Olympiades Panafricaines Mathématiques 2023
Quelques solutions

KouakouSchool

1[er] juillet 2023

Table des matières

Résumé

Ce document présente des solutions aux différents problèmes rencontrés lors des Olympiades Panafricaines de Mathématiques (OPAM) 2023.

1 Enoncés

1.1 Jour 1

1.1.1 Problème 1

Dans un triangle ABC tel que $AB < AC, D$ est un point du segment $[AC]$ tel que $BD = CD$. Une droite parallèle à (BD) coupe le segment $[BC]$ en E et coupe la droite (AB) en F. G est le point d'intersection des droites (AE) et (BD) par G.

$$\text{Montrer que} \quad \widehat{BCG} = \widehat{BCF}. \tag{1}$$

1.1.2 Problème 2

Trouver tous les nombres entiers naturels non nuls m et n qui n'ont pas de diviseur commun plus grand que 1 tels que :

$$m^3 + n^3 \quad \text{divise} \quad m^2 + 20mn + n^2. \tag{2}$$

1.1.3 Problème 3

On considère la suite de nombres réels définie par :

$$\begin{cases} x_1 = c \\ x_{n+1} = cx_n + \sqrt{c^2 - 1}\sqrt{x_n^2 - 1} \quad \text{pour tout} \quad n \geq 1. \end{cases} \tag{3}$$

Montrer que si c est un nombre entier naturel non nul, alors x_n est un entier pour tout $n \geq 1$.

1.2 Jour 2

1.2.1 Problème 4

Manzi possède n timbres et un album avec 10 pages. Il distribue les n timbres dans l'album de sorte que chaque page contienne un nombre distinct de timbres. Il trouve que, peu importe comment il fait cela, il y a toujours un ensemble de 4 pages tels que le nombre total de timbres dans ces 4 pages soit au moins $\frac{n}{2}$.

$$\text{Déterminer la valeur maximale possible de} \quad n. \tag{4}$$

1.2.2 Problème 5

Soient a et b des nombres réels avec $a \neq 0$. Soit :

$$P(x) = ax^4 - 4ax^3 + (5a+b)x^2 - 4bx + b \tag{5}$$

Montrer que toutes les racines de $P(x)$ sont réelles et strictement positives si et seulement si $a = b$.

1.2.3 Problème 6

Soit ABC un triangle dont tous les angles sont aigus avec $AB < AC$. Soient D, E et F les pieds des perpendiculaires issues de A, B et C aux côtés opposés, respectivement. Soit P le pied de la perpendiculaire issue de F sur la droite (DE). La droite (FP) et le cercle circonscrit au triangle BDF se rencontrent encore en Q.

$$\text{Montrer que} \quad \widehat{PBQ} = \widehat{PAD}. \tag{6}$$

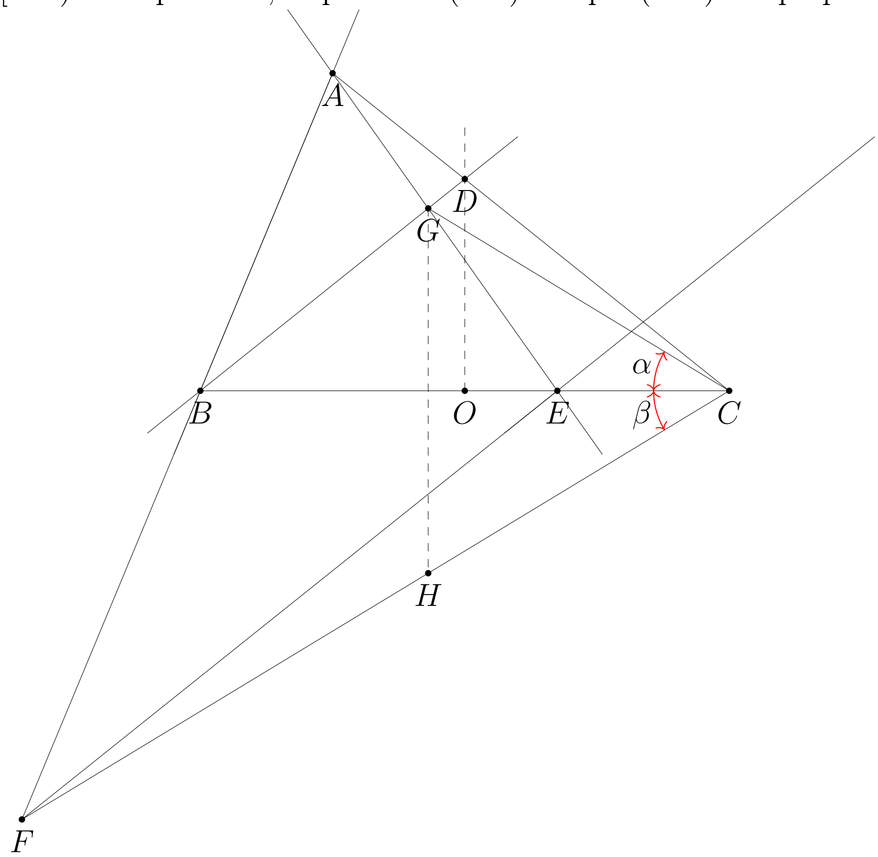
2 Solutions

2.1 Jour 1

2.1.1 Problème 1 : (taux de réussite : 22/178)

2.1.1.1 Solution 1 - Utilisation d'un repère orthonormal

Ci-dessous se trouve la construction géométrique de la figure résultant du problème posé. Nous avons rajouté le milieu du segment $[BC]$ qu'on appellera O, le point D' tel que la distance OC égale à la distance OD' et D' appartient à $[OD)$ et le point H, le point de (FC) tel que (GH) est perpendiculaire à (BC).



$$\text{Montrons que} \quad \widehat{BCG} = \widehat{BCF} \quad \text{c'est-à-dire que} \quad \hat{\alpha} = \hat{\beta}. \tag{7}$$

Pour cela, nous allons considérer le repère orthonormal formé par les points O, C et D'. Il s'agit bien d'un repère orthonormal car la droite (OD) est perpendiculaire à la droite (OC) puisque (OD) est la médiatrice du segment $[BC]$ (O est milieu de $[BC]$ et $BD = CD$) et la distance OD' est égale à la distance OC.

