

Feuille d'exercices n°16 : corrigé

PTSI B Lycée Eiffel

7 avril 2016

Exercice 0 (*)

- $\int_0^x \lambda f(t) + \mu h(t) dt = \lambda \int_0^x f(t) dt + \mu \int_0^x h(t) dt$ par linéarité de l'intégrale, l'application est donc linéaire.
- Le calcul précédent reste identiquement valable en remplaçant la borne x par x^2 , l'application est toujours linéaire.
- Remplacer dans l'intégrale $f(t)$ par $f(t^2)$ n'empêche toujours pas de faire le même calcul, l'application est encore linéaire.
- $\int_0^x (\lambda f + \mu h)^2(t) dt = \lambda^2 \int_0^x f^2(t) dt + 2\lambda\mu \int_0^x f(t)h(t) dt + \mu^2 \int_0^x h^2(t) dt$, ce qui ne correspond pas du tout à une application linéaire.
- $\int_0^x t^2(\lambda f(t) + \mu h(t)) dt = \lambda \int_0^x t^2 f(t) dt + \mu \int_0^x t^2 h(t) dt$, l'application est donc à nouveau linéaire.
- Le produit par x^2 à l'extérieur de l'intégrale ne modifie pas non plus la linéarité de l'application.
- $(\lambda f + \mu h)'' = \lambda f'' + \mu h''$ par linéarité de la dérivation, l'application est donc linéaire.
- Comment interpréter ce $f''(x^2)$? Normalement, on doit le lire comme f'' évaluée en x^2 , auquel cas l'application reste sans problème linéaire. S'il s'était agi de $(f(x^2))''$ (avec donc une dérivée de composée), l'application ne serait plus du tout linéaire.
- Plus de linéarité ici, $(\lambda f''(x) + \mu h''(x))^2 \neq \lambda f''(x)^2 + \mu h''(x)^2$ en général.
- Celle-ci est par contre linéaire, l'application qui à f associe $f''(0)$ est linéaire, et multiplier ensuite par x^2 ne modifie rien.
- Une somme de deux applications linéaires est toujours linéaire, c'est le cas ici.
- Il y a un bug d'énoncé, le $f'(t)$ devrait être dans l'intégrale (ou alors il devrait s'agir d'un $f'(x)$). Dans les deux cas, l'application n'est pas linéaire puisque, sans même parler de combinaisons linéaires, $\int_0^x (\lambda f(t))(\lambda f'(t)) dt = \lambda^2 \int_0^x f(t)f'(t) dt$.

Exercice 1 (*)

1. L'expression analytique de u est donnée par $u(x, y, z) = u(x(1, 0, 0) + y(0, 1, 0) + z(0, 0, 1)) = xu(1, 0, 0) + yu(0, 1, 0) + zu(0, 0, 1) = (x - 3y - 7z, -x + 2y + 4z, 2x - y + z)$ en appliquant simplement la linéarité.

2. Il faut résoudre le système
$$\begin{cases} x & - & 3y & - & 7z & = & -1 \\ -x & + & 2y & + & 4z & = & 1 \\ 2x & - & y & + & z & = & 8 \end{cases}$$

$$\Leftrightarrow \begin{cases} x - 3y - 7z = -1 \\ -y - 3z = 0 \\ -5y - 15z = -10 \end{cases}$$

Les deux dernières équations étant incompatibles, $(-1, 1, 8)$ n'a pas d'antécédent par u .

De même, pour le deuxième vecteur, il faut résoudre le système $\begin{cases} x - 3y - 7z = -2 \\ -x + 2y + 4z = 1 \\ 2x - y + z = 3 \end{cases}$

$$\Leftrightarrow \begin{cases} x - 3y - 7z = -2 \\ -y - 3z = -1 \\ -5y - 15z = -7 \end{cases}$$

Pas d'antécédent non plus pour ce vecteur.

- u n'est pas surjective puisque certains éléments n'ont pas d'antécédent. Pour prouver que u n'est pas non plus injective, on peut bien sûr déterminer son noyau, mais ce n'est en fait pas nécessaire. Soit on utilise le résultat du cours qui dit qu'un endomorphisme en dimension finie est injectif si et seulement si il est surjectif, soit on constate que le système à résoudre pour obtenir le noyau ayant le même membre de gauche que les deux précédents, il ne sera pas de Cramer et admettra donc une infinité de solutions (puisque'il en a au moins une, la solution nulle).

Exercice 2 (***)

- Supposons donc $x \in \text{Im}(u)$, il existe alors un $y \in E$ tel que $x = u(y)$. Mais alors $u(x) = u^2(y) = 0$ puisque $u^2 = 0$. Ceci prouve que $x \in \ker(u)$, donc $\text{Im}(u) \subset \ker(u)$. Pour prouver que $id + u$ est un automorphisme, il suffit d'exhiber son inverse : $(id + u) \circ (id - u) = id - u^2 = id$ (les deux morphismes commutent évidemment). L'application $id + u$ est donc un automorphisme, de réciproque $id - u$.
- Commençons par constater que $\ker(u) \subset \ker(u^2)$ est toujours vrai (si $u(x) = 0$, alors certainement $u(u(x)) = 0$). De même, on aura toujours $\text{Im}(u^2) \subset \text{Im}(u)$. Supposons alors que $\text{Im}(u) \cap \ker(u) = \{0\}$, et choisissons $x \in \ker(u^2)$, on peut donc écrire $u(u(x)) = 0$. Autrement dit, $u(x) \in \ker(u)$. Mais comme $u(x) \in \text{Im}(u)$, nécessairement $u(x) = 0$, ce qui prouve que $\ker(u^2) = \ker(u)$. Réciproquement, supposons que $\ker(u) = \ker(u^2)$, et choisissons $x \in \ker(u) \cap \text{Im}(u)$. On peut donc écrire $x = u(y)$, avec $u(x) = 0$. Cela implique $u(u(y)) = u(x) = 0$, mais comme $\ker(u) = \ker(u^2)$, $y \in \ker(u)$, donc $x = u(y) = 0$.

