



Déterminants, rangs, systèmes linéaires

Pierre Mathonet

Présentation provisoire

Département de Mathématique
Faculté des Sciences

Liège, le 21 Février 2013

Sous matrices

Une définition intuitive : on sélectionne certaines lignes et certaines colonnes d'une matrice (ou on en supprime d'autres) :

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 2 & \pi \\ 4 & e & 6 \\ 7 & 8 & 9 \end{pmatrix}$$

Sous matrices

Une définition intuitive : on sélectionne certaines lignes et certaines colonnes d'une matrice (ou on en supprime d'autres) :

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 2 & \pi \\ 4 & e & 6 \\ 7 & 8 & 9 \end{pmatrix}$$

On note entre parenthèses les lignes et les colonnes qui sont sélectionnées dans A , donc

$$A_{(1,3;1,2)} = \begin{pmatrix} 1 & 2 \\ 7 & 8 \end{pmatrix}.$$

Sous matrices

Une définition intuitive : on sélectionne certaines lignes et certaines colonnes d'une matrice (ou on en supprime d'autres) :

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 7 \\ 4 & 6 & 6 \\ 7 & 8 & 9 \end{pmatrix}$$

On note entre parenthèses les lignes et les colonnes qui sont sélectionnées dans A , donc

$$A_{(1,3;1,2)} = \begin{pmatrix} 1 & 2 \\ 7 & 8 \end{pmatrix}.$$

De même :

Sous matrices

Une définition intuitive : on sélectionne certaines lignes et certaines colonnes d'une matrice (ou on en supprime d'autres) :

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 2 & \pi \\ 4 & e & 6 \\ 7 & 8 & 9 \end{pmatrix}$$

On note entre parenthèses les lignes et les colonnes qui sont sélectionnées dans A , donc

$$A_{(1,3;1,2)} = \begin{pmatrix} 1 & 2 \\ 7 & 8 \end{pmatrix}.$$

De même :

$$A_{(1;1,2,3)} = (1 \quad 2 \quad \pi).$$

Sous matrices

Une définition intuitive : on sélectionne certaines lignes et certaines colonnes d'une matrice (ou on en supprime d'autres) :

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 2 & \pi \\ \cancel{4} & \cancel{e} & \cancel{6} \\ \cancel{7} & \cancel{8} & \cancel{9} \end{pmatrix}$$

On note entre parenthèses les lignes et les colonnes qui sont sélectionnées dans A , donc

$$A_{(1,3;1,2)} = \begin{pmatrix} 1 & 2 \\ 7 & 8 \end{pmatrix}.$$

De même :

$$A_{(1;1,2,3)} = (1 \quad 2 \quad \pi).$$

Un cas particulier

Definition

Soit $A \in \mathbb{R}_n^m$ une matrice. On note $A_{\hat{i}, \hat{j}}$ la sous-matrice obtenue en supprimant la ligne i et la colonne j dans A .

Un cas particulier

Definition

Soit $A \in \mathbb{R}_n^m$ une matrice. On note $A_{\hat{i},\hat{j}}$ la sous-matrice obtenue en supprimant la ligne i et la colonne j dans A .

Par exemple, si

$$B = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 2 & 0 \\ 3 & 4 & 6 & 1 \\ 0 & 4 & 2 & 1 \end{pmatrix},$$

on a

$$B_{\hat{1},\hat{3}} = \begin{pmatrix} 3 & 4 & 1 \\ 0 & 4 & 1 \end{pmatrix}.$$

Déterminants

On définit l'application "déterminant" sur l'ensemble de toutes les matrices carrées, par récurrence :

Déterminants

On définit l'application "déterminant" sur l'ensemble de toutes les matrices carrées, par récurrence :

Definition

Si $A \in \mathbb{R}_1^1 = \mathbb{R}$, alors $\det(A) = A$. Si $A \in \mathbb{R}_{n+1}^{n+1}$, alors

$$\det(A) = \sum_{j=1}^{n+1} a_{1,j} (-1)^{j+1} \det(A_{\hat{1}, \hat{j}}).$$

Déterminants

On définit l'application "déterminant" sur l'ensemble de toutes les matrices carrées, par récurrence :

Definition

Si $A \in \mathbb{R}_1^1 = \mathbb{R}$, alors $\det(A) = A$. Si $A \in \mathbb{R}_{n+1}^{n+1}$, alors

$$\det(A) = \sum_{j=1}^{n+1} a_{1,j} (-1)^{j+1} \det(A_{\hat{1},\hat{j}}).$$

Definition

- 1 Soit $A \in \mathbb{R}_n^m$ une matrice. Un *mineur d'ordre p* de A est le déterminant d'une sous-matrice de A à p lignes et p colonnes ;
- 2 Si $A \in \mathbb{R}_m^m$, le *mineur de l'élément* $a_{i,j}$ est $\det(A_{\hat{i},\hat{j}})$;
- 3 Si $A \in \mathbb{R}_m^m$, le *cofacteur de l'élément* $a_{i,j}$ est $\mathcal{A}_{i,j} = (-1)^{i+j} \det(A_{\hat{i},\hat{j}})$;



Definition

La matrice des cofacteurs : si A est une matrice carrée

$$(\text{cof}(A))_{i,j} = (\mathcal{A})_{i,j} = (-1)^{i+j} \det(A_{\hat{i},\hat{j}}).$$

On peut écrire la définition du déterminant :

$$\det(A) = \sum_{j=1}^{n+1} a_{1,j} \mathcal{A}_{1,j}.$$

C'est la *règle des cofacteurs* (sur la première ligne).