Les coordonnées des différents points A, B, C, D, E et O sont les suivants.

$$O = \Big(0, 0\Big) \tag{8}$$

$$C = \Big(1, 0\Big) \tag{9}$$

$$D = \Big(0, d\Big), \quad \text{où} \quad d \quad \text{est une variable.} \tag{10}$$

$$B = \Big(-1, 0\Big) \tag{11}$$

$$A = \Big(-\alpha, \beta\Big), \quad \text{où} \quad 0 < \alpha < 1 \quad \text{et} \quad \beta > 1 \quad \text{sont des variables.} \tag{12}$$

$$E = \Big(\gamma, 0\Big), \quad \text{où} \quad -1 < \gamma < 1 \quad \text{où} \quad \gamma \quad \text{est une variable.} \tag{13}$$

La variable γ est indépendante des autres variables d'après l'énoncé car le point E est un point quelconque du segment $[BC]$. La relation entre β, α et d peut être déterminée d'après la position de D par rapport aux points A, B et C.

Déterminons la relation entre β, α et d :

La droite (CD) a pour équation du type : $ax + by + c = 0$. En remplaçant les coordonnées de C et D dans cette équation, l'on obtient :

$$(DC): \quad x + \frac{1}{d}y - 1 = 0 \tag{14}$$

Le point A appartient à la droite (DC), donc : $-\alpha + \frac{1}{d}\beta - 1 = 0$. Cela implique que :

$$\beta = d(1 + \alpha) \tag{15}$$

Déterminons les valeurs des coordonnées de F et G

Concernant le point F, $F\Big(e, f\Big)$ appartient à la droite (AB) et (FE) est perpendiculaire à la normale $\vec{u}$ à la droite (BD).

$$(BD): \quad x - \frac{1}{d}y + 1 = 0 \tag{16}$$

$$\vec{u}\Big(1, -\frac{1}{d}\Big) \tag{17}$$

$$(AB): \quad x - \frac{1-\alpha}{d(1+\alpha)}y + 1 = 0 \tag{18}$$

donc :

$$\overrightarrow{FE}.\vec{u} = 0 \quad et \quad F \in (AB)$$

$$\begin{cases} e - \frac{1-\alpha}{d(1+\alpha)}f + 1 = 0 \\ (\gamma - e).1 + \frac{1}{d}.f = 0 \end{cases}$$

ainsi :

$$\begin{cases} e = \frac{\alpha\gamma-\gamma-\alpha-1}{2\alpha} \\ f = -\frac{d(\gamma+1)(\alpha+1)}{2\alpha} \end{cases}$$

$$F\Big(\frac{\alpha\gamma-\gamma-\alpha-1}{2\alpha}, -\frac{d(\gamma+1)(\alpha+1)}{2\alpha}\Big) \tag{19}$$

Concernant le point G, on a :

$$G\Big(g, h\Big) \in (BD) \cap (AE)$$

$$(AE): \quad x + \frac{\alpha+\gamma}{d(1+\alpha)}y - \gamma = 0 \tag{20}$$

L'équation de la droite (BD) est donnée par la relation (16). Donc :

$$\begin{cases} g - \frac{1}{d}h + 1 = 0 \\ g + \frac{\alpha+\gamma}{d(1+\alpha)}h - \gamma = 0 \end{cases}$$

ainsi :

$$\begin{cases} g = \frac{\alpha(\gamma-1)}{1+2\alpha+\gamma} \\ h = \frac{d(1+\gamma)(1+\alpha)}{1+2\alpha+\gamma} \end{cases}$$

$$G\Big(\frac{\alpha(\gamma-1)}{1+2\alpha+\gamma}, \frac{d(1+\gamma)(1+\alpha)}{1+2\alpha+\gamma}\Big) \tag{21}$$

Pour le point H, on a $H \in (FC)$ tel que $(GH) \perp (BC)$. L'abscisse de H est égal à g c'est-à-dire l'abscisse de G car $(GH) \perp (BC)$ et (BC) est l'axe des abscisses, on note donc $H\Big(g, i\Big)$.

$$(FC): \quad x + \frac{1-e}{f}y - 1 = 0 \tag{22}$$

Donc :

$$g + \frac{1-e}{f} i - 1 = 0$$

$1 - e \neq 0$, sinon $g = 1$. Il s'agit d'un cas limite impossible car $G \in [BC]$. De ce fait, nous pouvons écrire que :

$$i = \frac{1-g}{1-e} f$$

D'où, d'après (19) et par la suite (21), on a :

$$i = -\frac{d(\gamma+1)(\alpha+1)}{1+2\alpha+\gamma} = -h$$

Donc $G\Big(g, h\Big)$ et $H\Big(g, -h\Big)$, ainsi $CG = CH$ et $(HG) \perp (CB)$. D'où :

$$\widehat{BCG} = \widehat{OCG} = \widehat{HCO} = \widehat{HCB} = \widehat{FCB}$$

Par conséquent, nous avons montré que :

$$\widehat{BCG} = \widehat{BCF} \quad \text{c'est-à-dire que} \quad \hat{\alpha} = \hat{\beta}$$

2.1.2 Problème 2 : (taux de réussite : 20/178)

2.1.2.1 Solution 1 - Utilisation d'une identité remarquable

Trouvons tous les nombres entiers naturels non nuls m et n qui n'ont pas de diviseur commun plus grand que 1 tels que :

$$m^3 + n^3 \quad \text{divise} \quad m^2 + 20mn + n^2. \tag{23}$$

On a l'identité suivante pour tous entiers naturels m et n :

$$m^3 + n^3 = (m+n)(m^2 - mn + n^2) \tag{24}$$

Nous allons noté le symbole | comme représentant la division, c'est-à-dire $a|b$ veut dire a divise b. Ainsi, $m^3 + n^3$ divise $m^2 + 20mn + n^2$ implique que $m + n$ divise $m^2 + 20mn + n^2$ et $m^2 - mn + n^2$ divise $m^2 + 20mn + n^2$. D'où l'équation :

$$\begin{cases} m + n | m^2 + 20mn + n^2 \\ m^2 - mn + n^2 | m^2 + 20mn + n^2 \end{cases}$$

