Devoir à la maison n° 12 : corrigé

Problème 1 — Polynômes de Tchebychev

Partie I – Cas particulier

1. $f_0 = g_0$ donc $f_0 \in G_2$. De même, $f_1 = g_1$ donc $f_1 \in G_2$. Enfin, $f_2 = 2g_2 - g_1$ donc $f_2 \in G_2$. Puisque G_2 est un sous-espace vectoriel, il est stable par combinaison linéaire. Ainsi $F_2 = \text{vect}(f_0, f_1, f_2) \subset G_2$.

2. Soit $(\lambda_0, \lambda_1, \lambda_2) \in \mathbb{R}^3$ tel que $\lambda_0 f_0 + \lambda_1 f_1 + \lambda_2 f_2 = 0$. En particulier,

$$\begin{cases} \lambda_0 f_0(0) + \lambda_1 f_1(0) + \lambda_2 f_2(0) = 0 \\ \lambda_0 f_0\left(\frac{\pi}{2}\right) + \lambda_1 f_1\left(\frac{\pi}{2}\right) + \lambda_2 f_2\left(\frac{\pi}{2}\right) = 0 \\ \lambda_0 f_0(\pi) + \lambda_1 f_1(\pi) + \lambda_2 f_2(\pi) = 0 \end{cases}$$

ou encore

$$\begin{cases} \lambda_0 + \lambda_1 + \lambda_2 = 0 \\ \lambda_0 - \lambda_2 = 0 \\ \lambda_0 - \lambda_1 + \lambda_2 = 0 \end{cases}$$

On en déduit sans peine que $\lambda_0 = \lambda_1 = \lambda_2 = 0$. La famille (f_0, f_1, f_2) est donc libre. Puisqu'elle engendre F_2, c'est une base de F_2 et $\dim F_2 = 3$.

3. Soit $(\lambda_0, \lambda_1, \lambda_2) \in \mathbb{R}^3$ tel que $\lambda_0 g_0 + \lambda_1 g_1 + \lambda_2 g_2 = 0$. En particulier,

$$\begin{cases} \lambda_0 g_0(0) + \lambda_1 g_1(0) + \lambda_2 g_2(0) = 0 \\ \lambda_0 g_0\left(\frac{\pi}{2}\right) + \lambda_1 g_1\left(\frac{\pi}{2}\right) + \lambda_2 g_2\left(\frac{\pi}{2}\right) = 0 \\ \lambda_0 g_0(\pi) + \lambda_1 g_1(\pi) + \lambda_2 g_2(\pi) = 0 \end{cases}$$

ou encore

$$\begin{cases} \lambda_0 + \lambda_1 + \lambda_2 = 0 \\ \lambda_0 = 0 \\ \lambda_0 - \lambda_1 + \lambda_2 = 0 \end{cases}$$

On en déduit sans peine que $\lambda_0 = \lambda_1 = \lambda_2 = 0$. La famille (g_0, g_1, g_2) est donc libre. Puisqu'elle engendre G_2, c'est une base de G_2 et $\dim G_2 = 3$.

4. Puisque $F_2 \subset G_2$ et $\dim F_2 = \dim G_2$, $F_2 = G_2$.

Partie II – Une inclusion

1. Soit $n \in \mathbb{N}$. Pour tout $x \in \mathbb{R}$

$$\cos((n+2)x) + \cos(nx) = 2\cos\frac{(n+2)x + nx}{2}\cos\frac{(n+2)x - nx}{2} = 2\cos((n+1)x)\cos x$$

Ainsi $f_{n+2} + f_n = 2f_{n+1}f_1$ ou encore $f_{n+2} = 2f_{n+1}f_1 - f_n$.