Le cas des matrices de taille 1,2,3 et 4

- 1 Matrices de taille 1 : pour $a \in \mathbb{R}_1^1$, on a $\det(a) = a$;
- 2 Matrices de taille 2 :

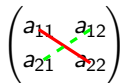
$$\det \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{pmatrix} = a_{11}\mathcal{A}_{11} + a_{12}\mathcal{A}_{12} = a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21}.$$

Le cas des matrices de taille 1,2,3 et 4

- 1 Matrices de taille 1 : pour $a \in \mathbb{R}_1^1$, on a $\det(a) = a$;
- 2 Matrices de taille 2 :

$$\det \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{pmatrix} = a_{11}\mathcal{A}_{11} + a_{12}\mathcal{A}_{12} = a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21}.$$

Représentation graphique :


$$\begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{pmatrix}$$

Le cas des matrices de taille 1,2,3 et 4

- 1 Matrices de taille 1 : pour $a \in \mathbb{R}_1^1$, on a $\det(a) = a$;
- 2 Matrices de taille 2 :

$$\det \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{pmatrix} = a_{11}\mathcal{A}_{11} + a_{12}\mathcal{A}_{12} = a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21}.$$

Représentation graphique :

$$\begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{pmatrix}$$

- 3 Pour une matrice à trois lignes et trois colonnes, on a

$$\begin{aligned} \det \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix} &= a_{11}\mathcal{A}_{11} + a_{12}\mathcal{A}_{12} + a_{13}\mathcal{A}_{13} \\ &= a_{11} \det \begin{pmatrix} a_{22} & a_{23} \\ a_{32} & a_{33} \end{pmatrix} - a_{12} \det \begin{pmatrix} a_{21} & a_{23} \\ a_{31} & a_{33} \end{pmatrix} + a_{13} \det \begin{pmatrix} a_{21} & a_{22} \\ a_{31} & a_{32} \end{pmatrix} \\ &= a_{11}(a_{22}a_{33} - a_{32}a_{23}) - a_{12}(a_{21}a_{33} - a_{31}a_{23}) + a_{13}(a_{21}a_{32} - a_{31}a_{22}). \end{aligned}$$

On a une représentation graphique : c'est la règle attribuée à Sarrus (Pierre Sarrus (1798-1861)).

$$\begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix}$$

On a une représentation graphique : c'est la règle attribuée à Sarrus (Pierre Sarrus (1798-1861)).

$$\begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix} \begin{matrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \\ a_{31} & a_{32} \end{matrix}$$

On a une représentation graphique : c'est la règle attribuée à Sarrus (Pierre Sarrus (1798-1861)).

$$\begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix} \begin{matrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \\ a_{31} & a_{32} \end{matrix}$$

On a une représentation graphique : c'est la règle attribuée à Sarrus (Pierre Sarrus (1798-1861)).

$$\begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{21} & a_{22} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{31} & a_{32} \end{pmatrix}$$

On a une représentation graphique : c'est la règle attribuée à Sarrus (Pierre Sarrus (1798-1861)).

$$\begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix} \begin{matrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \\ a_{31} & a_{32} \end{matrix}$$

- Attention : cela ne vaut que pour les matrices carrées de taille 3.
- Dans beaucoup de cas, il vaut mieux utiliser la règle des cofacteurs.

4

$$\begin{aligned} \det \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{pmatrix} &= a_{11} \mathcal{A}_{11} + a_{12} \mathcal{A}_{12} + a_{13} \mathcal{A}_{13} + a_{14} \mathcal{A}_{14} \\ &= a_{11} \det \begin{pmatrix} a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{pmatrix} - a_{12} \det \begin{pmatrix} a_{21} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{33} & a_{34} \\ a_{41} & a_{43} & a_{44} \end{pmatrix} \\ &\quad + a_{13} \det \begin{pmatrix} a_{21} & a_{22} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{34} \\ a_{41} & a_{42} & a_{44} \end{pmatrix} - a_{14} \det \begin{pmatrix} a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} \end{pmatrix}. \end{aligned}$$



Propriétés I

Proposition

- 1 *Le déterminant est une application multilinéaire sur les colonnes des matrices : on a pour tous $C_1, \dots, C_n, C'_i \in \mathbb{R}^n$, tout réel λ et tout $i \leq n$*
 - 1 $\det(C_1 \dots C_i + C'_i \dots C_n) = \det(C_1 \dots C_i \dots C_n) + \det(C_1 \dots C'_i \dots C_n)$,
 - 2 $\det(C_1 \dots \lambda C_i \dots C_n) = \lambda \det(C_1 \dots C_i \dots C_n)$.
- 2 *Le déterminant est antisymétrique sur les colonnes : une matrice A et une matrice A' obtenue en permutant deux colonnes de A ont des déterminants opposés.*
- 3 *Le déterminant de la matrice identité I_n vaut 1.*
- 4 *Pour tout $n \in \mathbb{N}_0$, l'application déterminant est l'unique application définie sur \mathbb{R}_n^n à valeurs réelles et satisfaisant ces trois propriétés.*

Propriétés II

Proposition

- ① Pour tout $A \in \mathbb{R}_n^n$, on a pour tout $i \leq n$

$$\det(A) = \sum_{j=1}^n a_{i,j} \mathcal{A}_{i,j}.$$

- ② Pour tout $j \leq n$

$$\det(A) = \sum_{i=1}^n a_{i,j} \mathcal{A}_{i,j}.$$

Ce sont des règles des cofacteurs pour les lignes et les colonnes.

- ③ On a aussi $\det(A) = \det(A^\sim)$ et $\det(AB) = \det(A) \det(B)$ pour toute matrice $B \in \mathbb{R}_n^n$.
- ④ L'application déterminant est multilinéaire sur les lignes.

Propriétés II

Proposition

- ① Pour tout $A \in \mathbb{R}_n^n$, on a pour tout $i \leq n$

$$\det(A) = \sum_{j=1}^n a_{i,j} \mathcal{A}_{i,j}.$$

- ② Pour tout $j \leq n$

$$\det(A) = \sum_{i=1}^n a_{i,j} \mathcal{A}_{i,j}.$$

Ce sont des règles des cofacteurs pour les lignes et les colonnes.