Donc :

$$\begin{cases} m+n|(m+n)^2+18mn \\ m^2-mn+n^2|m^2+20mn+n^2 \end{cases}$$

Comme $m^2+20mn+n^2-(m^2-mn+n^2)=21mn$, en utilisant la deuxième relation, on a :

$$m^2-mn+n^2|21mn \tag{25}$$

En utilisant la première relation et sachant que $m+n|(m+n)^2$, nous obtenons $m+n|((m+n)^2+18mn)-(m+n)^2$. Cela implique :

$$m+n|18mn \tag{26}$$

Nous notons le symbole $\wedge$ comme étant la notation du plus grand diviseur commun, c'est-à-dire $a \wedge b$ est le plus grand diviseur commun de a et b. Tout diviseur de mn et $m+n$ est diviseur de toute combinaison linéaire. Ainsi, le plus grand diviseur commun de deux entiers naturels divise toute combinaison linéaire de ces deux entiers naturels. En l'occurence :

$$mn \wedge (m+n)|mn \wedge mn - m*(m+n) \implies mn \wedge (m+n)|mn \wedge -m*m$$

Or, $mn \wedge -m*m = m(n \wedge -m)$ donc :

$$mn \wedge (m+n)|m(n \wedge -m)$$

Donc :

$$mn \wedge (m+n)|m(n \wedge m) \tag{27}$$

D'après l'énoncé, m et n n'ont pas de diviseur commun plus grand que 1. Cela est équivalent à $m \wedge n = 1$.

$$m \wedge n = 1 \tag{28}$$

Les équations (27) et (28) impliquent que :

$$mn \wedge (m+n)|m \tag{29}$$

On a :

$$mn \wedge (m+n)|m+n$$

Donc :

$$mn \wedge (m+n)|(m+n) \wedge m$$

$$(m+n) \wedge m | ((m+n)-m) \wedge m \implies (m+n) \wedge m | n \wedge m$$

Ainsi,

$$mn \wedge (m+n) = 1 \tag{30}$$

Les équations (26) et (30) impliquent que :

$$m+n | 18 \tag{31}$$

D'où $m+n \in \{2, 3, 6, 9, 18\}$ car m et n étant des entiers naturels non nuls, $m+n \geq 2$. Afin de déterminer m et n, nous considérons le cas où $m \geq n$ car m et n sont interchangeables. Ainsi, pour chaque valeur de $m+n$, nous déterminons les valeurs de m et n tels que $m \wedge n = 1$. Cela donne :

$$\begin{aligned}
m+n = 2 &\implies (m,n) = (1,1) \\
m+n = 3 &\implies (m,n) = (2,1) \\
m+n = 6 &\implies (m,n) = (5,1) \\
m+n = 9 &\implies (m,n) \in \{(8,1), (7,2), (5,4)\} \\
m+n = 18 &\implies (m,n) \in \{(17,1), (13,5), (11,7)\}
\end{aligned}$$

Donc, avec $m \geq n$, on a :

$$(m,n) \in \{(1,1), (2,1), (5,1), (8,1), (7,2), (5,4), (17,1), (13,5), (11,7)\}$$

Pour chaque valeur de (m,n) nous vérifions si l'équation (25) est vraie. Ainsi, le tableau suivant permet de voir les résultats.

$m+n$	m	n	m^2-mn+n^2	$21mn$	$m^2-mn+n^2 \vert 21mn$
2	1	1	1	21	vrai
3	2	1	3	$21*2$	vrai
6	5	1	21	$21*5$	vrai
9	8	1	$57=3*19$	$21*8*1$	faux
9	7	2	$39=3*13$	$21*7*2$	faux
9	5	4	$21=7*3$	$21*5*4$	vrai
18	17	1	$273=3*7*13$	$21*17$	faux
18	13	5	$129=3*43$	$21*13*5$	faux
18	11	7	$93=3*31$	$21*11*7$	faux

Donc :

$$(m,n) \in \{(1,1),(2,1),(1,2),(5,1),(1,5),(5,4),(4,5)\} \tag{32}$$

Réciproquement, $(m,n) \in \{(1,1),(2,1),(1,2),(5,1),(1,5)\}$ est tel que m^3+n^3 divise $m^2+20mn+n^2$. Cependant, si $(m,n) \in \{(5,4),(4,5)\}$ alors m^3+n^3 ne divise pas $m^2+20mn+n^2$. Cela se voit d'après le tableau suivant :

m	n	m^3+n^3	$m^2+20mn+n^2$	$m^3+n^3 \mid m^2+20mn+n^2$
1	1	2	22	vrai
2	1	9	45	vrai
5	1	126	126	vrai
5	4	$189 = 9*3*7$	$441 = 9*7*7$	faux

Ainsi, nous pouvons conclure que les valeurs des entiers naturels non nuls m et n qui n'ont pas de diviseur commun plus grand que 1 tels que : m^3+n^3 divise $m^2+20mn+n^2$ sont :

$$(1,1),(2,1),(1,2),(5,1),(1,5) \tag{33}$$

2.1.3 Problème 3 : (taux de réussite : 13/178)

Pour la suite de nombres réels suivante :

$$\begin{cases} x_1 = c \\ x_{n+1} = cx_n + \sqrt{c^2-1}\sqrt{x_n^2-1} \quad \text{pour tout} \quad n \geq 1. \end{cases} \tag{34}$$

Montrons que si c est un nombre entier naturel non nul, alors x_n est un entier pour tout $n \geq 1$.

2.1.3.1 Solution 1 - Changement de variable $x_n = cosh(a_n)$

Définissons la suite numérique a_n telle que pour tout entier naturel n,

$$x_n = cosh(a_n)$$

Cette suite est bien définie car la fonction $cosh$ est bijective sur $\mathbb{R}^+$. En effet, la fonction cosinus hyperbolique est strictement croissante sur $\mathbb{R}^+$ (car sa dérivée est la fonction sinus hyperbolique qui est strictement positive sur $\mathbb{R}^+$), elle est donc bijective sur $\mathbb{R}^+$.

