

Chapitre 2 : Applications linéaires et matrices

ÉQUIPE DE MATHÉMATIQUES APPLIQUÉES

UTC

juillet 2026



Chapitre 2

Applications linéaires et matrices

2.1	Applications linéaires	3
2.2	Matrices	23

[Sommaire](#)
[Concepts](#)

[Exemples](#)
[Exercices](#)
[Documents](#)

2.1 Applications linéaires

2.1.1	Application linéaire - définition	4
2.1.2	Espace vectoriel $\mathcal{L}(E; F)$	5
2.1.3	Noyau et image d'une application linéaire	6
2.1.4	Image d'une famille liée, image d'une famille génératrice de E	8
2.1.5	Projection	9
2.1.6	Composition de deux applications linéaires	11
2.1.7	Application linéaire entre espaces de dimension finie	12
2.1.8	Caractérisation de l'injectivité	14
2.1.9	Caractérisation de surjective, bijective	16
2.1.10	Isomorphismes	18
2.1.11	Isomorphisme entre E et K^n	20
2.1.12	Formes linéaires	21

[Sommaire](#)
[Concepts](#)

[Exemples](#)
[Exercices](#)
[Documents](#)

2.1.1 Application linéaire - définition

Exercices :

[Exercice A.1.1](#)

Dans tout ce chapitre E , F , G désignent des espaces vectoriels (en général de dimensions finies) sur un même corps commutatif $\mathbb{K}$.

Définition 2.1.1. On appelle **application linéaire** $u : E \rightarrow F$, une application de E dans F possédant les propriétés suivantes :

- $u(\vec{x} + \vec{y}) = u(\vec{x}) + u(\vec{y}) \quad \forall \vec{x}, \vec{y} \in E$,
- $u(\lambda \vec{x}) = \lambda u(\vec{x}) \quad \forall \vec{x} \in E, \forall \lambda \in \mathbb{K}$.

On notera $\mathcal{L}(E; F)$ l'ensemble des applications linéaires de E dans F .

L'application nulle qui à tout $\vec{x}$ associe le vecteur nul est bien sûr linéaire.

L'image par u du vecteur nul de E est toujours le vecteur nul de F : il suffit de choisir $\lambda = 0$ et l'on a $u(\vec{0}_E) = \vec{0}_F$.

L'application de $\mathbb{R}$ dans $\mathbb{R}$ qui à x associe e^x n'est pas linéaire, par contre l'application de $\mathbb{R}$ dans $\mathbb{R}$ qui à x associe $3x$ est linéaire.

[Sommaire](#)
[Concepts](#)

[Exemples](#)
[Exercices](#)
[Documents](#)

2.1.2 Espace vectoriel $\mathcal{L}(E; F)$

On peut définir la somme de deux applications u et v de $\mathcal{L}(E; F)$ par

$$(u \hat{+} v)(\vec{x}) = u(\vec{x}) + v(\vec{x}).$$

On peut alors vérifier que :

- $u \hat{+} v \in \mathcal{L}(E; F)$, donc $\hat{+}$ est une loi interne dans $\mathcal{L}(E; F)$.
- $\hat{+}$ est associative et commutative. Pour le démontrer, il suffit d'utiliser l'associativité et la commutativité de la loi $+$ dans F .
- l'application linéaire nulle est élément neutre.
- Pour toute application linéaire u , si on définit $\tilde{u}$ par $\tilde{u}(x) = -u(x)$, on peut vérifier que $\tilde{u} \in \mathcal{L}(E; F)$ et que, de plus, $u \hat{+} \tilde{u}$ est égale à l'application nulle.

$\mathcal{L}(E; F)$ muni de $\hat{+}$ a donc une structure de groupe commutatif.

Par ailleurs on peut définir la multiplication de u par un scalaire λ appartenant à $\mathbb{K}$:

$$(\lambda u)(\vec{x}) = \lambda u(\vec{x}).$$

Cette loi vérifie les 4 propriétés de la loi externe d'un espace vectoriel.

L'ensemble $\mathcal{L}(E; F)$ muni des 2 lois précédentes a donc une structure d'espace vectoriel sur $\mathbb{K}$.

On parlera dans la suite, de **l'espace vectoriel des applications linéaires de E dans F** . La loi $\hat{+}$ sera notée $+$.