- ③ On a aussi $\det(A) = \det(A^\sim)$ et $\det(AB) = \det(A) \det(B)$ pour toute matrice $B \in \mathbb{R}_n^n$.
- ④ L'application déterminant est multilinéaire sur les lignes.

Exercice : vérifier toutes ces propriétés sur des matrices carrées de taille 3.

Exercices

Calculer les déterminants des matrices suivantes.

$$1) \begin{pmatrix} 1 & 2 \\ -4 & 3 \end{pmatrix}$$

$$2) \begin{pmatrix} 1 & 2 \\ 2 & 4 \end{pmatrix}$$

$$3) \begin{pmatrix} 1 & x \\ 7 & y \end{pmatrix}$$

$$4) \begin{pmatrix} 7 & 0 \\ 12 & 0 \end{pmatrix}$$

$$5) \begin{pmatrix} x & y & z \\ 7 & 0 & 2 \\ -1 & 2 & -3 \end{pmatrix}$$

$$6) \begin{pmatrix} 7 & -1 & x \\ 2 & 5 & y \\ 1 & 0 & z \end{pmatrix}$$

$$7) \begin{pmatrix} 1 & 3 & 4 \\ 2 & 5 & 7 \\ 3 & 0 & 3 \end{pmatrix}$$

$$8) \begin{pmatrix} 1 & 3 & 4 & x \\ 2 & 5 & 7 & y \\ 3 & 0 & 3 & z \\ 1 & 1 & 1 & t \end{pmatrix}$$

$$9) \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & x \\ 2 & 5 & 0 & y \\ 3 & 0 & 3 & z \\ 1 & 1 & 1 & t \end{pmatrix}$$

Utilité majeure du déterminant

Proposition

Les éléments C_1, \dots, C_n de \mathbb{R}^n sont linéairement *dépendants* si, et seulement si on a $\det(C_1, \dots, C_n) = 0$.

Utilité majeure du déterminant

Proposition

Les éléments C_1, \dots, C_n de \mathbb{R}^n sont linéairement *dépendants* si, et seulement si on a $\det(C_1, \dots, C_n) = 0$.

Utilité :

- 1 Démontrer que les vecteurs $u = \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \end{pmatrix}$ et $v = \begin{pmatrix} 7 \\ 6 \end{pmatrix}$ sont linéairement indépendants dans \mathbb{R}^2 .
- 2 Etudier la dépendance linéaire de $u = \begin{pmatrix} 1 \\ -2 \\ 3 \end{pmatrix}$, $v = \begin{pmatrix} 2 \\ 3 \\ 1 \end{pmatrix}$, $w = \begin{pmatrix} 8 \\ 5 \\ 9 \end{pmatrix}$ dans \mathbb{R}^3 .
- 3 Exprimer que $u = \begin{pmatrix} 1 \\ -2 \\ 3 \end{pmatrix}$, $v = \begin{pmatrix} 2 \\ 3 \\ 1 \end{pmatrix}$, $w = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix}$ sont linéairement dépendants dans \mathbb{R}^3 .

Rangs de matrices

Definition

Soit $A \in \mathbb{R}_p^n$. Le *rang* de A est le nombre maximal de colonnes de A linéairement indépendantes (dans \mathbb{R}^n). On le note $\text{rg}(A)$ ou $\rho(A)$.

Proposition

Le rang d'une matrice $A \in \mathbb{R}_p^n$ est l'ordre du plus grand mineur non nul de A . C'est aussi le nombre maximal de lignes linéairement indépendantes de A .

Le rang permet donc de “compter de manière intelligente” les colonnes d'une matrice, ou ses lignes.

Rangs de matrices

Definition

Soit $A \in \mathbb{R}_p^n$. Le *rang* de A est le nombre maximal de colonnes de A linéairement indépendantes (dans \mathbb{R}^n). On le note $\text{rg}(A)$ ou $\rho(A)$.

Proposition

Le rang d'une matrice $A \in \mathbb{R}_p^n$ est l'ordre du plus grand mineur non nul de A . C'est aussi le nombre maximal de lignes linéairement indépendantes de A .

Le rang permet donc de “compter de manière intelligente” les colonnes d'une matrice, ou ses lignes. Exemples :

$$\text{rg} \begin{pmatrix} 1 & 2 \\ 2 & 4 \\ 3 & 6 \end{pmatrix} = 1, \quad \text{rg} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 2 \\ 2 & 2 & 4 \\ 3 & 4 & 7 \end{pmatrix} = 2, \quad \text{rg} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 2 & 0 & 3 \end{pmatrix} = 2.$$

Systèmes linéaires : définitions

Un système d'équations linéaires à p équations et n inconnues (que nous notons x_1, \dots, x_n) est un ensemble d'équations de la forme

$$\begin{cases} a_{11}x_1 + \cdots + a_{1n}x_n = b_1 \\ \vdots \\ a_{p1}x_1 + \cdots + a_{pn}x_n = b_p, \end{cases}$$

où les coefficients $a_{11}, \dots, a_{pn}, b_1, \dots, b_p$ sont réels. On note un tel système (S) pour faire court.

Systèmes linéaires : définitions

Un système d'équations linéaires à p équations et n inconnues (que nous notons x_1, \dots, x_n) est un ensemble d'équations de la forme

$$\begin{cases} a_{11}x_1 + \cdots + a_{1n}x_n = b_1 \\ \vdots \\ a_{p1}x_1 + \cdots + a_{pn}x_n = b_p, \end{cases}$$

où les coefficients $a_{11}, \dots, a_{pn}, b_1, \dots, b_p$ sont réels. On note un tel système (S) pour faire court.