Ainsi, l'équation (34) devient :

$$\begin{cases} x_n = cosh(a_n) \quad \text{pour tout} \quad n \geq 1 \\ cosh(a_{n+1}) = cosh(a_1)cosh(a_n) + \sqrt{cosh(a_1)^2 - 1}\sqrt{cosh(a_n)^2 - 1} \quad \text{pour tout} \quad n \geq 1. \end{cases} \tag{35}$$

Nous avons les identités remarquables suivantes pour les fonctions $cosh$ (cosinus hyperbolique) et $sinh$ (sinus hyperbolique) :

$$\begin{cases} cosh(x)^2 + sinh(x)^2 = 1 \quad \text{pour tout} \quad x \quad \text{et} \quad y \quad \text{nombres réels} \\ cosh(x+y) = cosh(x)cosh(y) + sinh(x)sinh(y) \quad \text{pour tout} \quad x \quad \text{et} \quad y \quad \text{nombres réels} \\ cosh(x) > 0 \quad \text{et} \quad sinh(x) > 0 \quad \text{pour tout} \quad x \quad \text{et} \quad y \quad \text{nombres réels strictement positifs} \end{cases} \tag{36}$$

La seconde relation de l'équation (35) permet de dire :

$$cosh(a_{n+1}) = cosh(a_1)cosh(a_n) + sinh(a_1)sinh(a_n)$$

Cela implique d'après (36) que :

$$cosh(a_{n+1}) = cosh(a_1 + a_n) \tag{37}$$

La fonction cosinus hyperbolique est bijective. Ainsi l'équation (37) implique que :

$$a_{n+1} = a_1 + a_n \tag{38}$$

Par récurrence sur n, nous montrons que $a_n = n * a_1$ pour tout $n \geq 1$. En effet, pour $n = 1$, cela est vrai car $a_1 = 1 * a_1$. Supposons que pour un certain $n \geq 1$, $\forall k \leq n$, $a_k = k * a_1$. Alors, on a :

$$a_{n+1} = a_n + a_1 \implies a_{n+1} = n * a_1 + a_1$$

Donc :

$$a_{n+1} = (n+1)a_1$$

Ainsi, par récurrence :

$$a_n = n * a_1 \quad \text{pour tout} \quad n \geq 1 \quad \text{entier naturel.} \tag{39}$$

Donc :

$$\begin{cases} cosh(a_1) = c \\ x_n = cosh(na_1) \quad \text{pour tout} \quad n \geq 1 \quad \text{entier naturel.} \end{cases} \tag{40}$$

Montrons que si $cosh(x)$ est un entier alors pour tout entier naturel n, $cosh(nx)$ est un entier naturel.

Pour tous nombres réels a et b et tout entier naturels n, on a :

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

Car lorsqu'on choisit a dans k termes $a+b$, l'on choisira automatiquement b, $n-k$ fois pour former un terme de $(a+b)^n$. De plus, nous pouvons calculer la valeur de c_k^n comme étant le nombre de manière de choisir k éléments parmi n éléments sans tenir compte de l'ordre, c'est à dire :

$$c_k^n = \binom{n}{k}$$

Or

$$\binom{n}{n-k} = \binom{n}{k} \implies c_k^n = c_{n-k}^n$$

D'où :

$$(a+b)^n = \sum_{k=0}^{\lfloor \frac{n}{2} \rfloor} c_k^n (a^k b^{n-k} + a^{n-k} b^k) - \delta_{\lfloor \frac{n}{2} \rfloor, \frac{n}{2}} c_{\lfloor \frac{n}{2} \rfloor}^n a^{\frac{n}{2}} b^{\frac{n}{2}} \tag{41}$$

Où la notation $\lfloor x \rfloor$ signifie, la partie entière de x et $\delta_{a,b}$ est telle que :

$$\delta_{a,b} = \begin{cases} 1 & \text{si} \quad a = b \\ 0 & \text{si} \quad a \neq b \end{cases}$$

Ainsi, pour $a = e^x$ et $b = e^{-x}$, on a : $2^n cosh(x)^n = (a+b)^n$. Ce qui donne donc :

$$2^n cosh(x)^n = \sum_{k=0}^{\lfloor \frac{n}{2} \rfloor} c_k^n (e^{(n-2k)x} + e^{-(n-2k)x}) - \delta_{(\lfloor \frac{n}{2} \rfloor, \frac{n}{2})} c_{\frac{n}{2}}^n$$

Donc :

$$2^n cosh(x)^n = \sum_{k=0}^{\lfloor \frac{n}{2} \rfloor} c_k^n 2cosh((n-2k)x) - \delta_{(\lfloor \frac{n}{2} \rfloor, \frac{n}{2})} c_{\frac{n}{2}}^n$$

$$2c_0^n cosh(nx) = 2^n cosh(x)^n - \sum_{k=1}^{\lfloor \frac{n}{2} \rfloor} 2c_k^n cosh((n-2k)x) + \delta_{(\lfloor \frac{n}{2} \rfloor, \frac{n}{2})} c_{\frac{n}{2}}^n$$

Or $c_0^n = \binom{n}{0} = 1$, donc :

$$cosh(nx) = 2^{n-1}cosh(x)^n - \sum_{k=1}^{\lfloor \frac{n}{2} \rfloor} c_k^n cosh((n-2k)x) + \delta_{(\lfloor \frac{n}{2} \rfloor, \frac{n}{2})} \frac{c_{\frac{n}{2}}}{2} \tag{42}$$

Soit x tel que $cosh(x)$ est un entier naturel. Par récurrence, montrons que pour tout entier naturel n, $cosh(nx)$ est un entier naturel. Pour $n = 1$, on a $cosh(nx) = cosh(x)$ est un entier naturel.

$$\text{Soit} \quad n, \quad \text{tel que pour tout} \quad k \leq n, \quad cosh(kx) \quad \text{est un entier naturel.} \tag{43}$$

Donc :

$$\forall k \leq \lfloor \frac{n+1}{2} \rfloor, \quad c_k^{n+1} cosh((n+1-2k)x) \quad \text{est un entier naturel} \tag{44}$$

Car $\forall k$ tel que, $1 \leq k \leq \lfloor \frac{n+1}{2} \rfloor$, $0 \leq n+1-2k \leq n$, l'hypothèse (43) est applicable pour $l = n+1-2k$ et $c_k^{n+1} = \binom{n+1}{k}$ est un entier.