Passons à la deuxième équivalence. Supposons d'abord $\ker(u) + \text{Im}(u) = E$, et choisissons $x \in \text{Im}(u)$. On peut donc écrire $x = u(y)$, avec par ailleurs $y = z + w$, où $z \in \ker(u)$, et $w = u(\alpha) \in \text{Im}(u)$ d'après l'hypothèse effectuée. Alors $x = u(z + w) = u(z) + u(w) = u(u(\alpha))$, ce qui prouve que $x \in \text{Im}(u^2)$. Réciproquement, supposons $\text{Im}(u) = \text{Im}(u^2)$, et choisissons $x \in E$. Par hypothèse, $u(x) \in \text{Im}(u^2)$, donc $u(x) = u(u(z))$. Posons alors $x = u(z) + (x - u(z))$. Par construction, $u(z) \in \text{Im}(u)$, mais par ailleurs $u(x - u(z)) = u(x) - u(u(z)) = 0$, donc $x - u(z) \in \ker(u)$. Nous avons bien prouvé que $x \in \text{Im}(f) + \ker(f)$ et achevé notre démonstration.

Exercice 3 (**)

Si z et z' sont deux nombres et λ une constante réelle, alors $f(z + \lambda z') = z + \lambda z' + \overline{az + \lambda z'} = z + \lambda z' + a\bar{z} + \lambda a\bar{z}' = f(z) + \lambda f(z')$. Le noyau est constitué de tous les nombres complexes vérifiant

$f(z) = 0$, soit $z + a\bar{z} = 0$. Autrement dit, en notant $z = x + iy$, et $a = b + ic$, $f(z) = x + iy + (b + ic)(x - iy) = x + bx + cy + i(y + cx - by)$. Il faut donc que $(1 + b)x = cy$ et $(1 - b)y = cx$. Cela implique $(1 - b^2)y = c^2y$, soit $(1 - b^2 - c^2)y = 0$. Si a n'est pas de module 1, on trouve $y = 0$, puis $(1 + b)x = cx = 0$. On a déjà exclu la possibilité $1 + b = c = 0$ (qui correspond au nombre $a = -1$ qui est de module 1), donc dans ce cas, $\ker(f) = \{0\}$ et l'application est injective (et même bijective car le système donnant le noyau est de Cramer, ce qui suffit à prouver l'existence d'antécédents par f de tout nombre complexe). Dans le cas très particulier où $a = -1$, le système se résume à $2y = 0$, soit $y = 0$, et $\ker(u) = \mathbb{R}$ (l'application n'est alors bien sûr pas bijective). Si a est de module 1 (et différent de -1), on doit avoir $x = \frac{c}{1+b}y$. Dans ce cas, $cx = \frac{c^2}{1+b}y = \frac{1-b^2}{1+b}y = (1-b)y$, donc la deuxième équation est automatiquement vérifiée. Autrement dit, $\ker(f) = \text{Vect}\left(\frac{c}{1+b} + i\right)$. On peut écrire si on préfère $\frac{c}{1+b} = \frac{1-b}{c}$, mais il n'y a pas vraiment de façon complètement évidente d'exprimer ceci en fonction de a .

Exercice 4 (**)

Les sous-ensembles F et G sont des sous-espaces vectoriels de E , et leur intersection est constituée des vecteurs de la forme (a, a, a) vérifiant $2a + a - a = 0$. seul le vecteur nul convient. Essayons désormais de décomposer un vecteur quelconque de \mathbb{R}^3 comme somme d'un élément de F et d'un élément de G (on peut conclure plus rapidement pour la supplémentarité en utilisant un argument de dimension, mais nous aurons besoin de la décomposition ensuite de toute façon). Pour cela, écrivons plutôt $G = \{(x, y, 2x+y) \mid (x, y) \in \mathbb{R}^2\} = \text{Vect}((1, 0, 2); (0, 1, 1))$. Soit $(x, y, z) \in \mathbb{R}^3$, on cherche donc trois réels a, b et c tels que $(x, y, z) = a(1, 1, 1) + b(1, 0, 2) + c(0, 1, 1)$. Autrement dit, on veut résoudre

$$\text{le système } \begin{cases} a + b & = x \\ a & + c = y \\ a + 2b + c & = z \end{cases}. \text{ Procédons, pour une fois, par substitution : } b = x - a \text{ et } c =$$

$y - a$, donc $a + 2x - 2a + y - a = z$, ce qui donne $x + \frac{1}{2}y - \frac{1}{2}z = a$; puis $b = -\frac{1}{2}y + \frac{1}{2}z$ et $c = -x + \frac{1}{2}y + \frac{1}{2}z$. Puisqu'il y a toujours une solution au système, on peut écrire tout vecteur comme sous la forme $x_F + x_G$, avec $x_F = a(1, 1, 1) \in F$ et $x_G = b(1, 0, 2) + c(0, 1, 1) \in G$. Ce qui prouve que $F \oplus G = \mathbb{R}^3$. On a déjà effectué tous les calculs nécessaires à l'expression de la projection. Si on la note p , par définition, $p(x, y, z) = x_F = a(1, 1, 1) = \left(x + \frac{1}{2}y - \frac{1}{2}z; x + \frac{1}{2}y - \frac{1}{2}z; x + \frac{1}{2}y - \frac{1}{2}z\right)$. De même pour la symétrie $s : s(x, y, z) = x_G - x_F = b(1, 0, 2) + c(0, 1, 1) - a(1, 1, 1) = (-x - y + z; -2x + z; -2x - y + 2z)$.

Exercice 5 (*)

Pour se simplifier la vie, écrivons l'application sous forme matricielle : en notant $A = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} 2 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & -1 \\ 1 & -1 & 2 \end{pmatrix}$,

on a $f(x, y, z) = A \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}$ (quitte à noter les vecteurs en colonne plutôt qu'en ligne). Calculons

$$A^2 = \frac{1}{9} \begin{pmatrix} 6 & 3 & 3 \\ 3 & 6 & -3 \\ 3 & -3 & 6 \end{pmatrix} = A, \text{ ce qui prouve que } p \circ p = p \text{ (puisque } p^2(x, y, z) = A^2(x, y, z)),$$

et donc que p est un projecteur. Pour déterminer son noyau, on résout le système (en multipliant

$$\text{tout par 3) : } \begin{cases} 2x + y + z = 0 \\ x + 2y - z = 0 \\ x - y + 2z = 0 \end{cases} . \text{ La somme des deux dernières équations donne la même}$$

chose que la première, le système ne sera pas de Cramer (sans surprise pour un projecteur). En soustrayant ces deux mêmes équations, $3y - 3z = 0$, donc $y = z$. On reporte alors dans la première pour trouver $2x + 2y = 0$, soit $y = -x$, donc $\ker(p) = \{(x, -x, -x) \mid x \in \mathbb{R}\} = \text{Vect}((1, -1, -1))$.

