .

**Correction**

On montre que c'est  $+\infty$ , en définissant la notion de limite. Soit  $M > 0$ . Posons  $m = \lfloor M \rfloor$ . Posons  $A = f^{-1}(\llbracket 0, m \rrbracket)$ . Par injectivité de  $f$ ,  $A$  est fini. Soit  $N = \max(A)$ . Alors  $\forall n \geq N + 1$ ,  $f(n) > m \geq M$ . Donc  $f(n) \xrightarrow[n \rightarrow +\infty]{} +\infty$ .

### 3 Relations

- Exercice 19.** ●○○ On considère dans le plan  $\mathbb{R}^2$  rapporté à une origine  $O$  la relation binaire définie par  $MRN$  si et seulement si  $O$ ,  $M$  et  $N$  sont alignés. Est-ce une relation d'équivalence ?

**Correction**

Pas de correction détaillée pour cet exercice : la relation n'est pas une relation d'équivalence, on contredit la transitivité en prenant un point confondu avec l'origine. En revance, sur  $\mathbb{R}^2 \setminus \{0\}$ , la relation est une relation d'équivalence.

- Exercice 20.** ●○○ On définit sur  $\mathbb{Z} \times \mathbb{N}^*$  la relation binaire  $\sim$  par

$$[(p, q) \sim (p', q')] \Leftrightarrow pq' = p'q.$$

1. Montrer que  $\sim$  est une relation d'équivalence.

**Correction**

- Réflexivité. Soit  $(p, q) \in \mathbb{Z} \times \mathbb{N}^*$ . Alors  $pq = pq$  donc  $(p, q) \sim (p, q)$ .
- Symétrie. Soient  $(p, q)$  et  $(p', q')$  dans  $\mathbb{Z} \times \mathbb{N}^*$ , tels que  $(p, q) \sim (p', q')$ . Donc  $pq' = p'q$  donc  $p'q = pq'$  donc  $(p', q') \sim (p, q)$ . D'où la symétrie.
- Transitivité. Soient  $(p, q)$ ,  $(p', q')$  et  $(p'', q'')$  dans  $\mathbb{Z} \times \mathbb{N}^*$ , tels que  $(p, q) \sim (p', q')$  et  $(p', q') \sim (p'', q'')$ . Alors  $pq' = p'q$  et  $p'q'' = p''q'$ . Donc  $pqq'' = p'qq'' = p''q'q$  donc, comme  $q \neq 0$ ,  $pq'' = p''q$ . D'où la transitivité (remarquez que je suis resté dans les entiers naturels !)

La relation est donc une relation d'équivalence.

2. ●●○ À quoi correspond l'ensemble quotient  $\mathbb{Z} \times \mathbb{N}^* / \sim$  ?

**Correction**

Il s'agit de l'ensemble  $\mathbb{Q}$  des rationnels !

**Exercice 21.** ●●○ Soient  $A$  et  $B$  deux parties de  $\mathbb{R}$  non vides et majorées. On pose  $A + B = \{x + y, x \in A, y \in B\}$ . Montrer que  $A + B$  admet une borne supérieure et que  $\sup(A + B) = \sup(A) + \sup(B)$ .

**Correction**

Montrons une double inégalité.

Déjà, montrons que  $\sup(A + B) \leq \sup(A) + \sup(B)$ . **Soit**  $x$  dans  $A + B$ . Alors on dispose de  $a$  dans  $A$  et  $b$  dans  $B$  tels que  $x = a + b$ . Donc  $x \leq \sup(A) + \sup(B)$ . Donc  $\sup(A) + \sup(B)$  est un majorant de  $A + B$ . Comme  $\sup(A + B)$  est le plus petit des majorants de  $A + B$ ,  $\sup(A + B) \leq \sup(A) + \sup(B)$ .

Montrons maintenant que  $\sup(A) + \sup(B) \leq \sup(A + B)$ . La technique est **bien plus délicate**. Soit  $a$  dans  $A$ . Alors si  $b$  est dans  $B$ ,  $a + b \in A + B$ . Donc  $a = a + b - b \leq \sup(A + B) - b$ . Donc  $\sup(A + B) - b$  est un majorant de  $A$ , donc  $\sup(A) \leq \sup(A + B) - b$  (car c'est le plus petit des majorants). Donc  $b \leq \sup(A + B) - \sup(A)$ . Donc  $\sup(A + B) - \sup(A)$  est un majorant de  $B$ , donc  $\sup(B) \leq \sup(A + B) - \sup(A)$ . Donc  $\sup(A) + \sup(B) \leq \sup(A + B)$ .