Aussi,

$$\delta_{(\lfloor \frac{n+1}{2} \rfloor, \frac{n+1}{2})} \frac{c_{\frac{n+1}{2}}^{n+1}}{2} = \begin{cases} \frac{c_{\frac{n+1}{2}}^{n+1}}{2} & \text{si} \quad n+1 \quad \text{est pair} \\ 0 \quad \text{si} \quad n+1 \quad \text{est impair} \end{cases}$$

Si $n+1$ est pair,

$$c_{\frac{n+1}{2}}^{n+1} = \binom{n+1}{\frac{n+1}{2}} \implies c_{\frac{n+1}{2}}^{n+1} = \frac{(n+1)!}{(\frac{n+1}{2})!(\frac{n+1}{2})!} \implies c_{\frac{n+1}{2}}^{n+1} = 2\frac{n!}{(\frac{n-1}{2})!(\frac{n+1}{2})!}$$

$$c_{\frac{n+1}{2}}^{n+1} = 2\binom{n}{\frac{n+1}{2}} \implies c_{\frac{n+1}{2}}^{n+1} = 2c_{\frac{n+1}{2}}^{n} \implies \frac{c_{\frac{n+1}{2}}^{n+1}}{2} = c_{\frac{n+1}{2}}^{n}$$

Donc :

$$\delta_{(\lfloor \frac{n+1}{2} \rfloor, \frac{n+1}{2})} \frac{c_{\frac{n+1}{2}}^{n+1}}{2} = \begin{cases} c_{\frac{n+1}{2}}^{n} & \text{si} \quad n+1 \quad \text{est pair} \\ 0 \quad \text{si} \quad n+1 \quad \text{est impair} \end{cases} \tag{45}$$

D'après (42),

$$cosh((n+1)x) = 2^n cosh(x)^{n+1} - \sum_{k=1}^{\lfloor \frac{n+1}{2} \rfloor} c_k^{n+1} cosh((n+1-2k)x) + \delta_{(\lfloor \frac{n+1}{2} \rfloor, \frac{n+1}{2})} \frac{c_{\frac{n+1}{2}}}{2}$$

et

$$cosh((n+1)x) > 0 \quad \text{pour tout} \quad x \quad \text{nombres réel strictement positifs}$$

En utilisant les remarques (44), (45) et le fait que $cosh(x)$ est un entier naturel alors $cosh((n+1)x)$ est un entier.

Ainsi, si x est un nombre réel tel que $cosh(x)$ est un entier naturel alors pour tout entier naturel n, $cosh(nx)$ est un entier naturel.

Pour conclure, en utilisant l'expression de x_n en fonction de a_1, (40) et l'implication précédente, nous pouvons déduire que :

Si c est un nombre entier naturel non nul, alors x_n est un entier pour tout $n \geq 1$.

2.1.3.2 Solution 2 - Montrer que : $\forall n \geq 2$, $x_{n+1} = 2cx_n - x_{n-1}$

Montrons par récurrence que pour tout entier naturel $n \geq 2$, $x_{n+1} = 2cx_n - x_{n-1}$

Pour $n = 1, 2$ et 3, on a :

$$x_1 = c$$

$$x_2 = c^2 + \sqrt{c^2-1}\sqrt{c^2-1} \implies x_2 = 2c^2 - 1$$

$$x_3 = c(2c^2-1) + \sqrt{c^2-1}\sqrt{(2c^2-1)^2-1} \implies x_3 = 2c^3 - c + \sqrt{c^2-1}\sqrt{4c^2(c^2-1)}$$

$$x_3 = 2c^3 - c + (c^2-1)(2c) \implies x_3 = 4c^3 - 3c \implies x_3 = 2c(2c^2-1) - c$$

$$\begin{cases} x_1 = c \\ x_2 = 2c^2 - 1 \\ x_3 = 2c(2c^2-1) - c \end{cases} \tag{46}$$

D'où :

$$x_3 = 2cx_2 - x_1 \tag{47}$$

Donc pour $n = 2$, on a : $x_{n+1} = 2cx_n - x_{n-1}$.

Supposons que pour un certain $n \geq 2$, on a : $\forall k, 2 \leq k \leq n, x_{k+1} = 2cx_k - x_{k-1}$. Alors, on a d'après la définition de la suite x_n,

$$x_{n+2} = cx_{n+1} + \sqrt{c^2-1}\sqrt{x_{n+1}^2 - 1} \tag{48}$$

D'après l'hypothèse, on a :

$$x_{n+1}^2 = (2cx_n - x_{n-1})^2 \implies x_{n+1}^2 = 4c^2x_n^2 - 4cx_nx_{n-1} + x_{n-1}^2$$
$$x_{n+1}^2 - 1 = (4c^2x_n^2 - 4cx_nx_{n-1}) + (x_{n-1}^2 - 1)$$
$$(c^2-1)(x_{n+1}^2 - 1) = (c^2-1)(4c^2x_n^2 - 4cx_nx_{n-1}) + (c^2-1)(x_{n-1}^2 - 1)$$

Or, d'après la définition de la suite x_n selon l'équation (34) :

$$(c^2-1)(x_{n-1}^2 - 1) = (x_n - cx_{n-1})^2$$

Donc :

$$(c^2-1)(x_{n+1}^2 - 1) = (c^2-1)(4c^2x_n^2 - 4cx_nx_{n-1}) + (x_n^2 - 2cx_nx_{n-1} + c^2x_{n-1}^2)$$
$$(c^2-1)(x_{n+1}^2 - 1) = (4c^4 - 4c^2 + 1)x_n^2 - 2c(2c^2-1)x_{n-1}x_n + c^2x_{n-1}^2$$

Aussi :

$$(cx_{n+1} - x_n)^2 = c^2x_{n+1}^2 - 2cx_{n+1}x_n + x_n^2$$

D'après l'hypothèse de la récurrence, pour $k = n$:

$$x_{n+1} = 2cx_n - x_{n-1} \quad \text{et} \quad x_{n+1}^2 = 4c^2x_n^2 - 4cx_nx_{n-1} + x_{n-1}^2$$

Donc :

$$(cx_{n+1} - x_n)^2 = c^2(4c^2x_n^2 - 4cx_nx_{n-1} + x_{n-1}^2) - 2c(2cx_n - x_{n-1})x_n + x_n^2$$
$$(cx_{n+1} - x_n)^2 = (4c^4 - 4c^2 + 1)x_n^2 - 2c(2c^2-1)x_{n-1}x_n + c^2x_{n-1}^2$$

D'où :

$$(c^2-1)(x_{n+1}^2 - 1) = (cx_{n+1} - x_n)^2$$

L'équation (48) donne :

$$x_{n+2} = cx_{n+1} + (cx_{n+1} - x_n) \quad \text{car} \quad cx_{n+1} \geq c^2x_n \geq x_n \quad (\text{car} \quad c \geq 1)$$

$$x_{n+2} = 2cx_{n+1} - x_n$$

Ainsi, par récurrence, pour tout $n \geq 2$:

$$x_{n+1} = 2cx_n - x_{n-1} \tag{49}$$

Montrons par récurrence sur n que si c est un entier naturel alors pour tout $n \geq 1, x_n$ est un entier naturel

Supposons que c est un entier naturel non nul.