- Une *solution* d'un système (S) d'équations est un n -uplet $(x_1, \dots, x_n) \sim$ de \mathbb{R}^n qui satisfait *simultanément* toutes les équations de (S) .

Systèmes linéaires : définitions

Un système d'équations linéaires à p équations et n inconnues (que nous notons x_1, \dots, x_n) est un ensemble d'équations de la forme

$$\begin{cases} a_{11}x_1 + \cdots + a_{1n}x_n = b_1 \\ \vdots \\ a_{p1}x_1 + \cdots + a_{pn}x_n = b_p, \end{cases}$$

où les coefficients $a_{11}, \dots, a_{pn}, b_1, \dots, b_p$ sont réels. On note un tel système (S) pour faire court.

- Une *solution* d'un système (S) d'équations est un n -uplet $(x_1, \dots, x_n) \sim$ de \mathbb{R}^n qui satisfait *simultanément* toutes les équations de (S) .
- Le système (S) est dit *compatible* s'il admet au moins une solution.

Systèmes linéaires : définitions

Un système d'équations linéaires à p équations et n inconnues (que nous notons x_1, \dots, x_n) est un ensemble d'équations de la forme

$$\begin{cases} a_{11}x_1 + \cdots + a_{1n}x_n = b_1 \\ \vdots \\ a_{p1}x_1 + \cdots + a_{pn}x_n = b_p, \end{cases}$$

où les coefficients $a_{11}, \dots, a_{pn}, b_1, \dots, b_p$ sont réels. On note un tel système (S) pour faire court.

- Une *solution* d'un système (S) d'équations est un n -uplet $(x_1, \dots, x_n) \sim$ de \mathbb{R}^n qui satisfait *simultanément* toutes les équations de (S) .
- Le système (S) est dit *compatible* s'il admet au moins une solution.
- Il est dit *incompatible* dans le cas contraire.

Systèmes linéaires : définitions

Un système d'équations linéaires à p équations et n inconnues (que nous notons x_1, \dots, x_n) est un ensemble d'équations de la forme

$$\begin{cases} a_{11}x_1 + \cdots + a_{1n}x_n = b_1 \\ \vdots \\ a_{p1}x_1 + \cdots + a_{pn}x_n = b_p, \end{cases}$$

où les coefficients $a_{11}, \dots, a_{pn}, b_1, \dots, b_p$ sont réels. On note un tel système (S) pour faire court.

- Une *solution* d'un système (S) d'équations est un n -uplet $(x_1, \dots, x_n) \sim$ de \mathbb{R}^n qui satisfait *simultanément* toutes les équations de (S) .
- Le système (S) est dit *compatible* s'il admet au moins une solution.
- Il est dit *incompatible* dans le cas contraire.
- Les nombres b_1, \dots, b_p constituent les *termes indépendants*.

Systèmes linéaires : définitions

Un système d'équations linéaires à p équations et n inconnues (que nous notons x_1, \dots, x_n) est un ensemble d'équations de la forme

$$\begin{cases} a_{11}x_1 + \cdots + a_{1n}x_n = b_1 \\ \vdots \\ a_{p1}x_1 + \cdots + a_{pn}x_n = b_p, \end{cases}$$

où les coefficients $a_{11}, \dots, a_{pn}, b_1, \dots, b_p$ sont réels. On note un tel système (S) pour faire court.

- Une *solution* d'un système (S) d'équations est un n -uplet $(x_1, \dots, x_n) \sim$ de \mathbb{R}^n qui satisfait *simultanément* toutes les équations de (S) .
- Le système (S) est dit *compatible* s'il admet au moins une solution.
- Il est dit *incompatible* dans le cas contraire.
- Les nombres b_1, \dots, b_p constituent les *termes indépendants*.
- Le système (S) est *homogène* si $b_1 = \dots = b_p = 0$.

Systèmes linéaires : définitions

Un système d'équations linéaires à p équations et n inconnues (que nous notons x_1, \dots, x_n) est un ensemble d'équations de la forme

$$\begin{cases} a_{11}x_1 + \cdots + a_{1n}x_n = b_1 \\ \vdots \\ a_{p1}x_1 + \cdots + a_{pn}x_n = b_p, \end{cases}$$

où les coefficients $a_{11}, \dots, a_{pn}, b_1, \dots, b_p$ sont réels. On note un tel système (S) pour faire court.

- Une *solution* d'un système (S) d'équations est un n -uplet $(x_1, \dots, x_n) \sim$ de \mathbb{R}^n qui satisfait *simultanément* toutes les équations de (S) .
- Le système (S) est dit *compatible* s'il admet au moins une solution.
- Il est dit *incompatible* dans le cas contraire.
- Les nombres b_1, \dots, b_p constituent les *termes indépendants*.
- Le système (S) est *homogène* si $b_1 = \dots = b_p = 0$.
- A tout système (S) , on peut associer un système homogène en remplaçant b_1, \dots, b_p par 0.

Systèmes linéaires : formes alternatives

- Forme “vectorielle” dans \mathbb{R}^p : on exprime les p équations comme une seule équation dans \mathbb{R}^p : Le système (S) s’écrit aussi

$$x_1 \begin{pmatrix} a_{11} \\ \vdots \\ a_{p1} \end{pmatrix} + \cdots + x_n \begin{pmatrix} a_{1n} \\ \vdots \\ a_{pn} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} b_1 \\ \vdots \\ b_p \end{pmatrix}$$

Systèmes linéaires : formes alternatives

- Forme “vectorielle” dans \mathbb{R}^p : on exprime les p équations comme une seule équation dans \mathbb{R}^p : Le système (S) s’écrit aussi

$$x_1 \begin{pmatrix} a_{11} \\ \vdots \\ a_{p1} \end{pmatrix} + \cdots + x_n \begin{pmatrix} a_{1n} \\ \vdots \\ a_{pn} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} b_1 \\ \vdots \\ b_p \end{pmatrix}$$

- Forme matricielle : le système s’écrit alors

$$\underbrace{\begin{pmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{p1} & \cdots & a_{pn} \end{pmatrix}}_A \underbrace{\begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix}}_X = \underbrace{\begin{pmatrix} b_1 \\ \vdots \\ b_p \end{pmatrix}}_b,$$

ou encore $AX = b$.