2. Tout d'abord, $f_0 \in G_0$ puisque $f_0 = g_0$ et $f_1 \in G_1$ puisque $f_1 = g_1$.
Supposons que $f_n \in G_n$ et $f_{n+1} \in G_{n+1}$ pour un certain $n \in \mathbb{N}$. A fortiori, $f_n \in G_{n+2}$ puisque $G_n \subset G_{n+2}$. De plus, $f_{n+1} \in G_{n+1} = \text{vect}(g_0, \dots, g_{n+1})$ donc

$$f_{n+1}f_1 = \in \text{vect}(g_0\cos, \dots, g_{n+1}\cos) = \text{vect}(g_1, \dots, g_{n+2}) \subset G_{n+2}$$

Donc $f_{n+2} = 2f_{n+1}f_1 - f_n \in G_{n+2}$.
Par récurrence double, $f_n \in G_n$ pour tout $n \in \mathbb{N}$.

3. Soit $n \in \mathbb{N}$. Pour tout $k \in [\![0, n]\!]$, $f_k \in G_k$ et a fortiori, $f_k \in G_n$. G_n étant stable par combinaison linéaire,

$$F_n = \text{vect}(f_0, \dots, f_n) \subset G_n$$

Partie III – Utilisation de la dimension

1. Par linéarisation, on trouve $I_{k,l} = 0$ si $k \neq l$ et $I_{k,l} = \pi$ si $k = l \neq 0$ et $I_{0,0} = 2\pi$.

2. Soit $n \in \mathbb{N}$. On se donne $(\lambda_0, \dots, \lambda_n) \in \mathbb{R}^{n+1}$ tel que $\sum_{k=0}^n \lambda_k f_k = 0$. Soit $l \in [\![0, n]\!]$. On a donc $\sum_{k=0}^n \lambda_k f_k f_l = 0$. En intégrant sur $[0, 2\pi]$, on obtient par linéarité de l'intégrale $\sum_{k=0}^n \lambda_k I_{k,l} = 0$ ou encore $\lambda_l = 0$ d'après la question précédente. Ainsi $\lambda_l = 0$ pour tout $l \in [\![0, n]\!]$. La famille $(f_0, \dots, f_n)$ est donc libre.

3. Puisque $(f_0, \dots, f_n)$ est libre et engendre F_n, c'est une base de F_n. Il s'ensuit que $\dim F_n = n + 1$.

4. $(g_0, \dots, g_n)$ est une famille de $n+1$ éléments engendrant G_n. On a donc nécessairement $\dim G_n \leqslant n + 1$.

5. Puisque $F_n \subset G_n$, $\dim F_n \leqslant G_n$. Or $\dim F_n = n + 1$ et $\dim G_n \leqslant n + 1$ donc $\dim G_n = \dim F_n = n + 1$. Ainsi $F_n \subset G_n$ et $\dim F_n = \dim G_n$ donc $F_n = G_n$.

Solution 1.

1. C'est du calcul.

2. **a.** Supposons que x et y admettent un diviseur premier commun p. Alors p divise x^2 et y^2. Puisque $z^2 = x^2 + y^2$, p divise z^2. Puisque p est premier, p divise z. Ainsi p est un diviseur premier commun de x, y et z, ce qui est absurde puisque x, y et z sont premiers entre eux dans leur ensemble. Ainsi x et y ne possèdent pas de diviseur premier commun : ils sont premiers entre eux.
On prouve de même que x et z d'une part et y et z d'autre part sont premiers entre eux.

b. Comme x et y sont premiers entre eux, ils ne peuvent pas être tous deux pairs.
Remarquons maintenant que le carré d'un entier pair est congru à 0 modulo 4 tandis que le carré d'un entier impair est congru à 1 modulo 4. Supposons x et y impairs. Alors $z^2 \equiv 2[4]$, ce qui est impossible puisque le carré d'un entier est congru à 0 ou 1 modulo 4.
Finalement x et y sont de parités distinctes. Dans ce cas, $z^2 \equiv 1[4]$, ce qui signifie que z est impair.