Pour $n = 1$, $x_1 = c$ est un entier naturel non nul. Pour $n = 2$, l'expression de x_2 donnée par l'équation (46) est : $x_2 = 2c^2 - 1$. Donc x_2 est un entier naturel non nul.

Supposons que pour un certain $n \geq 2$, $\forall k, 1 \leq k \leq n, x_k$ est un entier naturel non nul.

L'équation (49) implique que $x_{n+1} = 2cx_n - x_{n-1}$. Or d'après l'hypothèse de récurrence x_n et x_{n-1} sont des entiers naturels non nuls. Donc, x_{n+1} est un entier relatif. Aussi, $x_{n+1} \geq 1$ car les termes de l'expression de $x_{n+1} = cx_n + \sqrt{c^2-1}\sqrt{x_n^2-1}$ selon (34) sont tels que $cx_n \geq 1$ et $\sqrt{c^2-1}\sqrt{x_n^2-1} \geq 0$ car $c \geq 1$ et $x_n \geq 1$. D'où, x_{n+1} est un entier naturel non nul.

Ainsi par récurrence, $\forall n \geq 1$, x_n est un entier naturel non nul.

Pour conclure, si c est un nombre entier naturel non nul, alors x_n est un entier naturel pour tout $n \geq 1$.

Remarque 1: Polynôme de Chebyshev

Le problème posé est équivalent à une suite de polynômes de Chebyshev de premier type noté T_n, tel que :

$$T_n(cos\theta) = cos(n\theta)$$

Pour démontrer que nous sommes face à un polynôme de Chebyshev, nous pouvons calculer les premiers termes de la suite et vérifier qu'ils sont égaux à la suite de polynômes de Chebyshev.

$$\begin{cases} T_0(x) = 1 \\ T_1(x) = x \\ T_2(x) = 2x^2 - 1 \\ T_3(x) = 4x^3 - 3x \\ T_4(x) = 8x^4 - 8x^2 + 1 \\ T_5(x) = 16x^5 - 20x^3 + 5x \\ T_6(x) = 32x^6 - 48x^4 + 18x^2 - 1 \end{cases} \tag{50}$$

La relation de la solution 2, découle de la propriété suivante de la suite du polynôme de Chebyshev.

$$\begin{cases} T_0(x) = 1 \\ T_1(x) = x \\ T_{n+1}(x) = 2xT_n(x) - T_{n-1}(x) \quad \forall n \geq 1 \end{cases} \tag{51}$$

Pour plus de détails sur les propriétés du polynôme de Chebychev, se reférer à la page wikipédia suivante ([1]).

2.2 Jour 2

2.2.1 Problème 4 : (taux de réussite : 4/178)

Déterminons la valeur maximale possible de n.

2.2.1.1 Solution 1 - Utilisation de la fonction partie entière.

Remarque 2: Numérotation des pages suivant le nombre de timbres.

Pour une distribution donnée de timbres effectuée par Manzi, nous numérotons les pages en les rangeant par ordre croissant du nombre de timbres. Notons par a_k, le nombre de timbres dans la page k. Puisque la distribution de timbres dans les pages est telle que deux pages distinctes ont un nombre distinct de pages. La numérotation des pages est donc telle que pour tout k tel que : $2 \leq k \leq 10$, on a :

$$0 \leq a_{k-1} < a_k$$

Cela implique que :

$$a_k \geq a_{k-1} + 1 \geq 1 \tag{52}$$

Montrons que la valeur minimale de n est 45

Manzi dispose de n timbres et comme chaque page contient un nombre distinct de timbres, considérons une distribution de timbres effectuée par Manzi. Alors, nous considérons la numérotation telle que :

$$\forall k, \quad 2 \leq k \leq 10, \quad 0 \leq a_{k-1} < a_k$$

Montrons par récurrence sur n que pour tout $n \in \{1, 2, ..., 10\}$, $a_n \geq a_1 + (n-1)$

Pour $n = 1$, on a : $a_n = a_1 + (n-1)$.

Supposons que pour un certain n, tel que : $n \in \{1, 2, ..., 9\}$, $a_n \geq a_1 + (n-1)$. Alors, l'équation (52) permet de déduire que :

$$a_{n+1} \geq a_n + 1 \implies a_{n+1} \geq (a_1 + (n-1)) + 1$$

D'où :

$$a_{n+1} \geq a_1 + n$$

Ainsi, nous avons montré par récurrence sur n, que :

$$\forall n \in \{1, 2, ..., 10\}, \quad a_n \geq a_1 + (n-1) \tag{53}$$

On a :

$$n = \sum_{k=1}^{10} a_k \implies n \geq \sum_{k=1}^{10}(k-1) + \sum_{k=1}^{10} a_1$$

$$n \geq \frac{9 \times 10}{2} + 10a_1 \implies n \geq 45 + 10a_1 \tag{54}$$

Or, $a_1 \geq 0$, donc :

$$n \geq 45 \tag{55}$$

Aussi, pour $n = 45$, il existe bien toujours quatre pages pour toute distribution de timbres $(a_1, ..., a_{10})$ entre les dix pages telles que le nombre total de timbres est supérieur à $\frac{n}{2}$. En effet, les équations (53) et (54) permettent de dire que :

$$n = 45 \implies a_1 = 0 \quad \text{et} \quad \forall n \in \{1, 2, ..., 10\}, \quad a_n = a_1 + (n-1) \tag{56}$$

Sinon, si nous supposons qu'il existe $l \in \{1, 2, ..., 10\}$, tel que : $a_l > a_1 + (l-1)$. Alors :

$$n = \sum_{k=1, k\neq l}^{10} a_k + a_l \implies n > \sum_{k=1, k\neq l}^{10} (k-1) + \sum_{k=1, k\neq l}^{10} a_1 + (l-1) + a_1$$

$$n > \sum_{k=1}^{10}(k-1) + \sum_{k=1}^{10} a_1 \implies n > 45 + 10a_1 > 45$$

Ce qui est absurde. De même si nous supposons que $a_1 > 0$, alors :

$$n = \sum_{k=1}^{10} a_1 + (k-1) \implies n = 45 + 10a_1 > 45$$

Cela aussi est absurde.