Systèmes linéaires : formes alternatives

- Forme “vectorielle” dans \mathbb{R}^p : on exprime les p équations comme une seule équation dans \mathbb{R}^p : Le système (S) s’écrit aussi

$$x_1 \begin{pmatrix} a_{11} \\ \vdots \\ a_{p1} \end{pmatrix} + \cdots + x_n \begin{pmatrix} a_{1n} \\ \vdots \\ a_{pn} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} b_1 \\ \vdots \\ b_p \end{pmatrix}$$

- Forme matricielle : le système s’écrit alors

$$\underbrace{\begin{pmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{p1} & \cdots & a_{pn} \end{pmatrix}}_A \underbrace{\begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix}}_X = \underbrace{\begin{pmatrix} b_1 \\ \vdots \\ b_p \end{pmatrix}}_b,$$

ou encore $AX = b$.

- La matrice A est appelée matrice du système et le vecteur $b \in \mathbb{R}^p$ terme indépendant.

Exemples

L'ensemble d'équations

$$(S) : \begin{cases} 2x_1 - x_2 + x_3 & = & 1 \\ 3x_1 - 5x_2 + 4x_3 & = & 0 \end{cases}$$

est un système linéaire de 2 équations à 3 inconnues. Il peut être mis sous forme matricielle en

$$\begin{pmatrix} 2 & -1 & 1 \\ 3 & -5 & 4 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Il s'agit d'un système compatible puisque le triplet $(5/7, 3/7, 0)$ est une solution de (S) .

Ce système n'est pas homogène puisque son terme indépendant est $(1, 0)^\sim$, mais le système homogène associé à (S) est

$$(S_0) : \begin{cases} 2x_1 - x_2 + x_3 & = & 0 \\ 3x_1 - 5x_2 + 4x_3 & = & 0 \end{cases}$$

Systemes equivalents

Definition

Un systeme lineaire qui admet une solution unique est dit *determine*. S'il admet plusieurs solutions, il est dit *indetermine*. Deux systemes lineaires a n inconnues (S) et (S') sont dits *equivalents* s'ils ont les memes ensembles de solutions. On note alors $(S) \Leftrightarrow (S')$.

Systèmes équivalents

Definition

Un système linéaire qui admet une solution unique est dit *déterminé*. S'il admet plusieurs solutions, il est dit *indéterminé*. Deux systèmes linéaires à n inconnues (S) et (S') sont dits *équivalents* s'ils ont les mêmes ensembles de solutions. On note alors $(S) \Leftrightarrow (S')$.

Exemples : on a

$$\begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ -1 & 2 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \Leftrightarrow \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 1 & 2 & 3 \\ -1 & 2 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Systèmes équivalents

Definition

Un système linéaire qui admet une solution unique est dit *déterminé*. S'il admet plusieurs solutions, il est dit *indéterminé*. Deux systèmes linéaires à n inconnues (S) et (S') sont dits *équivalents* s'ils ont les mêmes ensembles de solutions. On note alors $(S) \Leftrightarrow (S')$.

Exemples : on a

$$\begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ -1 & 2 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \Leftrightarrow \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 1 & 2 & 3 \\ -1 & 2 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}$$

De même :

$$(S_1) : \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ -1 & 2 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \Leftrightarrow (S_2) : \begin{pmatrix} 1 & 6 & 7 \\ 1 & 2 & 3 \\ -1 & 2 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Systèmes équivalents

Definition

Un système linéaire qui admet une solution unique est dit *déterminé*. S'il admet plusieurs solutions, il est dit *indéterminé*. Deux systèmes linéaires à n inconnues (S) et (S') sont dits *équivalents* s'ils ont les mêmes ensembles de solutions. On note alors $(S) \Leftrightarrow (S')$.

Exemples : on a

$$\begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ -1 & 2 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \Leftrightarrow \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 1 & 2 & 3 \\ -1 & 2 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}$$

De même :

$$(S_1) : \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ -1 & 2 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \Leftrightarrow (S_2) : \begin{pmatrix} 1 & 6 & 7 \\ 1 & 2 & 3 \\ -1 & 2 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Conclusion : le nombre d'équations n'est pas important, mais bien le nombre d'équations utiles.

Premiers résultats

Definition

Si $A \in \mathbb{R}_n^p$ et $B \in \mathbb{R}_m^p$, on note $(A|B)$ la matrice dont les colonnes sont celles de A suivies de celles de B .

Premiers résultats

Definition

Si $A \in \mathbb{R}_n^p$ et $B \in \mathbb{R}_m^p$, on note $(A|B)$ la matrice dont les colonnes sont celles de A suivies de celles de B .

Le nombre maximal d'équations utiles (indépendantes) dans le système linéaire $AX = b$ est donc $\text{rg}(A|b)$. Ce nombre, avec $\text{rg}(A)$ gouverne la compatibilité de ce système.

Premiers résultats

Definition

Si $A \in \mathbb{R}_n^p$ et $B \in \mathbb{R}_m^p$, on note $(A|B)$ la matrice dont les colonnes sont celles de A suivies de celles de B .

Le nombre maximal d'équations utiles (indépendantes) dans le système linéaire $AX = b$ est donc $\text{rg}(A|b)$. Ce nombre, avec $\text{rg}(A)$ gouverne la compatibilité de ce système.