Pour l'image, plutôt que de calculer comme d'habitude les images des vecteurs de la base canonique, on peut utiliser le fait que les éléments de l'image d'un projecteur sont caractérisés par la condition $p(u) = u$, ou $p(u) - u = 0$. Ici, on se ramène alors au système (en multipliant à nouveau tout par

$$3) : \begin{cases} -x + y + z = 0 \\ x - y - z = 0 \\ x - y - z = 0 \end{cases} . \text{ Les trois équations sont équivalentes, l'image de } p \text{ est donc le plan}$$

d'équation $x = y + z$, ou si on préfère $\text{Vect}((1, 1, 0); (1, 0, 1))$.

Exercice 6 (***)

1. Il suffit de constater que $(p \circ q) \circ (p \circ q) = p^2 \circ q^2 = p \circ q$ en faisant commuter p et q . D'après la caractérisation des projecteurs, $p \circ q$ est donc un projecteur.
2. Procédons par double inclusion. Soit $x \in \text{Im}(p \circ q)$, donc $x = p \circ q(y)$. Le vecteur x est donc l'image par p de $q(y)$, il appartient à $\text{Im}(p)$. Mais puisque p et q commutent, on peut aussi écrire $x = q \circ p(y)$, et $x \in \text{Im}(q)$. Ceci prouve que $\text{Im}(p \circ q) \subset \text{Im}(p) \cap \text{Im}(q)$. Réciproquement, soit $x \in \text{Im}(p) \cap \text{Im}(q)$, on sait que, pour des projecteurs, on peut le traduire par $p(x) = x$ et $q(x) = x$. Mais alors $p \circ q(x) = p(x) = x$, donc $x \in \text{Im}(p \circ q)$ puisqu'il est laissé stable par $p \circ q$.
3. Procédons de même. Si $x \in \ker(p) + \ker(q)$, alors $x = y + z$, avec $p(y) = q(z) = 0$, donc $p \circ q(x) = p \circ q(y) + p \circ q(z) = q \circ p(y) + 0 = 0$, donc $x \in \ker(p \circ q)$. Réciproquement, si $x \in \ker(p \circ q)$, on peut écrire $x = q(x) + (x - q(x))$, avec $p(q(x)) = 0$ puisque $x \in \ker(p \circ q)$, et $q(x - q(x)) = q(x) - q^2(x) = 0$ puisque q est un projecteur. On vient de prouver que $x \in \ker(p) + \ker(q)$, ce qui achève notre démonstration.

Exercice 7 (**)

1. Si $x \in N_k$, alors $f^k(x) = 0$, donc $f^{k+1}(x) = f(0) = 0$ et $x \in N_{k+1}$. Autrement dit, $N_k \subset N_{k+1}$. De même, si $x \in I_{k+1}$, $x = f^{k+1}(y) = f^k(f(y)) \in I_k$, donc $I_{k+1} \subset I_k$.
2. D'après la question précédente, $\dim(N_k) \leq \dim(N_{k+1})$. La suite $(\dim(N_k))$ est donc une suite croissante d'entiers naturels, comme elle ne peut pas prendre une infinité de valeurs (elle est majorée par $\dim(E)$), il existe nécessairement un entier p pour lequel $\dim(N_p) = \dim(N_{p+1})$. Ceci combiné à l'inclusion démontrée précédemment prouve que $N_p = N_{p+1}$. Supposons alors, pour un certain entier $i \geq 1$, $N_{p+i} \neq N_{p+i+1}$. Cela signifierait l'existence d'un vecteur x tel que $f^{p+i+1}(x) = 0$ mais $f^{p+i}(x) \neq 0$ (l'inclusion dans l'autre sens étant toujours vraie). Mais alors $f^{p+1}(f^i(x)) = 0$ et $f^p(f^i(x)) \neq 0$, donc $f^i(x) \in N_{p+1}(x)$ et $f^i(x) \notin N_p(x)$, ce qui contredit l'égalité de ces deux noyaux. La suite est donc constante à partir du rang p .
3. En appliquant le théorème du rang, quel que soit l'entier i , $\dim(I_{p+i+1}) = \dim(E) - \dim(N_{p+i+1}) = \dim(E) - \dim(N_{p+i}) = \dim(I_{p+i})$. Au vu de l'inclusion démontrée à la première question, $I_{p+i} = I_{p+i+1}$, donc la suite (I_k) stationne aussi à partir du rang p .

4. D'après le théorème du rang, la somme des dimensions de N_p et de I_p est égale à la dimension de E , il suffit donc de prouver que leur intersection est réduite à 0. Supposons donc $x \in N_p \cap I_p$. On peut donc écrire $x = f^p(y)$, avec $f^p(x) = 0$. En découle que $f^{2p}(y) = 0$, soit $y \in N_{2p} = N_p$, donc $f^p(y) = x = 0$. C'est suffisant pour affirmer que $N_p \oplus I_p = E$.

Exercice 8 (***)