Ainsi, pour $n = 45$, on a : $\forall k \in \{1, 2, ..., 10\}$, $a_k = k - 1$. Donc :

$$a_7 + a_8 + a_9 + a_{10} = 6 + 7 + 8 + 9 \implies a_7 + a_8 + a_9 + a_{10} = 30 > \frac{45}{2}$$

Donc pour $n = 45$, il existe bien toujours quatre pages pour toute distribution de timbres $(a_1, ..., a_{10})$ entre les dix pages telle que le nombre total de timbres est supérieur à $\frac{n}{2}$.

Montrons que si pour n entier naturel, l'assertion : pour tout arrangement $(a_1, ..., a_{10})$, il existe toujours quatre éléments tels que le total est supérieur à $\frac{n}{2}$ est vraie alors n admet une valeur maximale.

Soit n fixé un entier naturel, tel que pour toute distribution de timbres parmi les dix pages $(a_1, ..., a_{10})$ (suivant l'encadré remarque (2)), il existe toujours quatre éléments tels que le total est supérieur à $\frac{n}{2}$. Prenons la distribution de timbres $(a_1, ..., a_{10})$ telle que :

$$\begin{cases} a_{i+1} = a_i + 1 \quad \text{pour tout} \quad i \in \{1, ..., 8\} \\ a_1 = \lfloor \frac{n-45}{10} \rfloor \quad \text{et} \quad a_{10} = n - 9a_1 - 36 \end{cases} \tag{57}$$

$$a_{10} = a_1 + 9 + (n - 45 - 10a_1)$$

Or :

$$a_1 \leq \frac{n-45}{10} \implies n - 45 - 10a_1 \geq n - 45 - 10\frac{n-45}{10} = 0$$

Donc :

$$a_{10} \geq a_1 + 9 = (a_1 + 8) + 1 = a_9 + 1$$

Ainsi, cette distribution est une distribution telle que deux pages distinctes ont un nombre distinct de timbres et on a :

$$a_{i+1} > a_i \quad \text{pour tout} \quad i \in \{1, ..., 9\}$$

S'il existe quatre pages telles que le nombre total de timbres est supérieur à $\frac{n}{2}$, en notant les quatre indices des pages comme i, j, k et l avec $i < j < k < l$ alors :

$$i < j < k < l \leq 10 \implies i \leq 7, \quad j \leq 8, \quad k \leq 9 \quad \text{et} \quad l \leq 10$$

Donc :

$$a_i \leq a_7, \quad a_j \leq a_8, \quad a_k \leq a_9 \quad \text{et} \quad a_l \leq a_{10}$$
$$a_7 + a_8 + a_9 + a_{10} \geq a_i + a_j + a_k + a_l \geq \frac{n}{2}$$

Ainsi :

$$a_7 + a_8 + a_9 + a_{10} \geq \frac{n}{2} \tag{58}$$

En utilisant l'équation (57) et la définition de a_1, on a :

$$a_7 + a_8 + a_9 + a_{10} = (a_1 + 6) + (a_1 + 7) + (a_1 + 8) + (n - 9a_1 - 36) = n - 6a_1 - 15$$

$$a_7 + a_8 + a_9 + a_{10} \leq n - 6(\frac{n - 45}{10} - 1) - 15 \implies a_7 + a_8 + a_9 + a_{10} \leq \frac{4n + 6 * 55 - 150}{10}$$

$$a_7 + a_8 + a_9 + a_{10} \leq \frac{4n + 180}{10}$$

D'où, en utilisant l'équation (58), on obtient :

$$\frac{4n + 180}{10} \geq a_7 + a_8 + a_9 + a_{10} \geq \frac{n}{2} \implies \frac{4n + 180}{10} \geq \frac{n}{2}$$

Donc :

$$\frac{n - 180}{10} \leq 0 \implies n \leq 180$$

Montrons que pour n entier naturel, l'assertion : pour tout arrangement $(a_1, ..., a_{10})$, il existe toujours quatre éléments tels que le total est supérieur à $\frac{n}{2}$ est vraie alors la valeur maximale de n est 140.

Pour tout n entier naturel, nous considérons la distribution de timbres $(a_1, a_2, ..., a_{10})$ selon la remarque (2). Pour démontrer le résultat ci-dessus, nous allons effectuer un raisonnement basé sur quelques valeurs possibles de a_6.

Soit $n \geq 140$,

Si $n = 140$,

Si $a_6 < 15$, alors :

$$a_1 + a_2 + a_3 + a_4 + a_5 + a_6 \leq a_6 + (a_6 - 1) + (a_6 - 2) + (a_6 - 3) + (a_6 - 4) + (a_6 - 5)$$

$$a_1 + a_2 + a_3 + a_4 + a_5 + a_6 \leq 6a_6 - (1 + 2 + 3 + 4 + 5) \leq 6 * 14 - 15$$

$$a_1 + a_2 + a_3 + a_4 + a_5 + a_6 \leq 69$$

Donc :

$$a_7 + a_8 + a_9 + a_{10} = n - (a_1 + a_2 + a_3 + a_4 + a_5 + a_6) \implies a_7 + a_8 + a_9 + a_{10} \geq 140 - 69$$

$$a_7 + a_8 + a_9 + a_{10} \geq 71 > \frac{140}{2} = \frac{n}{2}$$

Si $a_6 \geq 15$, alors :

$$a_7 + a_8 + a_9 + a_{10} \geq (a_6 + 1) + (a_6 + 2) + (a_6 + 3) + (a_6 + 4) = 4a_6 + 10$$

$$a_7 + a_8 + a_9 + a_{10} \geq 70 = \frac{140}{2} = \frac{n}{2}$$

Donc, pour $n = 140$, pour toute distribution de timbres parmi les dix pages, il existe toujours quatre pages telles que le total de timbres est supérieur à $\frac{n}{2}$.