3. **a.** Notons δ le pgcd de $z - x$ et $z + x$. Tout d'abord, z et x étant impairs, $z - x$ et $z + x$ sont pairs donc 2 divise δ. De plus, $2x = (z + x) - (z - x)$ et $2z = (z + x) + (z - x)$ donc δ divise $2x$ et $2z$. Par conséquent, δ divise $2x \wedge 2z = 2(x \wedge z) = 2$. Finalement $\delta = 2$.

b. Puisque le pgcd de $z - x$ et $z + x$ est 2, b et c sont premiers entre eux. De plus, $y^2 = z^2 - x^2 = (z - x)(z + x)$ i.e. $a^2 = bc$.
Puisque x, y, z sont strictement positifs, $a > 0$ et $b > 0$. Puisque $a^2 = bc$, on a également $c > 0$. On peut donc considérer les valuations p-adiques de a, b, c.
Soit alors p un nombre premier. Alors $\nu_p(a^2) = \nu_p(bc)$ i.e. $2\nu_p(a) = \nu_p(b) + \nu_p(c)$. Puisque b et c sont premiers entre eux, l'une des deux valuations $\nu_p(b)$ ou $\nu_p(c)$ est nulle tandis que l'autre vaut $2\nu_p(a)$. Quoi qu'il en soit, les deux valuations $\nu_p(a)$ et $\nu_p(b)$ sont paires. Ceci étant vrai pour tout nombre premier p, b et c sont des carrés d'entiers.

4. Soit (x, y, z) un triplet solution.

- Si l'un des deux réels x et y est nul, on peut supposer que $y = 0$ quitte à permuter x et y. Alors $x^2 = z^2$. Si x et z sont de même signe, on a bien $x = d(u^2 - v^2)$, $y = 2duv$ et $z = d(u^2 + v^2)$ avec $d = x = z$, $u = 1$ et $v = 0$. Sinon, il suffit de poser $d = z = -x$, $u = 0$ et $v = 1$.
- Si $z = 0$, alors $x = y = 0$ et on a bien $x = d(u^2 - v^2)$, $y = 2duv$ et $z = d(u^2 + v^2)$ avec $d = 0$ et u, v quelconques.

On suppose donc maintenant que x, y, z sont non nuls et même strictement positifs. Notons d le pgcd de x, y et z. Alors $\left(\frac{x}{d}, \frac{y}{d}, \frac{z}{d}\right)$ est encore un triplet solution formé d'entiers naturels non nuls premiers entre eux dans leur ensemble. D'après ce qu'il précède, quitte à échanger x et y, il existe des entiers b et c tels que $\frac{z+x}{d} = 2b$ et $\frac{z-x}{d} = 2c$ avec b et c des carrés d'entiers naturels non nuls que l'on peut noter u et v. On a alors $z + x = 2du^2$ et $z - x = 2dv^2$ puis, par somme et différence, $z = d(u^2 + v^2)$ et $x = d(u^2 - v^2)$. Enfin, $y^2 = (z - x)(z + x) = 4d^2u^2v^2$ puis $y = 2duv$ puisque y, d, u, v sont positifs.
Enfin, si x, y, z sont non nuls mais pas forcément positifs, $(|x|, |y|, |z|)$ est encore solution de (E) de sorte que, quitte à permuter x et y, il existe $(d, u, v) \in (\mathbb{N}^*)^3$ tels que $|x| = d(u^2 - v^2)$, $|y| = 2duv$ et $|z| = d(u^2 + v^2)$. On a quand même x, y, z de la forme voule quitte à

- échanger u et v si $x < 0$, $y > 0$ et $z > 0$;
- changer u en $-u$ si $x > 0$, $y < 0$ et $z > 0$;
- changer d en $-d$, u en $-v$ et v en u si $x > 0$, $y > 0$ et $z < 0$;
- changer u en $-v$ et v en u si $x < 0$, $y < 0$ et $z > 0$;
- changer d en $-d$ et échanger u et v si $x > 0$, $y < 0$ et $z < 0$;
- changer d en $-d$ et u en $-u$ si $x < 0$, $y > 0$ et $z < 0$;
- changer d en $-d$ si $x < 0$, $y < 0$ et $z < 0$.

La première question permet donc de conclure que l'ensemble des solutions de (E) est

$$\left\{(d(u^2-v^2), 2duv, d(u^2+v^2)),\ (d,u,v) \in \mathbb{Z}^3\right\} \cup \left\{(2duv, d(u^2-v^2), d(u^2+v^2)),\ (d,u,v) \in \mathbb{Z}^3\right\}$$