

Programme de colle 22

Révision : résolution des équations différentielles d'ordre 1 (**)

+ Chapitre 14 Polynômes (fin)

Factorisation en produit de facteurs irréductibles dans $\mathbb{R}[X]$.

+ Chapitre 15 Matrices

I Opérations sur les matrices.

1. **Généralités** définition d'une matrice, exemples (matrice nulle, identité, colonne ou ligne). Ensembles $M_{n,p}(K)$ et $M_n(K)$.

$M_{n,p}(K)$ est l'ensemble des matrices de type (n, p) à coefficients dans K .

$M_n(K)$ est l'ensemble des matrices carrées d'ordre n à coefficients dans K .

2. **Opérations :**

Définition de la somme de deux matrices et de la multiplication d'une matrice par un scalaire, combinaison linéaire de matrices.

$$\forall (A, B) \in M_{n,p}(K)^2, \forall (\alpha, \beta) \in K^2, \forall (i, j) \in \llbracket 1, n \rrbracket \times \llbracket 1, p \rrbracket, (A + B)_{ij} = a_{ij} + b_{ij} \text{ et } (\alpha A)_{ij} = \alpha a_{ij} \text{ et } (\alpha A + \beta B)_{ij} = \alpha a_{ij} + \beta b_{ij}$$

Définition du produit matriciel. Cas particulier du produit d'une matrice \times colonne ou de ligne \times matrice.

$$\forall A = (a_{ij}) \in M_{n,p}(K), \forall B = (b_{ij}) \in M_{p,q}(K), \forall (i, j) \in \llbracket 1, n \rrbracket \times \llbracket 1, q \rrbracket, (A \times B)_{ij} = \sum_{k=1}^p a_{ik} b_{kj}$$

Si $B = \begin{pmatrix} b_1 \\ \vdots \\ b_p \end{pmatrix} \in M_{p,1}(K)$ et $A \in M_{n,p}(K)$ alors $AB = \sum_{k=1}^p b_k C_k$ où C_1, \dots, C_p sont les colonnes de A .

Règles de calcul : associativité, commutativité de l'addition mais pas du produit matriciel, distributivité, élément neutre de l'addition et de la multiplication, produit mixte

Mises en garde il arrive très souvent que :

$$AB \neq BA$$

$$AB = O \text{ et } B \neq O \text{ et } A \neq O$$

$$AB = AC \text{ et } B \neq C$$

3. **Transposition**

Définition et notation

$$\forall A \in M_{n,p}(K), A^T \in M_{p,n}(K) \text{ telle que } \forall (i, j) \in \llbracket 1, p \rrbracket \times \llbracket 1, n \rrbracket, (A^T)_{ij} = A_{ji}$$

Règles de calcul : transposée de la transposée, transposée d'une combinaison linéaire, d'un produit.

$$\forall A \in M_{n,p}(K), \forall B \in M_{p,q}(K), \forall (\alpha, \beta) \in K^2, (A^T)^T = A \text{ et } (\alpha A + \beta B)^T = \alpha A^T + \beta B^T$$

$$\forall A \in M_{n,p}(K), \forall B \in M_{p,q}(K), (AB)^T = B^T A^T$$

4. **Matrices élémentaires**

Définition

$\forall (r, s) \in \llbracket 1, p \rrbracket \times \llbracket 1, n \rrbracket$, on définit $E_{rs} \in M_{n,p}(K)$ par : le seul coefficient non nul de E_{rs} est le coefficient ligne r et colonne s et ce coefficient vaut 1.

Multiplication de deux matrices élémentaires carrées et écriture de toute matrice de $M_{n,p}(K)$ comme combinaison linéaire des matrices élémentaires de $M_{n,p}(K)$.

$$\forall (r, s, u, v) \in \llbracket 1, n \rrbracket^4, E_{rs} E_{uv} = \delta_{su} E_{rv}$$

Toute matrice $A = (a_{ij}) \in M_{n,p}(K)$ s'écrit de manière unique comme combinaison linéaire des matrices élémentaires de $M_{n,p}(K)$ et cette unique écriture est $A = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^p a_{ij} E_{ij}$.