1. Commençons par prouver que $f(\mathbb{C}_3[X]) \subset \mathbb{C}_3[X]$. En effet, on sait que lors d'une division euclidienne, le degré du reste est toujours strictement inférieur à celui du dividende. Ici, B étant de degré 4, $f(P)$ sera de degré inférieur ou égal à 3 quel que soit le polynôme P (peu importe d'ailleurs que P appartienne à $\mathbb{C}_3[X]$). Reste à prouver que l'application est linéaire, ce qui n'est pour une fois pas évident. Soient donc deux polynômes P_1 et P_2 , alors si on effectue la division euclidienne de AP_1 et de AP_2 par B , on obtient les égalités $AP_1 = BQ_1 + R_1$, et $AP_2 = BQ_2 + R_2$. On peut effectuer la combinaison de ces deux équations : $A(\lambda P_1 + \mu P_2) = B(\lambda Q_1 + \mu Q_2) + (\lambda R_1 + \mu R_2)$. Comme $d^\circ(\lambda R_1 + \mu R_2) \leq \max(d^\circ(R_1), d^\circ(R_2)) < 4$, on tient nécessairement la division euclidienne de $A(\lambda P_1 + \mu P_2)$ par B , donc $f(\lambda P_1 + \mu P_2) = \lambda R_1 + \mu R_2 = \lambda f(P_1) + \mu f(P_2)$. L'application est linéaire, c'est bien un endomorphisme de $\mathbb{C}_3[X]$.
2. On peut caractériser les polynômes du noyau par la condition AP est divisible par B , mais ce n'est pas pratique à expliciter. Mieux vaut expliciter en calculant les images des polynômes de la base canonique : comme $A = B + X - 1$, $f(1) = X - 1$; de même $AX = BX + X^2 - X$, donc $f(X) = X^2 - X$ puis $f(X^2) = X^3 - X^2$. Un tout petit peu plus de réflexion pour la dernière : $AX^3 = BX^3 + X^4 - X^3 = BX^3 + (X^4 - X) + X - X^3 + B(X^3 + 1) + X - X^3$ donc $f(X^3) = X - X^3$. Cherchons maintenant le noyau : si $P = a + bX + cX^2 + dX^3$, alors $f(P) = -a + (a - b + d)X + (b - c)X^2 + (c - d)X^3$, donc P appartient au noyau si $b = c = d$ (à cause des deux derniers coefficients) et $a = 0$ (premier coefficient). La deuxième équation est alors toujours vérifiée, donc $\ker(f) = \{bX + bX^2 + bX^3\} = \text{Vect}(X + X^2 + X^3)$.
3. Puisque $\dim(\ker(f)) = 1$ et $\dim(\mathbb{C}_3[X]) = 4$, le théorème du rang assure que $\dim(\text{Im}(f)) = 3$. Comme l'image de f contient $X - 1$, $X^2 - X = X(X - 1)$ et $X^3 - X^2 = X^2(X - 1)$ (qui sont images de trois des polynômes de la base canonique), elle contient tous les polynômes de la forme $(X - 1)(a + bX + cX^2)$, donc $(X - 1)\mathbb{C}_2[X]$. Comme ce dernier espace est de dimension 3 comme $\text{Im}(f)$, il y a nécessairement égalité entre les deux.
4. Ah tiens, un peu de révision sur les complexes. Il faut donc résoudre l'équation $X^4 - X = 0$, soit $X(X^3 - 1) = 0$. Les quatre racines sont $z_1 = 0$, $z_2 = 1$, $z_3 = j = e^{i\frac{2\pi}{3}}$ et $z_4 = \bar{j} = e^{i\frac{-2\pi}{3}}$ (les trois dernières étant les racines cubiques de l'unité).
5. Écrivons les quatre polynômes : $P_1 = X^3 - 1$; $P_2 = X(X^2 + X + 1) = X^3 + X^2 + X$; $P_3 = X(X - 1)(X - \bar{j}) = X^3 + jX^2 + \bar{j}X$ et $P_4 = X(X - 1)(X - j) = X^3 + \bar{j}X^2 + jX$. Pour prouver que c'est une base, supposons $aP_1 + bP_2 + cP_3 + dP_4 = 0$, et profitons du fait que ces polynômes ont des racines en commun. Pour $x = 0$, l'équation devient $-a = 0$, ce qui implique $a = 0$; pour $x = 1$, on trouve $3b = 0$, donc $b = 0$; pour $x = j$, $cj(j - 1)(j - \bar{j}) = 0$ donc $c = 0$; de même pour $d = 0$, la famille est donc libre. Comme elle contient quatre polynômes, c'est une base de $\mathbb{C}_3[X]$.
6. On peut ruser pour s'éviter de pénibles calculs : $A = B + X - 1$, et $(X - z_k)P_k = B$, donc $AP_k = BP_k + (X - 1)P_k = BP_k + (X - z_k)P_k + (z_k - 1)P_k = B(P_k + 1) + (z_k - 1)P_k$. On a sous les yeux la division euclidienne de AP_k par B , donc $f(P_k) = (z_k - 1)P_k$. Pour détailler un peu plus, $f(P_1) = -P_1$; $f(P_2) = 0$; $f(P_3) = (j - 1)P_3$ et $f(P_4) = (\bar{j} - 1)P_4$.

Exercice 9 (**)

Note : un bug de notation dans l'énoncé, le \mathcal{E} devrait être un $\mathcal{L}(E)$.

1. Si le noyau était réduit à 0, l'application serait injective, donc bijective, donc f^k aussi, quelle que soit la valeur de l'entier k . C'est fort contradictoire avec le fait que f soit nilpotente. Comme $\dim(\ker(f)) \geq 1$, la théorème du rang assure que $\text{rg}(f) \leq n - 1$.
2. S'il n'existait pas un tel x , f^{p-1} serait l'application nulle, ce qui est contradictoire avec la minimalité de p . Naturellement, le q apparaissant ensuite dans l'énoncé doit être remplacé par un p . Si la famille n'est pas libre, on peut écrire $\lambda_0 x + \lambda_1 f(x) + \dots + \lambda_{p-1} f^{p-1}(x) = 0$. En composant par f^{p-1} , et en utilisant que $f^k(x) = 0$ dès que $k \geq p$, on en déduit que $\lambda_0 f^{p-1}(x) = 0$ (tous les autres termes s'annulent). Comme $f^{p-1}(x) \neq 0$, on doit avoir $\lambda_0 = 0$. On peut répéter l'opération en composant par f^{p-2} pour montrer que $\lambda_1 = 0$, puis de même pour tous les autres coefficients, et aboutir à la conclusion que la famille est libre.
3. Une famille libre dans un espace de dimension n étant toujours de cardinal inférieur ou égal à n , on a en effet $p \leq n$. Du coup, $f^n = 0$ puisque toutes les puissances de f à partir de f^p sont nulles.
4. Si $p = n$, la famille construite précédemment est une base de E . Si g est une application linéaire commutant avec f , $g(x)$ peut s'écrire sous la forme $\lambda_0 x + \lambda_1 f(x) + \dots + \lambda_{n-1} f^{n-1}(x)$ (même si g ne commute pas avec f , c'est vrai!). Calculons alors, en exploitant la commutation, les images des autres vecteurs de la base construite : $g(f(x)) = f(g(x)) = f(\lambda_0 x + \lambda_1 f(x) + \dots + \lambda_{n-1} f^{n-1}(x)) = \lambda_0 f(x) + \lambda_1 f^2(x) + \dots + \lambda_{n-1} f^n(x) = \lambda_0 f(x) + \lambda_1 f(f(x)) + \dots + \lambda_{n-1} f^{n-1}(f(x))$. De même, quelle que soit $i \leq n-1$, $g(f^i(x)) = f^i(g(x)) = f^i(\lambda_0 x + \lambda_1 f(x) + \dots + \lambda_{n-1} f^{n-1}(x)) = \lambda_0 f^i(x) + \lambda_1 f(f^i(x)) + \dots + \lambda_{n-1} f^{n-1}(f^i(x))$. autrement dit, g coïncide sur tous les vecteurs de notre base avec $\lambda_0 id + \lambda_1 f + \dots + \lambda_{n-1} f^{n-1}$. Les deux applications linéaires sont alors égales (un morphisme est toujours uniquement déterminé par l'image d'une base), et g est donc un polynôme de degré au plus $n-1$ en l'application f . réciproquement, tous les polynômes constitués à partir de f commutent évidemment avec f . Notons que l'ensemble des applications linéaires commutant avec f est ici de dimension n (la même que celle de $\mathbb{R}_{n-1}[X]$), sachant que l'ensemble de tous les endomorphismes de E est lui de dimension n^2 .