[Sommaire](#)
[Concepts](#)

[Exemples](#)
[Exercices](#)
[Documents](#)

2.1.3 Noyau et image d'une application linéaire

Exercices :

[Exercice A.1.2](#)

[Exercice A.1.3](#)

Définition 2.1.2. Soit $u \in \mathcal{L}(E; F)$.

— On appelle **noyau** de u , et on note $\text{Ker } u$, le sous-ensemble de E défini par :

$$\text{Ker } u = \{\vec{x} \in E \mid u(\vec{x}) = \vec{0}_F\}.$$

— On appelle **image** de u , et on note $\text{Im } u$, le sous-ensemble de F défini par

$$\text{Im } u = \{\vec{y} \in F \mid \exists \vec{x} \in E, \vec{y} = u(\vec{x})\}.$$

Par exemple, si u est définie de $\mathbb{R}^3$ dans $\mathbb{R}$ par $u(\vec{x}) = u(x_1, x_2, x_3) = x_1 + 3x_2 + 5x_3$, alors $\text{Ker } u$ est le plan d'équation $x_1 + 3x_2 + 5x_3 = 0$ et $\text{Im } u = \mathbb{R}$.

Proposition 2.1.1.

- $\text{Ker } u$ est un sous-espace vectoriel de E .
- $\text{Im } u$ est un sous-espace vectoriel de F .

[Sommaire](#)
[Concepts](#)

[Exemples](#)
[Exercices](#)
[Documents](#)

Démonstration – Pour $\text{Ker } u$, faire la démonstration en exercice.

On démontre maintenant que $\text{Im } u$ est un sous-espace vectoriel de F .

Tout d'abord, $\vec{0}_F = u(\vec{0}_E)$ donc $\vec{0}_F$ appartient à $\text{Im } u$, donc $\text{Im } u$ est non vide.

D'autre part, si $\vec{y}$ et $\vec{y}'$ appartiennent à $\text{Im } u$ alors, par définition, il existe $\vec{x}$ et $\vec{x}'$ dans E tels que

$$\vec{y} = u(\vec{x}), \quad \vec{y}' = u(\vec{x}').$$

Donc, en utilisant la linéarité de u , on a

$$\vec{y} + \vec{y}' = u(\vec{x}) + u(\vec{x}') = u(\vec{x} + \vec{x}') \quad \text{donc} \quad \vec{y} + \vec{y}' \in \text{Im } u.$$

De plus, quel que soit λ appartenant à $\mathbb{K}$,

$$\lambda \vec{y} = \lambda u(\vec{x}) = u(\lambda \vec{x}) \quad \text{donc} \quad \lambda \vec{y} \in \text{Im } u.$$

Ceci termine la démonstration.

**Noyau et image
d'une
application
linéaire**

[Sommaire](#)
[Concepts](#)

[Exemples](#)
[Exercices](#)
[Documents](#)

2.1.4 Image d'une famille liée, image d'une famille génératrice de E

Exercices :

[Exercice A.1.4](#)

Théorème 2.1.1. *Soit $u \in \mathcal{L}(E; F)$, alors on a les propriétés suivantes :*

- *l'image par u d'une famille liée quelconque de E est une famille liée de F ,*
- *l'image par u d'une famille génératrice quelconque de E est une famille génératrice de $\text{Im } u$.*

La démonstration de ce théorème est à faire en exercice.

[Sommaire](#)
[Concepts](#)

[Exemples](#)
[Exercices](#)
[Documents](#)

2.1.5 Projection

Exercices :

[Exercice A.1.5](#)[Exercice A.1.6](#)

Soit E un espace vectoriel. Soient F_1 et F_2 deux sous-espaces vectoriels de E tels que

$$E = F_1 \oplus F_2.$$

On a montré au Chapitre 1 (paragraphe : "sous espaces supplémentaires") que pour tout vecteur $\vec{x}$ appartenant à E , il existe $\vec{x}_1 \in F_1$, $\vec{x}_2 \in F_2$ uniques tels que $\vec{x} = \vec{x}_1 + \vec{x}_2$.

Définition 2.1.3. Soit un espace vectoriel E , F_1 et F_2 deux sous-espaces vectoriels de E tels que $E = F_1 \oplus F_2$, tout vecteur $\vec{x} \in E$ peut donc s'écrire $\vec{x} = \vec{x}_1 + \vec{x}_2$, où $\vec{x}_1 \in F_1$ et $\vec{x}_2 \in F_2$.

