

Chapitre V : Calcul algébrique

Dans tout ce chapitre, on note $\mathbb{K}$ le corps des réels ou celui des complexes. Ainsi $x \in \mathbb{K}$ signifie $x \in \mathbb{R}$ ou $x \in \mathbb{C}$.

A propos de la notion de famille.

Soit I un ensemble. Une famille $(a_i)_{i \in I}$ est une collection d'objets a_i que l'on indice, indexe ou « numérote » par les éléments de I .

- Dans une famille un même nombre peut être répété (on peut avoir $a_i = a_j$ pour $i \neq j$). Par exemple si $I = [-3; 3] = \{-3, -2, -1, 0, 1, 2, 3\}$ et si pour tout $i \in I$, $a_i = i^2$, alors la famille $(a_i)_{i \in I}$ contient, entre autres, deux fois l'élément 1. Il ne faut donc pas confondre la famille $(a_i)_{i \in I}$ avec l'ensemble $\{a_i \mid i \in I\} = \{0, 1, 4, 9\}$.
- Dans une famille l'ordre des éléments n'a pas d'importance. Ainsi $(i)_{i \in \{1, 2, 3\}} = (4 - i)_{i \in \{1, 2, 3\}}$. Une famille finie n'est donc pas le même objet qu'un n -uplet pour lequel l'ordre est important $(1, 2) \neq (2, 1)$.
- Exemples :
 - $(2^i)_{0 \leq i \leq 5}$ est la famille 1, 2, 4, 8, 16 et 32.
 - $(2k + 1)_{k \in \mathbb{N}}$ est la suite des entiers naturels impairs.
 - $(\sqrt{x})_{x \in \mathbb{R}_+}$ est une autre écriture pour désigner la fonction $x \mapsto \sqrt{x}$.
 - $(f^2)_{f \in \mathcal{F}(\mathbb{R}, \mathbb{R})}$ est la famille des carrés des fonctions de $\mathbb{R}$ dans $\mathbb{R}$.

Dans tout ce chapitre I désignera un ensemble **FINIE** d'éléments. Même si rien n'interdit de considérer un ensemble fini de réels, de complexes ou autres, on pourra toujours considérer que I désigne un ensemble fini d'entiers (naturels ou relatifs). On aura souvent en particulier (mais pas toujours) $I = \{0, \dots, n\}$ ou $I = \{1, \dots, n\}$.

I La somme $\sum$ et le produit $\prod$

I.1 Notation $\sum$ et $\prod$

Définition I.1

Soient I un ensemble fini et $(a_i)_{i \in I}$ une famille de nombres réels ou complexes. On note

- $\sum_{i \in I} a_i$ **la somme** de tous les éléments de la famille $(a_i)_{i \in I}$,
- $\prod_{i \in I} a_i$ **le produit** de tous les éléments de la famille $(a_i)_{i \in I}$.

Si $I = [q; p] = \{q, q + 1, \dots, p - 1, p\}$, avec $(p, q) \in \mathbb{Z}^2$, on note également

$$\sum_{i \in I} a_i = \sum_{q \leq i \leq p} a_i = \sum_{i=q}^p a_i = a_q + a_{q+1} + a_{q+2} + \dots + a_p$$

$$\prod_{i \in I} a_i = \prod_{q \leq i \leq p} a_i = \prod_{i=q}^p a_i = a_q \times a_{q+1} \times a_{q+2} \times \dots \times a_p.$$

Exemple 1 :

1. Si $I = [1; 5]$ et $a_i = i$ pour tout $i \in I$, alors

$$\sum_{i=1}^5 a_i = \sum_{i=1}^5 i = \frac{5(5+1)}{2} = 15 \quad \text{et} \quad \prod_{i=1}^5 a_i = \prod_{i=1}^5 i = 120 = 5!$$

2. Si $I = \{0, 2, 4, 6\}$ et $a_i = 2^i$ pour tout $i \in I$, alors

$$\sum_{i \in I} a_i = 2^0 + 2^2 + 2^4 + 2^6 = 1 + 4 + 16 + 64 = 85 \quad \text{et} \quad \prod_{i \in I} a_i = 2^0 \cdot 2^2 \cdot 2^4 \cdot 2^6 = 2^{12} = 4^6 = 16^3 = 4096.$$

Remarque 2 : D'une façon général il est possible de noter la somme (la même remarque est valable pour le produit) $\sum_I a_i$ par $\sum_{\text{description de l'ensemble } I \text{ sans accolade}} a_i$. Par exemple si $I = \{i \in \mathbb{N} \mid i \text{ divise } 12\}$ alors

$$\sum_{i \in I} i = \sum_{\substack{i \in \mathbb{N} \\ i|12}} i = 1 + 2 + 3 + 4 + 6 + 12 = 28.$$

Remarque 3 : Vous trouverez parfois les conventions suivantes :

- si $I = \emptyset$ est vide, $\sum_{i \in I} a_i = 0$ et $\prod_{i \in I} a_i = 1$,
- si $q > p$ alors $\sum_{i=q}^p a_i = 0$.

Remarque 4 : L'indice de sommation est muet !

L'indice i utilisé pour décrire la famille $(a_i)_{i \in I}$ ainsi que la somme $\sum_{i \in I} a_i$ ou le produit $\prod_{i \in I} a_i$ est un indice muet qui peut être modifié en une autre lettre sans porter à conséquence :

$$\sum_{i \in I} a_i = \sum_{k \in I} a_k = \sum_{f \in I} a_f = \sum_{\zeta \in I} a_\zeta.$$

Naturellement et comme à l'accoutumée, on veillera à ne pas utiliser une lettre précédemment réservée.

Remarque 5 :



IMPORTANT. La somme totale (ou le produit) ne doit JAMAIS dépendre de l'indice de sommation (ou de multiplication). Des monstruosité du genre

$$\sum_{k=1}^{10k} a_k \text{ ou } \sum_{k=1}^{100} a_k = \frac{57k+2}{100} \text{ ne doivent jamais être commises, sinon je cogne.}$$

Remarque 6 : La longueur d'une somme $\sum_{k=q}^p \dots$ est de $p - q + 1$.

I.2 Premières manipulations

Proposition I.2

Soient $n \in \mathbb{N}^*$, I un ensemble fini ayant n éléments, $(a_i)_{i \in I}$ et $(b_i)_{i \in I}$ deux familles de réels ou de complexes et $\lambda \in \mathbb{K}$. On a

- $\left(\sum_{i \in I} a_i \right) + \left(\sum_{i \in I} b_i \right) = \sum_{i \in I} (a_i + b_i).$
- $\left(\prod_{i \in I} a_i \right) \left(\prod_{i \in I} b_i \right) = \prod_{i \in I} (a_i b_i).$
- $\sum_{i \in I} (\lambda a_i) = \lambda \sum_{i \in I} a_i.$
- $\prod_{i \in I} (\lambda a_i) = \lambda^n \prod_{i \in I} a_i.$

Définition I.3

Pour tout entier $n \in \mathbb{N}^*$, on appelle **factorielle** n l'entier défini par

$$n! = \prod_{k=1}^n k.$$

Et on pose également par convention, $0! = 1$.

Exemple 7 : Soient $n \in \mathbb{N}^*$, $I = \llbracket 1; n \rrbracket$ et $(a_k)_{k \in I}$ la famille des entiers pairs de 2 à $2n$.

