

Dénombrement

5.1 Ensembles finis

5.1.1 Cardinal

Commençons par un lemme préliminaire, utile en soi.

Lemme 1

Soient $(n, p) \in \mathbb{N}^2$ deux entiers naturels non nuls.

1. Il existe une injection $f : \llbracket 1, n \rrbracket \longrightarrow \llbracket 1, p \rrbracket$ si et seulement si $n \leq p$.
2. Il existe une surjection $f : \llbracket 1, n \rrbracket \longrightarrow \llbracket 1, p \rrbracket$ si et seulement si $n \geq p$.
3. Il existe une bijection $f : \llbracket 1, n \rrbracket \longrightarrow \llbracket 1, p \rrbracket$ si et seulement si $n = p$.

Démonstration.

1. • Supposons que $n \leq p$.

Alors l'application $f : \llbracket 1, n \rrbracket \longrightarrow \llbracket 1, p \rrbracket$ est injective.

- Supposons qu'il existe une injection $f : \llbracket 1, n \rrbracket \longrightarrow \llbracket 1, p \rrbracket$.

Alors les éléments $f(1), \dots, f(n)$ de $\llbracket 1, p \rrbracket$ sont deux à deux distincts. Ainsi, l'ensemble $\{f(1), \dots, f(n)\}$ est une sous-partie de $\llbracket 1, p \rrbracket$ à n éléments. A fortiori, $n \leq p$.

2. • Supposons que $n \geq p$. Alors l'application

$$\begin{aligned} f : \llbracket 1, n \rrbracket &\longrightarrow \llbracket 1, p \rrbracket \\ k &\longmapsto \begin{cases} k & \text{si } k \leq p \\ p & \text{si } k > p \end{cases} \end{aligned}$$

est surjective.

- Supposons qu'il existe une surjection $f : \llbracket 1, n \rrbracket \longrightarrow \llbracket 1, p \rrbracket$.

Pour tout $k \in \llbracket 1, p \rrbracket$, il existe $x_k \in \llbracket 1, n \rrbracket$, tel que $f(x_k) = k$. On a nécessairement $x_i \neq x_j$ si $i \neq j$ puisque $f(x_i) = i \neq j = f(x_j)$.

Ainsi, l'ensemble $\{x_k | 1 \leq k \leq p\}$ est une partie à p éléments de $\llbracket 1, n \rrbracket$. A fortiori, $n \geq p$.

3. • Supposons que $n = p$. Alors $\llbracket 1, n \rrbracket = \llbracket 1, p \rrbracket$ et $\text{Id}_{\llbracket 1, n \rrbracket} : \llbracket 1, n \rrbracket \longrightarrow \llbracket 1, p \rrbracket$ est bien une bijection.

- Supposons qu'il existe une bijection $f : \llbracket 1, n \rrbracket \longrightarrow \llbracket 1, p \rrbracket$.

Puisque f est injective, d'après le premier point, $n \leq p$.

Puisque f est surjective, d'après le deuxième point, $n \geq p$. Finalement, on a bien $n = p$.



Définition 1: Ensembles en bijection

Soient E et F deux ensembles. On dit que E et F sont en bijection s'il existe une application $\varphi : E \longrightarrow F$ bijective.

Remarque 1. Dans ce cas, il existe également une bijection $\varphi^{-1} : F \longrightarrow E$.

Définition 2: Ensemble fini

Soit E un ensemble non vide. On dit que E est un ensemble fini s'il existe $n \in \mathbb{N}^*$ tel que $\llbracket 1, n \rrbracket$ et E sont en bijection.

Dans ce cas, on dit que E est de cardinal n et on note $\text{card}(E) = n$ (ou $\#E = n$).

Concrètement, ceci signifie que E contient n éléments et on peut en dresser la liste en notant par exemple

$$E = \{x_1, \dots, x_n\}.$$

Remarque 2. D'après le lemme, l'entier naturel n tel que $\llbracket 1, n \rrbracket$ est en bijection avec E est unique.

En effet, s'il existe $\varphi : \llbracket 1, n \rrbracket \longrightarrow E$ bijective et $\psi : \llbracket 1, p \rrbracket \longrightarrow E$ bijective, alors $\psi^{-1} \circ \varphi : \llbracket 1, n \rrbracket \longrightarrow \llbracket 1, p \rrbracket$ est une bijection d'où $n = p$ d'après le lemme.

Dans la suite de ce chapitre, nous ne considérerons que des ensembles finis.

Remarque 3. • Par convention, $\text{card}(\emptyset) = 0$.

• Un ensemble non fini est dit infini. C'est par exemple le cas des ensembles $\mathbb{N}, \mathbb{Z}, \mathbb{Q}$ et $\mathbb{R}$.

Exemple 1. • $\text{card}\{2\} = 1$; $\text{card}\{\sqrt{2}, \pi\} = 2$; $\text{card}\{(1, 2)\} = 1$.

• Soit $n \in \mathbb{N}^*$. Alors $\text{card}(\llbracket 1, n \rrbracket) = \text{card}(\llbracket 0, n-1 \rrbracket) = n$.

• Si $p \leq q$, $\text{card}\llbracket p, q \rrbracket = q - p + 1$.