**Exercice 22.** ●●○ Soit  $E$  un ensemble de cardinal  $n$ .

1. Combien peut-on définir de relations binaires sur  $E$  ?

**Correction**

Une relation binaire se décrit entièrement par une table de composition, avec une double entrée : si  $a_1, \dots, a_n$  sont les éléments de  $E$ , on remplit la case  $(i, j)$  avec 0 si les éléments ne sont pas en relation, 1 si c'est le cas. On peut donc définir  $2^{n^2}$  relations binaires.

2. Combien sont réflexives ?

**Correction**

Une relation réflexive est une relation pour laquelle pour tout  $x$ ,  $s\mathcal{R}x$ . Elle se code en imposant la diagonale à 1. D'où  $2^{n^2-n}$  possibilités.

3. Combien sont symétriques ?

**Correction**

Une relation symétrique revient à prendre une table symétrique, d'où  $2^{\frac{n(n+1)}{2}}$  possibilités.

**Exercice 23.** ●●○ Soit  $(E, \preceq)$  un ensemble ordonné non vide. On suppose que toute partie non vide de  $E$  admet une borne supérieure et une borne inférieure.

Soit  $f : E \rightarrow E$  une application croissante.

On pose  $A = \{x \in E, x \preceq f(x)\}$ . Montrer que  $A$  est non vide, admet une borne supérieure  $a$  et que  $a = f(a)$ .

**Correction**

Montrons que  $A$  n'est pas vide.  $E$  est non vide, donc admet une borne inférieure  $m$ . Donc  $m \leq y$  pour tout  $y$  de  $E$ , en particulier pour  $y = f(m)$ . Donc  $m \leq f(m)$  et  $m \in A$ .

Par définition de  $E$ ,  $A$  admet une borne supérieure  $a$ .

Montrons que  $a = f(a)$ .

Déjà pour tout  $x$  de  $A$ ,  $x \leq a$ , donc, par croissance de  $f$ ,  $f(x) \leq f(a)$ . Donc, par définition de  $A$ ,  $x \leq f(x) \leq f(a)$ . Donc  $f(a)$  est un majorant de  $A$ . Par définition de la borne supérieure,  $a \leq f(a)$ .

Maintenant, par croissance de  $f$ ,  $f(a) \leq f(f(a))$ . Donc  $f(a) \in A$ . Donc, comme  $a = \sup(A)$ ,  $a \geq f(a)$ .

Donc  $f(a) = a$ .

**Exercice 24.** Comment rendre une application injective? ●●● Soient  $E$  et  $F$  deux ensembles et  $f : E \rightarrow F$ .

1. On définit la relation  $\sim$  par  $(x \sim y) \Leftrightarrow (f(x) = f(y))$ . Montrer que cette relation est relation d'équivalence.
2. Décrire les classes d'équivalence sous  $\sim$ . Comment traduire en termes de classes d'équivalence la propriété «  $f$  est injective ».
3. Sur  $E/\sim$ , on définit l'application  $\bar{f}$  comme suit :

$$\bar{f} : \begin{cases} E/\sim \rightarrow F \\ \bar{x} \mapsto \bar{f}(\bar{x}) = f(x) \end{cases}$$

Montrer que  $\bar{f}$  est bien définie (c'est-à-dire qu'elle ne dépend pas du choix du représentant) et qu'elle est injective.

**Correction**

1. Évident.
2. Soit  $x$  dans  $E$ . La classe d'équivalence de  $x$  modulo  $\sim$  est

$$\bar{x} = \{y \in E, f(y) = f(x)\} = f^{-1}(\{f(x)\}).$$

(**ATTENTION!** Ici j'ai parlé d'image réciproque d'un ensemble, pas de la fonction  $f^{-1}$  !  
Je ne peux donc pas « simplifier »  $f^{-1}(\{f(x)\})$ .)

