

Feuille d'exercices n° 5

ENSEMBLES ET APPLICATIONS

Exercice 1. Soit I un intervalle de \mathbb{R} , et $f : I \rightarrow \mathbb{R}$ une application définie sur I et à valeurs réelles. Exprimer à l'aide de quantificateurs :

- a) la fonction f s'annule ;
- b) la fonction f est toujours nulle ;
- c) f n'est pas une fonction constante ;
- d) f est croissante ;
- e) f est décroissante ;
- f) f présente un minimum ;
- g) f présente un maximum.

Exercice 2. Donner la négation des assertions de l'exercice précédent.

Exercice 3. Soit E un ensemble et $(A, B, C) \in \mathcal{P}(E)^3$.

1. Montrer $(A \setminus C) \cup (B \setminus C) = (A \cup B) \setminus C$ et $(A \cup B) \cap (B \cup C) \cap (C \cup A) = (A \cap B) \cup (B \cap C) \cup (C \cap A)$.
2. Montrer l'équivalence des propositions :
 - a) $A \subseteq B$
 - b) $A \cap B = A$
 - c) $A \cup B = B$
 - d) $A \setminus B = \emptyset$
3. Montrer l'équivalence des propositions :
 - a) $A \cup B = A \cap C$
 - b) $B \subseteq A \subseteq C$
4. Montrer les implications

$$(A \cap B = A \cap C \text{ et } B \setminus A = C \setminus A) \implies B = C.$$

$$(A \cup B \subseteq A \cup C \text{ et } A \cap B \subseteq A \cap C) \implies B \subseteq C.$$

Exercice 4. Les applications suivantes sont-elles injectives, surjectives, bijectives ?

- a) $f : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$
 $n \mapsto n + 1$
- b) $g : \mathbb{Z} \rightarrow \mathbb{Z}$
 $n \mapsto n + 1$
- c) $h : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^2$
 $(x, y) \mapsto (2x - y, 4x - 2y)$
- d) $k : \mathbb{R} \setminus \{1\} \rightarrow \mathbb{R}$
 $x \mapsto \frac{x+1}{x-1}$

Exercice 5. Soient :

$$f : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N} \qquad g : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$$

$$n \mapsto 2n \qquad n \mapsto E\left(\frac{n}{2}\right)$$

où $E(x)$ désigne la partie entière de x .

Les fonctions f et g sont-elles injectives, surjectives ? Comparer $f \circ g$ et $g \circ f$.

Exercice 6. Soit f l'application de l'ensemble $\{1, 2, 3, 4\}$ dans lui-même définie par $f(1) = 4, f(2) = 1, f(3) = 2, f(4) = 2$. Déterminer $f^{-1}[A]$ lorsque $A = \{2\}, A = \{1, 2\}, A = \{3\}$.

Exercice 7. Soit f une application de E vers F avec $\text{Card}(E) = \text{Card}(F) = n$. Montrer que les trois propriétés suivantes sont équivalentes :

- a) f est injective ; b) f est surjective ; c) f est bijective.

Exercice 8. Pour un entier $n \in \mathbb{N}^*$ on désigne par I_n l'ensemble $\{1, 2, \dots, n\}$.

1. On suppose $n \geq 2$. Combien y a-t-il d'applications injectives $f : I_2 \rightarrow I_n$?
2. Soit $p \in \mathbb{N}^*$. Combien y a-t-il d'applications strictement croissantes de I_p dans I_n ?
3. A quelle condition portant sur les entiers m et n peut-on définir une application $f : I_m \rightarrow I_n$ qui soit injective, surjective, bijective ?

Exercice 9. Soit E un ensemble de cardinal $n \in \mathbb{N}^*$. Montrer qu'il y a $n!$ bijections de E vers E .

Exercice 10.

Soit E un ensemble, avec $\text{Card}(E) = n$. Démontrer que $\text{Card}(\mathcal{P}(E)) = 2^n$,

- en utilisant les coefficients $\binom{n}{k}$;
- en raisonnant par récurrence sur n .

Exercice 11. Montrer que \mathbb{Z} est dénombrable à l'aide de l'application $\varphi : \mathbb{Z} \rightarrow \mathbb{N}$ définie par :

$$\varphi(n) = 2n - 1 \text{ si } n > 0 \text{ et } \varphi(n) = -2n \text{ si } n \leq 0.$$

Exercice 12. Soient E, F deux ensembles non vides. Soient A une partie de E , B une partie de F et f une application de E dans F . Déterminer si les assertions suivantes sont vraies ou fausses :

1. Si A est une partie finie de E , alors $f[A]$ est une partie finie de F .
2. Si $f[A]$ est une partie finie de F , alors A est une partie finie de E .
3. Si B est une partie finie de F , alors $f^{-1}[B]$ est une partie finie de E .
4. Si $f^{-1}[B]$ est une partie finie de E , alors B est une partie finie de F .