Proposition

Un système linéaire à p équations et n inconnues qui s'écrit $Ax = b$ est compatible si, et seulement si, on a $\text{rg}(A) = \text{rg}(A|b)$.

Un système homogène à p équations et n inconnues $AX = 0$ est toujours compatible. L'ensemble de ses solutions est un sous-espace vectoriel de \mathbb{R}^n de dimension $n - \text{rg}(A)$.

Exercice démontrer que $\{X \in \mathbb{R}^n : AX = 0\}$ est un sous-espace vectoriel, en utilisant les propriétés du produit matriciel.



Exercices

- ① Le système d'équations à trois inconnues

$$\begin{cases} 3x_1 + 2x_2 + x_3 = 1 \\ x_1 + 2x_2 + 3x_3 = 7 \\ x_1 + x_2 + x_3 = 2 \end{cases}$$

est compatible. L'ensemble des solutions du système homogène associé est un sous-espace vectoriel de \mathbb{R}^3 de dimension 2.

- ② Le système d'équations à deux inconnues x et y

$$\begin{cases} 3x + 5y = 4 \\ 6x + \lambda y = 10 \end{cases}$$

est compatible pour tout $\lambda \in \mathbb{R} \setminus \{10\}$. Il est incompatible pour $\lambda = 10$. L'ensemble des solutions du système homogène associé est un sous-espace vectoriel de dimension 0 si $\lambda \neq 10$ et de dimension 1 si $\lambda = 10$.

- ③ Si $(u_1, u_2) \sim \in \mathbb{R}^2 \setminus \{0\}$, alors le système d'équations

$$\begin{cases} u_1 x = a \\ u_2 x = b \end{cases}$$

est compatible si, et seulement si, on a $\det \begin{pmatrix} u_1 & a \\ u_2 & b \end{pmatrix} = 0$.



- 4 Si $(u_1, u_2, u_3)^\sim$ et $(v_1, v_2, v_3)^\sim$ sont linéairement indépendants dans \mathbb{R}^3 , alors le système d'équations

$$\begin{cases} u_1x + v_1y = a \\ u_2x + v_2y = b \\ u_3x + v_3y = c \end{cases}$$

est compatible si, et seulement si, on a

$$\det \begin{pmatrix} u_1 & v_1 & a \\ u_2 & v_2 & b \\ u_3 & v_3 & c \end{pmatrix} = 0.$$

- 5 L'ensemble des solutions du système d'équations à 3 inconnues

$$x_1 + x_2 + x_3 = 0$$

est un sous-espace vectoriel de \mathbb{R}^3 de dimension 2. Exprimer les solutions comme combinaisons linéaires de deux vecteurs.

- 6 L'ensemble des solutions du système d'équations à 4 inconnues

$$\begin{cases} x_1 - x_2 + x_3 - x_4 = 0 \\ 3x_1 - 2x_2 + x_3 - x_4 = 0 \end{cases}$$

est un sous-espace vectoriel de \mathbb{R}^4 , de dimension 2. Exprimer l'ensemble des solutions comme une enveloppe linéaire.

Systèmes généraux et résolution

Proposition

Soient $(S) : AX = b$ un système linéaire de p équations à n inconnues, compatible, et X_0 une solution (particulière) de ce système. Pour toute solution Y du système homogène associé $(S_0) : AX = 0$, $X_0 + Y$ est une solution de (S) . Réciproquement, toute solution de (S) est de cette forme. L'ensemble des solutions de (S) s'écrit donc

$$\{X_0 + Y : AY = 0\}.$$

Systèmes généraux et résolution

Proposition

Soient $(S) : AX = b$ un système linéaire de p équations à n inconnues, compatible, et X_0 une solution (particulière) de ce système. Pour toute solution Y du système homogène associé $(S_0) : AX = 0$, $X_0 + Y$ est une solution de (S) . Réciproquement, toute solution de (S) est de cette forme. L'ensemble des solutions de (S) s'écrit donc

$$\{X_0 + Y : AY = 0\}.$$

La résolution de tels systèmes peut se faire à l'aide de la méthode du pivot de Gauss ou par substitution : on exprime une inconnue en fonction des autres dans une des équations, et on substitue la valeur trouvée dans toutes les autres. On transforme ainsi un système en un système équivalent, mais plus simple.

Calcul pratique du rang : déterminants bordés

Le calcul systématique du rang nécessite l'évaluation de beaucoup de déterminants. Pour rappel :

Proposition

Une matrice est de rang r si :

- ① *Elle admet un mineur d'ordre r non nul ;*
- ② *Tous les mineurs d'ordre strictement supérieur à r sont nuls.*

Calcul pratique du rang : déterminants bordés

Le calcul systématique du rang nécessite l'évaluation de beaucoup de déterminants. Pour rappel :

Proposition

Une matrice est de rang r si :

- ① *Elle admet un mineur d'ordre r non nul ;*
- ② *Tous les mineurs d'ordre strictement supérieur à r sont nuls.*

Definition

Soit $A \in \mathbb{R}_p^n$ et B une sous-matrice de A de type (r, r) . Une sous-matrice B' de A borde B si B' est de type $(r + 1, r + 1)$ et si B est une sous-matrice de B' .

Calcul pratique du rang : déterminants bordés

Le calcul systématique du rang nécessite l'évaluation de beaucoup de déterminants. Pour rappel :

Proposition

Une matrice est de rang r si :

- ① *Elle admet un mineur d'ordre r non nul ;*
- ② *Tous les mineurs d'ordre strictement supérieur à r sont nuls.*

Definition

Soit $A \in \mathbb{R}_p^n$ et B une sous-matrice de A de type (r, r) . Une sous-matrice B' de A borde B si B' est de type $(r + 1, r + 1)$ et si B est une sous-matrice de B' .

En d'autres termes B' borde B si B' est obtenue en sélectionnant dans A toutes les rangées de B , et une colonne et une ligne de plus.