La proposition «  $f$  injective » se traduit par

$$\forall x \in E, \bar{x} = \{x\}.$$

3. Soient  $x$  et  $x'$  les représentants d'une même classe d'équivalence modulo  $\sim$ . Alors  $x \sim x'$ , c'est-à-dire que  $f(x) = f(x')$ , donc le choix du représentant n'influe pas sur la valeur prise par  $\bar{f}$ .  
Montrons qu'alors  $\bar{f}$  est injective. Soient  $\bar{x}$  et  $\bar{x}'$  deux classes d'équivalence modulo  $\sim$ ,  $x$  et  $x'$  leurs représentants. Supposons  $\bar{f}(\bar{x}) = \bar{f}(\bar{x}')$ . On a alors  $f(x) = f(x')$ , donc  $x \sim x'$ , donc  $\bar{x} = \bar{x}'$ . Donc  $\bar{f}$  est injective.

**Exercice 25.** Ordres non totaux et prolongements. ●○○ -●●●

Les questions marquées d'une étoile (\*) sont des questions plus difficiles pour les plus algébristes d'entre vous.

1. **COURS** Soit  $E$  un ensemble,  $\preceq$  une relation binaire sur  $E$ . Définir «  $\preceq$  est une relation d'ordre sur  $E$  ».

**Correction**

$\preceq$  est une relation d'ordre si elle est

- réflexive, i.e.  $\forall x \in E, x \preceq x$
- antisymétrique, i.e.  $\forall (x, y) \in E^2, (x \preceq y \text{ et } y \preceq x) \Rightarrow x = y$
- transitive, i.e.  $\forall (x, y, z) \in E^3, (x \preceq y \text{ et } y \preceq z) \Rightarrow x \preceq z$ .

2. (cette question est indépendante des questions suivantes) Soit  $(E, \preceq)$  un ensemble muni d'une relation d'ordre. Soit  $f$  une application de  $E$  dans  $E$ , et  $\triangleleft_f$  la relation binaire sur  $E$  définie par

$$\forall (x, y) \in E^2, x \triangleleft_f y \Leftrightarrow f(x) \preceq f(y).$$

- (a) Démontrer que  $\triangleleft_f$  est réflexive et transitive.

**Correction**

**Réflexivité.** Soit  $x$  dans  $E$ . Alors  $f(x) = f(x)$  donc  $f(x) \preceq f(x)$ . Donc  $x \triangleleft_f x$ .

**Transitivité.** Soient  $x, y$  et  $z$  trois éléments de  $E$  tels que  $x \triangleleft_f y$  et  $y \triangleleft_f z$ . Alors  $f(x) \preceq f(y)$  et  $f(y) \preceq f(z)$ . Par transitivité de  $\preceq$ ,  $f(x) \preceq f(z)$ . Donc  $x \triangleleft_f z$ . D'où la transitivité.

- (b) Démontrer que  $\triangleleft_f$  est une relation d'ordre si et seulement si  $f$  est injective.  
*On raisonnera par double implication et on fera très attention au squelette de la démonstration. Cette question rapportera beaucoup de points, faites-la soigneusement.*



**Correction**

Raisonnons par double implication.

$\Rightarrow$  Supposons que  $\triangleleft_f$  est une relation d'ordre. Montrons que  $f$  est injective. Soient  $x$  et  $x'$  deux éléments de  $E$  tels que  $f(x) = f(x')$ . Alors  $f(x) \preceq f(x')$  donc  $x \triangleleft_f x'$ . Mais on a aussi  $f(x') \preceq f(x)$  donc  $x' \triangleleft_f x$ . Comme  $\triangleleft_f$  est une relation d'ordre, elle est antisymétrique donc  $x = x'$ . D'où l'injectivité de  $f$ .

$\Leftarrow$  Supposons que  $f$  est injective. Montrons que  $\triangleleft_f$  est une relation d'ordre. On sait déjà par la question précédente qu'elle est réflexive et transitive. Montrons alors qu'elle est antisymétrique. Soient  $x$  et  $x'$  tels que  $x \triangleleft_f x'$  et  $x' \triangleleft_f x$ . Alors  $f(x) \preceq f(x')$  et  $f(x') \preceq f(x)$ . Comme  $\preceq$  est une relation d'ordre,  $f(x) = f(x')$ . Comme  $f$  est injective,  $x = x'$ . D'où l'antisymétrie de  $\triangleleft_f$ , donc  $\triangleleft_f$  est une relation d'ordre.

