

Algèbre linéaire avancée II
printemps 2026

Série 1 - Corrigé

L'exercice marqué d'un (+) sert d'introduction à la série, tandis que celui marqué d'une (*) est plus difficile. Tous les exercices sauf celui marqué d'une (*) seront corrigés. La correction sera postée sur Moodle 2 semaines après. Les solutions des exercices (*) et (+) seront discutées dans les séances d'exercices du mardi d'après et d'avant respectivement. Un des exercices (*) sera une question ouverte de l'examen final.

Exercice 1. (+) Soit R un anneau et $\alpha \in Z(R)$ un élément du centre de R . Montrer que l'application

$$\begin{aligned}\Phi: R[x] &\rightarrow R \\ f(x) &\mapsto f(\alpha)\end{aligned}$$

est un morphisme d'anneaux surjectif.

Soit $R = \mathbb{Z}^{2 \times 2}$. Trouver $\alpha \in R$ (qui n'appartient donc pas à $Z(R)$) et deux polynômes $g, h \in R[x]$ tel que

$$g(\alpha) \cdot h(\alpha) \neq (g \cdot h)(\alpha).$$

Solution. Pour montrer que Φ est un morphisme d'anneaux, il faut vérifier les trois propriétés suivantes.

- $\Phi(fg) = \Phi(f)\Phi(g)$,
- $\Phi(f + g) = \Phi(f) + \Phi(g)$, et
- $\Phi(1) = 1$.

Les deux dernières propriétés se montrent sans difficulté. Montrons donc la première.

Soient $f(x) = \sum_i a_i x^i$ et $g(x) = \sum_j b_j x^j$, où les sommes sont finies et sur des entiers naturels. Alors $(fg)(x) = f(x)g(x) = \sum_{i,j} a_i b_j x^{i+j}$. On a donc $\Phi(fg) = \sum_{i,j} a_i b_j \alpha^{i+j}$. De plus,

$$\Phi(f)\Phi(g) = \sum_i a_i \alpha^i \sum_j b_j \alpha^j = \sum_{i,j} a_i \alpha^i b_j \alpha^j = \sum_{i,j} a_i b_j \alpha^{i+j},$$

où la dernière égalité vient de la commutativité de α avec les éléments de R .

La surjectivité de Φ découle du fait qu'un élément de R (polynôme constant) est envoyé sur lui-même.

Pour la deuxième partie de l'exercice on peut choisir par exemple $\alpha = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$, $f(x) = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot x$ et $g(x) = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 1 \end{pmatrix} \cdot x$ pour obtenir $g(\alpha) \cdot h(\alpha) \neq (g \cdot h)(\alpha)$. On a donc montré qu'avec ce choix Φ n'est pas un morphisme d'anneaux.

Exercice 2. Soient V et W deux espaces vectoriels sur $\mathbb{Z}_3$. On considère les bases

$$B_V = \{v_1, v_2, v_3, v_4\} \quad \text{et} \quad B_W = \{u_1, u_2, u_3, u_4\}$$

de V et W , respectivement.

Soit $f : V \rightarrow W$ une application linéaire définie par

$$f(v_1) = 1u_1 + 0u_2 + 2u_3 + 2u_4,$$

$$f(v_2) = 2u_1 + 1u_2 + 2u_3 + 1u_4,$$

$$f(v_3) = 0u_1 + 2u_2 + 0u_3 + 2u_4,$$

$$f(v_4) = 1u_1 + 2u_2 + 1u_3 + 2u_4.$$

Déterminer une base du noyau $\ker(f)$ et une base de l'image $\text{im}(f)$.

Solution. *Calcul.*

Exercice 3. Soit K un corps quelconque.

- i) Une matrice $N \in K^{n \times n}$ est appelée *nilpotente* s'il existe un entier $k \in \mathbb{N}_{>0}$ tel que $N^k = 0$.