Exercice 13. Soit $n \in \mathbb{N}^*$. Dénombrer les couples d'entiers $(n_1, n_2) \in \mathbb{N} \times \mathbb{N}$ tels que

- a) $n_1 + n_2 \leq n$, b) $n_1 + n_2 = n$.

Mêmes questions pour les triplets $(n_1, n_2, n_3) \in \mathbb{N}^3$. Pouvez-vous généraliser aux cas des m -uplets ?

Indication : il est utile et instructif de représenter les couples (n_1, n_2) dans le plan \mathbb{R}^2 et, pour la deuxième partie, les triplets (n_1, n_2, n_3) dans l'espace \mathbb{R}^3 .

Exercice 14. Soient E un ensemble fini non vide, F un ensemble quelconque, et f une application de E dans F .

1. Montrer que f est injective si et seulement si $\text{Card}(f[E]) = \text{Card}(E)$.
2. Montrer que f est surjective si et seulement si $\text{Card}(f[E]) = \text{Card}(F)$.

Exercice 15. Soient $n \in \mathbb{N}, n \geq 2$ et E un ensemble à n éléments. Soit $f : E \rightarrow \mathcal{P}(E)$ une application. On suppose que pour tout $x \in E$, on a $x \in f(x)$ et que pour tous $x, y \in E$, on a l'implication $x \in f(y) \Rightarrow y \in f(x)$.

1. Montrer que pour tout $x \in E$, on a $\text{Card } f(x) \geq 1$.
2. On suppose qu'il existe $a \in E$ tel que $\text{Card } f(a) = n$. Montrer que pour tout $x \in E$, on a $\text{Card } f(x) \geq 2$.
3. Montrer qu'il existe des éléments $x, y \in E$ différents tels que les ensembles $f(x)$ et $f(y)$ aient le même nombre d'éléments.

Exercice 16. Soit E un ensemble avec $\text{Card}(E) = n$.

1. Calculer le cardinal de l'ensemble $\{(A, B) \in \mathcal{P}(E)^2 / A \subseteq B\}$.
Indication : pour chaque $B \subseteq E$, compter les parties $A \subseteq B$.
2. Montrer que pour tout $(A, B) \in \mathcal{P}(E)^2$, $A \subseteq B$ équivaut à $A^c \cup B = E$.
3. En déduire le cardinal de l'ensemble $\{(A, B) \in \mathcal{P}(E)^2 / A \cup B = E\}$.

Exercice 17. Décider si les paires de fonctions qui suivent sont égales :

1. $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}, x \mapsto (x^2 + 2x + 1)(x - 1)$ et $g : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}, x \mapsto (x + 1)(x^2 - 1)$;
2. $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}, x \mapsto \sin(x)$ et $g : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}, x \mapsto \exp(x)$;
3. $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}, x \mapsto \sin(x)$ et $g : \mathbb{R} \rightarrow [-1, 1], x \mapsto \sin(x)$;
4. $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}, x \mapsto x + 1$ et $g : \mathbb{R} \setminus \{1\} \rightarrow \mathbb{R}, x \mapsto \frac{x^2 - 1}{x - 1}$;
5. $f : \{x \in \mathbb{R} \mid |x - 2| < \frac{1}{2}|x + 3|\} \rightarrow \mathbb{R}, x \mapsto 0$ et $g :]\frac{1}{3}, 7[\rightarrow \mathbb{R}, x \mapsto 0$;
6. $f : \mathbb{R}_+ \rightarrow \mathbb{R}, x \mapsto (\sqrt{x})^2$ et $g : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}, x \mapsto x$.

Exercice 18. Décrire les ensembles qui suivent.

- | | |
|---|--|
| a) $\tan[\{0\}]$ | b) $\sin^{-1}[\{2\}]$ |
| c) $\cos^{-1}[[0, 1]]$ | d) $(\cos _{[3, 7]})^{-1}[(0, 1)]$ |
| e) $(\cos _{[0, \pi]})^{-1}[[0, 1]]$ | f) $\sqrt{\cdot}[[0, 1]]$ |
| g) $f^{-1}[[0, 1]]$ pour $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}, x \mapsto x^2$ | h) $f^{-1}[[0, 1]]$ pour $f : [-\frac{1}{2}, \frac{4}{3}] \rightarrow \mathbb{R}, x \mapsto x^2$ |
| i) $f^{-1}[[0, 1]]$ pour $f : \mathbb{R}_+ \rightarrow \mathbb{R}, x \mapsto x^2$ | j) $f^{-1}[[[-1, 1] \cup \{2\}]]$ et $f[[[0, 1]^3]]$ pour $f : \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}, (x, y, z) \mapsto y$ |
| k) $ \cdot [[[-2, -1] \cup [2, 4]]]$ | l) $(\cdot _{[-8, 7]})^{-1}[[2, 3]]$ |
| m) $ \cdot ^{-1}[\{1\}]$ | n) $\exp[[-\infty, 2]]$ |
| o) $\exp^{-1}[[[-1, e]]]$ | p) $\ln[\mathbb{R}_-]$ |
| q) $\ln^{-1}[[3, +\infty[$ | |

Exercice 19. Soit E et F deux ensembles non vides et $f : E \rightarrow F$.