- (c) **COURS** Définir «  $\preceq$  est une relation d'ordre total » .

**Correction**

La proposition «  $\preceq$  est une relation d'ordre total » se traduit par

$$\forall (x, y) \in E^2, x \preceq y \text{ ou } y \preceq x.$$

- (d) Dans le cas où  $f$  est bijective, démontrer que  $\triangleleft_f$  est une relation d'ordre total si et seulement si  $\preceq$  est une relation d'ordre total.

**Correction**

Raisonnons par double implication.

$\Rightarrow$  Supposons que  $\triangleleft_f$  est une relation d'ordre total. Soient  $x$  et  $y$  dans  $E$ . Posons  $a = f^{-1}(x)$  et  $b = f^{-1}(y)$ . Alors  $a \triangleleft_f b$  ou  $b \triangleleft_f a$ , i.e.  $f(a) \preceq f(b)$  ou  $f(b) \preceq f(a)$ , i.e.  $x \preceq y$  ou  $y \preceq x$ . **Donc  $\preceq$  est une relation d'ordre total.**

$\Leftarrow$  Supposons que  $\preceq$  est une relation d'ordre total. Soient  $x$  et  $y$  dans  $E$ . Alors  $f(x) \preceq f(y)$  ou  $f(y) \preceq f(x)$ , i.e.  $x \triangleleft_f y$  ou  $y \triangleleft_f x$ .

**Donc  $\triangleleft_f$  est une relation d'ordre total.**

Soit  $(E, \preceq)$  un ensemble muni d'une relation d'ordre. Soit  $\leq$  une autre relation d'ordre sur  $E$ . On dit que  $\leq$  est un **prolongement** de la relation  $\preceq$  si

$$\forall (x, y) \in E^2, x \preceq y \Rightarrow x \leq y.$$

On dit que c'est un **prolongement total** si  $\leq$  est un prolongement de  $\preceq$  et  $\leq$  est totale.

3. (a) **COURS** On rappelle que la relation de divisibilité  $|$  sur  $\mathbb{N}$  est définie par

$$\forall (m, n) \in \mathbb{N}^2, m|n \Leftrightarrow \exists k \in \mathbb{N}, n = km.$$

Montrer que cette relation est une relation d'ordre. L'ordre défini est-il total? (on demande une justification)

**Correction**

On vérifie successivement les trois points.

- **Réflexivité** : soit  $n$  dans  $\mathbb{N}$ . Alors  $n = 1 \times n$  donc  $n|n$ .
- **Antisymétrie** : soient  $m$  et  $n$  dans  $\mathbb{N}$  tels que  $n|m$  et  $m|n$ . Alors on dispose de  $k$  dans  $\mathbb{N}$  tel que  $m = kn$  et de  $\ell$  dans  $\mathbb{N}$  tel que  $n = \ell m$ . Alors  $n = k\ell n$ . Donc ou bien  $n = 0$  et alors  $m = 0$ , donc  $m = n$ , ou bien  $n \neq 0$  alors  $k\ell = 1$ . Étant entiers positifs, on a nécessairement  $k = \ell = 1$  donc  $m = n$ . D'où l'antisymétrie.
- **Transitivité** : soient  $m$ ,  $n$  et  $p$  dans  $\mathbb{N}$  tels que  $m|n$  et  $n|p$ . Alors on dispose de  $k$  dans  $\mathbb{N}$  et de  $\ell$  dans  $\mathbb{N}$  tels que  $n = km$  et  $p = \ell n$ . Donc  $p = (k\ell)m$ , donc  $m$  divise  $p$ . D'où la transitivité.

Donc  $|$  est relation d'ordre.

Cette relation d'ordre n'est pas totale. En effet, si  $m = 2$  et  $n = 3$ , on n'a ni  $m|n$ , ni  $n|m$ . Donc il existe des éléments non comparables.

- (b) Sur  $\mathbb{N}^*$ , montrer que la relation d'ordre usuel  $\leq$  est un prolongement total de la relation de divisibilité  $|$ . Le résultat fonctionne-t-il toujours sur  $\mathbb{N}$  ?