5.1.2 Propriétés

Proposition 1: Cardinal d'une union disjointe

Soit E un ensemble fini non vide, soient A et B des parties disjointes de E (i.e. $A \cap B = \emptyset$). Alors $\text{card}(A \sqcup B) = \text{card}(A) + \text{card}(B)$.

Démonstration. Soit $n = \text{card}(A)$ et $p = \text{card}(B)$. Il existe deux bijections $\varphi : \llbracket 1, n \rrbracket \longrightarrow A$ et $\psi : \llbracket 1, p \rrbracket \longrightarrow B$.

Considérons l'application

$$\begin{aligned} f : \llbracket 1, n+p \rrbracket &\longrightarrow A \sqcup B \\ k &\longmapsto \begin{cases} \varphi(k) & \text{si } 1 \leq k \leq n \\ \psi(k-n) & \text{si } n+1 \leq k \leq n+p. \end{cases} \end{aligned}$$

• Prouvons que f est injective.

Soient $(i, j) \in \llbracket 1, n+p \rrbracket^2$ tels que $f(i) = f(j)$.

- Si l'un des deux indices est dans $\llbracket 1, n \rrbracket$ et l'autre dans $\llbracket n+1, n+p \rrbracket$, par exemple si $1 \leq i \leq n$ et $n+1 \leq j \leq n+p$, on a $f(i) = \varphi(i) \in A$ et $f(j) = \psi(j-n) \in B$ donc $f(i) = f(j) \in A \cap B = \emptyset$, ce qui est absurde. Ce cas est donc impossible.

- Si $(i, j) \in \llbracket 1, n \rrbracket^2$, alors $f(i) = f(j) \Leftrightarrow \varphi(i) = \varphi(j) \Leftrightarrow i = j$ par injectivité de φ .

- Si $(i, j) \in \llbracket n+1, n+p \rrbracket^2$, alors $f(i) = f(j) \Leftrightarrow \psi(i-n) = \psi(j-n) \Leftrightarrow i-n = j-n$ par injectivité de ψ , d'où $i = j$.

On a donc bien montré que si $f(i) = f(j)$, alors $i = j$, ce qui prouve l'injectivité de f .

• Prouvons que f est surjective.

Soit $x \in A \sqcup B$. Si $x \in A$, par surjectivité de φ , il existe $k \in \llbracket 1, n \rrbracket$, tel que $f(k) = \varphi(k) = x$. Si $x \in B$, par surjectivité de ψ , il existe $k \in \llbracket n+1, n+p \rrbracket$, tel que $f(k) = \psi(k-n) = x$.

Ainsi, pour tout $x \in A \sqcup B$, il existe $k \in \llbracket 1, n+p \rrbracket$ tel que $f(k) = x$. On a donc bien prouvé que f est surjective.

On en déduit que $f : \llbracket 1, n+p \rrbracket \longrightarrow A \cup B$ est bijective. Par définition, ceci implique que

$$\text{card}(A \sqcup B) = n + p = \text{card}(A) + \text{card}(B).$$

■

Corollaire 1

Soit E un ensemble fini non vide. Pour tout $n \in \mathbb{N}^*$, pour toute famille $(A_k)_{1 \leq k \leq n}$ de parties de E deux à deux disjointes (i.e. $i \neq j \Rightarrow A_i \cap A_j = \emptyset$), on a

$$\text{card} \left(\bigcup_{k=1}^n A_k \right) = \sum_{k=1}^n \text{card}(A_k).$$

Démonstration. Montrons la propriété par récurrence sur $n \in \mathbb{N}^*$.

Pour $n = 1$, $\text{card} \left(\bigcup_{k=1}^1 A_k \right) = \text{card}(A_1) = \sum_{k=1}^1 \text{card}(A_k)$ donc la propriété est vraie au rang $n = 1$.

Soit $n \in \mathbb{N}^*$ fixé. On suppose que la propriété est vraie au rang n . Montrons-la au rang $n+1$.

Tout d'abord, $\bigcup_{k=1}^n A_k$ et A_{n+1} sont disjoints :

$$\left(\bigcup_{k=1}^n A_k \right) \cap A_{n+1} = \bigcup_{k=1}^n (A_k \cap A_{n+1}) = \bigcup_{k=1}^n \emptyset = \emptyset.$$

On peut donc appliquer la proposition précédente et on a

$$\text{card} \left(\bigcup_{k=1}^{n+1} A_k \right) = \text{card} \left(\bigcup_{k=1}^n A_k \right) + \text{card}(A_{n+1}).$$

Par hypothèse de récurrence,

$$\text{card} \left(\bigcup_{k=1}^n A_k \right) = \sum_{k=1}^n \text{card}(A_k)$$

d'où

$$\text{card} \left(\bigcup_{k=1}^{n+1} A_k \right) = \sum_{k=1}^n \text{card}(A_k) + \text{card} A_{n+1} = \sum_{k=1}^{n+1} \text{card}(A_k),$$

ce qui prouve la propriété au rang $n+1$ et achève la récurrence. ■

Corollaire 2: Lemme des bergers

Soit E un ensemble fini non vide. Pour tout $n \in \mathbb{N}^*$, pour toute famille $(A_k)_{1 \leq k \leq n}$ de parties de E deux à deux disjointes (i.e. $i \neq j \Rightarrow A_i \cap A_j = \emptyset$) et de même cardinal $p \in \mathbb{N}$ (i.e. pour tout $k \in \llbracket 1, n \rrbracket$, $\text{card}(A_k) = p$), on a

$$\text{card}\left(\bigcup_{k=1}^n A_k\right) = n \times p.$$

Démonstration. Il suffit d'appliquer le corollaire précédent et on obtient

$$\text{card}\left(\bigcup_{k=1}^n A_k\right) = \sum_{k=1}^n \text{card}(A_k) = \sum_{k=1}^n p = np.$$

■

Proposition 2

Soit E un ensemble fini non vide. Soient A et B des parties de E .