Exercice 10 (**)

1. Si $P \in E$, on sait que $d^\circ(P) \leq 2$, donc $d^\circ(P') \leq 1$, et $d^\circ((X-1)P') \leq 2$. Quand on soustrait deux polynômes de degré inférieur ou égal à 2, le résultat l'est aussi, ce qui prouve que φ est à valeurs dans $\mathbb{R}_2[X]$. La linéarité étant essentiellement triviale : $\varphi(\lambda P + Q) = 2(\lambda P + Q) - (X-1)(\lambda P' + Q') = \lambda\varphi(P) + \varphi(Q)$, donc φ est bien un endomorphisme de E .
2. Soit $P = aX^2 + bX + c \in E$, alors $\varphi(P) = 2aX^2 + 2bX + 2c - (X-1)(2aX + b) = 2aX^2 + 2bX + 2c - 2aX^2 + 2aX - bX + b = (b+2a)X + 2c + b$. Ce polynôme est nul si et seulement si $b+2a = 2c+b = 0$, soit $c = a = -\frac{b}{2}$. On en déduit que $\ker(\varphi) = \left\{ P = -\frac{b}{2}X^2 + bX - \frac{b}{2} \right\} = \text{Vect}(X^2 - 2X + 1)$. Notre application n'est pas injective puisque son noyau n'est pas réduit au vecteur nul.
3. On peut comme d'habitude calculer les images des polynômes de la base canoniques : $\varphi(1) = 2$, $\varphi(X) = 2X - (X-1) = X+1$ et enfin $\varphi(X^2) = 2X^2 - 2X(X-1) = 2X$. On peut alors dire que $\text{Im}(\varphi) = \text{Vect}(2, X+1, 2X) = \text{Vect}(2, 2X) = \text{Vect}(1, X)$.

- Il est essentiellement évident que $\ker(\varphi) \cap \text{Im}(\varphi) = \{0\}$ (les polynômes de l'image sont tous de degré inférieur ou égal à 1, alors que ceux du noyau (hormis le polynôme nul) sont de degré 2. Puisque les dimensions respectives du noyau et de l'image sont de 1 et de 2, et que $\dim(E) = 3$, cela suffit à prouver la supplémentarité.
- Inutile de faire des calculs : puisque p est une projection sur $\ker(\varphi)$, on aura, $\forall x \in E$, $p(x) \in \ker(\varphi)$, et donc $\varphi(p(x)) = 0$. Autrement dit, $\varphi \circ p = 0$. Dans l'autre sens, on a, par définition de l'image, $\forall x \in E$, $\varphi(x) \in \text{Im}(\varphi)$. Or, $\text{Im}(\varphi) = \ker(p)$ puisque p est un projecteur de direction $\text{Im}(\varphi)$. On en déduit qu'on a également $p \circ \varphi = 0$.

Exercice 11 (*)

- C'est essentiellement évident : $\varphi(\lambda z + z') = \frac{1}{2}(\lambda z + z') + \frac{i}{2}(\lambda \bar{z} + \bar{z}')$, puisque $\lambda \in \mathbb{R}$.
- Calculons donc $\varphi(\varphi(z)) = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{2}z + \frac{i}{2}\bar{z} \right) + \frac{i}{2} \left(\frac{1}{2}\bar{z} - \frac{i}{2}z \right)$ puisque $\bar{i} = -i$. Il ne reste plus qu'à regrouper pour constater que $\varphi(\varphi(z)) = \frac{1}{2}z + \frac{i}{2}\bar{z} = \varphi(z)$, ce qui prouve que φ est un projecteur.
- Pour le noyau, on peut revenir à la forme algébrique $z = a + ib$: $\varphi(a + ib) = \frac{a}{2} + \frac{ib}{2} + \frac{ia}{2} + \frac{b}{2}$, qui est nul si et seulement si $a + b = 0$ (la partie réelle et la partie imaginaire de notre image étant identiques), soit $b = -a$. Autrement dit, $\ker(\varphi) = \text{Vect}(1 - i)$. Pour l'image, on calcule simplement les images des deux vecteurs de la base canonique : $\varphi(1) = \frac{1+i}{2}$, et $\varphi(i) = \frac{i+1}{2}$. On a donc $\text{Im}(\varphi) = \text{Vect}(1 + i)$. L'image et le noyau sont tous deux de dimension 1.

Exercice 12 (**)

- La normalisation impose de résoudre l'équation $y' - \frac{1}{x}y = -\frac{1}{x}$ séparément sur \mathbb{R}^{-*} et sur \mathbb{R}^{+*} . Si on se place par exemple sur $]0, +\infty[$, l'équation homogène associée a pour solutions les fonctions $y_h : x \mapsto Ke^{\ln(x)} = Kx$, et pour solution particulière évidente $y_p(x) = 1$. Les solutions de l'équation sont donc de la forme $y(x) = Kx + 1$. Il est très facile de constater que sur $] - \infty, 0[$, les solutions sont de la forme $y(x) = Lx + 1$, et surtout de voir que toutes les fonction $y : x \mapsto Kx + 1$ sont solutions sur \mathbb{R} tout entier.
- C'est trivial : $f(P)$ est un polynôme, et $f(\lambda P + Q) = \lambda P + Q - \lambda P'X - XQ' = \lambda f(P) + f(Q)$.
- On a déjà résolu plus haut l'équation $y - xy' = 0$ dans l'espace vectoriel de toutes les fonctions dérivables sur \mathbb{R}^{+*} , qui contient très largement tous les polynômes. Ce qui tombe bien, c'est que les solutions étaient justement des polynômes, qui sont donc les éléments du noyau de φ . Autrement dit, $\ker(f) = \{KX \mid K \in \mathbb{R}\} = \text{Vect}(X)$.
- C'est un peu moins évident, mais on peut en fait constater que X n'est l'image de personne par l'application f . En effet, si $P = \sum_{k=0}^n a_k X^k$, alors $XP' = \sum_{k=1}^n k a_k X^k$, puis $f(P) = \sum_{k=0}^n (1 - k) a_k X^k$, qui ne comporte jamais de terme non nul de degré 1. En fait, l'image de f est constituée de tous les polynômes $P = \sum_{k=0}^n a_k X^k$, avec $a_1 = 0$ (ce qui constitue pour les curieux un hyperplan de E).

