

DM 56 : Opérateur de différence

Il s'agit d'un sujet supplémentaire pour votre travail personnel.

Il n'est pas à rendre.

Un corrigé sera fourni le vendredi 22 mai.

Dans tout le texte, n désigne un entier naturel supérieur ou égal à 1 et $\mathbb{R}_n[X]$ est l'ensemble des polynômes à coefficients réels de degré inférieur ou égal à n .

Pour $a < b$ dans \mathbb{Z} , on note $\llbracket a, b \rrbracket$ l'ensemble $[a, b] \cap \mathbb{Z}$.

Pour $k \in \mathbb{N}^*$, on note P_k le polynôme X^{k-1} . Pour $P \in \mathbb{R}_n[X]$, on note $\deg(P)$ le degré de P et, lorsque P est non nul, $\text{cd}(P)$ désigne le coefficient dominant de P , c'est-à-dire le coefficient du monôme $X^{\deg(P)}$.

Pour $k \in \mathbb{N}$ et $j \in \llbracket 0, k \rrbracket$, le coefficient binomial $\binom{k}{j}$ vaut $\frac{k!}{j!(k-j)!}$.

Pour un ensemble E et $f : E \rightarrow E$, on définit l'application $f^k : E \rightarrow E$ par récurrence sur $k \in \mathbb{N}$ de la façon suivante :

$$f^0 = \text{Id}_E \text{ et } f^{k+1} = f \circ f^k$$

Si f est bijective, on note f^{-1} la réciproque de f et pour $k \in \mathbb{N}$, on note $f^{-k} = (f^{-1})^k$.

Pour $p \in \mathbb{N}^*$, on note $\mathcal{M}_p(\mathbb{R})$ l'ensemble des matrices carrées réelles de taille p .

I L'opérateur de translation et l'opérateur de différence

I.A L'opérateur de translation

L'opérateur de translation est l'endomorphisme τ de $\mathbb{R}_n[X]$ donné par :

$$\begin{aligned} \tau : \mathbb{R}_n[X] &\rightarrow \mathbb{R}_n[X] \\ P(X) &\mapsto P(X+1) \end{aligned}$$

I.A.1. Montrer que τ est bien un endomorphisme d'espace vectoriel.

Pour un polynôme non nul $P \in \mathbb{R}_n[X]$, exprimer $\deg(\tau(P))$ et $\text{cd}(\tau(P))$ à l'aide de $\deg(P)$ et $\text{cd}(P)$.

I.A.2. Soit $P \in \mathbb{R}_n[X]$. Pour $k \in \mathbb{N}$, donner l'expression de $\tau^k(P)$ en fonction de P .

I.A.3. Donner la matrice $M = (M_{i,j})_{1 \leq i, j \leq n+1}$ de τ dans la base $(P_k)_{k \in \llbracket 1, n+1 \rrbracket}$. On exprimera les coefficients $M_{i,j}$ en fonction de i et j .

I.A.4. Un réel λ est une valeur propre de τ si et seulement si il existe $P \in \mathbb{R}_n[X]$ tel que $P \neq 0$ et $\tau(P) = \lambda P$. Dans ce cas, on dit que P est un vecteur propre de τ pour la valeur propre .

Préciser l'ensemble des valeurs propres de τ .

L'application τ est-elle diagonalisable, c'est-à-dire existe-t-il une base de $\mathbb{R}_n[X]$ constituée de vecteurs propres de τ ?

I.A.5. L'application τ est-elle bijective ? Si oui, préciser τ^{-1} . L'expression de τ^j trouvée à la question I.A.2. pour $j \in \mathbb{N}$ est-elle valable pour $j \in \mathbb{Z}$?

I.A.6. Que vaut M^{-1} ? Exprimer les coefficients $(M^{-1})_{i,j}$ en fonction de i et j .

I.A.7. On se donne une suite réelle $(u_k)_{k \in \mathbb{N}}$ et on définit, pour tout entier $k \in \mathbb{N}$

$$v_k = \sum_{j=0}^k \binom{k}{j} u_j \tag{I.1}$$

Déterminer une matrice $Q \in \mathcal{M}_{n+1}(\mathbb{R})$ telle que

$$\begin{pmatrix} v_0 \\ v_1 \\ \vdots \\ v_n \end{pmatrix} = Q \begin{pmatrix} u_0 \\ u_1 \\ \vdots \\ u_n \end{pmatrix}$$

I.A.8. En déduire la formule d'inversion : pour tout entier $k \in \mathbb{N}$,

$$u_k = \sum_{j=0}^k (-1)^{k-j} \binom{k}{j} v_j \quad (\text{I.2})$$

I.A.9. On considère un réel λ et la suite $(u_k = \lambda^k)_{k \in \mathbb{N}}$. Quelle est la suite $(v_k)_{k \in \mathbb{N}}$ définie par la formule (I.1) ? Vérifier alors la formule (I.2).