Calcul pratique du rang : déterminants bordés

Le calcul systématique du rang nécessite l'évaluation de beaucoup de déterminants. Pour rappel :

Proposition

Une matrice est de rang r si :

- 1 Elle admet un mineur d'ordre r non nul ;
- 2 Tous les mineurs d'ordre strictement supérieur à r sont nuls.

Definition

Soit $A \in \mathbb{R}_p^n$ et B une sous-matrice de A de type (r, r) . Une sous-matrice B' de A borde B si B' est de type $(r+1, r+1)$ et si B est une sous-matrice de B' .

En d'autres termes B' borde B si B' est obtenue en sélectionnant dans A toutes les rangées de B , et une colonne et une ligne de plus.

Cette définition se transpose directement en termes de mineurs.



Un exemple

Exemples : si

$$A = \begin{pmatrix} 3 & 1 & \pi & 0 \\ 0 & e & 3 & -2 \\ -1 & 3 & 2,7 & 0,5 \\ 0 & \sqrt{2} & \sqrt{3} & 1 \\ -3 & \sqrt{2} & 2 & 4 \end{pmatrix}, \quad B = A_{1,2;1,3} = \begin{pmatrix} 3 & \pi \\ 0 & 3 \end{pmatrix}$$

alors les sous-matrices qui bordent B sont

$$A_{(1,2,3;1,2,3)} =$$

Un exemple

Exemples : si

$$A = \begin{pmatrix} 3 & 1 & \pi & 0 \\ 0 & e & 3 & -2 \\ -1 & 3 & 2,7 & 0,5 \\ 0 & \sqrt{2} & \sqrt{3} & 1 \\ -3 & \sqrt{2} & 2 & 4 \end{pmatrix}, \quad B = A_{1,2;1,3} = \begin{pmatrix} 3 & \pi \\ 0 & 3 \end{pmatrix}$$

alors les sous-matrices qui bordent B sont

$$A_{(1,2,3;1,2,3)} = \begin{pmatrix} 3 & 1 & \pi \\ 0 & e & 3 \\ -1 & 3 & 2,7 \end{pmatrix}, \quad A_{(1,2,3;1,3,4)} =$$

Un exemple

Exemples : si

$$A = \begin{pmatrix} 3 & 1 & \pi & 0 \\ 0 & e & 3 & -2 \\ -1 & 3 & 2,7 & 0,5 \\ 0 & \sqrt{2} & \sqrt{3} & 1 \\ -3 & \sqrt{2} & 2 & 4 \end{pmatrix}, \quad B = A_{1,2;1,3} = \begin{pmatrix} 3 & \pi \\ 0 & 3 \end{pmatrix}$$

alors les sous-matrices qui bordent B sont

$$A_{(1,2,3;1,2,3)} = \begin{pmatrix} 3 & 1 & \pi \\ 0 & e & 3 \\ -1 & 3 & 2,7 \end{pmatrix}, \quad A_{(1,2,3;1,3,4)} = \begin{pmatrix} 3 & \pi & 0 \\ 0 & 3 & -2 \\ -1 & 2,7 & 0,5 \end{pmatrix},$$

Un exemple

Exemples : si

$$A = \begin{pmatrix} 3 & 1 & \pi & 0 \\ 0 & e & 3 & -2 \\ -1 & 3 & 2,7 & 0,5 \\ 0 & \sqrt{2} & \sqrt{3} & 1 \\ -3 & \sqrt{2} & 2 & 4 \end{pmatrix}, \quad B = A_{1,2;1,3} = \begin{pmatrix} 3 & \pi \\ 0 & 3 \end{pmatrix}$$

alors les sous-matrices qui bordent B sont

$$A_{(1,2,3;1,2,3)} = \begin{pmatrix} 3 & 1 & \pi \\ 0 & e & 3 \\ -1 & 3 & 2,7 \end{pmatrix}, \quad A_{(1,2,3;1,3,4)} = \begin{pmatrix} 3 & \pi & 0 \\ 0 & 3 & -2 \\ -1 & 2,7 & 0,5 \end{pmatrix},$$

$$A_{(1,2,4;1,2,3)} =$$

Un exemple

Exemples : si

$$A = \begin{pmatrix} 3 & 1 & \pi & 0 \\ 0 & e & 3 & -2 \\ -1 & 3 & 2,7 & 0,5 \\ 0 & \sqrt{2} & \sqrt{3} & 1 \\ -3 & \sqrt{2} & 2 & 4 \end{pmatrix}, \quad B = A_{1,2;1,3} = \begin{pmatrix} 3 & \pi \\ 0 & 3 \end{pmatrix}$$

alors les sous-matrices qui bordent B sont

$$A_{(1,2,3;1,2,3)} = \begin{pmatrix} 3 & 1 & \pi \\ 0 & e & 3 \\ -1 & 3 & 2,7 \end{pmatrix}, \quad A_{(1,2,3;1,3,4)} = \begin{pmatrix} 3 & \pi & 0 \\ 0 & 3 & -2 \\ -1 & 2,7 & 0,5 \end{pmatrix},$$

$$A_{(1,2,4;1,2,3)} = \begin{pmatrix} 3 & 1 & \pi \\ 0 & e & 3 \\ 0 & \sqrt{2} & \sqrt{3} \end{pmatrix}, \quad A_{(1,2,4;1,3,4)} =$$