II Algorithme de Gauss et rang.

1. **Opérations élémentaires** : Définitions des opérations élémentaires sur les lignes ou les colonnes. Matrices équivalentes par lignes ou par colonnes . Matrices d'opérations élémentaires. Traduction des opérations élémentaires par le produit avec matrices d'opérations élémentaires.

Opérations élémentaires	produit matriciel correspondant	Opérations élémentaires inverses	produit matriciel correspondant
$L_i \leftrightarrow L_j \text{ resp. } C_i \leftrightarrow C_j$	$T_{ij} A \text{ resp. } A T_{ij}$	$L_j \leftrightarrow L_i$	$T_{ij} A' \text{ resp. } A' T_{ij}$
$L_i \leftarrow \lambda L_i \text{ resp. } C_i \leftarrow \lambda C_i \text{ tq } \lambda \in K^*$	$D_i(\lambda) A \text{ resp. } A D_i(\lambda)$	$L_i \leftarrow \frac{1}{\lambda} L_i \text{ resp. } C_i \leftarrow \frac{1}{\lambda} C_i \text{ tq } \lambda \in K^*$	$D_i\left(\frac{1}{\lambda}\right) A' \text{ resp. } A' D_i\left(\frac{1}{\lambda}\right)$
$L_i \leftarrow L_i + \beta L_j \text{ resp. } C_j \leftarrow C_j + \beta C_i \text{ tq } \beta \in K \text{ et } i \neq j$	$H_{ij}(\beta) A \text{ resp. } A H_{ij}(\beta)$	$L_i \leftarrow L_i - \beta L_j \text{ resp. } C_i \leftarrow C_i - \beta C_j \text{ tq } \beta \in K \text{ et } i \neq j$	$H_{ij}(-\beta) A' \text{ resp. } A'^{H_{ij}(-\beta)}$
	<i>Illustrations</i>		

2. Echelonnement : Matrice échelonnée (réduite) par lignes, pivots, rang. Théorème de Gauss-Jordan.

Matrice échelonnée : une matrice $A \in M_{n,p}(K)$ est échelonnée par ligne (resp. colonne) lorsqu'elle est nulle ou lorsque chaque ligne (resp. colonne) non nulle débute par davantage de zéros que la précédente. Les pivots d'une telle matrice sont les premiers coefficients non nuls des lignes (resp. colonnes) non nulles.

Matrice échelonnée réduite: une matrice $A \in M_{n,p}(K)$ est échelonnée réduite par ligne (resp. colonne) lorsqu'elle est échelonnée, que ses pivots valent 1 et les autres coefficients se trouvant sur la colonne (resp. ligne) d'un pivot sont nuls. Le **rang** d'une telle matrice échelonnée réduite est le nombre de ses pivots.

Théorème de Gauss-Jordan. Toute matrice $A \in M_{n,p}(K)$ est équivalente par ligne (resp. colonne) à une matrice E échelonnée par ligne (resp. colonne) et à une unique matrice U (resp. V) échelonnée réduite par ligne (resp. colonne). De plus, $rg(U) = rg(V)$.

Le rang de A est par définition le rang de U (qui est aussi le rang de V).

Le rang de toute matrice échelonnée est égal à son nombre de pivots.

Le rang d'une matrice A est le rang de toute matrice équivalente par ligne (resp. colonne) à A .

Si $A \in M_n(K)$ alors $[rg(A) = n \Leftrightarrow A \sim I_n]$.