I.B L'opérateur de différence

L'opérateur de différence est l'endomorphisme δ de $\mathbb{R}_n[X]$ tel que $\delta = \tau - \text{Id}_{\mathbb{R}_n[X]}$:

$$\begin{aligned} \delta : \mathbb{R}_n[X] &\rightarrow \mathbb{R}_n[X] \\ P(X) &\mapsto P(X+1) - P(X) \end{aligned}$$

I.B.1. Pour un polynôme non constant $P \in \mathbb{R}_n[X]$, exprimer $\deg(\delta(P))$ et $\text{cd}(\delta(P))$ à l'aide de $\deg(P)$ et $\text{cd}(P)$.

I.B.2. En déduire le noyau $\text{Ker}(\delta)$ et l'image $\text{Im}(\delta)$ de l'endomorphisme δ .

I.B.3. Plus généralement, pour $j \in \llbracket 1, n \rrbracket$, montrer les égalités suivantes :

$$\text{Ker}(\delta^j) = \mathbb{R}_{j-1}[X] \quad \text{et} \quad \text{Im}(\delta^j) = \mathbb{R}_{n-j}[X] \quad (\text{I.3})$$

I.B.4. Pour $k \in \mathbb{N}$ et $P \in \mathbb{R}_n[X]$, exprimer $\delta^k(P)$ en fonction des $\tau^j(P)$ pour $j \in \llbracket 0, k \rrbracket$.

I.B.5. Soit $P \in \mathbb{R}_{n-1}[X]$. Montrer que :

$$\sum_{j=0}^n (-1)^{n-j} \binom{n}{j} P(j) = 0 \quad (\text{I.4})$$

I.B.6. Dans cette question, on veut montrer qu'il n'existe pas d'application linéaire $u : \mathbb{R}_n[X] \rightarrow \mathbb{R}_n[X]$ telle que $u \circ \delta = \delta \circ u$. On suppose, par l'absurde, qu'une telle application u existe.

(a) Montrer que u et δ^2 commutent.

(b) En déduire que $\mathbb{R}_1[X]$ est stable par l'application u .

(c) Montrer qu'il n'existe pas de matrice $A \in \mathcal{M}_2(\mathbb{R})$ telle que :

$$A^2 = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$$

(d) Conclure.

I.B.7. Dans cette question, on cherche tous les sous-espaces vectoriels de $\mathbb{R}_n[X]$ stables par l'application δ .

(a) Pour P polynôme non nul de degré $d \leq n$, montrer que la famille $(P, \delta(P), \dots, \delta^d(P))$ est libre. Quel est l'espace vectoriel engendré par cette famille ?

(b) En déduire que si V est un sous-espace vectoriel de $\mathbb{R}_n[X]$ stable par δ et non réduit à $\{0\}$, il existe un entier $d \in \llbracket 0, n \rrbracket$ tel que $V = \mathbb{R}_d[X]$.

II Applications en combinatoire

Pour tout couple (p, k) d'entiers naturels non nuls, on note $S(p, k)$ le nombre de surjections de $\llbracket 1, p \rrbracket$ dans $\llbracket 1, k \rrbracket$. De façon cohérente, pour tout $p \in \mathbb{N}^*$, on pose $S(p, 0) = 0$.

II.A Quelques cas particuliers

II.A.1. Que vaut $S(p, n)$ pour $p < n$?

II.A.2. Déterminer $S(n, n)$.

II.A.3. Déterminer $S(n+1, n)$.

II.B Recherche d'une expression générale

II.B.1. Combien y a-t-il d'applications de $\llbracket 1, p \rrbracket$ dans $\llbracket 1, n \rrbracket$?

II.B.2. Pour $p \geq n$, établir la formule

$$n^p = \sum_{k=0}^n \binom{n}{k} S(p, k) \quad (\text{II.1})$$

où $S(p, 0) = 0$ par convention.

II.B.3. En déduire une expression de $S(p, n)$ pour $p \geq n$.

II.B.4. En relisant la question I.B.5., commenter la cohérence de cette expression pour $p < n$.

II.C

II.C.1. Simplifier autant que possible les expressions suivantes :

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

III Étude d'une famille de polynômes

On considère la famille de polynômes

$$\begin{cases} H_0 = 1 \\ H_k = \frac{1}{k!} \prod_{j=0}^{k-1} (X - j) \end{cases} \quad \text{pour } k \in \llbracket 1, n \rrbracket$$

III.A Généralités

III.A.1. Montrer que la famille $(H_k)_{k \in \llbracket 0, n \rrbracket}$ est une base de $\mathbb{R}_n[X]$.

III.A.2. Calculer $\delta(H_0)$ et, pour $k \in \llbracket 1, n \rrbracket$, exprimer $\delta(H_k)$ à l'aide de H_{k-1} .

III.A.3. Déterminer la matrice de τ dans la base $(H_k)_{k \in \llbracket 0, n \rrbracket}$.