5. L'application f n'étant pas injective, $f \circ f$ ne peut pas non plus l'être (les éléments du noyau de f sont aussi dans celui de $f \circ f$). Elle ne peut pas plus être surjective, le polynôme X n'appartenant pas à l'image de $f \circ f$, sinon on pourrait écrire $X = f(f(P))$ pour un certain polynôme P , donc $X = f(Q)$, avec $Q = f(P)$. On aurait alors $X \in \text{Im}(f)$, ce qui est absurde. Pour déterminer le noyau de P , comme on ne sait pas résoudre l'équation différentielle associée, utilisons le fait que, si $f \circ f(P) = 0$, alors $f(P) = KX$, pour un certain réel K . Or, on a vu plus haut que les polynômes de la forme KX n'appartenaient justement pas à l'image de f , donc n'admettent aucun antécédent! Seul cas particulier, quand $K = 0$, où les antécédents sont tout simplement les éléments du noyau de f . Bref, $\ker(f \circ f) = \ker(f) = \text{Vect}(X)$.

Exercice 13 (***)

1. Calculons $f(\lambda(x, y, z) + \mu(x', y', z')) = f(\lambda x + \mu x', \lambda y + \mu y', \lambda z + \mu z') = (2\lambda y + 2\mu y' - 2\lambda z - 2\mu z', \lambda x + \mu x' + \lambda y + \mu y' - 2\lambda z - 2\mu z', \lambda x + \mu x' - \lambda y - \lambda y') = \lambda(2y - 2z, x + y - 2z, x - y) + \mu(2y' - 2z', x' + y' - 2z', x' - y')$. L'application f est bien une application linéaire.

2. Le noyau est constitué des triplets solutions du système
$$\begin{cases} 2y - 2z = 0 \\ x + y - 2z = 0 \\ x - y = 0 \end{cases}$$
. Les

équations extrêmes donnent immédiatement $x = y = z$, en reportant dans la deuxième on trouve alors $0 = 0$ qui est toujours vérifié donc $\ker(f) = \{(x, x, x) \mid x \in \mathbb{R}\} = \text{Vect}((1, 1, 1))$. Pour l'image, on peut calculer les images des vecteurs de la base canonique de \mathbb{R}^3 : $f(1, 0, 0) = (0, 1, 1)$; $f(0, 1, 0) = (2, 1, -1)$ et $f(0, 0, 1) = (-2, -2, 0)$. Comme $(2, 1, -1) = -(-2, -2, 0) - (0, 1, 1)$, on peut l'oublier et conclure que $\text{Im}(f) = \text{Vect}((0, 1, 1), (-2, -2, 0)) = \text{Vect}((0, 1, 1), (1, 1, 0))$. L'application n'est donc pas injective (le noyau contient d'autres vecteurs que le vecteur nul) ni surjective (le vecteur $(1, 0, 0)$ par exemple n'appartient pas à l'image, on ne peut pas l'écrire comme combinaison linéaire de $(1, 1, 0)$ et $(0, 1, 1)$). A fortiori, f n'est pas bijective.

3. Commençons par prouver que $\ker(f) \cap \text{Im}(f) = \{0\}$. Soit donc un vecteur u appartenant à la fois à $\ker(f)$ et à $\text{Im}(f)$. On peut alors écrire u , d'une part sous la forme (x, x, x) pour un certain réel x , d'autre part comme combinaison linéaire $a(0, 1, 1) + b(1, 1, 0) = (b, a + b, a)$. On doit donc avoir à la fois $x = a$, $x = b$ et $x = a + b$, ce qui n'est possible que si $x = a = b = 0$, soit $u = 0$.

Montrons maintenant que $\ker(f) + \text{Im}(f) = \mathbb{R}^3$. Soit donc $u = (x, y, z)$, on cherche trois réels a, b et c tels que $u = a(1, 1, 1) + b(1, 1, 0) + c(0, 1, 1)$, ce qui se traduit par le système

$$\begin{cases} a + b = x \\ a + b + c = y \\ a + c = z \end{cases}$$

. En soustrayant la première et la troisième ligne du système à la

deuxième, on obtient immédiatement $c = y - x$ et $b = y - z$. Ensuite, $a = x - b = x - y + z$. On peut donc écrire n'importe quel vecteur de l'espace comme somme d'un vecteur du noyau et d'un vecteur de l'image de f . ces deux sous-espaces sont bien supplémentaires.

4. La question précédente nous permet d'affirmer que $(x, y, z) = (x - y + z)(1, 1, 1) + (y - z)(1, 1, 0) + (y - x)(0, 0, 1)$, avec le premier terme de la somme de droite appartenant à $\ker(f)$, et les deux suivants à $\text{Im}(f)$. La projection sur $\text{Im}(f)$ parallèlement à $\ker(f)$ donne donc $p(x, y, z) = (y - z)(1, 1, 0) + (y - x)(0, 1, 1) = (y - z, 2y - x - z, y - x)$. On vérifie facilement si on le souhaite que $p^2 = p$.
5. Calculons donc : $f^2(x, y, z) = f(f(x, y, z)) = (2(x+y-2z) - 2(x-y), 2y - 2z + x + y - 2z - 2(x-y), 2y - 2z - x - y + 2z) = (4y - 4z, -x + 5y - 4z, -x + y)$; puis $f^3(x, y, z) = (2(-x + 5y - 4z) -$

$2(-x+y), 4y-4z-x+5y-4z-2(-x+y), 4y-4z+x-5y+4z) = (8y-8z, x+7y-8z, x-y)$.
Il ne reste plus qu'à vérifier que $f^3(x, y, z) - f^2(x, y, z) + 2f(x, y, z) = (8y-8z, x+7y-8z, x-y) - (4y-4z, -x+5y-4z, -x+y) - (4y-4z, 2x+2y-4z, 2x-2y) = (0, 0, 0)$, ce qui est vrai.