1. $\text{card}(\overline{A}) = \text{card}(E) - \text{card}(A)$.
2. Si $A \subset B$, alors $\text{card}(A) \leq \text{card}(B)$ avec égalité si et seulement si $A = B$.
3. $\text{card}(A \cup B) = \text{card}(A) + \text{card}(B) - \text{card}(A \cap B)$

Démonstration.

1. On a $E = A \sqcup \overline{A}$ avec A et $\overline{A}$ disjoints donc d'après la proposition précédente,

$$\text{card}(E) = \text{card}(A) + \text{card}(\overline{A}),$$

d'où le résultat.

2. Supposons que $A \subset B$. Alors $B = A \cup (B \setminus A)$ avec $A \cap (B \setminus A) = \emptyset$. En utilisant la proposition précédente, on a donc

$$\text{card}(B) = \text{card}(A) + \text{card}(B \setminus A).$$

Puisque $\text{card}(B \setminus A) \geq 0$, on a bien l'inégalité voulue.

Par ailleurs, $\text{card}(A) = \text{card}(B) \Leftrightarrow \text{card}(B \setminus A) = 0 \Leftrightarrow B \setminus A = \emptyset \Leftrightarrow B \subset A$ d'où $A = B$.

3. $A \cup B$ peut s'écrire comme union d'ensembles deux à deux disjoints de la façon suivante :

$$A \cup B = (A \setminus B) \cup (A \cap B) \cup (B \setminus A)$$

donc

$$\text{card}(A \cup B) = \text{card}(A \setminus B) + \text{card}(A \cap B) + \text{card}(B \setminus A).$$

Par ailleurs, on a de même $A = (A \cap B) \sqcup (A \setminus B)$ et $B = (A \cap B) \sqcup (B \setminus A)$ d'où

$$\text{card}(A) = \text{card}(A \cap B) + \text{card}(A \setminus B) \quad \text{et} \quad \text{card}(B) = \text{card}(A \cap B) + \text{card}(B \setminus A).$$

En sommant, on a donc

$$\begin{aligned} \text{card}(A) + \text{card}(B) - \text{card}(A \cap B) &= 2\text{card}(A \cap B) + \text{card}(A \setminus B) + \text{card}(B \setminus A) - \text{card}(A \cap B) \\ &= \text{card}(A \setminus B) + \text{card}(A \cap B) + \text{card}(B \setminus A) \\ &= \text{card}(A \cup B). \end{aligned}$$

■

5.1.3 Injections, surjections et bijections entre ensembles finis

Théorème 1

Soient E et F deux ensembles finis non vides.

Alors :

1. Il existe une injection $f : E \longrightarrow F$ si et seulement si $\text{card}(E) \leq \text{card}(F)$.
2. Il existe une surjection $f : E \longrightarrow F$ si et seulement si $\text{card}(E) \geq \text{card}(F)$.
3. E et F sont en bijection si et seulement si $\text{card}(E) = \text{card}(F)$.

Démonstration. Soit $n = \text{card}(E)$ et $p = \text{card}(F)$. Il existe des bijections $\varphi : \llbracket 1, n \rrbracket \longrightarrow E$ et $\psi : \llbracket 1, p \rrbracket \longrightarrow F$.

1. • Supposons qu'il existe une injection $f : E \longrightarrow F$.
Alors l'application $\psi^{-1} \circ f \circ \varphi : \llbracket 1, n \rrbracket \longrightarrow \llbracket 1, p \rrbracket$ est une injection comme composée d'injections.
D'après le lemme, ceci implique que $\text{card}(E) = n \leq p = \text{card}(F)$.
• Supposons que $n \leq p$.
D'après le lemme, il existe une injection $g : \llbracket 1, n \rrbracket \longrightarrow \llbracket 1, p \rrbracket$.
Alors l'application $f = \psi \circ g \circ \varphi^{-1} : E \longrightarrow F$ est une injection comme composée d'injections.
2. • Supposons qu'il existe une surjection $f : E \longrightarrow F$.
Alors l'application $\psi^{-1} \circ f \circ \varphi : \llbracket 1, n \rrbracket \longrightarrow \llbracket 1, p \rrbracket$ est une surjection comme composée de surjections.
D'après le lemme, ceci implique que $\text{card}(E) = n \geq p = \text{card}(F)$.
• Supposons que $n \geq p$.
D'après le lemme, il existe une surjection $g : \llbracket 1, n \rrbracket \longrightarrow \llbracket 1, p \rrbracket$.
Alors l'application $f = \psi \circ g \circ \varphi^{-1} : E \longrightarrow F$ est une surjection comme composée de surjections.
3. • Supposons qu'il existe une bijection $f : E \longrightarrow F$.
Alors l'application $\psi^{-1} \circ f \circ \varphi : \llbracket 1, n \rrbracket \longrightarrow \llbracket 1, p \rrbracket$ est une bijection comme composée de bijections.
D'après le lemme, ceci implique que $\text{card}(E) = n = p = \text{card}(F)$.
• Supposons que $n = p$.
D'après le lemme, il existe une bijection $g : \llbracket 1, n \rrbracket \longrightarrow \llbracket 1, p \rrbracket$.
Alors l'application $f = \psi \circ g \circ \varphi^{-1} : E \longrightarrow F$ est une bijection comme composée de bijections.