Un exemple

Exemples : si

$$A = \begin{pmatrix} 3 & 1 & \pi & 0 \\ 0 & e & 3 & -2 \\ -1 & 3 & 2,7 & 0,5 \\ 0 & \sqrt{2} & \sqrt{3} & 1 \\ -3 & \sqrt{2} & 2 & 4 \end{pmatrix}, \quad B = A_{1,2;1,3} = \begin{pmatrix} 3 & \pi \\ 0 & 3 \end{pmatrix}$$

alors les sous-matrices qui bordent B sont

$$A_{(1,2,3;1,2,3)} = \begin{pmatrix} 3 & 1 & \pi \\ 0 & e & 3 \\ -1 & 3 & 2,7 \end{pmatrix}, \quad A_{(1,2,3;1,3,4)} = \begin{pmatrix} 3 & \pi & 0 \\ 0 & 3 & -2 \\ -1 & 2,7 & 0,5 \end{pmatrix},$$

$$A_{(1,2,4;1,2,3)} = \begin{pmatrix} 3 & 1 & \pi \\ 0 & e & 3 \\ 0 & \sqrt{2} & \sqrt{3} \end{pmatrix}, \quad A_{(1,2,4;1,3,4)} = \begin{pmatrix} 3 & \pi & 0 \\ 0 & 3 & -2 \\ 0 & \sqrt{3} & 1 \end{pmatrix},$$

Un exemple

Exemples : si

$$A = \begin{pmatrix} 3 & 1 & \pi & 0 \\ 0 & e & 3 & -2 \\ -1 & 3 & 2,7 & 0,5 \\ 0 & \sqrt{2} & \sqrt{3} & 1 \\ -3 & \sqrt{2} & 2 & 4 \end{pmatrix}, \quad B = A_{1,2;1,3} = \begin{pmatrix} 3 & \pi \\ 0 & 3 \end{pmatrix}$$

alors les sous-matrices qui bordent B sont

$$A_{(1,2,3;1,2,3)} = \begin{pmatrix} 3 & 1 & \pi \\ 0 & e & 3 \\ -1 & 3 & 2,7 \end{pmatrix}, \quad A_{(1,2,3;1,3,4)} = \begin{pmatrix} 3 & \pi & 0 \\ 0 & 3 & -2 \\ -1 & 2,7 & 0,5 \end{pmatrix},$$

$$A_{(1,2,4;1,2,3)} = \begin{pmatrix} 3 & 1 & \pi \\ 0 & e & 3 \\ 0 & \sqrt{2} & \sqrt{3} \end{pmatrix}, \quad A_{(1,2,4;1,3,4)} = \begin{pmatrix} 3 & \pi & 0 \\ 0 & 3 & -2 \\ 0 & \sqrt{3} & 1 \end{pmatrix},$$

et finalement $A_{(1,2,5;1,2,3)}$, $A_{(1,2,5;1,3,4)}$. Il n'y en a donc que 6, contre 40 sous-matrices d'ordre 3.

Calcul du rang

Proposition

Soit $A \in \mathbb{R}_n^p$. Le rang de A est r si, et seulement si,

- 1 la matrice A admet un mineur d'ordre r non nul ;
- 2 tous les mineurs d'ordre $r + 1$ qui bordent ce mineur sont nuls.

Calcul du rang

Proposition

Soit $A \in \mathbb{R}_n^p$. Le rang de A est r si, et seulement si,

- 1 la matrice A admet un mineur d'ordre r non nul ;
- 2 tous les mineurs d'ordre $r + 1$ qui bordent ce mineur sont nuls.

Utilités :

- 1 Réduire fortement le nombre de déterminants à calculer pour calculer le rang ;
- 2 Compter le nombre utiles de conditions pour que le rang soit r . Ce sera utile pour les équations de sous-espaces vectoriels.

Calcul du rang

Proposition

Soit $A \in \mathbb{R}_n^p$. Le rang de A est r si, et seulement si,

- 1 la matrice A admet un mineur d'ordre r non nul ;
- 2 tous les mineurs d'ordre $r + 1$ qui bordent ce mineur sont nuls.

Utilités :

- 1 Réduire fortement le nombre de déterminants à calculer pour calculer le rang ;
- 2 Compter le nombre utiles de conditions pour que le rang soit r . Ce sera utile pour les équations de sous-espaces vectoriels.

A utiliser en plus : le rang de A est inférieur ou égal au nombre de lignes et au nombre de colonnes de A . Il ne peut pas diminuer si on ajoute une colonne à la matrice (ou une ligne).

Exercices

Calculer les rangs des matrices suivantes.

$$1) \begin{pmatrix} 1 & 2 \\ -4 & 3 \\ 14 & -5 \end{pmatrix} \quad 2) \begin{pmatrix} 1 & 2 \\ 2 & 4 \\ 4 & 8 \end{pmatrix} \quad 3) \begin{pmatrix} 1 & 2 & 6 \\ 1 & 3 & 8 \\ 2 & 3 & 10 \\ -2 & 4 & 4 \end{pmatrix}$$

Exprimer les égalités suivantes pour les nombres x, y, z, t .

$$4) \operatorname{rg} \begin{pmatrix} 7 & x \\ 12 & y \end{pmatrix} = 1 \quad 5) \operatorname{rg} \begin{pmatrix} 1 & 0 & x \\ 2 & 3 & y \\ -1 & 2 & z \end{pmatrix} = 2 \quad 6) \operatorname{rg} \begin{pmatrix} 7 & -1 & x \\ 2 & 5 & y \\ 1 & 0 & z \end{pmatrix} = 2$$

$$7) \operatorname{rg} \begin{pmatrix} 1 & 3 & x \\ 2 & 5 & y \\ 3 & 0 & z \\ 2 & 1 & t \end{pmatrix} = 2 \quad 8) \operatorname{rg} \begin{pmatrix} 1 & 3 & 4 & x \\ 2 & 5 & 7 & y \\ 3 & 0 & 3 & z \\ 1 & 1 & 2 & t \end{pmatrix} = 2 \quad 9) \operatorname{rg} \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & x \\ 2 & 5 & 0 & y \\ 3 & 0 & 3 & z \\ 1 & 1 & 1 & t \end{pmatrix} = 3.$$