Montrer que, pour une telle matrice nilpotente N , on a

$$(I + N)^{-1} = I - N + N^2 - N^3 + \cdots + (-1)^{k-1} N^{k-1}. \quad (1)$$

- ii) En utilisant (1), donner une formule pour l'inverse R^{-1} d'une matrice $R \in K^{n \times n}$ triangulaire supérieure avec des 1 sur la diagonale.
- iii) Donner une formule pour l'inverse R^{-1} d'une matrice $R \in K^{n \times n}$ triangulaire supérieure dont tous les éléments diagonaux sont non nuls.

Solution. i) *Considérons la somme*

$$S := I - N + N^2 - \cdots + (-1)^{k-1} N^{k-1}.$$

On conclut en observant que $(I + N)S = S(I + N) = I$.

- ii) *Soit R triangulaire supérieure avec 1 sur la diagonale. Alors*

$$R = I + N,$$

où N est strictement triangulaire supérieure. Une matrice strictement triangulaire supérieure est nilpotente (en effet $N^n = 0$).

On peut donc appliquer le point précédent :

$$R^{-1} = I - N + N^2 - \cdots + (-1)^{n-1} N^{n-1}.$$

iii) Soit maintenant R triangulaire supérieure avec éléments diagonaux non nuls.
On écrit

$$R = D(I + N),$$

où

$$D = \text{diag}(r_{11}, \dots, r_{nn})$$

et

$$N = D^{-1}R - I.$$

Alors N est strictement triangulaire supérieure, donc nilpotente. On a

$$R^{-1} = (I + N)^{-1}D^{-1}.$$

Par la formule du point (1),

$$R^{-1} = \left(I - N + N^2 - \dots + (-1)^{n-1}N^{n-1} \right) D^{-1}.$$

Cela donne une formule explicite pour l'inverse.

Exercice 4. Montrer que toute matrice $A \in K^{m \times n}$ peut être factorisée sous la forme

$$UAV = \begin{pmatrix} I_k & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix},$$

où $k = \text{rang}(A)$, et où $U \in K^{m \times m}$ et $V \in K^{n \times n}$ sont des matrices inversibles.

Indice : Commencer avec la forme échelonnée de A .

Solution. Soit $A \in K^{m \times n}$ et soit $k = \text{rang}(A)$.

Il existe une matrice inversible $U \in K^{m \times m}$ telle que UA soit sous forme échelonnée réduite par lignes. Cette matrice s'obtient comme produit de matrices élémentaires correspondant aux opérations élémentaires sur les lignes.

Ainsi,

$$UA = \begin{pmatrix} I_k & B \\ 0 & 0 \end{pmatrix},$$

où I_k est la matrice identité de taille k et $B \in K^{k \times (n-k)}$.

Nous voulons maintenant éliminer le bloc B . Pour cela, nous effectuons des opérations élémentaires sur les colonnes, ce qui correspond à multiplier à droite par une matrice inversible $V \in K^{n \times n}$.

On choisit

$$V = \begin{pmatrix} I_k & -B \\ 0 & I_{n-k} \end{pmatrix}.$$

Alors

$$(UA)V = \begin{pmatrix} I_k & B \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_k & -B \\ 0 & I_{n-k} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} I_k & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

Nous avons construit des matrices inversibles $U \in K^{m \times m}$ et $V \in K^{n \times n}$ telles que

$$UAV = \begin{pmatrix} I_k & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

Cela montre que toute matrice est équivalente, par multiplication à gauche et à droite par des matrices inversibles, à une matrice diagonale par blocs dont le nombre de 1 sur la diagonale est égal au rang de A .

Exercice 5. Soit R un anneau et $S \subseteq R$. Montrer que S est un anneau si les deux conditions suivantes sont vérifiées:

- i) $1 \in S$,
- ii) pour $s, t \in S$ alors $s \cdot t \in S$ et $s - t \in S$.

Solution. Il faut vérifier les conditions (R1) à (R7) de la définition d'anneau en utilisant le fait que R est un anneau et les conditions i) et ii).