Si $n > 140$,

Nous raisonnons avec les distributions de timbres sur les 10 pages suivant la numérotation de la remarque (2). Et nous considérons le cas où $a_6 = \lfloor \frac{n}{10} \rfloor + 1$. Cette distribution est possible en posant :

$$\begin{cases} a_k = k, \quad \text{pour tout} \quad k \in \{1, 2, 3, 4, 5\} \\ a_6 = \lfloor \frac{n}{10} \rfloor + 1 \\ a_k = a_6 + (k - 6), \quad \text{pour tout} \quad k \in \{7, 8, 9\} \\ a_{10} = n - \sum_{k=1}^{9} a_k = n - (1 + 2 + 3 + 4 + 5) - (4a_6 + (1 + 2 + 3)) \end{cases} \tag{59}$$

En effet :

$$a_{10} \geq n - 21 - 4 * (\frac{n}{10} + 1) \implies a_{10} \geq 6 * (\frac{n}{10}) - 25$$

$$a_{10} - (a_9 + 1) \geq 6 * (\frac{n}{10}) - 25 - (a_9 + 1) \geq 6 * (\frac{n}{10}) - 25 - (\lfloor \frac{n}{10} \rfloor + 4 + 1)$$

Or,

$$-\lfloor\frac{n}{10}\rfloor \geq -\frac{n}{10}$$

Et vu que $n > 140$,

$$a_{10} - (a_9 + 1) \geq 5 * (\frac{n}{10} - 6) > 5 * (14 - 6) > 0 \implies a_{10} > a_9$$

On obtient une distribution de timbres $\{a_1, a_2, ..., a_{10}\}$ sur les 10 pages suivant la numérotation de la remarque (2).

En écrivant :

$$n = 10.(14 + a) + b \quad \text{avec} \quad a > 0 \quad \text{et} \quad 0 < b \leq 9 \tag{60}$$

On obtient :

$$a_6 = 14 + a + 1 = 15 + a \quad \text{avec} \quad a > 0 \tag{61}$$

$$n = 10a_6 + b - 10 \quad \text{avec} \quad b > 0 \tag{62}$$

Si $b \leq 5$, on prend :

$$\begin{cases} a_6 = \lfloor\frac{n}{10}\rfloor + 1 \\ a_1 = a_6 + b - 10 \\ a_k = a_6 + (k - 6), \quad \text{pour tout} \quad k \in \{2, 3, 4, 5, 7, 8, 9, 10\} \end{cases} \tag{63}$$

On a :

$$a_1 + ... + a_{10} = 6a_6 + (b - 10) - (1 + 2 + 3 + 4) + 4a_6 + (1 + 2 + 3 + 4)$$

$$a_1 + ... + a_{10} = 10a_6 + b - 10 = n$$

Et :

$$a_7 + a_8 + a_9 + a_{10} = 4a_6 + 10 = 4(15 + a) + 10$$

$$a_7 + a_8 + a_9 + a_{10} = 4a + 70$$

$$a_7 + a_8 + a_9 + a_{10} - \frac{n}{2} = 4a + 70 - 5(14 + a) - \frac{b}{2}$$

$$a_7 + a_8 + a_9 + a_{10} - \frac{n}{2} = -a - \frac{b}{2} < 0 \quad \text{car} \quad a > 0 \quad \text{et} \quad b > 0$$

$$a_7 + a_8 + a_9 + a_{10} < \frac{n}{2}$$

Donc :

$$a_i + a_j + a_k + a_l < \frac{n}{2} \quad \forall i,j,k,l \in \{1,...,10\} \tag{64}$$

Si $b > 5$, on pose :

$$\begin{cases} a_6 = \lfloor \frac{n}{10} \rfloor + 1 \\ a_k = a_6 + (k-6), \quad \text{pour tout} \quad k \in \{1,2,3,4,5\} \\ a_k = a_6 + (k-6) + \delta_{b-5>10-l}, \quad \text{pour tout} \quad k \in \{7,8,9,10\} \end{cases} \tag{65}$$

On a :

$$a_1 + ... + a_{10} = 6a_6 - (1+2+3+4+5) + 4a_6 + (1+2+3+4) + (b-5)$$
$$a_1 + ... + a_{10} = 10a_6 + b - 10 = n$$

Et :

$$a_7 + a_8 + a_9 + a_{10} = 4a_6 + 10 + (b-5) = 4(15+a) + 10 + (b-5)$$
$$a_7 + a_8 + a_9 + a_{10} = 4a + 65 + b$$
$$a_7 + a_8 + a_9 + a_{10} - \frac{n}{2} = 4a + 65 + b - 5(14+a) - \frac{b}{2} = \frac{b}{2} - 5 - a$$

Donc :

$$a_7 + a_8 + a_9 + a_{10} - \frac{n}{2} \leq \frac{9}{2} - 5 - a = -\frac{1}{2} - a < 0 \quad \text{car} \quad a > 0 \quad \text{et} \quad b \leq 9$$

$$a_7 + a_8 + a_9 + a_{10} < \frac{n}{2}$$

$$a_i + a_j + a_k + a_l < \frac{n}{2} \quad \forall i,j,k,l \in \{1,...,10\} \tag{66}$$

Ainsi, à l'aide des équations (64) et (66), on a :

$$\text{Pour} \quad n > 140, \quad \forall i,j,k,l \in \{1,...,10\} \quad a_i + a_j + a_k + a_l < \frac{n}{2} \tag{67}$$

L'équation (67) et le fait que pour $n = 140$ et pour toute distribution de timbres parmi les dix pages, il existe toujours quatre pages telles que le total de timbres est supérieur à $\frac{n}{2}$, nous permet de déduire que si l'assertion : pour tout arrangement $(a_1, ..., a_{10})$, il existe toujours quatre éléments tels que le total est supérieur à $\frac{n}{2}$ est vraie alors la valeur maximale de n est 140.

Remarque 3: Comment trouver la valeur maximale de n

Dans les conditions de ce problème, pour déterminer la valeur maximale de n, l'on peut se baser sur les deux premiers résultats démontrés ci-dessus, à savoir montrer que :

$$45 \leq n \leq 180$$

Puis, en descendant de proche en proche la borne supérieure de la valeur de n et essayant de trouver le cas échéant une distribution des timbres telle que tout ensemble de quatre pages a une somme totale de timbres inférieure strictement à $\frac{n}{2}$.

Enfin, si l'on connaît la valeur maximale de n d'avance, l'on pourrait se contenter de le démontrer.

2.2.2 Problème 5 : (taux de réussite : 17/178)

2.2.3 Problème 6 : (taux de réussite : 3/178)

Références

[1] Wikipedia. *Chebyshev Polynomials*. URL : `https://en.wikipedia.org/wiki/Chebyshev_polynomials`. (accessed: 23.06.2023).