1. Pour tout $k \in I$ décrire a_k en fonction de k .

2. En déduire une écriture de $\prod_{k \in I} a_k$ en fonction de $n! = \prod_{k=1}^n k$.

Rappel : deux ensembles I et J sont disjoints si leur intersection $I \cap J$ est vide, si pour tout $i \in I$, $i \notin J$ et pour tout $j \in J$, $j \notin I$.

Proposition I.4

Soient I et J deux ensembles **disjoints** et $(a_i)_{i \in I \sqcup J}$ une famille d'éléments de réels ou de complexes, alors

$$\left(\sum_{i \in I} a_i \right) + \left(\sum_{j \in J} a_j \right) = \sum_{i \in I \sqcup J} a_i \quad \text{et} \quad \left(\prod_{i \in I} a_i \right) \left(\prod_{j \in J} a_j \right) = \prod_{i \in I \sqcup J} a_i.$$

En particulier on a la **relation de Chasles** : pour tout $(p, q, m) \in \mathbb{Z}^3$, $q \leq m < p$ on a

$$\left(\sum_{k=q}^m a_k \right) + \left(\sum_{k=m+1}^p a_k \right) = \sum_{k=q}^p a_k \quad \text{et} \quad \left(\prod_{k=q}^m a_k \right) \left(\prod_{k=m+1}^p a_k \right) = \prod_{k=q}^p a_k.$$

Exemple 8 : Soit $n \in \mathbb{N}^*$. On note B_n le produit des entiers impairs entre 1 et $2n+1$ et A_n le produit des entiers pairs entre 1 et $2n$. Simplifier l'écriture de $A_n B_n$ puis à l'aide de l'exemple 7, déterminer B_n en fonction de $(2n+1)!$ et $n!$.

Anti-Proposition I.5

Il est évident que $\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \neq \frac{1}{2+2}$ à ce titre vous ne commettrez jamais dans votre vie l'erreur d'affirmer le contraire qu'en général

$$\sum_{k=p}^q \frac{1}{a_k} \neq \frac{1}{\sum_{k=p}^q a_k}.$$

I.3 Techniques de calculs

Proposition I.6 (glissement d'indice)

Soit $(p, q) \in \mathbb{N}^2$, $q \leq p$ et $(a_k)_{k \in \mathbb{N}}$ une famille de réels ou de complexes. Pour tout $r \in \mathbb{N}$, en posant $\tilde{k} = k - r$, on a

$$\sum_{k=q+r}^{p+r} a_k = \sum_{\tilde{k}=q}^p a_{\tilde{k}+r} = \sum_{k=q}^p a_{k+r} \quad \text{et} \quad \prod_{k=q+r}^{p+r} a_k = \prod_{\tilde{k}=q}^p a_{\tilde{k}+r} = \prod_{k=q}^p a_{k+r}.$$

Exemple 9 : Simplifions $\prod_{k=1}^n (k+5)$. Pour tout $n \in \mathbb{N}^*$, en posant $\tilde{k} = k+5$, on a si $k=1$, $\tilde{k}=6$ et si $k=n$, $\tilde{k}=n+5$. Enfin, $k+5 = \tilde{k}$. Donc

$$\prod_{k=1}^n (k+5) = \prod_{\tilde{k}=6}^{n+5} \tilde{k} = \prod_{k=6}^{n+5} k = \frac{\prod_{k=1}^{n+5} k}{\prod_{k=1}^5 k} = \frac{(n+5)!}{5!}.$$

Exemple 10 : Soit $n \in \mathbb{N}^*$ et $S_n = \sum_{k=1}^n \frac{2}{k(k+1)}$. Puisque pour tout $k \in \mathbb{N}^*$, $\frac{2}{k(k+1)} = \frac{1}{k} - \frac{1}{k+1}$, alors

$$S_n = \sum_{k=1}^n \frac{1}{k} - \sum_{k=1}^n \frac{1}{k+1}.$$

Par le changement de variable $\tilde{k} = k+1$ on a

$$\sum_{k=1}^n \frac{1}{k+1} = \sum_{\tilde{k}=2}^{n+1} \frac{1}{\tilde{k}} = \sum_{k=2}^{n+1} \frac{1}{k}.$$

Donc, pour $n \geq 2$,

$$S_n = \sum_{k=1}^n \frac{1}{k} - \sum_{k=2}^{n+1} \frac{1}{k} = 1 + \sum_{k=2}^n \frac{1}{k} - \sum_{k=2}^n \frac{1}{k} - \frac{1}{n+1} = 1 - \frac{1}{n+1} = \frac{n}{n+1}.$$

Remarque 11 : Il est possible d'effectuer d'autres changements de variables plus exotiques transformant un ensemble I en un ensemble J pourvu que ces deux ensembles aient exactement le même nombre d'éléments.

Exemple 12 : On reprend l'exemple 7 et on note A_n le produit des entiers pairs entre 2 et $2n$: $A_n = \prod_{\substack{1 \leq k \leq 2n \\ k \text{ pair}}} k$.

Dans cet exemple l'ensemble $I = \{k \in \llbracket 1; 2n \rrbracket \mid k \text{ pair}\}$ est en bijection avec l'ensemble $\llbracket 1; n \rrbracket$. Donc en posant le changement de variable $\tilde{k} = \frac{k}{2}$, on obtient :

$$A_n = \prod_{\substack{1 \leq k \leq 2n \\ k \text{ pair}}} k = \prod_{\tilde{k}=1}^n (2\tilde{k}) = \prod_{k=1}^n (2k) = 2^n n!$$

Proposition I.7 (somme et produit télescopique)

Soient $(p, q) \in \mathbb{Z}^2$, $q \leq p$ et $(a_i)_{i \in \llbracket q; p+1 \rrbracket}$ une famille de réels ou de complexes. On a

$$\sum_{i=q}^p (a_{i+1} - a_i) = a_{p+1} - a_q.$$

Si de plus les a_i sont non nuls alors

$$\prod_{i=q}^p \frac{a_{i+1}}{a_i} = \frac{a_{p+1}}{a_q}.$$

Démonstration. Soient $(p, q) \in \mathbb{Z}^2$, $q \leq p$ et $(a_i)_{i \in \llbracket q; p+1 \rrbracket}$ une famille de réels ou de complexes. Alors,

$$\sum_{i=q}^p (a_{i+1} - a_i) = \sum_{i=q}^p a_{i+1} - \sum_{i=q}^p a_i.$$

En procédant au changement de variable $\tilde{i} = i + 1$, on observe de plus que

$$\sum_{i=q}^p a_{i+1} = \sum_{i=q+1}^{p+1} a_i = \sum_{i=q}^p a_i + a_{p+1} - a_q.$$

Par conséquent,

$$\sum_{i=q}^p (a_{i+1} - a_i) = \sum_{i=q}^p a_i + a_{p+1} - a_q - \sum_{i=q}^p a_i = a_{p+1} - a_q.$$

□

Sommation par paquets

Exemple 13 : Soient $n \in \mathbb{N}^*$ et $S_n = \sum_{k=1}^{2n} (-1)^k k$. On regroupe les termes deux par deux :

$$S_n = \underbrace{-1+2}_{=1} \underbrace{-3+4}_{=1} \dots \underbrace{-(2n-1)+(2n)}_{=1} = \sum_{k=1}^n (2k - (2k-1)) = \sum_{k=1}^n 1 = n.$$

I.4 Sommes et produits remarquables

Proposition I.8 (somme et produit d'une constante)

Soit $(p, q) \in \mathbb{Z}^2$, $q \leq p$. Pour tout $\lambda \in \mathbb{K}$,

$$\sum_{k=q}^p \lambda = (p - q + 1) \lambda \quad \text{et} \quad \prod_{k=q}^p \lambda = \lambda^{p-q+1}.$$

Proposition I.9

Pour tout $n \in \mathbb{N}^*$, on a

$$1. \sum_{k=1}^n k = \frac{n(n+1)}{2}. \quad 2. \sum_{k=1}^n k^2 = \frac{n(n+1)(2n+1)}{6}. \quad 3. \sum_{k=1}^n k^3 = \left(\frac{n(n+1)}{2} \right)^2.$$

Démonstration.