3. Système linéaire : Définition d'un système linéaire, d'un système homogène, de la matrice des coefficients et écriture matricielle.

$$(S): \begin{cases} a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1p}x_p = b_1 \\ a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2p}x_p = b_2 \\ \vdots \\ a_{n1}x_1 + a_{n2}x_2 + \dots + a_{np}x_p = b_n \end{cases} \text{ d'inconnue } (x_1, x_2, \dots, x_p) \in K^p. \rightsquigarrow (SH): \begin{cases} a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1p}x_p = 0 \\ a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2p}x_p = 0 \\ \vdots \\ a_{n1}x_1 + a_{n2}x_2 + \dots + a_{np}x_p = 0 \end{cases} \text{ système homogène associé}$$

(S) est échelonné lorsque en passant d'une ligne de (S) à la suivante, au moins une inconnue « disparaît » (cette inconnue a en fait son coefficient nul).

(S) est de Cramer lorsque $n = p$ et (S) admet une unique solution.

(S) est compatible lorsque (S) admet au moins une solution. (S) est incompatible lorsque (S) n'admet aucune solution.

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1p} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2p} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{np} \end{pmatrix} \text{ la matrice des coefficients de (S). Et } B = \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_n \end{pmatrix} \text{ la matrice du second membre de (S).}$$

$$rg(S) = rg(A).$$

Relation entre les solutions de (S) et celles de (SH): Si X_0 est une solution particulière de (S) alors les solutions de (S) sont toutes les matrices de la forme $X_0 + Y$ où Y solution de (SH).

Théorème de Gauss-Jordan. Tout système linéaire est équivalent à un système linéaire échelonné.

Théorème. Un système linéaire (S) n équations, n inconnues est de Cramer si et seulement si $rg(S) = n$.

III Matrices carrées

1. Définition et opérations.

2. Trace : définition et propriétés.

Soit $A \in M_n(K)$. $tr(A) = \sum_{i=1}^n A_{ii}$

Soit $(A, B) \in M_n(K)^2$ et $(\alpha, \beta) \in K^2$. $tr(\alpha A + \beta B) = \alpha tr(A) + \beta tr(B)$ et $tr(AB) = tr(BA)$

Soit $A \in M_{n,p}(K)$. $tr(A^T A) = tr(AA^T) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^p A_{ij}^2$.

3. Matrices carrées particulières :

Matrice nulle, identité

Matrices diagonales ou triangulaires Définition. Le produit et les combinaisons linéaires de matrices diagonales (resp. triangulaires supérieures, resp. inférieures) sont diagonales (resp. triangulaires supérieures, respectivement inférieures). Diagonale d'un produit de matrices diagonales (resp. triangulaires supérieures, respectivement inférieures).

Soit $A = (a_{ij}) \in M_n(K)$. A est diagonale lorsque $\forall (i, j) \in \llbracket 1, n \rrbracket^2, (i \neq j \Rightarrow a_{ij} = 0)$. On note $diag(\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_n) = \begin{pmatrix} \delta_1 & 0 & 0 \\ 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & \delta_n \end{pmatrix}$.

Soit $A = (a_{ij}) \in M_n(K)$. A est triangulaire supérieure lorsque $\forall (i, j) \in \llbracket 1, n \rrbracket^2, i > j \Rightarrow a_{ij} = 0$.

Soit $A = (a_{ij}) \in M_n(K)$. A est triangulaire inférieure lorsque $\forall (i, j) \in \llbracket 1, n \rrbracket^2, i < j \Rightarrow a_{ij} = 0$.

Soit $(A, B) \in M_n(K)^2$ et $(\alpha, \beta) \in K^2$.

Si A et B sont diagonales alors $\alpha A + \beta B$ et AB sont diagonales.

Si A et B sont triangulaires supérieures (resp. inférieures) alors $\alpha A + \beta B$ et AB sont triangulaires supérieures (resp. inférieures).

Matrices symétriques ou antisymétriques. Définition. Les combinaisons linéaires de matrices symétriques (resp. antisymétriques), sont symétriques (resp. antisymétriques). Toute matrice s'écrit de manière unique comme somme d'une matrice symétrique et d'une matrice antisymétrique.