III.A.4. Montrer que, pour $k, l \in \llbracket 0, n \rrbracket$,

$$\delta^k(H_l)(0) = \begin{cases} 1 & \text{si } k = l \\ 0 & \text{si } k \neq l \end{cases}$$

III.A.5. Montrer que, pour tout $P \in \mathbb{R}_n[X]$,

$$P = \sum_{k=0}^n (\delta^k(P))(0) H_k$$

III.B Étude d'un exemple

III.B.1. Donner les coordonnées du polynôme $X^3 + 2X^2 + 5X + 7$ dans la base (H_0, H_1, H_2, H_3) de $\mathbb{R}_3[X]$.

III.B.2. En déduire un polynôme $P \in \mathbb{R}_5[X]$ tel que

$$\delta^2(P) = X^3 + 2X^2 + 5X + 7$$

III.B.3. Déterminer les suites réelles $(u_k)_{k \in \mathbb{N}}$ telles que

$$u_{k+2} - 2u_{k+1} + u_k = k^3 + 2k^2 + 5k + 7 \quad (k \in \mathbb{N})$$

III.C Polynômes à valeurs entières

III.C.1. Soit $k \in \mathbb{Z}$. Calculer $H_n(k)$. On distinguera trois cas : $k \in \llbracket 0, n-1 \rrbracket$, $k \geq n$ et $k < 0$. Pour ce dernier cas, on posera $k = -p$.

III.C.2. En déduire que $H_n(\mathbb{Z}) \subset \mathbb{Z}$, c'est-à-dire que H_n est à valeurs entières sur les entiers.

III.C.3. Soit $P \in \mathbb{R}_n[X]$ à valeurs entières sur les entiers. Montrer que $\delta(P)$ est aussi à valeurs entières sur les entiers.

III.C.4. Montrer que $P \in \mathbb{R}_n[X]$ est à valeurs entières sur les entiers si et seulement si ses coordonnées dans la base $(H_k)_{k \in \llbracket 0, n \rrbracket}$ sont entières.

III.C.5. Soit $P \in \mathbb{R}[X]$ de degré $d \in \mathbb{N}$. Montrer que si P est à valeurs entières sur les entiers alors $d!P$ est un polynôme à coefficients entiers. Étudier la réciproque.

IV Généralisation de l'opérateur de différence et application

Pour une application $f : \mathbb{R}_+^* \rightarrow \mathbb{R}$ de classe \mathcal{C}^∞ , on définit l'application

$$\begin{aligned} \delta(f) : \mathbb{R}_+^* &\rightarrow \mathbb{R} \\ x &\mapsto f(x+1) - f(x) \end{aligned}$$

IV.A

IV.A.1. Montrer que $\delta(f)$ est de classe \mathcal{C}^∞ sur \mathbb{R}_+^* . Comparer $(\delta(f))'$ et $\delta(f')$.

IV.A.2. Pour $n \in \mathbb{N}$ et $x > 0$, exprimer $(\delta^n(f))(x)$ à l'aide des coefficients binomiaux $\binom{n}{j}$ et des $f(x+j)$ (où l'indice j appartient à $\llbracket 0, n \rrbracket$).

IV.A.3. Expliquer pourquoi, pour tout $x > 0$, il existe un $y_1 \in]0, 1[$ tel que

$$(\delta(f))(x) = f'(x + y_1)$$

IV.A.4. En déduire que pour tout $x > 0$, pour tout $n \in \mathbb{N}^*$, il existe un $y_n \in]0, n[$ tel que

$$\sum_{j=0}^n (-1)^{n-j} \binom{n}{j} f(x+j) = f^{(n)}(x + y_n) \quad (\text{IV.1})$$

On pourra procéder par récurrence sur $n \in \mathbb{N}^$ et utiliser les trois questions précédentes.*

IV.B

On considère dans toute la suite de cette partie un réel α . On suppose que pour tout nombre p premier, p^α est un entier naturel. On se propose de montrer que α est alors un entier naturel.

IV.B.1. Montrer que pour tout entier k strictement positif, k^α appartient à \mathbb{N}^* .

IV.B.2. Montrer que α est positif ou nul.

IV.B.3. On considère l'application f_α définie sur \mathbb{R}_+^* par $f_\alpha(x) = x^\alpha$. Montrer que α est un entier naturel si et seulement si l'une des dérivées successives de f_α s'annule en au moins un réel strictement positif.

IV.C

On applique la relation (IV.1) à la fonction f_α et à l'entier $n = [\alpha] + 1$ (où $[\cdot]$ désigne la partie entière). On choisit désormais $x \in \mathbb{N}^*$.

IV.C.1. Montrer que l'expression

$$\sum_{j=0}^n (-1)^{n-j} \binom{n}{j} f_\alpha(x+j)$$

est un entier relatif.

IV.C.2. Les notations sont celles de la question IV.A.4..

Quelle est la limite de l'expression $f_\alpha^{(n)}(x+y_n)$ quand $x \in \mathbb{N}^*$ tend vers $+\infty$?

IV.C.3. Conclure.