■

Proposition 3

Soient E et F deux ensembles finis non vides tels que

$$\text{card}(E) = \text{card}(F).$$

Alors :

1. Toute injection de E dans F est bijective.
2. Toute surjection de E dans F est bijective.

Démonstration.

1. Soit $f : E \rightarrow F$ une injection.
 Alors $\tilde{f} : E \rightarrow f(E)$ est bijective ce qui implique que $\text{card}(E) = \text{card}(f(E))$.
 Or, $\text{card}(E) = \text{card}(F)$ donc $\text{card}(f(E)) = \text{card}(F)$.
 Puisque $f(E) \subset F$, ceci implique que $f(E) = F$, donc f est surjective.
 f étant à la fois injective et surjective, f est bijective.
2. Soit $f : E \rightarrow F$ une surjection. Soit $p = \text{card}(F)$. Notons $y_1, \dots, y_p$ les éléments de F .
 Puisque f est surjective, pour tout $1 \leq k \leq p$, il existe $x_k \in E$ tel que $f(x_k) = y_k$.
 Soit $A = \{x_k | 1 \leq k \leq p\}$.
 Par construction, la restriction de f à A , $f|_A : A \rightarrow F$ est injective et surjective, donc bijective.
 On en déduit que $\text{card}(A) = \text{card}(F) = \text{card}(E)$, et puisque $A \subset E$, ceci implique que $A = E$.
 Finalement, $f|_A = f$, donc f est bijective. ■

Remarque 4. Le procédé utilisé dans la dernière preuve est général : pour toute application $f : E \rightarrow F$, on peut toujours trouver une partie $A \subset E$ telle que la restriction de f à A $f|_A : A \rightarrow f(E)$ soit bijective.

Il en découle directement le corollaire suivant :

Corollaire 3

Soient E et F deux ensembles finis non vides tels que $\text{card}(E) = \text{card}(F)$. Soit $f : E \rightarrow F$ une application.

On a les équivalences :

$$f \text{ est injective} \Leftrightarrow f \text{ est surjective} \Leftrightarrow f \text{ est bijective.}$$

Remarque 5. Autrement dit, pour montrer qu'une application entre ensembles finis de même cardinal est bijective, il suffit de montrer l'injectivité ou la surjectivité.

En revanche, si E est un ensemble infini, il peut exister une application $f : E \rightarrow F$ qui soit injective (ou surjective) mais pas bijective.

Par exemple, l'application $f : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$ définie par $f(n) = 2n$ est injective mais pas surjective tandis que l'application $g : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$ définie par $g(n) = \left\lfloor \frac{n}{2} \right\rfloor$ est surjective mais pas injective.

5.2 Cardinaux remarquables

5.2.1 Cardinal d'un produit cartésien

Proposition 4: Cardinal d'un produit cartésien

Soient E et F deux ensembles finis.

Alors le produit cartésien $E \times F$ est un ensemble fini et son cardinal vérifie

$$\text{card}(E \times F) = \text{card}(E) \times \text{card}(F).$$

Démonstration. Soit $n = \text{card}(E)$.

Notons $E = \{x_1, \dots, x_n\}$.

Alors $E \times F = \bigcup_{i=1}^n (\{x_i\} \times F)$ avec $(\{x_i\} \times F) \cap (\{x_j\} \times F) = \emptyset$ si $i \neq j$.

Ainsi, $\text{card}(E \times F) = \sum_{i=1}^n \text{card}(\{x_i\} \times F)$.

Or, pour tout $1 \leq i \leq n$, on a une bijection $f_i : \{x_i\} \times F \longrightarrow F$
 $(x_i, y) \longmapsto y$ donc

$$\text{card}(\{x_i\} \times F) = \text{card}(F).$$

Il en découle que

$$\text{card}(E \times F) = \sum_{i=1}^n \text{card}(F) = n \text{card}(F) = \text{card}(E) \times \text{card}(F).$$

■

Remarque 6. C'est le nombre de façons de choisir de façon indépendante un élément de E et un élément de F .

Plus généralement, si $E_1, \dots, E_p$ sont des ensembles finis, alors

$$\text{card}(E_1 \times \dots \times E_p) = \prod_{k=1}^p \text{card}(E_k).$$

Corollaire 4

Soit E un ensemble fini.

Alors pour tout $p \in \mathbb{N}^*$,

$$\text{card}(E^p) = (\text{card}(E))^p.$$

Autrement dit, si $\text{card}(E) = n$, il y a n^p p -uplets (ou p -listes) de E .

Remarque 7. Soit $n = \text{card}(E)$. Le nombre $\text{card}(E^p)$ désigne le nombre de façons de choisir successivement p objets parmi n objets distincts, avec d'éventuelles répétitions.