On appelle **projection**, ou encore **projecteur**, sur F_1 parallèlement à F_2 l'application u de E dans E définie par :

$$u(\vec{x}) = \vec{x}_1.$$

Bien sûr, dans l'espace $\mathbb{R}^3$, la projection sur un plan π parallèlement à une droite D telle que vous la connaissez déjà est une projection au sens de la définition précédente.

[Sommaire](#)
[Concepts](#)[Exemples](#)
[Exercices](#)
[Documents](#)

Proposition 2.1.2. *La projection sur F_1 parallèlement à F_2 est une application linéaire dont le noyau est F_2 et l'image est F_1 .*

Démontrer cette proposition en exercice.

Projection

[Sommaire](#)
[Concepts](#)

[Exemples](#)
[Exercices](#)
[Documents](#)

2.1.6 Composition de deux applications linéaires

Exercices :
[Exercice A.1.7](#)

Documents :
[Document C.1.1](#)

Soient $v \in \mathcal{L}(E; F)$ et $u \in \mathcal{L}(F; G)$ deux applications linéaires, on rappelle la définition de la composée de u et v , notée $u \circ v$:

$$u \circ v : \begin{cases} E & \longrightarrow & G \\ \vec{x} & \longmapsto & u(v(\vec{x})) \end{cases}$$

et on a le diagramme suivant (bien noter l'ordre dans lequel sont écrits u et v) :

$$\left\{ \begin{array}{ccccc} E & \xrightarrow{v} & F & \xrightarrow{u} & G \\ E & \xrightarrow{w=u \circ v} & & & G \end{array} \right.$$

Proposition 2.1.3. *Si $v \in \mathcal{L}(E; F)$ et $u \in \mathcal{L}(F; G)$, alors $u \circ v \in \mathcal{L}(E; G)$*

Démontrer cette proposition en exercice.

[Sommaire](#)
[Concepts](#)

[Exemples](#)
[Exercices](#)
[Documents](#)

2.1.7 Application linéaire entre espaces de dimension finie

Exercices :

[Exercice A.1.8](#)

À partir de maintenant, les espaces vectoriels utilisés seront de dimension finie.

Vous pouvez traiter l'exercice avant de lire la proposition générale :

Proposition 2.1.4. Soient E non réduit à $\{\vec{0}\}$, $\mathcal{E} = (\vec{e}_1, \vec{e}_2, \dots, \vec{e}_n)$ une base de E et $u \in \mathcal{L}(E; F)$. Alors quel que soit $\vec{x}$ appartenant à E , le vecteur $u(\vec{x})$ est combinaison linéaire des vecteurs $(u(\vec{e}_j))_{j=1, \dots, n}$.

Démonstration – Soit $\vec{x} \in E$, alors il se décompose de manière unique sur $\mathcal{E}$:

$$\vec{x} = \sum_{j=1}^n x_j \vec{e}_j. \quad (2.1.1)$$

u est linéaire, donc on a

$$u(\vec{x}) = u\left(\sum_{j=1}^n x_j \vec{e}_j\right) = \sum_{j=1}^n u(x_j \vec{e}_j) = \sum_{j=1}^n x_j u(\vec{e}_j), \quad (2.1.2)$$

ce qui termine la démonstration.

[Sommaire](#)
[Concepts](#)

[Exemples](#)
[Exercices](#)
[Documents](#)

On retrouve un résultat démontré dans le Théorème 2.1.1. $\mathcal{E} = (\vec{e}_1, \vec{e}_2, \dots, \vec{e}_n)$ est une base de E , donc une famille génératrice de E , alors $(u(\vec{e}_1), u(\vec{e}_2), \dots, u(\vec{e}_n))$ est une famille génératrice de $\text{Im } u$.

