Dénombrement

Aperçu

1. Partie finie de $\mathbb{N}$
2. Analyse combinatoire

L 1 *Soient deux entiers m, t tels que $m > 1$ et $1 \leq t \leq m$.*
Alors il existe une bijection ϕ de l'ensemble $T = [\![1, m]\!] \setminus \{ t \}$ sur $[\![1, m-1]\!]$.

Démonstration. L'application $s : [\![1, m]\!] \to [\![1, m]\!]$ définie par

$$s(t) = m, \qquad s(m) = t, \qquad s(k) = k \text{ si } k \notin \{ m, t \}$$

est une bijection de $[\![1, m]\!]$ sur $[\![1, m]\!]$ (c'est par exemple l'identité si $t = m$).
L'application ϕ de T dans $[\![1, m-1]\!]$ définie par $\phi(k) = s(k)$ convient. ∎

T 2 *Soient* $p, q \in \mathbb{N}^\star$.

1. *Il existe une injection de* $[\![1, p]\!]$ *dans* $[\![1, q]\!]$ *si et seulement si* $p \leq q$.
2. *Il existe une surjection de* $[\![1, p]\!]$ *dans* $[\![1, q]\!]$ *si et seulement si* $p \geq q$.
3. *Il existe une bijection de* $[\![1, p]\!]$ *dans* $[\![1, q]\!]$ *si et seulement si* $p = q$.

P 3 *Soient X et Y deux ensembles. On suppose qu'il existe une bijection de X sur Y. Alors X est fini si et seulement si Y est fini et dans ce cas*

$$\operatorname{card}(X) = \operatorname{card}(Y).$$

E 4

1. Tout singleton est fini et de cardinal 1.
2. L'application $k \mapsto 2k$ est une bijection de $[\![1, n]\!]$ sur l'ensemble des entiers pairs de $[\![1, 2n]\!]$. Cet ensemble est donc fini et de cardinal n.
3. Si $a, b \in \mathbb{N}$ et $a \leq b$, alors $\operatorname{card}([\![a, b]\!]) = b - a + 1$.
4. Si $\operatorname{card}(X) = n \geq 1$ et si $x \in X$, alors $\operatorname{card}(X \setminus \{ x \}) = n - 1$.

T 5 *Soient X et Y deux ensembles finis, de cardinaux n et p respectivement.*

1. *Il existe une injection de X dans Y si, et seulement si, $n \leq p$.*
2. *Il existe une surjection de X dans Y si, et seulement si, $n \geq p$.*
3. *Il existe une bijection de X dans Y si, et seulement si, $n = p$.*

C 6 Principe des tiroirs et des chaussettes

Si p chaussettes sont rangées dans n tiroirs et $p > n$, alors il existe un tiroir qui contient au moins deux chaussettes.

T 7 **Toute partie d'un ensemble fini est finie**

Soient X *un ensemble fini et* A *une partie de* X*. Alors l'ensemble* A *est fini,*

$$\operatorname{card}(A) \leq \operatorname{card}(X).$$

De plus, $\operatorname{card}(A) = \operatorname{card}(X)$ *si et seulement si* $A = X$*.*

T 8 *Soient X et Y deux ensembles finis ayant le même nombre d'éléments, et f une application de X dans Y. Les assertions suivantes sont équivalentes*

(i) *f est une injection ;*

(ii) *f est une surjection ;*

(iii) *f est une bijection.*

Ce théorème s'applique au cas d'une application f d'un ensemble **fini** dans lui-même. Une bijection de E dans lui-même s'appelle une **permutation** de E.

Ce théorème est faux pour les ensembles infinis.

C 9 $\mathbb{N}$ *est infini.*

T 13 *Soit A et B deux ensembles finis et disjoints. Alors $A \cup B$ est fini et*

$$\operatorname{card}(A \cup B) = \operatorname{card}(A) + \operatorname{card}(B).$$

Démonstration. Si A ou B est vide, le résultat est clair. Supposant A et B de cardinaux p et q strictement positifs, on possède deux bijections

$$\alpha : A \to [\![1, p]\!] \text{ et } \beta : B \to [\![1, q]\!].$$

On définit alors $\gamma : A \cup B \to [\![1, p+q]\!]$ par

$$\gamma(x) = \begin{cases} \alpha(x) & x \in A \\ p + \beta(x) & x \in B. \end{cases}$$

Il ne vous reste plus qu'à montrer que γ est bijective. ∎

T 13 *Soit A et B deux ensembles finis et disjoints. Alors $A \cup B$ est fini et*

$$\operatorname{card}(A \cup B) = \operatorname{card}(A) + \operatorname{card}(B).$$