1. Soient $n \in \mathbb{N}^*$ et $S_n = \sum_{k=1}^n k$. En effectuant le changement de variable $\tilde{k} = n - k + 1$, on écrit

$$S_n = \sum_{k=1}^n k = \sum_{\tilde{k}=1}^n (n - \tilde{k} + 1) = \sum_{k=1}^n (n + 1) - \sum_{k=1}^n k = (n + 1)n - S_n.$$

Ainsi $2S_n = n(n + 1)$ et donc

$$S_n = \frac{n(n+1)}{2}.$$

Autre démonstration : pour tout $k \in \mathbb{N}^*$, on a $(k + 1)^2 - k^2 = 2k + 1$ dont on déduit l'égalité suivante :

$$\sum_{k=1}^n ((k + 1)^2 - k^2) = \sum_{k=1}^n (2k + 1) = 2S_n + n.$$

Or le premier terme est une somme télescopique. Donc

$$(n + 1)^2 - 1^2 = 2S_n + n.$$

De cette égalité on conclut que

$$S_n = \frac{n^2 + 2n + 1 - 1 - n}{2} = \frac{n^2 + n}{2} = \frac{n(n+1)}{2}.$$

2. Soient $n \in \mathbb{N}^*$ et $S_n = \sum_{k=1}^n k^2$. Pour tout $k \in \mathbb{N}$, on a $(k + 1)^3 = k^3 + 3k^2 + 3k + 1$ et donc $(k + 1)^3 - k^3 = 3k^2 + 3k + 1$. Donc en sommant entre 1 et n ,

$$\sum_{k=1}^n ((k + 1)^3 - k^3) = \sum_{k=1}^n (3k^2 + 3k + 1) = 3 \sum_{k=1}^n k^2 + 3 \sum_{k=1}^n k + n.$$

Or d'après le point précédent, on sait que $\sum_{k=1}^n k = \frac{n(n+1)}{2}$. Donc,

$$\sum_{k=1}^n ((k + 1)^3 - k^3) = 3S_n + 3 \frac{n(n+1)}{2} + n.$$

D'autre part $\sum_{k=1}^n ((k + 1)^3 - k^3)$ est une somme télescopique. Donc $\sum_{k=1}^n ((k + 1)^3 - k^3) = (n + 1)^3 - 1 =$

$n^3 + 3n^2 + 3n$. Ainsi,

$$\begin{aligned} n^3 + 3n^2 + 3n &= 3S_n + 3 \frac{n(n+1)}{2} + n \\ \Rightarrow n^3 + 3n^2 + 2n - 3 \frac{n(n+1)}{2} &= 3S_n \\ \Rightarrow 2n^3 + 6n^2 + 4n - 3n^2 - 3n &= 6S_n \\ \Rightarrow 2n^3 + 3n^2 + n &= 6S_n \\ \Rightarrow S_n &= \frac{n(2n^2 + 3n + 1)}{6} \\ \Rightarrow S_n &= \frac{n(n+1)(2n+1)}{6}. \end{aligned}$$

3. On effectue la même méthode que précédemment. Soit $n \in \mathbb{N}^*$ et posons $S_n = \sum_{k=1}^n k^3$. Puisque pour tout $k \in \mathbb{N}$, $(k+1)^4 = k^4 + 4k^3 + 6k^2 + 4k + 1$, on en déduit que

$$(n+1)^4 - 1 = \sum_{k=1}^n ((k+1)^4 - k^4) = \sum_{k=1}^n (4k^3 + 6k^2 + 4k + 1).$$

En utilisant les points précédents, on obtient,

$$\begin{aligned} (n+1)^4 - 1 &= 4S_n + 6 \frac{n(n+1)(2n+1)}{6} + 4 \frac{n(n+1)}{2} + n \\ \Leftrightarrow n^4 + 4n^3 + 6n^2 + 4n &= 4S_n + n((n+1)(2n+1) + 2(n+1) + 1) \\ \Leftrightarrow n^4 + 4n^3 + 6n^2 + 4n &= 4S_n + n(2n^2 + 3n + 1 + 2n + 2 + 1) \\ \Leftrightarrow n(n^3 + 4n^2 + 6n + 4 - 2n^2 - 5n - 4) &= 4S_n \\ \Leftrightarrow n(n^3 + 2n^2 + n) &= 4S_n \\ \Leftrightarrow S_n &= \frac{n^2(n^2 + 2n + 1)}{4} = \frac{n^2(n+1)^2}{4} = \left(\frac{n(n+1)}{2}\right)^2. \end{aligned}$$

□

Rappel (suite arithmétique)

Soient $(u_n)_{n \in \mathbb{N}}$ une suite de réels ou de complexes et $r \in \mathbb{K}$. Les assertions suivantes sont équivalentes.

1. La suite $(u_n)_{n \in \mathbb{N}}$ est une suite arithmétique de raison r .
2. Pour tout $n \in \mathbb{N}$, $u_{n+1} = u_n + r$
3. Pour tout $n \in \mathbb{N}$, $u_n = u_0 + rn$
4. Pour tout $(p, q) \in \mathbb{N}^2$, $q \leq p$, $u_p = u_q + r(p - q)$.

Exemple 14 : (somme arithmétique). Soient $r \in \mathbb{K}$ et $(u_n)_{n \in \mathbb{N}}$ une suite arithmétique de raison r . Pour tout $n \in \mathbb{N}$, calculer $\sum_{k=0}^n u_k$.

Exemple 15 : (somme arithmétique). Soient $r \in \mathbb{K}$ et $(u_n)_{n \in \mathbb{N}}$ une suite arithmétique de raison r . Montrons que pour tout $(p, q) \in \mathbb{N}^2$, $q \leq p$,

$$\sum_{k=q}^p u_k = \frac{u_p + u_q}{2} (p - q + 1).$$

Autrement dit,

somme des termes = moyenne du premier et dernier terme $\times$ nombres de termes.

Démonstration. Soient $r \in \mathbb{C}$, $(u_n)_{n \in \mathbb{N}}$ une suite arithmétique de raison r et p et q deux entiers naturels tels que $q \leq p$. Alors, d'après le résultat de l'exemple précédent, si $q \geq 1$,

$$\sum_{k=q}^p u_k = \sum_{k=0}^p u_k - \sum_{k=0}^{q-1} u_k = (p+1)u_0 + r \frac{p(p+1)}{2} - qu_0 - r \frac{(q-1)q}{2} = (p-q+1)u_0 + r \frac{p^2 + p - q^2 + q}{2}.$$

Notez que ce résultat reste encore vrai si $q = 0$. D'autre part, on a

$$\begin{aligned}\frac{u_p + u_q}{2} (p - q + 1) &= \frac{u_0 + pr + u_0 + qr}{2} (p - q + 1) \\ &= \left(u_0 + r \frac{p+q}{2} \right) (p - q + 1) \\ &= u_0 (p - q + 1) + r \frac{p^2 - pq + p + pq - q^2 + q}{2} \\ &= u_0 (p - q + 1) + r \frac{p^2 + p - q^2 + q}{2}.\end{aligned}$$

Conclusion,

$$\sum_{k=q}^p u_k = \frac{u_p + u_q}{2} (p - q + 1).$$

□

Exemple 16 : Calculer la somme des nombres impairs de 1 à 99 en utilisant une suite arithmétique.

