Proposition I.6 (Cardinal d'un complémentaire). *Si $A \subset B$, alors $|\mathcal{C}_B A| = |B| - |A|$.*

Éléments de preuve. Écrire l'un des trois ensembles en jeu comme union disjointe des deux autres. □

Corollaire I.7 (Cardinal d'un sous-ensemble). *Si $A \subset B$, alors $|A| \leq |B|$, avec égalité si et seulement si $A = B$.*

Éléments de preuve. Quel est le cardinal de $\mathcal{C}_B A$ lorsqu'on est dans le cas d'égalité ? □

Proposition I.8 (Cardinal d'une union quelconque). *Soit A et B des ensembles finis. On a :*

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

Éléments de preuve. On peut décomposer en $A \cup B = A \cup (B \setminus (A \cap B))$. □

Proposition I.9 (Cardinal d'un produit cartésien). *1. Soit A et B deux ensembles finis. Alors $|A \times B| = |A| \times |B|$. 2. Plus généralement, soit $A_1, \ldots, A_n$ des ensembles finis. Alors*

$$|A_1 \times \cdots \times A_n| = \prod_{i=1}^{n} |A_i|.$$

Éléments de preuve. Le point 2 s'obtient du 1 par récurrence. Pour le point 1, découper en tranche, ou utiliser une bijection de $[0, nm-1]$ dans $[0, n-1] \times [0, m-1]$ définie par une opération arithmétique classique. □

I.3 Grands principes combinatories

Par définition même :

Proposition I.10 (Injectivité, surjectivité, bijectivité et cardinal). *Soit E et F deux ensembles finis, et soit $f : E \longrightarrow F$ une application. Alors : 1. Si f est bijective, Card(E) = Card(F). 2. Si f est injective, Card$(E) \leq$ Card(F). 3. Si f est surjective, Card$(E) \geq$ Card(F)*

Éléments de preuve. Restreindre ou corestreindre de façon adéquate, de sorte à se ramener à une bijection.
Cela incite, pour des dénombrements (ou calculs de cardinaux, à se ramener par une bijection, à des modèles simples et connus). □

Méthode I.11 (Combinatoire bijective). *Pour dénombrer un ensemble fini E (c'est-à-dire pour déterminer son cardinal), une méthode classique consiste à le mettre en bijection avec un ensemble dont le cardinal est connu.*

Exemple I.12. *Par définition des coefficients binoniaux, le cardinal de $P_k([1, n])$ est $\binom{n}{k}$. En déduire le nombre de l'ensemble des chemins monotones de $(0, 0)$ à (a, b) dans N^2, chaque pas étant de longueur 1, et se faisant vers la droite ou vers le haut.*

Méthode I.13 (Tri, partitionnement, principe additif). *Si on peut trier les objets de E en plusieurs paquets disjoints $E_1, \ldots, E_n$ de cardinaux respectifs $a_1, \ldots, a_n$, alors le cardinal de E est*

$$E = \sum_{k=1}^{n} a_k.$$

Exemple I.14. *Formule sommatoire, ou lemme de la chaussette :*

$$\sum_{k=0}^{p} \binom{n+k}{n} = \binom{n+p+1}{n+1}.$$

Méthode I.15 (Choix successifs, principe multiplicatif)**.** *Dénombrer un ensemble se fait souvent en s'intéressant à la façon de construire un élément, en décomposant sa construction de façon élémentaire en plusieurs étapes. Si un élément se construit en 2 étapes, et que : - la première étape peut se faire de a façons différentes ; - pour chaque choix de première étapes, la deuxième étape peut se faire de b façons différentes (le nombre b ne dépendant pas de la première étape) ; - toutes les constructions faites ainsi sont distinctes*

alors le nombre total d'éléments est ab.

Éléments de preuve. Une formalisation passe par un partitionnement de l'ensemble E dénombré en

$$\bigcup_{k\in[1,a]} E_k$$

, où on a rangé les éléments à dénombrer dans des ensembles E_k, en les triant suivant le résultat de la première étape. La troisième hypothèse certifie que l'union est disjointe (ce qui est représenté par le signe $+$ dans l'union), et la deuxième hypothèse assure que les E_k sont tous de cardinal b. Cette formalisation est équivalente au lemme du berger, stipulant que si $f : E \to F$ est une surjection telle que les images réciproques $f^{-1}(\{y\})$ aient toutes même cardinal b, alors $|E| = b|F|$. □