Exemple 2. Soit $E = \{0, 1\}$. Alors

$$E^3 = \{(0, 0, 0), (0, 0, 1), (0, 1, 0), (0, 1, 1), (1, 0, 0), (1, 0, 1), (1, 1, 0), (1, 1, 1)\}$$

contient $2^3 = 8$ éléments.

5.2.2 Nombre d'applications entre ensembles finis

Proposition 5: Cardinal de F^E

Soient E et F deux ensembles finis non vides. Soit F^E l'ensemble des applications de E dans F .

Alors

$$\text{card}(F^E) = \text{card}(F)^{\text{card}(E)}.$$

Remarque 8. Ceci justifie la notation F^E , qui est utilisée même dans le cas où les ensembles sont infinis (par exemple dans le cas des suites réelles, que l'on note $\mathbb{R}^{\mathbb{N}}$).

Démonstration. Soit $n = \text{card}(E)$. Notons $E = \{x_1, \dots, x_n\}$.

Une application $f : E \rightarrow F$ est entièrement caractérisée par la donnée du n -uplet $(f(x_1), \dots, f(x_n)) \in F^n$.

Il y a donc autant d'applications de E dans F que de n -uplets dans F^n , c'est à dire d'après la section précédente, $\text{card}(F)^n = \text{card}(F)^{\text{card}(E)}$. ■

Exemple 3. Soit $n \in \mathbb{N}^*$. Il y a exactement 2^n applications de $\llbracket 1, n \rrbracket$ dans $\{0, 1\}$.

Définition 3: p -uplet sans répétition

Soit E un ensemble non vide. Soit $(x_1, \dots, x_p) \in E^p$.

Le p -uplet $(x_1, \dots, x_p)$ est dit sans répétition si

$$\forall (i, j) \in \llbracket 1, p \rrbracket^2, i \neq j \Rightarrow x_i \neq x_j.$$

Autrement dit, $(x_1, \dots, x_p)$ est dit sans répétition si les éléments du p -uplet sont distincts deux à deux.

Remarque 9. • Le nombre de p -uplets sans répétition est le nombre de façons de choisir successivement p objets parmi n objets distincts sans répétition.

- Si $p > \text{card}(E)$, il n'existe pas de p -uplets de E sans répétition.

Proposition 6: Nombre de p -uplets sans répétition

Soit E un ensemble fini de cardinal $n \in \mathbb{N}^*$. Soit $p \in \llbracket 1, n \rrbracket$.

Le nombre de p -uplets sans répétition de E est

$$n(n-1) \dots (n-p+1) = \frac{n!}{(n-p)!}.$$

Démonstration. Construisons un p -uplet $(x_1, \dots, x_p) \in E^p$.

On peut choisir le premier élément $x_1 \in E$ de n façons différentes.

On peut choisir le deuxième élément $x_2 \in E \setminus \{x_1\}$ de $n-1$ façons différentes.

On peut choisir le troisième élément $x_3 \in E \setminus \{x_1, x_2\}$ de $n-2$ façons différentes, etc...

On peut choisir le p -ème élément $x_p \in E \setminus \{x_1, \dots, x_{p-1}\}$ de $n - (p-1) = n - p + 1$ façons différentes.

Il y a donc $n(n-1) \dots (n-p+1)$ façons de construire un p -uplet sans répétition.

D'autre part, on a bien

$$\frac{n!}{(n-p)!} = \frac{\prod_{k=1}^n k}{\prod_{k=1}^{n-p} k} = \frac{\prod_{k=1}^{n-p} k \prod_{k=n-p+1}^n k}{\prod_{k=1}^{n-p} k} = \prod_{k=n-p+1}^n k = n(n-1) \dots (n-p+1).$$

■

Exemple 4. Le nombre de façons de tirer successivement et sans remise trois boules dans une urne contenant 5 boules numérotées de 1 à 5 est égal à

$$\frac{5!}{(5-3)!} = \frac{5!}{2!} = 5 \times 4 \times 3 = 60.$$

Corollaire 5: Nombre d'applications injectives entre ensembles finis

Soient E et F deux ensembles finis non vides de cardinaux $\text{card}(E) = n$ et $\text{card}(F) = p$ avec $n \leq p$.

Il y a $\frac{p!}{(p-n)!}$ applications injectives de E dans F .

Démonstration. Notons $E = \{x_1, \dots, x_n\}$.

Une application injective $f : E \longrightarrow F$ est entièrement caractérisée par la donnée du n -uplet sans répétition (par injectivité de f) $(f(x_1), \dots, f(x_n))$.

Il y a donc autant d'applications injectives de E dans F que de n -uplets sans répétition dans F qui est de cardinal p , à savoir $\frac{p!}{(p-n)!}$. ■

Définition 4: Permutation

Soit E un ensemble fini de cardinal $n \in \mathbb{N}^*$.

On appelle permutation de E tout n -uplet de E contenant exactement une fois chaque élément de E .

Proposition 7: Nombre de permutations d'un ensemble fini

Soit E un ensemble fini de cardinal $n \in \mathbb{N}^*$.

Il y a $n!$ permutations de E .

Démonstration. Une permutation est un n -uplet sans répétition de E : il y en a donc $\frac{n!}{(n-n)!} = \frac{n!}{0!} = n!$. ■

Remarque 10. $n!$ est le nombre de façons de choisir successivement et sans répétition tous les objets d'un ensemble de cardinal $n \in \mathbb{N}^*$.