Rappel (suite géométrique)

Soient $(u_n)_{n \in \mathbb{N}}$ une suite de réels ou de complexes et $q \in \mathbb{K}$. Les assertions suivantes sont équivalentes.

1. La suite $(u_n)_{n \in \mathbb{N}}$ est une suite géométrique de raison q .
2. Pour tout $n \in \mathbb{N}$, $u_{n+1} = qu_n$
3. Pour tout $n \in \mathbb{N}$, $u_n = q^n u_0$
4. Pour tout $(m, n) \in \mathbb{N}^2$, $m \leq n$, $u_n = q^{n-m} u_m$.

Proposition I.10 (somme géométrique)

Soient $q \in \mathbb{K}$ et $(u_n)_{n \in \mathbb{N}}$ une suite géométrique de raison q . Si $q \neq 1$, alors pour tout $n \in \mathbb{N}$,

$$\sum_{k=0}^n q^k = \frac{1 - q^{n+1}}{1 - q}.$$

Démonstration. Soient $q \in \mathbb{K} \setminus \{1\}$ et $(u_n)_{n \in \mathbb{N}}$ une suite géométrique de raison q . Soit $n \in \mathbb{N}$. Remarquons que

$$(1 - q) \sum_{k=0}^n q^k = \sum_{k=1}^n (q^k - q^{k+1})$$

est une somme télescopique. Ainsi,

$$(1 - q) \sum_{k=0}^n q^k = q^0 - q^{n+1} = 1 - q^{n+1}.$$

En divisant chaque membre de l'égalité par $1 - q$, car $q \neq 1$, on obtient la formule souhaitée.

□

Exemple 17 : Soient $q \in \mathbb{K}$ et $(u_n)_{n \in \mathbb{N}}$ une suite géométrique de raison q . Si $q \neq 1$, alors montrer que pour tout $(m, n) \in \mathbb{N}^2$, $m \leq n$,

$$\sum_{k=m}^n u_k = u_m \frac{1 - q^{n-m+1}}{1 - q}.$$

Autrement dit

$$\text{somme des termes} = \text{premier terme} \times \frac{1 - q^{\text{nombre de terme}}}{1 - q}$$

Démonstration. Soient $q \in \mathbb{K} \setminus \{1\}$ et $(u_n)_{n \in \mathbb{N}}$ une suite géométrique de raison q . Soient m et n deux entiers tels que $m \leq n$. On écrit que

$$\sum_{k=m}^n u_k = \sum_{k=m}^n q^{k-m} u_m.$$

On remarque que l'on peut sortir u_m de la somme (puisqu'il ne dépend pas de l'indice de sommation k) et effectuer le changement d'indice $\tilde{k} = k - m$,

$$\sum_{k=m}^n u_k = u_m \sum_{k=0}^{n-m} q^k.$$

En utilisant la proposition précédemment démontrée, on conclut que

$$\sum_{k=m}^n u_k = u_m \frac{1 - q^{n-m+1}}{1 - q}.$$

□

Remarque 18 :

1. La proposition doit être connue sur le bout des doigts. Le cas général se déduit aisément du cas particulier comme le montre la démonstration ci-dessus.
2. Il est naturellement très important de vérifier que $q \neq 1$ pour utiliser les formules ci-dessus. Le cas $q = 1$ correspond à la suite constante, dont la somme se calcule facilement (voir la proposition I.8).

Exemple 19 : Soit $n \in \mathbb{N}$. Calculer $S_n = \sum_{k=1}^n 2^k \cos\left(\frac{k\pi}{2}\right)$.

Proposition I.11 (Formule de Bernoulli)

Soient $n \in \mathbb{N}^*$ et a et b deux réels ou complexes. On a

$$a^n - b^n = (a - b) \sum_{k=0}^{n-1} a^{n-1-k} b^k = (a - b) (a^{n-1} + a^{n-2}b + a^{n-3}b^2 + \dots + a^2b^{n-3} + ab^{n-1} + b^{n-1}).$$

Démonstration. Soient $n \in \mathbb{N}^*$ et $(a, b) \in \mathbb{K}^2$. On a

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

Dans la dernière somme, on effectue le changement de variable $\tilde{k} = k + 1$. On obtient alors

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

ce qui achève la démonstration. On pouvait aussi se rendre compte que $\sum_{k=0}^{n-1} a^{n-k} b^k - a^{n-1-k} b^{k+1}$ est une somme télescopique (ce qui revient au même ici nous avons redémontré le calcul de la somme télescopique dans ce cas particulier).

□

Exemple 20 : Soit $a \in \mathbb{C}$. Donner le développement de $(a + 1)^4 - a^4$.

II Coefficient binomial et formule du binôme de Newton

Définition II.1

Soit $(k, n) \in \mathbb{N}^2$, $k \leq n$. On appelle **coefficient binomial** de k parmi n , noté $\binom{n}{k}$, le réel

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

Par convention, si $k < 0$ ou si $k > n$, on pose $\binom{n}{k} = 0$.

Interprétation combinatoire.

Soient k et n deux entiers naturels tels que $k \leq n$. Le coefficient binomial $\binom{n}{k}$ correspond aux nombres de façons qu'il y a de tirer k boules *simultanément* parmi un lot de n boules.

Pour l'établir commençons tout d'abord par calculer le nombre de façons de ranger k boules parmi n boîtes, ce que l'on appelle le nombre d'arrangements de k parmi n , noté A_n^k (nous y reviendrons dans le chapitre dénombrement). Pour la première boule, les n tiroirs sont disponibles, on a donc n choix possibles. Pour la deuxième boule tous les tiroirs sauf celui qui contient la première boule, sont disponibles. Pour la deuxième boule il reste $n - 1$ tiroirs de disponibles. De même pour la troisième boule il reste $n - 2$ possibilités. Et ainsi de suite jusqu'à la boule numéro k pour laquelle il reste $n - k + 1$ tiroirs possibles. Au total nous avons donc

$$A_n^k = n \times (n - 1) \times \cdots \times (n - k + 1) = \frac{n \times (n - 1) \times \cdots \times (n - k + 1) \times (n - k) \times \cdots \times 1}{(n - k) \times \cdots \times 1} = \frac{n!}{(n - k)!},$$

possibilités pour ranger k boules dans n tiroirs.

La même démarche est valide pour compter le nombre de façons de tirer *successivement* et *sans remise* k boules parmi n . Nous pouvons tout d'abord piocher n boules, puis au deuxième tirage il nous reste $n - 1$ possibilités, au troisième $n - 2$ etc. Au bilan A_n^k correspond également au nombre de façons de tirer successivement et sans remise k boules parmi n .