**Correction**

Soient  $n$  et  $m$  tels que  $m|n$ . Alors on dispose de  $k$  dans  $\mathbb{N}$  tel que  $n = km$ . Comme  $m$  et  $n$  sont non nuls,  $k \neq 0$ . Donc  $k \geq 1$  donc  $km \geq m$  donc  $m \leq n$ . Donc  $\leq$  est un prolongement total de  $|$ .

En revanche, sur  $\mathbb{N}$ , le résultat ne fonctionne pas. En effet, 3 divise 0 mais on n'a pas  $3 \leq 0$ .

Le but de la fin de l'exercice est de prolonger totalement une relation d'ordre quelconque sur un ensemble. Soit  $(E, \preceq)$  un ensemble muni d'une relation d'ordre. On définit la relation  $\mathcal{R}$  sur  $E$  par

$$\forall (x, y) \in E^2, x\mathcal{R}y \Leftrightarrow (x = y) \text{ ou } (x \text{ et } y \text{ ne sont pas comparables})$$

(pour rappel, on dit que  $x$  et  $y$  sont comparables si  $x \preceq y$  ou  $y \preceq x$ )

4. Montrer que la relation  $\mathcal{R}$  est réflexive et symétrique.

**Correction**

- **Réflexivité**. Soit  $x$  dans  $E$ . Alors  $x = x$  donc  $x\mathcal{R}x$ . Donc la relation est réflexive.
- **Symétrie**. Soient  $x$  et  $y$  dans  $E$  tels que  $x\mathcal{R}y$ . Si  $x = y$  alors  $y = x$  donc  $y\mathcal{R}x$ . Si  $x$  et  $y$  ne sont pas comparables, alors  $y$  et  $x$  ne sont pas comparables, donc  $y\mathcal{R}x$ . Donc la relation est symétrique.

5. On se pose la question de la transitivité de cette relation dans certains cas particuliers :

- (a) Montrer que lorsque  $\preceq$  est total, alors  $\mathcal{R}$  est transitive.

**Correction**

Soient  $(x, y, z)$  trois éléments de  $E$  tels que  $x\mathcal{R}y$  et  $y\mathcal{R}z$ . Comme  $\preceq$  est totale,  $x$  et  $y$  sont nécessairement comparables donc  $x = y$ . De même,  $y$  et  $z$  sont nécessairement comparables donc  $y = z$ . Donc, par transitivité de la relation d'égalité,  $x = z$ , donc  $x\mathcal{R}z$ .

- (b) Montrer que lorsque  $E = \mathbb{N}^*$  et  $\preceq$  est la relation de divisibilité, alors la relation n'est pas transitive.

**Correction**

Posons  $x = 2$ ,  $y = 3$  et  $z = 4$ . Alors  $x\mathcal{R}y$  car  $x$  et  $y$  ne sont pas comparables. De même  $y\mathcal{R}z$  car  $y$  et  $z$  ne sont pas comparables. Mais  $x \neq z$  et  $x$  et  $z$  sont comparables car 2 divise 4 donc on n'a pas  $x\mathcal{R}z$ . Donc  $\mathcal{R}$  n'est pas transitive !

Pour finir l'exercice, on se place dans le cas où  $E$  est fini et  $\mathcal{R}$  est transitive, i.e. lorsque  $\mathcal{R}$  est une relation d'équivalence. On définit, pour  $x$  et  $y$  dans  $E$ ,  $x \prec y$  par «  $(x \preceq y)$  et  $x \neq y$  ».

**6. Questions de cours.**

- (a) **COURS** Définir ce qu'est la classe d'équivalence d'un élément de  $E$ .

**Correction**

Si  $x$  est un élément de  $E$ , la classe d'équivalence de  $x$  est l'ensemble  $\bar{x} = \{y \in E, y\mathcal{R}x\}$ .

On nomme alors  $c_1, \dots, c_n$  les classes d'équivalence de  $E$ . Il y en a un nombre fini car  $E$  est fini.

- (b) **COURS** Si  $i \neq j$ , que peut-on dire de  $c_i \cap c_j$ ? Que vaut  $\bigcup_{i=1}^n c_i$ ? (on ne demande pas de justifications)

**Correction**

On sait que si  $i \neq j$ ,  $c_i \cap c_j = \emptyset$ . De même,  $\bigcup_{i=1}^n c_i = E$ .