Exemple 5. Les permutations de $\llbracket 1, 3 \rrbracket$ sont au nombre de 6 :

$$(1, 2, 3); (1, 3, 2); (2, 1, 3); (2, 3, 1); (3, 1, 2); (3, 2, 1).$$

Corollaire 6: Nombre de bijections entre ensembles finis

Soient E et F deux ensembles finis de même cardinal $n \in \mathbb{N}^*$.

Il y a $n!$ bijections de E dans F .

Démonstration. Il y a $\frac{n!}{(n-n)!} = n!$ injections de E dans F . Or, une application de E dans F est injective si et seulement si elle est bijective puisque E et F ont même cardinal, d'où le résultat. ■

Remarque 11. Il y a donc $n!$ bijections de E dans E . On appelle également permutations ces bijections.

5.2.3 Coefficients binomiaux et formule du binôme de Newton

Définition 5: Coefficients binomiaux

Soient k un entier relatif et n un entier naturel. On définit le coefficient binomial k parmi n , noté $\binom{n}{k}$ par

$$\binom{n}{k} = \begin{cases} 0 & \text{si } k > n \text{ ou } k < 0 \\ \frac{n(n-1)\dots(n-k+1)}{k!} = \frac{n!}{k!(n-k)!} & \text{si } 0 \leq k \leq n. \end{cases}$$

Remarque 12. Notons que par convention, $\binom{0}{0} = 1$.

Exemple 6. Pour tout $n \in \mathbb{N}$, on a

$$\binom{n}{0} = \frac{n!}{0!(n-0)!} = 1; \binom{n}{n} = \frac{n!}{n!(n-n)!} = 1; \binom{n}{1} = \frac{n!}{1!(n-1)!} = n; \binom{n}{n-1} = \frac{n!}{(n-1)!(n-(n-1))!} = n.$$

$$\text{On a également } \binom{n}{2} = \frac{n!}{2!(n-2)!} = \frac{n(n-1)}{2}.$$

Définition 6: Combinaisons

Soit E un ensemble fini de cardinal $n \in \mathbb{N}^*$. Soit $p \in \llbracket 0, n \rrbracket$.
On appelle p -combinaison de E toute partie de E à p éléments.

Exemple 7. Soit $E = \{1, 2, 3\}$. L'ensemble des 2-combinaisons de E (aussi appelées paires) est

$$\{\{1, 2\}, \{1, 3\}, \{2, 3\}\}.$$

On constate qu'il y en a $\binom{3}{2} = 3$.

Plus généralement, on a le résultat suivant :

Proposition 8: Nombre de combinaisons

Soit E un ensemble fini de cardinal $n \in \mathbb{N}^*$. Soit $p \in \llbracket 0, n \rrbracket$.
Il y a $\binom{n}{p}$ p -combinaisons de E .

Démonstration. Soit $p \in \llbracket 0, n \rrbracket$. Construisons une partie à p éléments de E .

Si $p = 0$, seul l'ensemble vide convient. Il y a donc bien $\binom{n}{0} = 1$ 0-combinaison de E .

Supposons que $1 \leq p \leq n$.

Commençons par construire un p -uplet sans répétition de E . Il y a $\frac{n!}{(n-p)!}$ façons de choisir un tel p -uplet. Notons-le $(x_1, \dots, x_p)$. On en déduit naturellement une partie à p -éléments de E , à savoir $A = \{x_1, \dots, x_p\}$.

Or, toute permutation de A est un p -uplet sans répétition dont on aurait déduit la même partie à p éléments.

Autrement dit, il y a $p!$ p -uplets qui mènent à la même partie de E à p éléments.

Il faut donc diviser le nombre de p -uplets sans répétition de E par $p!$ pour obtenir le nombre de p -combinaisons de E .

Il y a donc bien $\frac{n!}{p!(n-p)!} = \binom{n}{p}$ p -combinaisons de E . ■

Remarque 13. $\binom{n}{p}$ est le nombre de façons de choisir simultanément p objets parmi n objets distincts. L'ordre desdits éléments n'est pas pris en compte.

Exemple 8. Dans un jeu de 52 cartes, il y a $\binom{52}{5}$ mains de 5 cartes possibles.

Les coefficients binomiaux ont des propriétés calculatoires intéressantes que nous allons désormais énoncer.

Proposition 9

Pour tout $n \in \mathbb{N}$, pour tout $k \in \llbracket 0, n \rrbracket$,

1.

$$\binom{n}{k} = \binom{n}{n-k};$$

2. (Formule du capitaine)

$$\binom{n+1}{k+1} = \frac{n+1}{k+1} \binom{n}{k}.$$

Démonstration.

1. • Preuve combinatoire : Soit E un ensemble à n éléments. $\binom{n}{k}$ est le nombre de parties de E à k éléments. Or, construire une partie à k éléments revient exactement à construire son complémentaire, c'est à dire à choisir les $n - k$ éléments parmi n qui ne vont pas constituer cette partie. D'où l'égalité attendue.

• Preuve calculatoire : Remarquons d'abord que si $0 \leq k \leq n$, alors $0 \leq n - k \leq n$. On a

$$\binom{n}{n-k} = \frac{n!}{(n-k)!(n-(n-k))!} = \frac{n!}{(n-k)!k!} = \binom{n}{k}.$$

2. • Preuve combinatoire : On dispose d'une classe de $n + 1$ élèves. On souhaite compter le nombre de façons de former une équipe de $k + 1$ personnes disposant d'un capitaine.