6. Calculons $r \circ r = \frac{1}{36}(f^2 + f) \circ (f^2 + f) = \frac{1}{36}(f^4 + 2f^3 + f^2)$, Comme $f^3 = f^2 + 2f$, $f^4 = f \circ (f^2 + 2f) = f^3 + 2f^2 = 3f^2 + 2f$, et $r^2 = \frac{1}{36}(3f^2 + 2f + 2f^2 + 4f + f^2) = \frac{1}{36}(6f^2 + 6f) = \frac{1}{6}(f^2 + f) = r$, donc r est un projecteur. De même, $s^2 = \frac{1}{9}(f^2 - 2f) \circ (f^2 - 2f) = \frac{1}{9}(f^4 - 4f^3 + 4f^2) = \frac{1}{9}(3f^2 + 2f - 4f^2 - 8f + 4f^2) = \frac{1}{9}(3f^2 - 6f) = \frac{1}{3}(f^2 - 2f) = s$, donc s est également un projecteur. De plus, $f \circ r = \frac{1}{6}(f^3 + f^2) = \frac{1}{6}(2f^2 + 2f) = \frac{2}{6}(f^2 + f) = 2r$, et $f \circ s = \frac{1}{3}(f^3 - 2f^2) = \frac{1}{3}(-f^2 + 2f) = -s$.

7. Prouvons par récurrence la propriété $P_n : f^n = 2^n r + (-1)^n s$. Au rang 1, on a $2r - s = \frac{1}{3}(f^2 + f) - \frac{1}{3}(f^2 - 2f) = \frac{1}{3}(3f) = f$, donc P_1 est vraie. Supposons que P_n est vraie, alors d'après les résultats de la question précédente, $f^{n+1} = f \circ f^n = f \circ (2^n r + (-1)^n s) = 2^n f \circ r + (-1)^n f \circ s = 2^{n+1} r + (-1)^{n+1} s$. On en déduit que $f^n = \frac{2^n}{6}(f^2 + f) + \frac{(-1)^n}{3}(f^2 - 2f) = \frac{2^{n-1} + (-1)^n}{3} f^2 + \frac{2^{n-1} - 2(-1)^n}{3} f$, soit $f^n(x, y, z) = \frac{1}{3}((2^{n-1} + (-1)^n)(4y - 4z) + (2^{n-1} - 2(-1)^n)(2y - 2z), \dots)$, qu'on peut simplifier si on a du temps à perdre.

Problème (***)

I. Une somme directe intéressante.

- Comme f et id commutent, on peut calculer $p^2 = \left(\frac{2}{3}f + \frac{1}{3}id\right)^2 = \frac{4}{9}f^2 + \frac{4}{9}f + \frac{1}{9}id = \frac{2}{9}(f + id) + \frac{4}{9}f + \frac{1}{9}id = \frac{2}{3}f + \frac{1}{3}id = p$. L'application p est donc un projecteur.
- Puisque p est un projecteur, son image est constituée des vecteurs x vérifiant $p(x) = x$, c'est-à-dire $\frac{2}{3}f(x) + \frac{1}{3}x = x$. On en déduit très facilement que la condition est équivalente à avoir $f(x) = x$.
- Pour tout vecteur x , on peut écrire $p(x) + q(x) = x$. En effet, si on écrit x sous la forme $x = x_1 + x_2$, avec $x_1 \in \ker(p)$ et $x_2 \in \text{Im}(p)$, alors $p(x) = x_2$ et $q(x) = x_1$, donc $p(x) + q(x) = x_1 + x_2 = x$. Autrement dit, $q = id - p$. Comme par ailleurs $p = \frac{2}{3}f + \frac{1}{3}id$ implique $id = 3p - 2f$, on en déduit que $q = 3p - 2f - p = 2p - 2f$.
- On sait que, p étant un projecteur, $E = \ker(p) \oplus \text{Im}(p)$. On a vu à la question 2 que $\text{Im}(p) = \{x \mid f(x) = x\} = \ker(f - id)$. Par ailleurs, $\ker(p) = \text{Im}(q)$. Comme q est un projecteur, $\text{Im}(q) = \{x \mid q(x) = x\} = \{x \mid 2p(x) - 2f(x) = x\}$. Or, $2p(x) - 2f(x) = \frac{4}{3}f(x) + \frac{2}{3}x - 2f(x)$, donc $2p(x) - 2f(x) = x \Leftrightarrow -\frac{2}{3}f(x) = \frac{1}{3}x$, ou encore $f(x) = -\frac{1}{2}x$. Autrement dit, $\text{Im}(q) = \ker\left(f + \frac{1}{2}id\right)$, ce qui donne bien l'égalité souhaitée.

II. Expression des puissances de f .

1. Tentons une démonstration par récurrence. Au rang 0, $f^0 = id$ et $p + q = id$ (résultat utilisé plus haut), donc la relation est vraie. Supposons-là vérifiée au rang n , alors $f^{n+1} = f \circ f^n = f \circ p + \left(-\frac{1}{2}\right)^n f \circ q$. Or, $f \circ p = \frac{2}{3}f^2 + \frac{1}{3}f = \frac{1}{3}(f + id) + \frac{1}{3}f = \frac{2}{3}f + \frac{1}{3}id = p$; et $f \circ q = f \circ (2p - 2f) = 2p - 2f^2 = 2p - f - id$. En utilisant $id = 3p - 2f$, on trouve $f \circ q = -p + f = -\frac{1}{2}(2p - 2f) = -\frac{1}{2}q$. En reportant ces deux égalités dans notre calcul précédent, on trouve $f^{n+1} = p + \left(-\frac{1}{2}\right)^{n+1} q$, ce qui est bien la formule attendue au rang $n + 1$. Par principe de récurrence, elle est donc valable pour tout entier n .

2. Reprenons la relation initiale $f^2 = \frac{1}{2}(f + id)$. On peut l'écrire sous la forme $f \circ \left(f - \frac{1}{2}id\right) = \frac{1}{2}id$, ou encore $f \circ (2f - id) = id$. L'application f est donc bijective, de réciproque $f^{-1} = \frac{2}{2f - id}$.