Maintenant si l'on tire d'abord les k boules d'un coup parmi les n puis qu'on ordonne ses k boules on obtient au bilan un tirage ordonné de k boules parmi n . En d'autres termes tirer k boules parmi n puis les ranger, correspond à un arrangement A_n^k . Comptons le nombre de façon de tirer k boules parmi n puis de les ranger. Notons C_n^k le nombre de façons de tirer *simultanément* k boules parmi n . Une fois ces k boules tirées les ordonner correspond au fait de ranger k boules parmi k cases, on obtient donc au total

$$C_n^k \times k!$$

façons de tirer k boules d'un coup parmi n puis de les ordonner. On peut voir aussi que cela correspond à choisir d'abord k tiroirs parmi n , puis de ranger k boules dans ces k tiroirs. Or on a dit que cela équivaut également à un tirage successif et sans remise de k boules parmi n ou encore à un rangement de k boules dans n tiroirs. Ainsi

$$A_n^k = C_n^k \times k!$$

De cette formule, on déduit le nombre de façons de tirer simultanément k boules parmi n :

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

Remarque 21 :

- Vous croiserez peut-être, notamment dans de vieux livres, la notation C_n^k qui est une écriture désuète de $\binom{n}{k}$.
- Les valeurs remarquables

$$\forall n \in \mathbb{N}, \quad \binom{n}{0} = \binom{n}{n} = 1 \quad \text{et} \quad \forall n \in \mathbb{N}^*, \quad \binom{n}{1} = \binom{n}{n-1} = n$$

sont à connaître.

Proposition II.2

Pour tout $n \in \mathbb{N}$ et tout $k \in \llbracket 0; n \rrbracket$, on a

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

Démonstration. Soient $n \in \mathbb{N}$ et $k \in \llbracket 0; n \rrbracket$. On a, par définition,

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

□

Proposition II.3 (Formule de Pascal)

Pour tout $(n, k) \in \mathbb{N}^2$ on a

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

Démonstration. Soient $n \in \mathbb{N}$ et $k \in \mathbb{N}$.

Premier cas. Si $k > n$, alors $k + 1 > n$, $k + 1 > n + 1$. Donc

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

Donc on a bien

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

Deuxième cas. Si $k = n$, alors

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

De plus, $\binom{n}{k+1} = \binom{n}{n+1} = 0$. Donc

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

Troisième cas. Si $n > 0$, et $k < n$. Alors

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

On met ces deux fractions au même dénominateur,

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

Puis en factorisant par $n!$, on observe que

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

□

Remarque 22 : Cette formule donne une façon rapide de calculer les premiers coefficients binomiaux par ce que l'on appelle le triangle de Pascal.

$n \backslash k$	0	1	2	3	4	5	6	...
0	1							
1	1	1						
2	1	2	1					
3	1	3	3	1				
4	1	4	6	4	1			
5	1	5	10	10	5	1		
6	1	6	15	20	15	6	1	
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

La formule $\binom{n}{k} = \binom{n}{n-k}$ se retrouve bien dans la symétrie des termes de droites du triangle par rapport aux termes de gauche.

Corollaire II.4

Pour tout $n \in \mathbb{N}$ et tout $k \in \llbracket 0; n \rrbracket$, on a

$$\binom{n}{k} \in \mathbb{N}^*.$$

Démonstration. Ce corollaire est immédiat d'après l'interprétation combinatoire puisqu'il correspond au *nombre* de façons de piocher simultanément k éléments parmi n . Apportons une démonstration mathématique rigoureuse à partir de la définition et de la formule de Pascal.

Pour tout $n \in \mathbb{N}$, définissons la propriété P_n : « $\forall k \in \llbracket 0; n \rrbracket$, $\binom{n}{k} \in \mathbb{N}^*$ » et procédons par récurrence.

- *Initialisation.* Pour $n = 0$, on a pour $k = 0$, $\binom{0}{0} = \frac{0!}{0!(0-0)!} = 1 \in \mathbb{N}^*$. Donc P_0 est vraie.
- *Hérédité.* Soit $n \in \mathbb{N}$. Supposons que P_n soit vraie, c'est-à-dire que pour tout $k \in \llbracket 0; n \rrbracket$, $\binom{n}{k} \in \mathbb{N}^*$. On a donc naturellement pour tout $k \in \llbracket 0; n-1 \rrbracket$, $\binom{n}{k+1} \in \mathbb{N}^*$. Ainsi par la formule de Pascal, on a pour tout $k \in \llbracket 0; n-1 \rrbracket$,

$$\binom{n+1}{k+1} = \underbrace{\binom{n}{k+1}}_{\in \mathbb{N}^*} + \underbrace{\binom{n}{k}}_{\in \mathbb{N}^*} \in \mathbb{N}^*.$$

Autrement dit, pour tout $k \in \llbracket 1; n \rrbracket$, $\binom{n+1}{k} \in \mathbb{N}^*$. Pour conclure, il nous reste à vérifier pour $k = 0$ et $k = n+1$. Or, il est facile de voir que

$$\binom{n+1}{0} = \binom{n+1}{n+1} = 1.$$

Et donc on peut conclure que P_{n+1} est vraie.

Nous avons montré que P_0 est vraie et l'implication $P_n \Rightarrow P_{n+1}$ également. Donc par récurrence, on conclut que pour tout $n \in \mathbb{N}$, P_n est vraie. $\square$

Proposition II.5 (Binôme de Newton)

Soient $(a, b) \in \mathbb{K}^2$ et $n \in \mathbb{N}$. On a

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

Démonstration. Soit $(a, b) \in \mathbb{K}^2$. Procédons par récurrence. Pour tout $n \in \mathbb{N}$ considérons la propriété P_n : « $(a+b)^n = \sum_{k=0}^n \binom{n}{k} a^k b^{n-k}$ ».

- *Initialisation.* Pour $n = 0$, on a $\sum_{k=0}^0 \binom{0}{k} a^k b^{0-k} = \binom{0}{0} a^0 b^{0-0} = 1 = (a+b)^0$. Donc P_0 est vraie.
- *Hérédité.* Soit $n \in \mathbb{N}$ et supposons que P_n soit vraie. Alors,

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

Effectuons le changement de variables $\tilde{k} = k+1$ dans la première somme du terme de droite. On obtient alors,

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

Par la formule de Pascal,

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

et donc P_{n+1} est vraie.

Conclusion, nous avons démontré P_0 et pour tout $n \in \mathbb{N}$, $P_n \Rightarrow P_{n+1}$ donc par récurrence la propriété P_n est vraie pour tout $n \in \mathbb{N}$. $\square$

Exemple 23 : Les deux cas particuliers suivants sont à connaître. Pour tout $n \in \mathbb{N}$,

$$\sum_{k=0}^n \binom{n}{k} = 2^n \quad \text{et} \quad \sum_{k=0}^n \binom{n}{k} (-1)^k = 0.$$

Exemple 24 : Démontrer que pour tout $x \in \mathbb{R}_+$ et tout $n \in \mathbb{N}$,

$$(1+x)^n \geq 1+nx.$$

Exemple 25 : Calculons pour tout $n \in \mathbb{N}$, $S_n = \sum_{k=0}^n k \binom{n}{k}$.