1. Soient $A, B \subseteq E$. Montrer que

$$f[A \cup B] = f[A] \cup f[B] \quad \text{et} \quad f[A \cap B] \subseteq f[A] \cap f[B].$$

2. Pour l'inclusion de la question précédente, donner un contre-exemple à l'inclusion réciproque.
3. Soient maintenant $A, B \subseteq F$. Montrer que

$$f^{-1}[A \cup B] = f^{-1}[A] \cup f^{-1}[B] \quad \text{et} \quad f^{-1}[A \cap B] = f^{-1}[A] \cap f^{-1}[B].$$

Exercice 20. Étudier l'injectivité et la surjectivité des applications qui suivent. Lorsqu'elles sont bijectives, donner leur inverse.

- | | |
|--|--|
| a) $\mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}, x \mapsto \cos(x)$; | b) $[\pi, 2\pi] \rightarrow [-1, 1], x \mapsto \sin(x)$; |
| c) $\mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^2, (x, y) \mapsto (x + y, x - y)$; | d) $\mathbb{N} \rightarrow \mathbb{R}, x \mapsto x$; |
| e) $\mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}, x \mapsto \begin{cases} -\ln x & \text{si } x > 0 \\ x^2 & \text{sinon} \end{cases}$; | f) $\mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}, x \mapsto \begin{cases} \frac{1}{x} & \text{si } x < 0 \\ x^2 & \text{sinon} \end{cases}$; |
| g) $\{0, 1, 2\} \rightarrow \{-1, 0, 1\}, x \mapsto -(x - 1)$; | h) $\mathcal{F}(\mathbb{R}, \mathbb{R}) \rightarrow \mathbb{R}, f \mapsto f(0)$; |
| i) $\{0, 1, 2, 3\} \rightarrow \{1, 7, 9, 11\}, x \mapsto \begin{cases} 1 & \text{si } x = 0 \\ 11 & \text{si } x = 1 \\ 7 & \text{si } x = 2 \\ 9 & \text{si } x = 3 \end{cases}$. | |

Exercice 21. On considère l'application $f : I \rightarrow J, x \mapsto x^2$, où I et J sont deux intervalles de \mathbb{R} . Trouver I et J tels que :

1. f est injective mais pas surjective ;
2. f est surjective mais pas injective ;
3. f est bijective.

Exercice 22. Soit E un ensemble non vide. Soient f, g et h des fonctions de E dans E . On suppose $h \circ g \circ f$ et $g \circ f \circ h$ injectives et $f \circ h \circ g$ surjective. Montrer que f, g et h sont bijectives.

Exercice 23. Soit E un ensemble non vide et $f : E \rightarrow \mathcal{P}(E)$. Étudier la surjectivité de f en considérant $A = \{x \in E \mid x \notin f(x)\}$.

Exercice 24. Soient E et F deux ensembles non vides et $f : E \rightarrow F$.

1. Montrer que, pour tout $B \subseteq F$, $f(f^{-1}[B]) = B \cap f[E]$.
2. En déduire que si f est surjective alors, pour tout $B \in \mathcal{P}(F)$, $f[f^{-1}[B]] = B$.
3. Montrer que, pour tout $A \subseteq E$, $A \subseteq f^{-1}[f[A]]$.
4. Montrer que si f est injective alors, pour tout $A \in \mathcal{P}(E)$, $f^{-1}[f[A]] = A$.