- 7. (a) (\*)** Soient  $a$  et  $b$  deux éléments de  $E$ . Montrer que si  $a\mathcal{R}b$  alors on ne peut pas avoir  $a \prec b$ .

**Correction**

Si  $a\mathcal{R}b$ , alors ou bien  $a = b$  donc on n'a pas  $a \neq b$  donc on n'a pas  $a \prec b$ , ou bien  $a$  et  $b$  ne sont pas comparables, donc on n'a pas  $a \preceq b$  donc on n'a pas  $a \prec b$ .

- (b) (\*) Soient  $x, y, x'$  et  $y'$  quatre éléments de  $E$  tels que  $x\mathcal{R}x'$  et  $y\mathcal{R}y'$ . Montrer que si  $x \prec y$  alors  $x' \prec y'$ . On pourra commencer par montrer que  $x \prec y'$ .

**Correction**

Déjà, on montre que  $x \prec y'$ . Si  $x$  et  $y'$  n'étaient pas comparables, alors on aurait  $x\mathcal{R}y'$  donc, par transitivité de  $\mathcal{R}$ ,  $x\mathcal{R}y$ . Ceci est impossible car  $x \neq y$  et  $x \preceq y$ , i.e.  $x$  et  $y$  sont comparables. Donc  $x$  et  $y'$  sont comparables. Si on avait  $y' \preceq x$ , comme on a  $x \prec y$ , on aurait  $y' \prec y$ , i.e.  $y$  et  $y'$  comparables, mais pas égaux, ce qui contredirait  $y\mathcal{R}y'$ . Donc  $x \prec y'$ .

Ensuite, si  $x'$  et  $y'$  sont nécessairement comparables. Si ce n'était pas le cas, on aurait  $x'\mathcal{R}y'$ , donc  $x\mathcal{R}y$ , toujours impossible. De même, si  $y' \preceq x'$ , alors on aurait  $x \prec x'$ , absurde car  $x\mathcal{R}x'$ .

Pour chaque classe d'équivalence  $c_i$ , on définit une relation d'ordre arbitraire,  $\lesssim_i$  (on prend tous les éléments de  $c_i$  que l'on ordonne dans l'ordre que l'on souhaite). On définit alors la relation  $\lesssim$  sur  $E$  par

$$\forall (x, y) \in E^2, (x \lesssim y) \Leftrightarrow (x \prec y) \text{ ou } \left( (x \text{ et } y \text{ appartiennent à une même classe d'équivalence } c_i) \text{ et } (x \lesssim_i y) \right)$$

8. (\*\*\*) Montrer que  $\lesssim$  est une relation d'ordre, et que c'est un prolongement total de  $\preceq$ .

**Correction**

On montre déjà que  $\lesssim$  est une relation d'ordre.

- **Réflexivité.** Soit  $x$  dans  $E$ . Soit  $i$  dans  $\llbracket 1, n \rrbracket$  tel que  $x \in c_i$ . Alors comme  $\lesssim_i$  est une relation d'ordre,  $x \lesssim_i x$  donc  $x \lesssim x$ . D'où la réflexivité.

- **Antisymétrie.** Soient  $x$  et  $y$  dans  $E$  tels que  $x \lesssim y$  et  $y \lesssim x$ .

- si  $x\mathcal{R}y$ , alors  $x$  et  $y$  sont dans une même classe d'équivalence  $c_i$ . Alors  $x \lesssim_i y$  et  $y \lesssim_i x$ . Donc, comme  $\lesssim_i$  est une relation d'ordre,  $x = y$ .

- sinon, alors  $x \neq y$  et  $x$  et  $y$  sont comparables pour  $\preceq$  donc, comme  $x \lesssim y$ ,  $x \prec y$ . De même, comme  $y \lesssim x$ ,  $y \prec x$ . Ceci est impossible car  $x \neq y$ !

Donc  $x = y$ , d'où l'antisymétrie.