Il y a deux manières de faire :

- On choisit les $k + 1$ personnes qui vont constituer l'équipe ($\binom{n+1}{k+1}$ façons de le faire) parmi lesquelles on choisit un capitaine ($k + 1$ façons de le faire).

Il y a donc $(k + 1) \times \binom{n+1}{k+1}$ façons de former ces équipes.

- On commence par choisir le capitaine de l'équipe ($n + 1$ possibilités) puis on choisit les k autres personnes de l'équipe parmi les n restantes ($\binom{n}{k}$ façons de le faire).

Il y a donc $(n + 1) \times \binom{n}{k}$ façons de former ces équipes.

Finalement, on a donc $(k + 1) \times \binom{n+1}{k+1} = (n + 1) \times \binom{n}{k}$ d'où $\binom{n+1}{k+1} = \frac{n+1}{k+1} \binom{n}{k}$.

• Preuve calculatoire : On a

$$\frac{n+1}{k+1} \binom{n}{k} = \frac{n+1}{k+1} \frac{n!}{k!(n-k)!} = \frac{(n+1)!}{(k+1)!(n+1-(k+1))!} = \binom{n+1}{k+1}.$$

■

La relation la plus célèbre et la plus importante à bien des égards portant sur les coefficients binomiaux est la suivante :

Proposition 10: Relation de Pascal

Pour tout $n \in \mathbb{N}$, pour tout $k \in \mathbb{Z}$, on a

$$\binom{n}{k-1} + \binom{n}{k} = \binom{n+1}{k}.$$

Démonstration. • Si $k < 0$, tous les coefficients binomiaux en question sont nuls donc l'égalité est vérifiée.

- Si $k = 0$, on a $\binom{n}{-1} = 0$ et $\binom{n}{0} = \binom{n+1}{0} = 1$ donc l'égalité est vérifiée.
- Si $k > n + 1$, tous les coefficients binomiaux en question sont nuls donc l'égalité est vérifiée.
- Si $k = n + 1$, on a $\binom{n}{k-1} = \binom{n+1}{k} = 1$ et $\binom{n}{k} = 0$ donc l'égalité est vérifiée.
- Supposons dorénavant que $1 \leq k \leq n$ de telle sorte que tous les coefficients binomiaux en jeu soient non nuls. (Si $n = 0$, les quatre cas précédents couvrent tous les cas possibles).

Donnons d'abord une preuve combinatoire. Soit E un ensemble à $n + 1$ éléments dont on souhaite construire une partie A à k éléments (ce qui peut se faire de $\binom{n+1}{k}$ façons différentes). Soit $a \in E$.

Il y a deux possibilités qui s'excluent :

- Soit on choisit a pour le mettre dans A et il reste alors à choisir $k - 1$ éléments parmi les n autres de E pour compléter A , ce qui peut se faire de $\binom{n}{k-1}$ façons différentes ;
- Soit on laisse a de côté et il reste alors à choisir k éléments parmi les n autres de E pour compléter A , ce qui peut se faire de $\binom{n}{k}$ façons différentes.

En additionnant les possibilités issues des deux cas, on trouve bien

$$\binom{n}{k-1} + \binom{n}{k} = \binom{n+1}{k}.$$

On peut sinon vérifier cette relation par le calcul :

$$\begin{aligned} \binom{n}{k-1} + \binom{n}{k} &= \frac{n!}{(k-1)!(n-k+1)!} + \frac{n!}{k!(n-k)!} \\ &= \frac{kn! + (n-k+1)n!}{k!(n+1-k)!} \\ &= \frac{(n+1)n!}{k!(n+1-k)!} \\ &= \frac{(n+1)!}{k!(n+1-k)!} \\ &= \binom{n+1}{k}. \end{aligned}$$

■

Remarque 14. (Triangle de Pascal)

La relation de Pascal permet de calculer les coefficients binomiaux de manière récursive en les disposant dans un triangle, à la manière de Pascal.

Ainsi, pour obtenir le coefficient en ligne $n + 1$ et colonne k , il suffit d'ajouter les deux coefficients qui se situent au-dessus et au-dessus à gauche de ce dernier, c'est à dire les coefficients en ligne n et colonnes k et $k - 1$. On obtient le triangle ci-dessous :

1						
1	1					
1	2	1				
1	3	3	1			
1	4	6	4	1		
1	5	10	10	5	1	
1	6	15	20	15	6	1

On rappelle les identités remarquables bien connues :

Proposition 11: Identités remarquables

Pour tout $(a, b) \in \mathbb{R}^2$, on a :

1. $(a + b)^2 = a^2 + 2ab + b^2$;
2. $(a - b)^2 = a^2 - 2ab + b^2$;
3. $(a - b)(a + b) = a^2 - b^2$.

Exemple 9. En utilisant, la première identité remarquable, on trouve aussi que

$$(a + b)^3 = a^3 + 3a^2b + 3ab^2 + b^3.$$

Plus généralement, essayons de donner une formule permettant de calculer $(a + b)^n$ pour tout entier naturel n .