Exercice 6. Pour cet exercice on travaille sur le corps fini $\mathbb{Z}_5$.

- i) Trouver le polynôme $f(x) \in \mathbb{Z}_5[x]$ de degré au plus 4 tel que $f(0) = 1$, $f(1) = 2$, $f(2) = 4$, $f(3) = 0$, $f(4) = 4$. Établir un système d'équations linéaires correspondant.
- ii) Soient les polynômes $f(x) = 3x^4 + 2x^2 + x + 1$ et $g(x) = 2x^2 + 3x + 2$ sur le corps $\mathbb{Z}_5$. Trouver deux polynômes q et r sur $\mathbb{Z}_5$ tels que :
 - $f = qg + r$ et
 - $\deg(r) < \deg(g)$.

Solution. i) Soit le polynôme $f(x) = a + bx + cx^2 + dx^3 + ex^4$. On a que

$$\begin{aligned} a &= 1 \\ a + b + c + d + e &= 2 \\ a + 2b + 4c + 8d + 16e &= 4 \\ a + 3b + 9c + 27d + 81e &= 0 \\ a + 4b + 16c + 64d + 256e &= 4 \end{aligned}$$

On peut simplifier le système, vu que les coefficients sont dans $\mathbb{Z}_5$. On doit résoudre le système :

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 4 & 3 & 1 \\ 1 & 3 & 4 & 2 & 1 \\ 1 & 4 & 1 & 4 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a \\ b \\ c \\ d \\ e \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 4 \\ 0 \\ 4 \end{pmatrix}$$

On résout ce système d'équations sur $\mathbb{Z}_5$ et on trouve des valeurs pour a, b, c, d, e . Le système donne comme solution $a = 1, b = 0, c = 3, d = 4, e = 4$. Le polynôme $f(x)$ sera donc $f(x) = 1 + 3x^2 + 4x^3 + 4x^4$.

ii) On trouve que $3x^4 + 2x^2 + x + 1 = (2x^2 + 3x + 2)(4x^2 + 4x + 1) + 4$.

Les détails:

$$\begin{array}{r|l}
 3x^4 + 2x^2 + x + 1 & 2x^2 + 3x + 2 \\
 \hline
 3x^4 + 2x^3 + 3x^2 & 4x^2 + \dots \\
 \hline
 3x^3 + 4x^2 + x + 1 & \\
 \hline
 3x^4 + 2x^2 + x + 1 & 2x^2 + 3x + 2 \\
 \hline
 3x^4 + 2x^3 + 3x^2 & 4x^2 + 4x + \dots \\
 \hline
 3x^3 + 4x^2 + x + 1 & \\
 3x^3 + 2x^2 + 3x & \\
 \hline
 2x^2 + 3x + 1 & \\
 \hline
 3x^4 + 2x^2 + x + 1 & 2x^2 + 3x + 2 \\
 \hline
 3x^4 + 2x^3 + 3x^2 & 4x^2 + 4x + 1 \\
 \hline
 3x^3 + 4x^2 + x + 1 & \\
 3x^3 + 2x^2 + 3x & \\
 \hline
 2x^2 + 3x + 1 & \\
 2x^2 + 3x + 2 & \\
 \hline
 4 &
 \end{array}$$

Exercice 7. Soit K un corps. Montrer que le déterminant de $A = V_{r_0, \dots, r_n} \in K^{(n+1) \times (n+1)}$ est

$$\det(V_{r_0, \dots, r_n}) = \prod_{0 \leq i < j \leq n} (r_j - r_i).$$

Solution. On montre que $\det(A) = \prod_{0 \leq i < j \leq n} (x_j - x_i)$ par récurrence :

Pour $n = 1$: $A = \begin{pmatrix} 1 & x_0 \\ 1 & x_1 \end{pmatrix}$ et clairement $\det(A) = x_1 - x_0$.