- **Transitivité.** Soient  $x$ ,  $y$  et  $z$  trois éléments de  $E$  tels que  $x \lesssim y$  et  $y \lesssim z$ . Alors

- si  $x \prec y$  et  $y \prec z$ , alors par transitivité de  $\preceq$ ,  $x \preceq z$  et  $x \neq z$  donc  $x \prec z$ . Donc  $x \lesssim z$ .

- si  $x \prec y$  et  $y$  et  $z$  sont dans la même classe d'équivalence, i.e.  $y\mathcal{R}z$ , alors la question précédente nous indique que  $x \prec z$ . Donc  $x \lesssim z$ .

- si  $x$  et  $y$  sont dans la même classe d'équivalence, i.e.  $x\mathcal{R}y$ , et  $y \prec z$ , alors la question précédente nous indique que  $x \prec z$ . Donc  $x \lesssim z$ .

- enfin, si  $x\mathcal{R}y$  et  $y\mathcal{R}z$ , alors les trois éléments sont dans la même classe d'équivalence  $c_i$ . Donc  $x \lesssim_i y$  et  $y \lesssim_i z$  donc, par transitivité de  $\lesssim_i$ ,  $x \lesssim_i z$ , donc  $x \lesssim z$ .

D'où, dans tous les cas,  $x \lesssim z$  d'où la transitivité.

Donc  $\lesssim$  est une relation d'ordre.

**Montrons ensuite qu'elle est totale.** Soient  $x$  et  $y$  dans  $E$ . Alors

- si  $x\mathcal{R}y$ , alors  $x$  et  $y$  sont dans la même classe d'équivalence  $c_i$  donc, comme  $\lesssim_i$  est totale,  $x \lesssim_i y$  ou  $y \lesssim_i x$  donc  $x \lesssim y$  ou  $y \lesssim x$ .

- sinon, alors  $x \neq y$  et  $x$  et  $y$  sont comparables, i.e.  $x < y$  ou  $y < x$ . Donc  $x \lesssim y$  ou  $y \lesssim x$ .

Dans tous les cas,  $x$  et  $y$  sont comparables pour  $\lesssim$ .

**Montrons enfin que cette relation est un prolongement de  $\preceq$ .** Soient  $x$  et  $y$  dans  $E$  tels que  $x \preceq y$ . Alors

- si  $x \mathcal{R} y$ , alors  $x = y$  donc  $x \lesssim y$ .
- si  $x$  n'est pas en relation avec  $y$ , alors  $x \neq y$  car  $x$  et  $y$  sont comparables. Donc  $x < y$ . Donc  $x \lesssim y$ .

Donc  $\lesssim$  est bien un prolongement de  $\preceq$ .

### Indications :

1. 1. Faire une représentation graphique ou une étude de fonction (on ne demande pas de justification!)  
2. Déterminer les réels  $x$  tels que  $\sin(x) \in [1/2, 3/2]$ . Puis regarder l'image de ces réels par  $\sin$ .  
3. Résoudre l'équation  $e^z = e^0$  et  $e^z = e^{i\pi/2}$ .
- 2 Les deux premières questions sont du cours. Pour le reste, tenter une double inclusion. Et, si vous bloquez sur une inclusion, c'est peut-être qu'elle n'est pas vraie en général!
- 4 Supposer  $f$  injective et montrer qu'elle est surjective, et réciproquement (raisonnement par double implication). Respecter très formellement la manière de rédiger. Et penser que l'injectivité permet de « simplifier » par  $f$ .
- 5 Pour la 2, supposer que  $A$  admet un antécédent  $x_0$  et se demander si  $x_0 \in A$  ou si  $x_0 \notin A$ .
- 6 Démontrer que cette relation équivaut à  $f(x) = f(y)$  pour une certaine fonction  $f$  à définir.
- 7 Supposer que  $E$  possède un plus grand élément et aboutir à une contradiction. Ensuite penser que tous les éléments de  $\mathcal{P}(\mathbb{R})$  sont majorés.
- 8 1. Regarder 0 et 3.  
2. Écrire, si  $x \in \mathbb{N}$ , que  $x \in \varphi^{-1}(\{1\}) \Leftrightarrow \varphi(x) = 1$  et conclure.  
3. Supposer  $\psi(n, m) = \psi(n', m')$  et supposer par exemple que  $n \leq n'$ .  
4. Penser à 5.
- 9 1. Faire une double implication, et penser à la négation de l'injectivité.  
2. Résoudre une équation du type  $\varphi(z) = \omega$  (c'est une des méthodes importantes pour la bijectivité).
- 10 Revenir à la définition de l'injectivité et de la surjectivité.
- 11 Rédiger **très proprement**, en faisant une double inclusion. Exemple pour la première. **Soit**  $y \in f(f^{-1}(f(A)))$ . **Alors on dispose de**  $x \in f^{-1}(f(A))$  tel que  $y = f(x)$ ...
- 12 1. Question de cours.  
2. Question de cours.  
3. Remarquer que  $f \circ g$  n'est pas égale à  $\text{Id}_{\mathbb{N}}$ .
- 14 1. S'intéresser à ce que donne  $\varphi_A(X)$  si  $X$  est une partie de  $E \setminus A$ .