Soit $A \in M_n(K)$. A est symétrique lorsque $A^T = A$. A est antisymétrique lorsque $A^T = -A$.

$A = (a_{ij})$ symétrique $\Leftrightarrow \forall (i, j) \in \llbracket 1, n \rrbracket^2, a_{ij} = a_{ji}$.

$A = (a_{ij})$ antisymétrique $\Leftrightarrow \forall (i, j) \in \llbracket 1, n \rrbracket^2, a_{ij} = -a_{ji}$. A antisymétrique $\Rightarrow \forall i \in \llbracket 1, n \rrbracket, a_{ii} = 0$.

Si A et B sont symétriques (resp. antisymétriques) alors $\alpha A + \beta B$ et AB sont symétriques (resp. antisymétriques).

Toute matrice M de $M_n(K)$ s'écrit de manière unique comme somme d'une matrice symétrique et d'une antisymétrique et l'écriture est $M = \frac{M+M^T}{2} + \frac{M-M^T}{2}$.

4. Puissances d'une matrice carrée

Définition :

Soit $A \in M_n(K)$. $A^0 = I$ et $\forall m \in \mathbb{N}^*$, $A^m = A^{m-1}A$.

Si $P(X) = a_0 + a_1X + a_2X^2 + \dots + a_pX^p \in K[X]$ alors $P(A) = a_0I + a_1A + a_2A^2 + \dots + a_pA^p$. P est annulateur de A lorsque $P(A) = 0$.

Si $P(X) = Q(X)S(X) + R(X)$ alors $P(A) = Q(A)S(A) + R(A)$.

Règles de calcul :

 formule du binôme de Newton, formule de factorisation.

Si A et $B \in M_n(K)$ telles que $AB = BA$ (A et B commutent) alors $(A+B)^N = \sum_{k=0}^N \binom{N}{k} A^k B^{N-k}$ et $A^{N+1} - B^{N+1} = (A-B)(\sum_{k=0}^N A^k B^{N-k})$.

Si $(A, B) \in M_n(K)^2$ et $(\alpha, \beta) \in K^2$ telles que A et B commutent alors αA et βB commutent.

Exemples :

 puissance de λA , de $I (= I_n)$, de $J \in M_n(K)$ dont tous les coefficients valent 1, d'une matrice diagonale, du produit de deux matrices qui commutent.

Si $(A, B) \in M_n(K)^2$ et $\lambda \in K$ et $m \in \mathbb{N}$, alors $(\lambda A)^m = \lambda^m A^m$ et si $AB = BA$ alors $(AB)^m = A^m B^m$.

$I^m = I$ et $J^m = \begin{cases} n^{m-1}J & \text{si } m \geq 1 \\ I & \text{si } m = 0 \end{cases}$.

$(diag(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n))^m = diag(\alpha_1^m, \alpha_2^m, \dots, \alpha_n^m)$

Matrices nilpotentes :

 définition, exemple : cas des matrices triangulaires avec la diagonale nulle

Soit $N \in M_n(K)$. N est nilpotente lorsqu'il existe $p \in \mathbb{N}$ tel que $N^p = 0$.

Toute matrice triangulaire avec diagonale nulle est nilpotente.

Méthodes pour calculer A^m tq $m \in \mathbb{N}$.

- Conjecture + récurrence (+ parfois suites)
- Ecriture $A = B + C$ où B et C commutent + formule du binôme de Newton.
- Polynôme annulateur + division euclidienne.
- $A = P^{-1}BP$ donc $A^k = P^{-1}B^kP$

IV Matrices carrées inversibles

1. Définition

Soit $A \in M_n(K)$. A est inversible lorsqu'il existe $B \in M_n(K)$ tel que $AB = BA = I_n$. Une telle matrice B lorsqu'elle existe est unique est appelée l'inverse de A et est notée A^{-1} . Ainsi, A^{-1} , si elle existe, est l'unique matrice vérifiant $AA^{-1} = A^{-1}A = I_n$.