Démonstration. Soit $n \in \mathbb{N}$. Posons $\tilde{k} = n - k$ i.e. $k = n - \tilde{k}$. Si $k = 0$, alors $\tilde{k} = n$ et si $k = n$, alors $\tilde{k} = 0$. Ainsi,

$$\begin{aligned} S_n &= \sum_{\tilde{k}=0}^n (n - \tilde{k}) \binom{n}{n - \tilde{k}} \\ &= \sum_{k=0}^n (n - k) \binom{n}{n - k} \quad \text{car la variable est muette} \\ &= \sum_{k=0}^n (n - k) \binom{n}{k} \quad \text{car } \binom{n}{n - k} = \binom{n}{k} \\ &= n \sum_{k=0}^n \binom{n}{k} - \sum_{k=0}^n k \binom{n}{k} \\ &= n(1+1)^n - S_n \quad \text{car on reconnaît un binôme de Newton} \\ &= n2^n - S_n. \end{aligned}$$

Ainsi,

$$2S_n = n2^n \quad \Leftrightarrow \quad S_n = n2^{n-1}.$$

Conclusion,

$$\boxed{\forall n \in \mathbb{N}, \quad S_n = n2^{n-1}.}$$

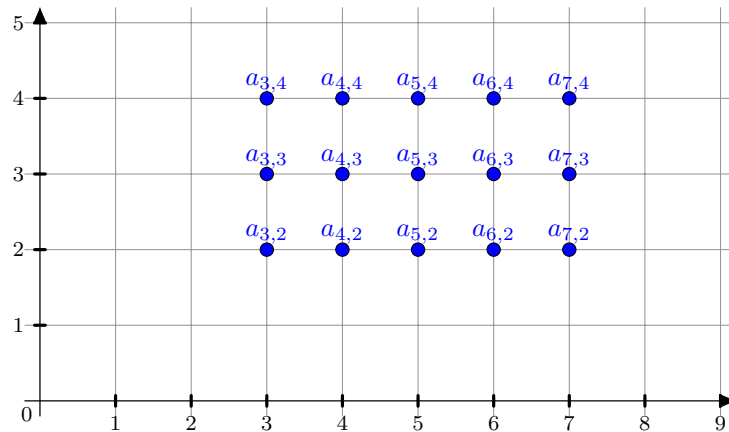
$\square$

III Sommes doubles

III.1 Sommes indexées par un rectangle

Soient m, n, p, q quatre entiers tels que $m \leq n$ et $q \leq p$. On pose $I = \llbracket m; n \rrbracket \times \llbracket q; p \rrbracket$ et on considère une famille $(a_{i,j})_{(i,j) \in I}$ de complexes ou de réels. L'ensemble I correspond à l'ensemble des couples d'entiers dont la première coordonnée est entre m et n et la seconde entre q et p . On peut représenter I dans le plan comme étant l'ensemble des points M à coordonnées entières contenus dans le rectangle $[m; n] \times [q; p]$.

Exemple : $I = \llbracket 3; 7 \rrbracket \times \llbracket 2; 4 \rrbracket$



Le problème qui se pose alors pour calculer la somme $\sum_{(i,j) \in I} a_{i,j}$ de tous les termes de la famille $(a_{i,j})_{(i,j) \in I}$ est l'ordre dans lequel procéder pour sommer. Pour les segments $\llbracket q; p \rrbracket$ on somme naturellement de q à p (notez que l'on peut aussi sommer de p à q par le changement d'indice $\tilde{k} = p - k + q$), ici il ne se dégage pas d'ordre naturel. Heureusement la proposition suivante vient pallier ce problème.

Proposition III.1

Soit $(m, n, p, q) \in \mathbb{Z}^4$ tel que $m \leq n$ et $q \leq p$. Soit $(a_{i,j})_{(i,j) \in I}$ une famille de complexes ou de réels. On a

$$\sum_{(i,j) \in \llbracket m;n \rrbracket \times \llbracket q;p \rrbracket} a_{i,j} = \sum_{i=m}^n \left(\sum_{j=q}^p a_{i,j} \right) = \sum_{j=q}^p \left(\sum_{i=m}^n a_{i,j} \right).$$

Pour sommer tous les éléments de la famille $(a_{i,j})_{(i,j) \in I}$, commençons par les ranger dans le tableau ci-dessous :

$\begin{array}{c} i \backslash j \\ \hline \end{array}$	q	$\dots$	j	$\dots$	p	Somme sur les colonnes
m	$a_{m,q}$	$\dots$	$a_{m,j}$	$\dots$	$a_{m,p}$	$\sum_{j=q}^p a_{m,j}$
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
i	$a_{i,q}$	$\dots$	$a_{i,j}$	$\dots$	$a_{i,p}$	$\sum_{j=q}^p a_{i,j}$
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
n	$a_{n,q}$	$\dots$	$a_{n,j}$	$\dots$	$a_{n,p}$	$\sum_{j=q}^p a_{n,j}$
Somme sur les lignes	$\sum_{i=m}^n a_{i,q}$	$\dots$	$\sum_{i=m}^n a_{i,j}$	$\dots$	$\sum_{i=m}^n a_{i,p}$	$\sum_{(i,j) \in \llbracket m;n \rrbracket \times \llbracket q;p \rrbracket} a_{i,j}$

La proposition affirme simplement que pour sommer tous les termes du tableau, on peut sommer d'abord toutes les lignes, $\sum_{i=m}^n a_{i,j}$, puis sommer les sommes obtenues $\sum_{j=q}^p (\sum_{i=m}^n a_{i,j})$. On peut aussi sommer toutes les colonnes dans un premier temps, $\sum_{j=q}^p a_{i,j}$ et de sommer les sommes obtenues dans un second temps $\sum_{i=m}^n (\sum_{j=q}^p a_{i,j})$. Ces deux façons de procéder aboutissent au même résultat : à la somme de toute la famille : $\sum_{(i,j) \in \llbracket m;n \rrbracket \times \llbracket q;p \rrbracket} a_{i,j}$.

Exemple 26 : Soient $(n, m) \in \mathbb{N}^2$. Calculer $\sum_{\substack{1 \leq i \leq n \\ 1 \leq j \leq m}} (i + j)$.

Exemple 27 : Soient $(n, m) \in \mathbb{N}^2$. Calculer $\sum_{\substack{1 \leq i \leq n \\ 1 \leq j \leq m}} (ij)$.

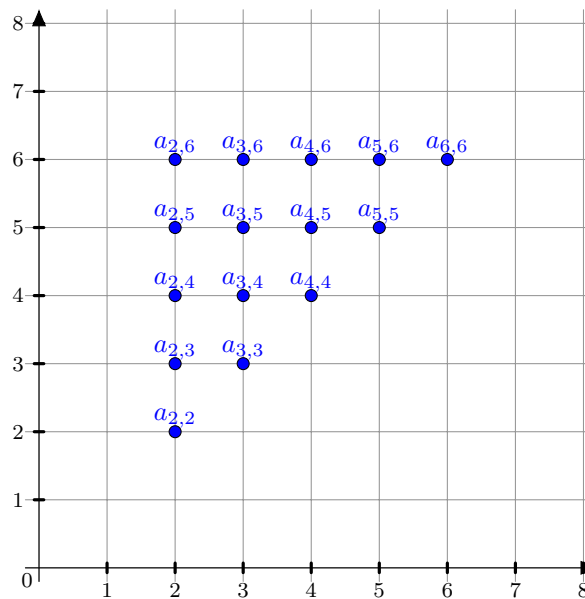
Remarque 28 :

- Il est possible de ne pas noter les parenthèses : $\sum_{(i,j) \in \llbracket m;n \rrbracket \times \llbracket q;p \rrbracket} a_{i,j} = \sum_{i=m}^n \sum_{j=q}^p a_{i,j} = \sum_{j=q}^p \sum_{i=m}^n a_{i,j}$.
- Les variables de sommations (ici i et j) sont toujours muettes et peuvent être remplacées par d'autres variables. Mais il est toujours formellement interdit de sortir une variable de sommation de la somme à laquelle elle dépend et un indice de sommation ne doit jamais être considéré comme un paramètre extérieur de la somme.