Pour $n > 1$: On modifie A par l'addition de $(-x_0)$ fois la colonne j à la colonne

$j + 1$ pour $j = n, n - 1, \dots, 1$ et on obtient la matrice suivante

$$\begin{aligned}
 A' &= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 1 & x_1 - x_0 & x_1^2 - x_1 x_0 & \dots & x_1^n - x_1^{n-1} x_0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & x_{n-1} - x_0 & x_{n-1}^2 - x_{n-1} x_0 & \dots & x_{n-1}^n - x_{n-1}^{n-1} x_0 \\ 1 & x_n - x_0 & x_n^2 - x_n x_0 & \dots & x_n^n - x_n^{n-1} x_0 \end{pmatrix} \\
 &= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 1 & x_1 - x_0 & (x_1 - x_0)x_1 & \dots & (x_1 - x_0)x_1^{n-1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & x_{n-1} - x_0 & (x_{n-1} - x_0)x_{n-1} & \dots & (x_{n-1} - x_0)x_{n-1}^{n-1} \\ 1 & x_n - x_0 & (x_n - x_0)x_n & \dots & (x_n - x_0)x_n^{n-1} \end{pmatrix}
 \end{aligned}$$

Alors $\det(A) = \det(A') = \prod_{i=1}^n (x_i - x_0) \det(B')$ où B' est la matrice donnée par

$$B' = \begin{pmatrix} 1 & x_1 & x_1^2 & \dots & x_1^{n-1} \\ 1 & x_2 & x_2^2 & \dots & x_2^{n-1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & x_{n-1} & x_{n-1}^2 & \dots & x_{n-1}^{n-1} \\ 1 & x_n & x_n^2 & \dots & x_n^{n-1} \end{pmatrix}$$

Par l'hypothèse de récurrence, $\det(B') = \prod_{1 \leq i < j \leq n} (x_j - x_i)$, et donc $\det(A) = \det(A') = \prod_{0 \leq i < j \leq n} (x_j - x_i)$.

Exercice 8. Soit K un corps et $a_0, a_1, \dots, a_n \in K$ des éléments distincts ($n \geq 1$). On définit

$$c_k(x) = \frac{\prod_{i \neq k} (x - a_i)}{\prod_{i \neq k} (a_k - a_i)}$$

et soit $f(x) \in K[x]$ un polynôme tel que $\deg(f(x)) \leq n$. Montrer que

$$f(x) = f(a_0)c_0(x) + f(a_1)c_1(x) + \dots + f(a_n)c_n(x).$$

Solution. Remarquons que les polynômes c_k sont tous de degré n et valent 1 en $x = a_k$ et 0 en a_i pour $i \neq k$.

On a donc, par construction des c_k , que la somme

$$g(x) := f(a_0)c_0(x) + f(a_1)c_1(x) + \dots + f(a_n)c_n(x)$$

est un polynôme de degré n vérifiant $g(a_k) = f(a_k)$ pour tout $k \in \{0, \dots, n\}$.

De plus, d'après le cours, pour que deux polynômes de degrés n soient égaux il faut et il suffit qu'ils soient égaux en $n + 1$ valeurs distinctes. D'où $g \equiv f$.

Exercice 9. Soit $f(x) \in \mathbb{R}[x] \setminus \{0\}$, $\deg(f) \geq 2$.

i) Si $\deg(f)$ est impair, alors $f(x)$ n'est pas irréductible.

ii) Si $f(x)$ est irréductible, alors $\deg(f) = 2$.

iii) Montrer comment ii) implique que chaque polynôme $f(x) \in \mathbb{R}[x]$, $\deg(f) \geq 1$ possède une racine complexe.

Pour le point ii), utiliser le théorème fondamental de l'algèbre¹.