$GL_n(K)$ est l'ensemble des matrices carrées d'ordre n à coefficients dans K et inversibles.

Si $A \in GL_n(K)$ alors $[AB = AC \Leftrightarrow B = C]$ et $[AX = Y \Leftrightarrow X = A^{-1}Y]$.

2. Opérations

Si P et $Q \in M_n(K)$ sont inversibles, $\lambda \in K^*$ et $k \in \mathbb{N}$ alors $\lambda P, PQ, P^T, P^k$ sont inversibles et

$$(PQ)^{-1} = Q^{-1}P^{-1}, \quad (\lambda P)^{-1} = \left(\frac{1}{\lambda}\right)P^{-1}, \quad (P^T)^{-1} = (P^{-1})^T \quad \text{et} \quad (P^k)^{-1} = (P^{-1})^k \quad \text{mais } P + Q \text{ n'est pas toujours inversible.}$$

Si P est inversible alors on définit $\forall k \in \mathbb{N}, P^{-k} = (P^{-1})^k = (P^k)^{-1}$.

Si P est inversible alors $(P^{-1}BP)^k = P^{-1}B^kP$ et si, de plus, B est inversible alors $(P^{-1}BP)^{-1} = P^{-1}B^{-1}P$.

3. Caractérisations

Soit $A \in M_n(K)$.

A est inversible **si et seulement si** $rg(A) = n$ **si et seulement si** $A \sim I_n$ **si et seulement si** A est le produit de matrices d'opérations élémentaires.

A est inversible **si et seulement si** le système $AX = 0$ admet $X = 0$ comme unique solution.

A est inversible **si et seulement si** il existe B tel que $AB = I$

A est inversible **si et seulement si** il existe B tel que $BA = I$

A est inversible **si et seulement si** tout système linéaire $AX = Y$ associé à A est de Cramer. Le cas échéant, l'unique solution est $X = A^{-1}Y$.

A est inversible **si et seulement si** l'un des systèmes linéaires associés à A est de Cramer.

A est inversible **si et seulement si** A^T est inversible

A **n'est pas** inversible **si et seulement si** $rg(A) < n$

A **n'est pas** inversible **si et seulement si** il existe $X \in M_{n,1}(K)$ non nulle telle que $AX = 0$

A **n'est pas** inversible **si et seulement si** l'une des colonnes (resp. lignes) de A est combinaison linéaire des autres colonnes (resp. lignes).

4. Exemples de référence

1. I_n et toute matrice d'opération élémentaires sont inversibles et $I_n^{-1} = I_n, T_{ij}^{-1} = T_{ij}, D_i(\lambda)^{-1} = D_i\left(\frac{1}{\lambda}\right), H_{ij}(\beta)^{-1} = H_{ij}(-\beta)$

2. Toute matrice d'opération élémentaire est inversible et l'inverse est la matrice de l'opération inverse i.e.

$$\forall (i, j) \in \llbracket 1, n \rrbracket^2 \text{ tel } i \neq j, \forall \beta \in K, \forall \lambda \in K^*, T_{ij}^{-1} = T_{ij} \text{ et } D_i(\lambda)^{-1} = D_i\left(\frac{1}{\lambda}\right) \text{ et } H_{ij}(\beta)^{-1} = H_{ij}(-\beta).$$

3. S'il existe B non nulle telle que $AB = 0$ ou $BA = 0$ alors A **n'est pas** inversible.

4. Si l'une des colonnes (resp. lignes) de A est combinaison linéaire des autres colonnes (resp. lignes) alors A **n'est pas** inversible. (en particulier si A contient une ligne ou une colonne nulle alors A n'est pas inversible)

5. Soit $D = diag(\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_n)$. D est inversible **si et seulement si** $\forall k \in \llbracket 1, n \rrbracket, \delta_k \neq 0$. Et le cas échéant, $D^{-1} = diag(\delta_1^{-1}, \delta_2^{-1}, \dots, \delta_n^{-1})$.