C 14 *Soient $A_1, A_2, \dots, A_n$ des ensembles finis deux à deux disjoints. Alors $A_1 \cup A_2 \cup \cdots \cup A_n$ est fini et*

$$\operatorname{card}\left(A_1 \cup A_2 \cup \cdots \cup A_n\right) = \operatorname{card}(A_1) + \operatorname{card}(A_2) + \cdots + \operatorname{card}(A_n)$$

Démonstration. Par récurrence sur n. ∎

C 15 *Soit A et B deux ensembles finis. Alors $A \setminus B$ est fini et*

$$\operatorname{card}(A \setminus B) = \operatorname{card}(A) - \operatorname{card}(A \cap B).$$

Démonstration. Notons $A' = A \setminus B = A \setminus (A \cap B)$. Remarquons que $A \cap B$ et A' sont finies car incluses dans A qui est finie.
Or A est l'union disjointe de A' et $A \cap B$, donc

$$\operatorname{card}(A) = \operatorname{card}(A') + \operatorname{card}(A \cap B).$$

∎

T 17 *Soient A et B deux ensembles finis. Alors $A \cup B$ est fini et*

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

Démonstration. Notons $A' = A \setminus B = A \setminus (A \cap B)$ et $B' = B \setminus A$. Ce sont des parties finies car incluses dans A et B qui sont finies.
Puisque A est réunion disjointe de $A \cap B$ et A',

$$\operatorname{card}(A) = \operatorname{card}(A \cap B) + \operatorname{card}(A').$$

De même, $A \cup B$ est réunion disjointe de B et de A' donc

$$\operatorname{card}(A \cup B) = \operatorname{card}(B) + \operatorname{card}(A')$$

L'égalité annoncée en résulte:

$$\operatorname{card}(A \cup B) + \operatorname{card}(A \cap B) + \operatorname{card}(A') = \operatorname{card}(A) + \operatorname{card}(B) + \operatorname{card}(A').$$

∎

T 18 *Soient X et Y deux ensembles finis. Alors l'ensemble $X \times Y$ est fini et*

$$\operatorname{card}(X \times Y) = \operatorname{card} X \times \operatorname{card} Y.$$

Démonstration. Posons $m = \operatorname{card}(X)$ et $p = \operatorname{card}(Y)$. Si $x \in X$, $A_x = \{x\} \times Y$ est une partie à p éléments de $X \times Y$, car $y \mapsto (x, y)$ est une bijection de Y sur A_x. Lorsque x décrit X, les A_x forment une **partition** de $X \times Y$: ces parties sont deux à deux disjointes et leur réunion est $X \times Y$. Le cardinal de $X \times Y$ est donc $\overbrace{p + p + \ldots p}^{m \text{ termes}}$, c'est-à-dire mp. ∎

C 19 *Soient $p \geq 1$ un entier et $X_1, \ldots, X_n$ des ensembles finis. Alors l'ensemble produit $X_1 \times X_2 \times \cdots \times X_p$ est fini et l'on a*

$$\operatorname{card}\left(X_1 \times X_2 \times \cdots \times X_p\right) = \operatorname{card}(X_1) \times \operatorname{card}(X_2) \times \cdots \times \operatorname{card}(X_p).$$

En particulier, si X est un ensemble fini,

$$\operatorname{card}(X^p) = (\operatorname{card} X)^p.$$

D 20 Soit X un ensemble. Les éléments de X^p sont appelés ***p*-listes** ou ***p*-uplets** d'éléments de X.

R

- Les p-listes sont aussi appelées **mots**, **listes** ou **suites** de longueur p.
- L'ordre des éléments de la p-liste est important.
- Une p-liste peu contenir plusieurs fois le même élément.
- Il y a n^p p-listes d'un ensemble à n éléments.

E 21 Si $X = \{ 1, 2, 3, 4, 5 \}$,

- $(1, 2, 2)$ et $(5, 3, 4)$ sont des 3-listes d'éléments de X.
- $(5, 3, 4)$ et $(3, 5, 4)$ sont des 3-listes différentes.

T 22 **Principe des Bergers**

Soient X, Y deux ensembles et f une surjection de X sur Y. On suppose Y fini et que les ensembles $f^{-1}(\{ y \})$, pour $y \in Y$, aient tous même cardinal p (c'est-à-dire que tout élément de Y possède exactement p antécédents par f). Alors X est fini et

$$\mathrm{card}(X) = \mathrm{card}(Y) \times p.$$

E 23 Combien y-a-t-il de couples $(x, y) \in [\![1, 10]\!]$ tels que $x \neq y$?