Exemple I.16. *Dénombrement des injections, cardinal de $\mathfrak{S}_n$.*

Remarque I.17. *Les deux méthodes peuvent être combinées, par exemple un tri, et pour chaque part du tri, une succession de choix.*

Exemple I.18. *Formule de Vandermonde :*

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

Méthode I.19 (Formalisation par couple, et lecture inverse)**.** *Une formalisation mathématique de deux choix successifs peut se faire sous forme d'un couple, en mettant E en bijection avec un ensemble F de couples (x, y) où x est le résultat du premier choix, y le résultat du deuxième choix. Il y a souvent des contraintes entre x et y (liés à la façon de procéder au second choix). Ces contraintes définissent une propriété satisfaite par x et y, qu'on note $P(x, y)$. Ainsi*

$$F = \{(x, y) \mid P(x, y)\}$$

Sous cette forme on peut voir que la contrainte peut souvent être retournée en lisant le couple dans l'autre sens : F et clairement en bijection avec

$$G = \{(y, x) \mid P(x, y)\}$$

Cela revient à intervertir le rôle des deux étapes, donc l'ordre dans lequel on effectue la construction.

Exemple I.20. *La formule du capitaine, ou comité-président.*

Méthode I.21 (Démonstration ou interprétation combinatoire d'une formule)**.** *- Interpréter combinatoriement une formule permet d'en avoir une compréhension intuitive et naturelle, qui aide à la retenir ou à la retrouver. - Cela permet également éventuellement de la démontrer, comme la formule de Vandermonde ci-dessus. - Pour démontrer ou interpréter combinatoriement une formule, chercher un modèle adéquat, et dénombrer de deux façons différentes, par exemple de façon directe et en effectuant un tri, ou bien en effectuant des choix successifs dans des ordres différents etc.*

Exemple I.22. *Interpréter combinatoriement la formule*

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

Méthode I.23 (Signes, principe de l'interrupteur)**.** *- Une formule combinatoire ne contient a priori que des termes positifs. Certaines formules contenant aussi des signes négatifs peuvent quand même se démontrer combinatoriement, en réarrageant l'égalité de sorte à passer les termes négatifs de l'autre côté. On a alors deux quantités à comparer, ce qu'on peut faire combinatoriement, par exemple en établissant des bijections. - Une situation classique : des signes qui alternent devant une expression avec des coefficients binomiaux : il s'agit de comparer des ensembles ayant des cardinaux de parité différente pour cela, faire entrer ou sortir un élément (interrupteur qu'on allume ou éteint). On illustre cela dans l'exemple qui suit, qui est à peu près le plus simple du genre.*

Exemple I.24. *Montrer combinatoriement que*

$$\sum_{k=0}^{n} (-1)^k \binom{n}{k} = 0 \text{ si } n > 0.$$

II. Dénombrabilité

II.1 Cardinaux infinis

On ne peut pas définir d'emblée (en tout cas pas simplement) de cardinal d'un ensemble fini. Cantor fait une construction (compliquée) qui permet de définir des cardinaux (ou plutôt des classes cardinales) de façon explicite, mais ce n'est pas l'objet de ce cours. Nous nous contentons de définir la condition d'égalité des cardinaux.

Définition II.1 (Ensembles de même cardinal)**.** *Soit E et F deux ensembles. - On dit que E et F ont même cardinal s'il existe une bijection $f : E \to F$. On dit aussi que E est équipotent à F. - On dit que E est subpotent à F (ou que le cardinal de E est strictement inférieur à celui de F) s'il existe une injection de E dans F.*

Remarque II.2 ((HP))**.** *- On peut montrer que la relation de subpotence vérifie les propriétés d'une relation d'ordre sur les classes cardinales. L'antisymétrie provient d'un théorème classique dû à Cantor et Berstein, affirmant que s'il existe une injection $f : E \to F$, et une injection $g : F \to E$, alors il existe une bijection $E \to F$. - Avec l'axiome du choix, on peut montrer que cette « relation d'ordre » est totale.*

Attention, certaines intuitions sur les comparaisons de cardinaux d'ensembles finis peuvent être fausses dans ce contexte.

Remarque II.3 (Avertissement)**.** *Deux ensembles vérifiant une inclusion stricte $E \subsetneq F$ peuvent être de même cardinal. Pourtant F contient strictement plus d'éléments que E.*

Exemple II.4 (Hôtel de Hilbert)**.** *$f : \mathbb{N} \to \mathbb{N}^*$ tel que $f(n) = n + 1$ est une bijection. Donc $\mathbb{N}$ et $\mathbb{N}^*$ ont même cardinal.*