6. Soit $A = \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix} \in M_2(K)$.

A est inversible **si et seulement si** $det(A) = ad - cb \neq 0$. Et le cas échéant, $A^{-1} = \frac{1}{det(A)} \begin{pmatrix} d & -b \\ -c & a \end{pmatrix}$.

7. Soit $T = (t_{ij}) \in M_n(K)$ telle que T triangulaire. T est inversible **si et seulement si** $\forall k \in \llbracket 1, n \rrbracket, t_{kk} \neq 0$. Et le cas échéant, T^{-1} est aussi triangulaire.

A savoir démontrer :

1. Si N est nilpotente telle que $N^p = 0$ alors pour tout $\lambda \in K$, $I - \lambda N$ est inversible et $(I - \lambda N)^{-1} = \sum_{k=0}^{p-1} (\lambda N)^k$.

2. S'il existe $a_0, a_1, \dots, a_n \in K$ tels que $a_0I + a_1A + a_2A^2 + \dots + a_pA^p = 0$ et $a_0 \neq 0$ (autrement dit il existe un polynôme annulateur de A qui ne s'annule pas en 0) alors A est inversible et on trouve A^{-1} en isolant I d'un côté de l'égalité puis en factorisant par A de l'autre côté de l'égalité.

5. Méthodes pour prouver A est inversible et déterminer A^{-1} .

1. Utiliser un polynôme annulateur
2. Ecrire A comme le produit de matrices inversibles, la transposée, une puissance d'une matrice inversible
3. Résoudre le système linéaire $(S) : AX = Y$ où $Y = \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{pmatrix}$ paramètre et $X = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix}$ inconnue.
 - Ou bien (S) a parfois plein de solutions et parfois aucune solution selon Y . Alors A n'est pas inversible
 - Ou bien, pour tout Y , (S) est de Cramer et A^{-1} se lit sur l'unique solution $X = A^{-1}Y$.
4. Echelonner A en lignes (resp en colonnes) et faire, en parallèle, les mêmes opérations sur I
 - jusqu'à une matrice échelonnée pour connaître $\text{rg}(A)$ et savoir si A est inversible.
 - jusqu'à l'obtention de I pour lire A^{-1} qui sera la matrice obtenue, en parallèle, équivalence par ligne (resp. colonne) à I .

() résoudre deux ou trois équations différentielles linéaires d'ordre 1 pour se remémorer la méthode... Cela pourra faire l'objet d'un exercice de colle.**

Questions de cours :

QDC 1: Montrer que :

$$\forall A \in M_{n,p}(K), \forall B \in M_{n,p}(K), \forall (\alpha, \beta) \in K^2, (\alpha A + \beta B)^T = \alpha A^T + \beta B^T.$$

$$\forall A \in M_{n,p}(K), \forall B \in M_{p,q}(K), (AB)^T = B^T A^T$$

$$\forall A \in M_{n,p}(K), \text{tr}(A^T A) = \text{somme des carrés des coefficients de } A.$$

QDC 2: Montrer que le produit de deux matrices carrées d'ordre n triangulaires supérieures est triangulaire supérieure.

QDC 3: Montrer que toute matrice carrée d'ordre n s'écrit de manière unique comme somme d'une matrice symétrique et d'une matrice anti-symétrique.

QDC 4: Soit $A \in M_n(K)$. Démontrer que :

A est inversible

si et seulement si il existe B tel que $BA = I$

si et seulement si le système $AX = 0$ admet $X = 0$ comme unique solution

si et seulement si $\text{rg}(A) = n$

si et seulement si $A \sim_L I_n$

si et seulement si A est le produit de matrices d'opérations élémentaires

si et seulement si tout système linéaire, dont la matrice des coeff est A , est de Cramer.