III.2 Sommes indexées par un triangle

Soient m et n deux entiers tels que $m \leq n$ et considérons l'ensemble $I = \{(i, j) \in \mathbb{N}^2 \mid m \leq i \leq j \leq n\}$ ainsi que $(a_{i,j})_{(i,j) \in I}$ une famille de réels ou de complexes. La famille $(a_{i,j})_{(i,j) \in I}$ est également notée $(a_{i,j})_{m \leq i \leq j \leq n}$. Cette fois, l'ensemble I peut-être représenté par l'ensemble des points du plan dont les coordonnées (i, j) sont dans I . Cela correspond alors à un triangle.

Exemple : $m = 2$ et $n = 6$.



Proposition III.2

Soient $(m, n) \in \mathbb{Z}^2$ tel que $m \leq n$ et $(a_{i,j})_{(i,j) \in I}$ une famille de réels ou de complexes. On a

$$\sum_{m \leq i \leq j \leq n} a_{i,j} = \sum_{i=m}^n \sum_{j=i}^n a_{i,j} = \sum_{j=m}^n \sum_{i=m}^j a_{i,j}.$$

Si de plus $m < n$, on a également,

$$\sum_{m \leq i < j \leq n} a_{i,j} = \sum_{i=m}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n a_{i,j} = \sum_{j=m+1}^n \sum_{i=m}^{j-1} a_{i,j}.$$

Remarque 29 :

- Il est très important de noter que dans ces doubles sommes le second indice de sommation dépend du précédent ce qui rend l'interversion des deux sommes plus délicate.
- Remarquer également que le triangle représentant l'ensemble de sommation I est équilatéral. Dans le cas d'un ensemble I plus complexe, il faudra tenter de se ramener à un cas plus favorable.

Pour comprendre ce résultat, rangeons à nouveau les éléments $(a_{i,j})_{m \leq i \leq j \leq n}$ dans un tableau.

$\begin{array}{c} j \\ \backslash \\ i \end{array}$	m	$m+1$	$\cdots$	$n-1$	n	Somme sur les colonnes
m	$a_{m,m}$	$a_{m,m+1}$	$\cdots$	$a_{m,n-1}$	$a_{m,n}$	$\sum_{j=m}^n a_{m,j}$
$m+1$	$\times$	$a_{m+1,m+1}$	$\cdots$	$a_{m+1,n-1}$	$a_{m+1,n}$	$\sum_{j=m+1}^n a_{m+1,j}$
$\vdots$	$\times$	$\times$	$\ddots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
$n-1$	$\times$	$\cdots$	$\times$	$a_{n-1,n-1}$	$a_{n-1,n}$	$\sum_{j=n-1}^n a_{n-1,j}$
n	$\times$	$\cdots$	$\cdots$	$\times$	$a_{n,n}$	$\sum_{j=n}^n a_{n,j}$
Somme sur les lignes	$\sum_{i=m}^m a_{i,m}$	$\sum_{i=m}^{m+1} a_{i,m+1}$	$\cdots$	$\sum_{i=m}^{n-1} a_{i,n-1}$	$\sum_{i=m}^n a_{i,n}$	$\sum_{m \leq i \leq j \leq n} a_{i,j}$

On observe alors bien d'une part que

$$\sum_{m \leq i \leq j \leq n} a_{i,j} = \sum_{j=m}^n a_{m,j} + \sum_{j=m+1}^n a_{m+1,j} + \cdots + \sum_{j=n-1}^n a_{n-1,j} + \sum_{j=n}^n a_{n,j} = \sum_{i=m}^n \sum_{j=i}^n a_{i,j}.$$

Et d'autre part,

$$\sum_{m \leq i \leq j \leq n} a_{i,j} = \sum_{i=m}^m a_{i,m} + \sum_{i=m}^{m+1} a_{i,m+1} + \cdots + \sum_{i=m}^{n-1} a_{i,n-1} + \sum_{i=m}^n a_{i,n} = \sum_{j=m}^n \sum_{i=m}^j a_{i,j}.$$

Exemple 30 : Calculer pour tout $n \in \mathbb{N}$, $S_n = \sum_{0 \leq i \leq j \leq n} 2^j$.

Démonstration. Soit $n \in \mathbb{N}$. Puisque la somme est triangulaire, on a

$$\begin{aligned} S_n &= \sum_{i=0}^n \left(\sum_{j=i}^n 2^j \right) \\ &= \sum_{i=0}^n \left(2^i \frac{2^{n-i+1} - 1}{2 - 1} \right) \quad \text{car on reconnaît une somme géométrique} \\ &= \sum_{i=0}^n (2^{n+1} - 2^i) \\ &= \sum_{i=0}^n 2^{n+1} - \sum_{i=0}^n 2^i \\ &= 2^{n+1} (n+1) - \frac{2^{n+1} - 1}{2 - 1} \quad \text{car on reconnaît une somme géométrique} \\ &= (n+1) 2^{n+1} - 2^{n+1} + 1 \\ &= n 2^{n+1} + 1. \end{aligned}$$

Conclusion,

$$\boxed{\forall n \in \mathbb{N}, \quad S_n = n 2^{n+1} + 1.}$$

□

Proposition III.3

Soit $(m, n) \in \mathbb{Z}^2$ tel que $m \leq n$ et $(a_i)_{i \in [m;n]}$ une famille de réels ou de complexes. On a

$$\left(\sum_{i=m}^n a_i \right)^2 = \sum_{i=m}^n a_i^2 + 2 \sum_{m \leq i < j \leq n} a_{i,j}.$$

Démonstration. On a

$$\left(\sum_{i=m}^n a_i\right)^2 = \sum_{i=m}^n a_i \sum_{j=m}^n a_j = \sum_{i=m}^n \sum_{j=m}^n a_i a_j.$$

Supposons $n \geq m + 2$ (les cas $n = m$ et $n = m + 1$ peuvent être traités facilement à part) et isolons les cas $i = m$ et $i = n$,

$$\begin{aligned} \left(\sum_{i=m}^n a_i\right)^2 &= \sum_{j=m}^n a_m a_j + \sum_{i=m+1}^{n-1} \sum_{j=m}^n a_i a_j + \sum_{j=m}^n a_n a_j \\ &= a_m^2 + \sum_{j=m+1}^n a_m a_j + \sum_{i=m+1}^{n-1} \left[\sum_{j=m}^{i-1} a_i a_j + a_i^2 + \sum_{j=i+1}^n a_i a_j \right] + \sum_{j=m}^{n-1} a_n a_j + a_n^2. \end{aligned}$$

On développe et réordonne les différents termes :

$$\begin{aligned} \left(\sum_{i=m}^n a_i\right)^2 &= a_m^2 + \underbrace{\sum_{i=m+1}^{n-1} a_i^2 + a_n^2}_{=\sum_{i=m}^n a_i^2} + \underbrace{\sum_{j=m+1}^n a_m a_j + \sum_{i=m+1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n a_i a_j}_{=\sum_{i=m}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n a_i a_j} + \underbrace{\sum_{j=m}^{n-1} a_n a_j + \sum_{i=m+1}^{n-1} \sum_{j=m}^{i-1} a_i a_j}_{=\sum_{i=m+1}^n \sum_{j=m}^{i-1} a_i a_j} \\ &= \sum_{i=m}^n a_i^2 + \sum_{i=m}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n a_i a_j + \sum_{i=m+1}^n \sum_{j=m}^{i-1} a_i a_j. \end{aligned}$$