Solution. Comme ii) implique i) il suffit de démontrer ii) et iii).

ii) Soit $f(x) = a_0 + \cdots + a_n x^n \in \mathbb{R}[x]$ irréductible et soit $\alpha \in \mathbb{C}$ une racine de f (théorème fondamental de l'algèbre). On a $\alpha \notin \mathbb{R}$ car $\deg(f) \geq 2$ et f est irréductible par hypothèse (f ne possède pas de racines réelles). Soit $\bar{\alpha}$ le conjugué complexe de α . Alors

$$\begin{aligned} 0 &= \bar{0} \\ &= \overline{a_0 + a_1 \alpha + \cdots + a_n \alpha^n} \\ &= \bar{a}_0 + \bar{a}_1 \cdot \bar{\alpha} + \cdots + \bar{a}_n \cdot \bar{\alpha}^n \\ &= a_0 + a_1 \cdot \bar{\alpha} + \cdots + a_n \cdot \bar{\alpha}^n \\ &= f(\bar{\alpha}). \end{aligned}$$

Ainsi $(x - \alpha) \mid f(x)$ et $(x - \bar{\alpha}) \mid f(x)$ (sur $\mathbb{C}$). Les deux polynômes $(x - \alpha) \neq (x - \bar{\alpha})$ sont irréductibles, alors $g(x) = (x - \alpha) \cdot (x - \bar{\alpha}) \mid f(x)$. On observe que $g(x) \in \mathbb{R}[x]$. Il existe alors $h(x) \in \mathbb{C}[x]$ tel que $g(x)h(x) = f(x)$.

Si $g(x)$ ne divise pas $f(x)$ sur $\mathbb{R}$, alors la division avec reste donne $f(x) = q(x)g(x) + r(x)$ où $q(x), r(x) \in \mathbb{R}[x]$ $r(x) \neq 0$ et $\deg(r) < \deg(g) = 2$. Mais $r = f - qg = gh - qg = (h - q)g$ et $r \neq 0$ implique $\deg(r) \geq \deg(g)$. Alors $g \mid f$ sur $\mathbb{R}$. Comme f est irréductible, on obtient $f(x) = a \cdot g(x)$ où $a \in \mathbb{R}$. On a montré que $\deg(f) = 2$.

iii) Il faut montrer que l'assertion suivante

Tout polynôme $f(x) \in \mathbb{R}[x]$ irréductible satisfait $\deg(f) \leq 2$.

implique que tout polynôme réel de degré au moins 1 possède une racine complexe.

Soit $f(x) \in \mathbb{R}[x]$ de degré au moins 1. On écrit la factorisation

$$f = a \prod_i p_i,$$

en polynômes irréductibles et unitaires $p_i \in \mathbb{R}[x]$ avec $a \in \mathbb{R}$. On supposant l'assertion, alors $\deg(p_i) \leq 2$ pour tout i . S'il existe un i tel que $\deg(p_i) = 1$, alors $p_i(x) = x - \alpha$ pour un $\alpha \in \mathbb{R}$ et f possède la racine $\alpha \in \mathbb{R} \subseteq \mathbb{C}$.

Autrement $p_1(x) = x^2 + bx + c$ où $b, c \in \mathbb{R}$. Le polynôme p_1 possède les racines $\alpha_{\pm} = -b/2 \pm \sqrt{b^2/4 - c} \in \mathbb{C}$. Comme p_1 est un facteur dans la factorisation de f , ce sont des racines de f .

¹Chaque polynôme $f(x) \in \mathbb{R}[x]$, $\deg(f) \geq 1$ possède au moins une racine complexe.

Exercice 10. (*) Soit R un anneau.

- i) Montrer que l'élément 1 est unique.
- ii) Montrer qu'un élément inversible $r \in R^*$ n'est pas un diviseur de zéro.
- iii) Montrer que deux polynômes

$$p(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \cdots \text{ et } q(x) = b_0 + b_1x + b_2x^2 + \cdots \in R[x]$$

sont égaux si et seulement si $a_i = b_i$ pour tous i .

- iv) Soit $R^{n \times n}$ l'anneau des matrices $n \times n$ sur R . Montrer que le centre de $R^{n \times n}$ est $Z(R^{n \times n}) = \{aI_n : a \in Z(R)\}$.

Solution.