Exercice 25. Pour chacune des relations définies ci dessous, déterminer si ce sont des relations d'ordre ou d'équivalence :

- Pour m et n deux entiers relatifs, $n \equiv m$ si et seulement si 4 divise $m - n$.
- Pour f et g deux fonctions réelles, $f \mathcal{R} g$ si et seulement si il existe $x \in \mathbb{R}$ tel que $f(x) = g(x)$.
- Pour f et g deux fonctions réelles, $f \sim g$ si et seulement si il existe $h : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ tel que $f = h \cdot g$ et que h ait limite 1 en $+\infty$.
- Soit E un ensemble. On définit, pour A et B deux parties de E , $A \prec B$ si et seulement si il existe une fonction injective de A dans B .
- Soit E un ensemble. On définit, pour A et B deux parties de E , $A \bowtie B$ si et seulement $A \cap B = \emptyset$.
- Soient E et F deux ensembles et $f : E \rightarrow F$. On définit, pour x et y dans E , $x \smile y$ si et seulement si $f(x) = f(y)$.
- (*) Soient E un ensemble et \ll une relation réflexive et transitive sur ces éléments. Soit $X = \{\{y \in E, x \ll y \text{ et } y \ll x\}, x \in E\}$. On définit pour A et B deux éléments de X , $A \lll B$ si et seulement il existe a dans A et b dans B tels que $a \ll b$.

Exercice 26. Indicatrice d'une partie d'un ensemble

Soit E un ensemble. On note $\mathcal{P}(E)$ l'ensemble de parties de E . Soit A une partie de $E : A \in \mathcal{P}(E)$. On note $\bar{A} = E \setminus A$, le complémentaire de A dans E .

Pour tout $A \subseteq E$ on définit une fonction *indicatrice de A* sur E à valeurs dans $\{0, 1\}$, notée $\mathbf{1}_A$, définie pour $\forall x \in E$ par :

$$\mathbf{1}_A(x) = \begin{cases} 1 & \text{si } x \in A \\ 0 & \text{si } x \in \bar{A}. \end{cases}$$

1. On considère deux exemples :

- Soient $E = \{a, b, c, d\}$, $A = \{a, b, c\} \subseteq E$ et $B = \{c, d\} \subseteq E$. Expliciter les fonctions $\mathbf{1}_E, \mathbf{1}_\emptyset, \mathbf{1}_A, \mathbf{1}_{\bar{A}}, \mathbf{1}_B$ ainsi que $\mathbf{1}_{A \cap B}$ et $\mathbf{1}_{A \cup B}$.
- Soient A une partie de \mathbb{R} et $\mathbf{1}_A : \mathbb{R} \rightarrow \{0; 1\}$ sa fonction indicatrice sur \mathbb{R} . Décrire les ensembles $\mathbf{1}_A[A], \mathbf{1}_A[\bar{A}], \mathbf{1}_A[\mathbb{R}], \mathbf{1}_A^{-1}[\{1\}], \mathbf{1}_A^{-1}[\{0\}], \mathbf{1}_A^{-1}[\{0; 1\}]$.

2. Soient E un ensemble et $A, B \in \mathcal{P}(E)$. Démontrer les propriétés de la fonction indicatrice :

- Montrer que $(\mathbf{1}_A)^2 = \mathbf{1}_A$.
- Inclusion : $A \subseteq B \Leftrightarrow \mathbf{1}_A \leq \mathbf{1}_B$. (Cela veut dire que pour $\forall x \in E$, on a $\mathbf{1}_A(x) \leq \mathbf{1}_B(x)$.)
Égalité : $A = B \Leftrightarrow \mathbf{1}_A = \mathbf{1}_B$.
- Opérations ensemblistes :

$$\mathbf{1}_{\bar{A}} = 1 - \mathbf{1}_A; \quad \mathbf{1}_{A \cap B} = \min\{\mathbf{1}_A, \mathbf{1}_B\} = \mathbf{1}_A \cdot \mathbf{1}_B; \quad \mathbf{1}_{A \cup B} = \max\{\mathbf{1}_A, \mathbf{1}_B\} = \mathbf{1}_A + \mathbf{1}_B - \mathbf{1}_A \cdot \mathbf{1}_B.$$

- Lien avec le cardinal : si E est de cardinal fini, $|A| = \sum_{x \in E} \mathbf{1}_A(x)$.

3. Formule du crible. Soient E un ensemble et $A, B, C \in \mathcal{P}(E)$. Montrer que

$$|A \cup B \cup C| = |A| + |B| + |C| - |A \cap B| - |B \cap C| - |A \cap C| + |A \cap B \cap C|$$

4. Soit E un ensemble fini de cardinalité n . Notons \mathcal{F} l'ensemble des applications de E dans $\{0, 1\}$.

(a) Quel est le cardinal de \mathcal{F} ?

(b) Soit

$$\phi : \mathcal{P}(E) \rightarrow \mathcal{F} : A \mapsto \mathbf{1}_A$$

une application qui à chaque partie A de E associe sa fonction indicatrice. Montrer que ϕ est une application injective. En déduire que ϕ est bijective.

(c) En déduire que $\mathcal{P}(E)$ est fini et calculer son cardinal.

5. Soit E un ensemble fini de cardinalité n . Calculer $\sum_{A, B \subseteq E} |A \cap B|$, $\sum_{A, B \subseteq E} |A \cup B|$.