3. La relation nous donnerait $f^{-1} = p + \left(-\frac{1}{2}\right)^{-1} q = p - 2q$. Or, $p - 2q = p - 2(2p - 2f) = 4f - 3p = 4f - 2f - id = 2f - id$. La relation reste donc valable pour $n = -1$. Pour regarder ce qui se passe pour un n négatif quelconque, on peut refaire une récurrence. On vient de vérifier que, pour $n = -1$, la formule était vraie. Supposons-là au rang $-n$ (si ça vous choque vraiment de faire une récurrence sur des entiers négatifs, vous appelez Q_n la propriété $f^{-n} = p + (-2)^n q$), et calculons $f^{-n-1} = f^{-1} \circ f^{-n} = (2f - id) \circ (p + (-2)^n q) = 2f \circ p + (-2)^n (2f \circ q) - p - (-2)^n q$. En utilisant les relations $f \circ p = p$ et $f \circ q = -\frac{1}{2}q$, on trouve $f^{-n-1} = 2p - (-2)^n q - p - (-2)^n q = p + (-2)^{n+1} q$, ce qui prouve la propriété au rang $n + 1$. Celle-ci reste donc valable pour tous les entiers relatifs.

On pouvait aussi, alternativement, prouver que la formule donnait bien pour $-n$ la réciproque de f^n , autrement dit que $\left(p + \left(-\frac{1}{2}\right)^n q\right) \circ (p + (-2)^n q) = id$. En effet, cette expression se développe en $p^2 + (-2^n)p \circ q + \left(-\frac{1}{2}\right)^n q \circ p + q$. Or, $p \circ q = p \circ (2p - 2f) = \left(\frac{2}{3}f + \frac{1}{3}id\right) \left(-\frac{2}{3}f + \frac{2}{3}id\right) = -\frac{4}{9}f^2 + \frac{2}{9}f + \frac{2}{9}id = 0$ puisque $f^2 = \frac{1}{2}(f + id)$. De même, $q \circ p = 0$ (tout cela commute puisqu'on peut tout exprimer en fonction de f et de id). Il ne reste donc de notre calcul que $p + q$, qui est bien égal à l'identité.

III. Un exemple concret.

1. Calculons donc $f \circ f(x, y, z) = \left(4x - 2y - 2z - \frac{3}{2}x + \frac{3}{2}y + \frac{1}{2}z - 3x + y + 2z; 3x - \frac{3}{2}y - \frac{3}{2}z - \frac{9}{4}x + \frac{9}{4}y + \frac{3}{4}z - \frac{3}{2}x + \frac{1}{2}y + z; 6x - 3y - 3z - \frac{3}{2}x + \frac{3}{2}y + \frac{1}{2}z - 6x + 2y + 4z\right)$
 $= \left(-\frac{1}{2}x + \frac{1}{2}y + \frac{1}{2}z; -\frac{3}{4}x + \frac{5}{4}y + \frac{1}{4}z; -\frac{3}{2}x + \frac{1}{2}y + \frac{3}{2}z\right)$, ce qui correspond bien à $\frac{1}{2}(f(x, y, z) + (x, y, z))$ (calcul passionnant).

2. Appartenir à $\ker(f - id)$ est équivalent à vérifier l'équation $f(x) = x$, ce qui nous mène

au système $\begin{cases} -2x + y + z = x \\ -\frac{3}{2}x + \frac{3}{2}y + \frac{1}{2}z = y \\ -3x + y + 2z = z \end{cases}$. Quitte à multiplier la deuxième équation par deux, les trois équations se ramènent à $-3x + y + z = 0$, soit $z = 3x - y$. Autrement dit, $\ker(f - id) = \{(x, y, 3x - y) \mid (x, y) \in \mathbb{R}^2\} = \text{Vect}((1, 0, 3); (0, 1, -1))$.

De même, le deuxième noyau se calcule en résolvant $\begin{cases} -2x + y + z = -\frac{1}{2}x \\ -\frac{3}{2}x + \frac{3}{2}y + \frac{1}{2}z = -\frac{1}{2}y \\ -3x + y + 2z = -\frac{1}{2}z \end{cases}$.

Multiplions partout par 2 et passons tout à gauche pour obtenir $\begin{cases} -3x + 2y + 2z = 0 \\ -3x + 4y + z = 0 \\ -6x + 2y + 5z = 0 \end{cases}$.

La différence des deux premières équations donne $2y - z = 0$, et $2L_1 - L_3$ donne $2y - z = 0$ aussi. Sans surprise, le système n'est donc pas de Cramer, on peut exprimer $z = 2y$, puis $3x = 2y + 2z = 6y$, donc $x = 2y$. Finalement, $\ker\left(f + \frac{1}{2}id\right) = \{(2y, y, 2y) \mid y \in \mathbb{R}\} = \text{Vect}((2, 1, 2))$.

3. Si on tient vraiment à donner les expressions analytiques, $p(x, y, z) = \left(-x + \frac{2}{3}y + \frac{2}{3}z; -x + \frac{4}{3}y + \frac{1}{3}z; -2x + \frac{2}{3}y + \frac{2}{3}z\right)$ et $q(x, y, z) = (x, y, z) - p(x, y, z) = \left(2x - \frac{2}{3}y - \frac{2}{3}z; x - \frac{1}{3}y - \frac{1}{3}z; 2x - \frac{2}{3}y - \frac{2}{3}z\right)$.

4. D'après les calculs de la deuxième partie, $f^n(x) = p(x) + \left(-\frac{1}{2}\right)^n q(x)$. On va se contenter

d'écrire la matrice $A = \begin{pmatrix} -1 - \left(-\frac{1}{2}\right)^{n-1} & \frac{2}{3}\left(1 - \left(-\frac{1}{2}\right)^n\right) & \frac{2}{3}\left(1 - \left(-\frac{1}{2}\right)^n\right) \\ -1 + \left(-\frac{1}{2}\right)^n & \frac{1}{3}\left(4 - \left(-\frac{1}{2}\right)^n\right) & \frac{1}{3}\left(1 - \left(-\frac{1}{2}\right)^n\right) \\ -2 - \left(-\frac{1}{2}\right)^{n-1} & \frac{2}{3}\left(1 - \left(-\frac{1}{2}\right)^n\right) & \frac{1}{3}\left(5 + \left(-\frac{1}{2}\right)^{n-1}\right) \end{pmatrix}$ et de dire que

$$f^n(x, y, z) = A \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}$$