Proposition 12: Formule du binôme de Newton

Soient $(a, b) \in \mathbb{R}^2$, soit $n \in \mathbb{N}$.

Alors

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

Démonstration. Montrons cette propriété par récurrence sur $\mathbb{N}$.

Pour $n = 0$, on a $(a + b)^0 = 1 = \sum_{k=0}^0 \binom{0}{0} a^0 b^{0-0}$, donc la propriété est vraie au rang $n = 0$.

Soit $n \in \mathbb{N}$ fixé. Supposons que $(a + b)^n = \sum_{k=0}^n \binom{n}{k} a^k b^{n-k}$. Montrons que la propriété reste vraie au rang $n + 1$.

On a

$$\begin{aligned} (a + b)^{n+1} &= (a + b)(a + b)^n \\ &= (a + b) \sum_{k=0}^n \binom{n}{k} a^k b^{n-k} \\ &= \sum_{k=0}^n \binom{n}{k} a^{k+1} b^{n-k} + \sum_{k=0}^n \binom{n}{k} a^k b^{n-k+1} \\ &= \sum_{i=1}^{n+1} \binom{n}{i-1} a^i b^{n-i+1} + \sum_{k=0}^n \binom{n}{k} a^k b^{n-k+1} \quad (i = k + 1) \\ &= \sum_{k=0}^{n+1} \binom{n}{k-1} a^k b^{n-k+1} + \sum_{k=0}^{n+1} \binom{n}{k} a^k b^{n-k+1} \quad \left(\binom{n}{-1} = \binom{n}{n+1} = 0 \right) \\ &= \sum_{k=0}^{n+1} \left(\binom{n}{k-1} + \binom{n}{k} \right) a^k b^{n-k+1} \\ &= \sum_{k=0}^{n+1} \binom{n+1}{k} a^k b^{n+1-k}, \end{aligned}$$

ce qui prouve la propriété au rang $n + 1$ et achève la récurrence. La deuxième égalité s'obtient en échangeant les rôles de a et b . ■

Remarque 15. On peut également donner une preuve combinatoire de cette formule.

En effet, lorsqu'on développe $(a + b)^n$, on regroupe les termes par monômes de la forme $a^k b^{n-k}$. Pour cela, on choisit les k facteurs $a + b$ dans lesquels on choisira le a (il y a $\binom{n}{k}$ façons de le faire) et on choisit b dans les autres facteurs (il n'y a qu'un seul choix pour cela).

Pour tout $0 \leq k \leq n$, il y a donc $\binom{n}{k}$ facteurs de la forme $a^k b^{n-k}$, d'où le résultat.

Exemple 10.

$$\begin{aligned}(a + b)^4 &= \binom{4}{0} a^0 b^4 + \binom{4}{1} a^1 b^3 + \binom{4}{2} a^2 b^2 + \binom{4}{3} a^3 b + \binom{4}{4} a^4 b^0 \\ &= b^4 + 4ab^3 + 6a^2b^2 + 4a^3b + a^4.\end{aligned}$$

Corollaire 7

Soient $(a, b) \in \mathbb{R}^2$, soit $n \in \mathbb{N}$.

Alors

$$(a - b)^n = \sum_{k=0}^n \binom{n}{k} (-1)^{n-k} a^k b^{n-k} = \sum_{k=0}^n \binom{n}{k} (-1)^k a^{n-k} b^k.$$

Démonstration. Il suffit d'appliquer le binôme de Newton à a et $-b$ et utiliser le fait que $(-b)^{n-k} = (-1)^{n-k} b^{n-k}$ et $(-b)^k = (-1)^k b^k$. ■

Exemple 11. $(a - b)^3 = a^3 - 3a^2b + 3ab^2 - b^3$.

Enfin, la formule du binôme de Newton permet également de calculer le cardinal de l'ensemble des parties d'un ensemble fini.

Proposition 13: Cardinal de l'ensemble des parties d'un ensemble fini

Soit E un ensemble fini. Soit $\mathcal{P}(E)$ l'ensemble des parties de E .

Alors $\mathcal{P}(E)$ est un ensemble fini et son cardinal vérifie

$$\text{card}(\mathcal{P}(E)) = 2^{\text{card}(E)}.$$

En particulier, pour tout $n \in \mathbb{N}$,

$$\sum_{k=0}^n \binom{n}{k} = 2^n.$$

Démonstration. Soit $n = \text{card}(E)$.

• Preuve combinatoire : Listons les éléments de $E = \{x_1, \dots, x_n\}$.

Si on souhaite former une partie A de E , on passe en revue les éléments de E et pour chacun, on a deux choix : le prendre dans A ou ne pas le prendre. Il y a donc 2 possibilités pour x_1 , 2 possibilités pour x_2 , ..., 2 possibilités pour x_n .

Il y a donc 2^n façons de former une partie de E d'où le résultat.

• Preuve calculatoire : Pour tout $0 \leq k \leq n$, il y a $\binom{n}{k}$ parties de E à k éléments. Pour calculer le nombre de parties de E , il faut donc sommer pour tout $0 \leq k \leq n$ le nombre de parties de E à k éléments, i.e.

$$\text{card}(\mathcal{P}(E)) = \sum_{k=0}^n \binom{n}{k} = \sum_{k=0}^n \binom{n}{k} 1^k 1^{n-k} = (1 + 1)^n = 2^n.$$

■