T 24 *Soient X, Y deux ensembles finis de cardinaux respectifs n et p.*
L'ensemble $\mathscr{F}(X,Y)$ des applications de X dans Y est de cardinal p^n :

$$\operatorname{card}(\mathscr{F}(X,Y)) = (\operatorname{card} Y)^{\operatorname{card} X}.$$

Démonstration. Lorsque X est vide, il existe une unique application de X dans Y : celle dont le graphe est vide. La formule est donc correcte, puisque $p^0 = 1$.
Dans le cas contraire, numérotons les éléments de X : $x_1, \ldots, x_n$, ce qui revient à choisir une bijection $i \mapsto x_i$ de $[\![1, n]\!]$ sur X. On définit alors une application

$$\begin{array}{rccl} F : & \mathscr{F}(X,Y) & \to & Y^n \\ & f & \mapsto & \big(f(x_1), \ldots, f(x_n)\big) \end{array}.$$

Soit $v = (y_1, \ldots, y_n) \in Y^n$. Le seul antécédent de v par F est l'application $f : X \to Y$ définie par $f(x_i) = y_i, i = 1, \ldots, n$. Ainsi F est bijective. Le cardinal de Y^n étant p^n, on a la conclusion. ∎

L 25 *Soit X un ensemble. L'application $A \mapsto \mathbb{1}_A$ est une bijection de l'ensemble $\mathcal{P}(X)$ des parties de X sur $\mathscr{F}(X, \{0, 1\})$.*

Démonstration. À toute fonction $f \in \mathscr{F}(X, \{0, 1\})$, associons la partie $f^{-1}(\{1\})$ de X.
Les applications

$$\begin{array}{rcl} \mathcal{P}(X) & \to & \mathscr{F}(X, \{0, 1\}) \\ A & \mapsto & \mathbb{1}_A \end{array} \qquad \text{et} \qquad \begin{array}{rcl} \mathscr{F}(X, \{0, 1\}) & \to & \mathcal{P}(X) \\ f & \mapsto & f^{-1}(\{1\}) \end{array}$$

sont deux bijections réciproques (regarder les composées dans les deux sens). ∎

T 26 *Soit X un ensemble fini. L'ensemble $\mathcal{P}(X)$ des parties de X est fini et*

$$\operatorname{card}(\mathcal{P}(X)) = 2^{\operatorname{card}(X)}.$$

D 27 Soit X un ensemble. Un **p-arrangement** d'éléments de X est une *p-liste d'éléments distincts deux à deux*, c'est-à-dire sans répétition.
Si $\text{card}(X) = n$, une n-liste d'éléments distincts de X est appelée une **permutation** de X.

R

- On dit aussi un **arrangement de p éléments** ou **p-liste d'éléments distincts** ou **p-uplet d'éléments distincts**.
- L'ordre des éléments d'un p-arrangement est important.

R Soit Y un ensemble fini, de cardinal n. Une suite $(y_1, \dots, y_p)$ de p éléments de Y est par définition une application $f : [\![1, p]\!] \to Y$ $\big(f(i) = y_i$ pour $i = 1 \dots p\big)$, et $y_1, \dots, y_p$ sont distincts si, et seulement si, f est *injective*. Ainsi, un arrangement des n éléments de Y pris p à p est simplement une application *injective* de $[\![1, p]\!]$ dans Y.

Généralisons ce résultat :

P 28 *Soient X, Y deux ensembles finis, $p = \operatorname{card}(X)$, $n = \operatorname{card}(Y)$. Si $p \leq n$, le cardinal de l'ensemble $I(X, Y)$ des injections de X dans Y est* [a]

$$\frac{n!}{(n-p)!} = n \times (n-1) \times \cdots \times (n-p+2) \times (n-p+1)$$

Si $p > n$, il n'y a pas d'injection de X dans Y.

[a] 28: Il y a p termes dans ce produit.

C 29

1. *Le nombre de bijections entre deux ensembles finis de même cardinal* n *est* $n!$.
2. *Le nombre de permutations d'un ensemble fini de cardinal* n *est* $n!$.

D 30 Soit X un ensemble. On appelle **combinaison de p éléments** de X, ou p-combinaison, toute partie à p éléments de X.

R

- Les éléments d'une combinaison de p éléments de E sont deux à deux distincts.
- L'ordre des éléments d'une combinaison n'a pas d'importance.

E 31 Si $X = \{ 1, 2, 3, 4, 5 \}$,

- $\{ 1, 2, 3 \}$ est une combinaison de 3 éléments de X.
- $\{ 1, 2, 3 \} = \{ 2, 3, 1 \}$.
- $\{ 1, 2, 2 \}$ n'est pas une combinaison de 3 éléments de X.

P 32 *Soit X un ensemble fini de cardinal n. Étant donné un entier $p \in [\![0, n]\!]$, le nombre de parties à p éléments de X est*

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

On pose $\binom{n}{p} = 0$ pour tout couple d'entiers naturels tels que $p > n$. Avec cette convention, le nombre des parties à p éléments d'un ensemble à n éléments est $\binom{n}{p}$ pour *tout* entier naturel p.