2. S'intéresser à ce que donne  $\psi_A(X)$  si  $X$  est une partie de  $A$ .
  3. Comment « reconstruire » une partie de  $E$  en connaissant son intersection avec deux parties de  $E$  ?
- 13 **Exercice important.** Supposer que  $f$  est injective et montrer que  $f = \text{Id}_E$ . Supposer que  $f$  est surjective et montrer que  $f = \text{Id}_E$ .
- 15
1. Montrer que toute partie de  $E$  contient  $a$  ou ne contient pas  $a$ .
  2. Écrire proprement : **soit**  $Y \in \mathfrak{I}m(g)$ .
  3. Montrer que  $g$  est injective et surjective. Ou trouver directement sa bijection réciproque.
  4. Écrire proprement l'injectivité et la surjectivité. Pour l'injectivité, il faut faire attention à distinguer, si  $(X, X') \in \mathcal{P}(E)$ , au cas  $(X, X') \in M^2$ ,  $(X, X') \in N^2$  ou  $(X, X') \in M \times N$ . Remarquer aussi que  $h$  envoie les éléments de  $M$  sur  $N$  et réciproquement.
  5. On pourra poser  $A = \{X \in \mathcal{P}(E) \mid X \text{ a un nombre pair d'éléments}\}$ ,  $B = \{X \in \mathcal{P}(E) \mid X \text{ a un nombre impair d'éléments}\}$ , et examiner l'effet de l'application  $h$  sur ces ensembles.
- 16 Procéder par analyse-synthèse. Si  $x \in \mathbb{R}$ , distinguer les cas  $f(x) \leq x$  ou  $f(x) \geq x$ .
- 17 Démontrer par récurrence sur  $n$  que  $f(n) = n$ .
- 18
1. Non (raisonner par l'absurde)
  2. Oui (trouver un exemple)
  3. Montrer que c'est  $+\infty$ , en utilisant le fait que  $f(n) \xrightarrow{n \rightarrow +\infty}$  équivaut (par définition) à
- $$\forall M \in \mathbb{R}, \exists N \in \mathbb{N}, \forall n \geq N, f(n) \geq M.$$
- 19 Remarquer que ce n'est pas une relation d'équivalence sur  $\mathbb{R}^2$  mais c'en est une sur  $\mathbb{R}^2 \setminus \{(0, 0)\}$ .
- 20
1. Revenir à la définition.
  2. Remarquer qu'il s'agit d'une définition de  $\mathbb{Q}$ .
- 21 Démontrer une double inégalité :
- L'inégalité  $\sup(A + B) \leq \sup(A) + \sup(B)$  est assez simple.
  - L'inégalité inverse est plus dure. Commencer ainsi : « Soit  $a$  dans  $A$ . Alors si  $b$  est dans  $B$ ,  $a + b \in A + B$ . Donc  $a = a + b - b \leq \sup(A + B) - b$ . »
- 22 Penser au fait qu'une relation binaire se définit par une « table de relation, à double entrée ».
- 23 Pour montrer que  $a \leq f(a)$ , utiliser le fait que  $a$  est la borne supérieure de  $A$  et que  $f(a)$  est un majorant de  $A$ . Pour l'inégalité réciproque, utiliser la croissance de  $f$  pour montrer que  $f(a) \in A$ .
- 24 Pas d'indication particulière, c'est juste délicat à écrire.
- 25 Il s'agit + d'un entraînement au DS. Me demander si besoin d'indications.