Donc d'après la proposition III.2,

$$\left(\sum_{i=m}^n a_i\right)^2 = \sum_{i=m}^n a_i^2 + \sum_{m \leq i < j \leq n} a_i a_j + \sum_{m \leq j < i \leq n} a_i a_j$$

Comme $a_i a_j = a_j a_i$, en échangeant les noms des variables de sommation de la seconde double somme $i \leftrightarrow j$, on obtient

$$\left(\sum_{i=m}^n a_i\right)^2 = \sum_{i=m}^n a_i^2 + \sum_{m \leq i < j \leq n} a_i a_j + \sum_{m \leq i < j \leq n} a_i a_j = \sum_{i=m}^n a_i^2 + 2 \sum_{m \leq i < j \leq n} a_i a_j$$

□

IV Prochainement... Analyse asymptotique - Propriétés des petits o

Proposition IV.1

Soient $(p, q) \in \mathbb{Z}^2$, $q < p$ alors

$$1. \quad x^q \underset{x \rightarrow +\infty}{=} o(x^p) \quad 2. \quad x^p \underset{x \rightarrow 0}{=} o(x^q) \quad 3. \quad n^q \underset{n \rightarrow +\infty}{=} o(n^p) \quad 4. \quad \frac{1}{n^p} \underset{n \rightarrow +\infty}{=} o\left(\frac{1}{n^q}\right)$$

Dans les propositions qui suivent, on fixe $a \in \overline{\mathbb{R}}$, I un voisinage de a , f, g, h trois fonctions définies sur I et $(u_n)_{n \in \mathbb{N}}$, $(v_n)_{n \in \mathbb{N}}$, $(w_n)_{n \in \mathbb{N}}$ trois suites à valeurs dans $\mathbb{K}$.

Proposition IV.2 (Transitivité des petits o)

- *Fonctions* : si $f(x) \underset{x \rightarrow a}{=} o(g(x))$ et $g(x) \underset{x \rightarrow a}{=} o(h(x))$ alors $f(x) \underset{x \rightarrow a}{=} o(h(x))$.
- *Suites* : si $u_n \underset{n \rightarrow +\infty}{=} o(v_n)$ et $v_n \underset{n \rightarrow +\infty}{=} o(w_n)$ alors $u_n \underset{n \rightarrow +\infty}{=} o(w_n)$.

Proposition IV.3 (Somme de petits o)

- *Fonctions* : si $f(x) \underset{x \rightarrow a}{=} o(h(x))$ et $g(x) \underset{x \rightarrow a}{=} o(h(x))$ alors $f(x) + g(x) \underset{x \rightarrow a}{=} o(h(x))$.
Autrement dit $o(h(x)) + o(h(x)) \underset{x \rightarrow a}{=} o(h(x))$.
- *Suites* : si $u_n \underset{n \rightarrow +\infty}{=} o(w_n)$ et $v_n \underset{n \rightarrow +\infty}{=} o(w_n)$ alors $u_n + v_n \underset{n \rightarrow +\infty}{=} o(w_n)$.
Autrement dit, $o(w_n) + o(w_n) \underset{n \rightarrow +\infty}{=} o(w_n)$.

Proposition IV.4 (Simplification de petits o)

- *Fonctions* : si $f(x) \underset{x \rightarrow a}{=} o(g(x))$ alors $o(f(x) + g(x)) \underset{x \rightarrow a}{=} o(g(x))$.
Autrement dit $o(f(x) + o(f(x))) \underset{x \rightarrow a}{=} o(f(x))$.
- *Suites* : si $u_n \underset{n \rightarrow +\infty}{=} o(v_n)$ alors $o(u_n + v_n) \underset{n \rightarrow +\infty}{=} o(v_n)$.
Autrement dit, $o(u_n + o(u_n)) \underset{n \rightarrow +\infty}{=} o(u_n)$.

Remarque 31 : On a également $o(o(f(x))) \underset{x \rightarrow a}{=} o(f(x))$ ou encore $o(o(u_n)) \underset{n \rightarrow +\infty}{=} o(u_n)$.

Exemple 32 : Simplifier les expressions suivantes :

1. $o(4x^3 - 5 + e^{-x}) \underset{x \rightarrow +\infty}{=}$
2. $o(\sqrt{x} + 2x^2 + \frac{1}{x}) \underset{x \rightarrow 0}{=}$
3. $o(n^2) + o(10^4 n) + 2o(\sqrt{n^3}) \underset{n \rightarrow +\infty}{=}$
4. $o(\sin(x)) + o(1 - x^2) + o(2 \cos(x)) \underset{x \rightarrow 0}{=}$
5. $o(n^5 + \sqrt{n}) + o(\ln(n^7)) + 3o(\sin(n)) \underset{n \rightarrow +\infty}{=}$
6. $o(e^{-x^2}) + o(2 + \frac{1}{x}) + o(\frac{1}{\sqrt{x}}) + o(1) \underset{x \rightarrow +\infty}{=}$



Blaise PASCAL (Clermont-Ferrand 1623 - Paris 1662) ayant perdu sa mère à l'âge de trois ans est pris en charge par son père juriste, passionné de mathématiques et qui fréquentait les plus grands savants de l'époque. Dès l'enfance, Pascal montra des dons exceptionnels pour les mathématiques. On prétend ainsi qu'il retrouva par lui-même la plupart des résultats d'Euclide. A seize ans il écrivit un Essay pour les coniques d'une si grande qualité que Descartes eu peine à croire que c'était l'oeuvre d'un adolescent. Il se passionna pour l'hydrostatique et établit la pesanteur de l'air. Il entra en contact avec Fermat avec qui il eu un fructueux échange épistolaire. On y retrouve en particulier les prémices du calcul des probabilités.

Un matin de novembre 1654, Pascal tomba en extase mystique et abandonne les sciences pour la théologie. Il écrivit alors deux chefs-d'oeuvre de la littérature Pensées et Les Provinciales mais sa production scientifique s'interrompt totalement durant quatre ans. Un soir de l'année 1658, souffrant d'un fort mal de tête, Pascal pour se divertir réfléchit à la cycloïde. Ses souffrances disparurent aussitôt. Convaincu que c'était un signe de Dieu lui montrant qu'il n'était pas opposé aux mathématiques, Pascal revint à l'étude des mathématiques. Son domaine de prédilection était la géométrie mais Pascal s'intéressa également à l'analyse infinitésimal vers la fin de sa vie, théorie qui sera largement développée par Newton et Leibniz par la suite.

Pascal est sans doute l'un des mathématicien les plus profonds mais sa mort prématurée et son mysticisme l'ont empêché d'être parmi les plus féconds.

Le triangle de Pascal est déjà connu des mathématiciens Yang Hui et Zhu Shijie (XIII et XIV siècle). Le mathématicien arabe Al Kachi l'utilise également vers 1400. Pascal en fit une étude détaillée en 1653.



Soit $\mathcal{A}$ l'ensemble des lettres de l'alphabet, $\mathcal{A} = \{a, b, \dots, z\}$. Calculer le produit $\prod_{\alpha \in \mathcal{A}} (x - \alpha)$.