Esquisse. Une p-liste d'éléments distincts de X est une permutation d'une combinaison de p éléments de X.
Pour chaque façon de choisir une combinaison de p éléments de X, il y a $p!$ permutations de ses éléments. On a donc

$$\operatorname{card} I([\![1, p]\!], X) = p! \times \operatorname{card} \mathcal{P}_p(X).$$

∎

P 33

1. $\binom{n}{p} = \binom{n}{n-p}$.
2. $\binom{n}{0} = \binom{n}{n} = 1$.
3. $\binom{n}{1} = \binom{n}{n-1} = n$.
4. Si $p > 0$, $p\binom{n}{p} = n\binom{n-1}{p-1}$.

P 34 *Pour tout entier n, on a*

$$\binom{n}{0} + \binom{n}{1} + \cdots + \binom{n}{n-1} + \binom{n}{n} = 2^n.$$

Démonstration. Soit X est un ensemble à n éléments. Les $\mathcal{P}_p(X)$, $p = 0 \ldots n$, forment une partition de $\mathcal{P}(X)$. ∎

P 35 **Relation de Pascal**

Soient n et p des entiers ; on a

$$\binom{n+1}{p+1} = \binom{n}{p+1} + \binom{n}{p}.$$

Démonstration. Voici une démonstration sans calcul.
Soit X un ensemble de cardinal $n+1$, a un élément de X et $X' = X \setminus \{ a \}$. Les parties à p éléments de X qui ne contiennent pas a sont les parties à p éléments de X' : leur nombre est $\binom{n}{p}$. Celles qui contiennent a sont de la forme $A \cup \{ a \}$ où A est une partie à $p-1$ éléments de A', et leur nombre est donc $\binom{n}{p-1}$. ∎

D'où la construction par récurrence du tableau des coefficients binomiaux, appelé **triangle de Pascal**

	$p=0$	$p=1$	$p=2$	$\dots$	p	$p+1$	$\dots$	$p=n$	$p=n+1$
$n=0$	1								
$n=1$	1	1							
$n=2$	1	2	1						
$n=3$	1	3	3	1					
$\vdots$	$\vdots$			$\ddots$					
n	1	$\binom{n}{1}$	$\binom{n}{2}$	$\dots$	$\binom{n}{p}$	$\binom{n}{p+1}$	$\dots$	1	
$n+1$	1	$\binom{n+1}{1}$	$\binom{n+1}{2}$	$\dots$		$\binom{n+1}{p+1}$	$\dots$	$\binom{n+1}{n}$	1

E 36 Calculer la somme $S = \sum_{k=1}^{n} k \binom{n}{k}$.

1. Par calcul.
2. Par dénombrement.
3. Par application de la formule du binôme.

Démonstration. 1. Par calcul. De $\binom{n}{k} = \frac{n}{k}\binom{n-1}{k-1}$, on tire $k\binom{n}{k} = n\binom{n-1}{k-1}$, d'où

$$S = \sum_{k=1}^{n} n\binom{n-1}{k-1} = n\sum_{k=0}^{n-1}\binom{n-1}{k} = n2^{n-1}.$$

$\blacksquare$

2. Par dénombrement. Soit E un ensemble de cardinal n. On calcule de deux manières différentes le nombre $B = \sum_{A \in \mathcal{P}(E)} \operatorname{card} A$.

On a

$$B = \sum_{A \in \mathcal{P}(E)} \operatorname{card} A = \sum_{k=0}^{n} \left(\sum_{\substack{A \in \mathcal{P}(E) \\ \operatorname{card}(A)=k}} \operatorname{card} A \right).$$

Pour tout $k \in [\![0, n]\!]$, les parties A de E de cardinal k sont en nombre $\binom{n}{k}$, donc la somme de leurs cardinaux est $k\binom{n}{k}$. En faisant varier k, on trouve

$$B = \sum_{k=1}^{n} k \binom{n}{k} = S.$$

L'application $A \mapsto \complement A$ est une permutation de $\mathcal{P}(E)$. On a donc

$$2B = \sum_{A \in \mathcal{P}(E)} \operatorname{card} A + \sum_{A \in \mathcal{P}(E)} \operatorname{card} \complement A = \sum_{A \in \mathcal{P}(E)} \left(\operatorname{card} A + \operatorname{card} \complement A \right) = \sum_{A \in \mathcal{P}(E)} n = n2^n.$$

D'où $S = n2^{n-1}$.

■

3. Par application de la formule du binôme. Pour tout $x \in \mathbb{R}$, on a $(1+x)^n = \sum_{k=0}^{n} \binom{n}{k} x^k$. En dérivant par rapport à x, il vient

$$n(1+x)^{n-1} = \sum_{k=1}^{n} k \binom{n}{k} x^{k-1},$$

et pour $x = 1$, on obtient $S = n(1+1)^{n-1} = n2^{n-1}$.

$\blacksquare$