Proposition 2.1.5. Soient E et F deux espaces vectoriels non réduits à $\{\vec{0}\}$ munis, respectivement, des bases $\mathcal{E} = (\vec{e}_1, \vec{e}_2, \dots, \vec{e}_n)$ et $\mathcal{F} = (\vec{f}_1, \vec{f}_2, \dots, \vec{f}_m)$. Soit $u \in \mathcal{L}(E; F)$. Alors pour $j = 1, 2, \dots, n$, chacun des vecteurs $u(\vec{e}_j)$ a des composantes sur la base $\mathcal{F}$. On peut noter ces composantes

$$u(\vec{e}_j) = \sum_{i=1}^m a_{ij} \vec{f}_i.$$

Quel que soit $\vec{x} \in E$, on connaît ses composantes sur $\mathcal{E}$

$$\vec{x} = \sum_{j=1}^n \alpha_j \vec{e}_j.$$

Alors les composantes de $u(\vec{x})$ sur $\mathcal{F}$ sont données par

$$u(\vec{x}) = \sum_{i=1}^m \beta_i \vec{f}_i \quad \text{avec} \quad \beta_i = \sum_{j=1}^n a_{ij} \alpha_j, \quad \forall i = 1, \dots, m.$$

Démonstration – On a

$$u(\vec{x}) = u\left(\sum_{j=1}^n \alpha_j \vec{e}_j\right) = \sum_{j=1}^n \alpha_j u(\vec{e}_j) = \sum_{j=1}^n \left(\alpha_j \sum_{i=1}^m a_{ij} \vec{f}_i\right) = \sum_{i=1}^m \left(\sum_{j=1}^n a_{ij} \alpha_j\right) \vec{f}_i.$$

**Application
linéaire entre
espaces de
dimension finie**

Sommaire
Concepts

Exemples
Exercices
Documents

2.1.8 Caractérisation de l'injectivité

Exercices :

[Exercice A.1.9](#)

Théorème 2.1.2. Soit $u \in \mathcal{L}(E; F)$, alors les deux propositions suivantes sont équivalentes :

- (i) u est injective,
- (ii) $\text{Ker } u = \{\vec{0}_E\}$.

Démonstration –

(i) $\Rightarrow$ (ii) Supposons que u est injective.

Soit $\vec{x} \in \text{Ker } u$, donc $u(\vec{x}) = \vec{0}_F$.

De plus u est linéaire, donc $u(\vec{0}_E) = \vec{0}_F$.

Comme u est injective, on déduit que $\vec{x} = \vec{0}_E$.

On vient donc de montrer que $\text{Ker } u = \{\vec{0}_E\}$.

(ii) $\Rightarrow$ (i) Soient $\vec{x}$ et $\vec{x}'$ deux vecteurs de E tels que $u(\vec{x}) = u(\vec{x}')$.

u est linéaire donc $u(\vec{x} - \vec{x}') = \vec{0}_F$.

$\text{Ker } u = \{\vec{0}_E\}$, donc $\vec{x} - \vec{x}' = \vec{0}_E$, donc $\vec{x} = \vec{x}'$.

Ce qui démontre que u est injective.

Proposition 2.1.6. Soit $u \in \mathcal{L}(E; F)$ une application injective, alors l'image par u d'une famille libre de E est une famille libre de F .

[Sommaire](#)
[Concepts](#)

[Exemples](#)
[Exercices](#)
[Documents](#)

Démonstration – Soit $\mathcal{L} = (\vec{v}_1, \vec{v}_2, \dots, \vec{v}_n)$ une famille libre de E .

Pour montrer que la famille $(u(\vec{v}_1), u(\vec{v}_2), \dots, u(\vec{v}_n))$ est libre, on doit montrer l'implication

$$\forall (\alpha_i)_{i=1, \dots, n} \in \mathbb{K}^n : \sum_{i=1}^n \alpha_i u(\vec{v}_i) = \vec{0}_F \implies \forall i = 1, \dots, n, \alpha_i = 0.$$

Soit donc $(\alpha_i)_{i=1, \dots, n} \in \mathbb{K}^n$ tels que $\sum_{i=1}^n \alpha_i u(\vec{v}_i) = \vec{0}_F$. u est linéaire donc

$$\sum_{i=1}^n \alpha_i u(\vec{v}_i) = \vec{0}_F \Rightarrow u\left(\sum_{i=1}^n \alpha_i \vec{v}_i\right) = \vec{0}_F.$$

u est injective donc $\text{Ker } u = \{\vec{0}_E\}$, donc

$$u\left(\sum_{i=1}^n \alpha_i \vec{v}_i\right) = \vec{0}_F \Rightarrow \sum_{i=1}^n \alpha_i \vec{v}_i = \vec{0}_E,$$

$\mathcal{L}$ est une famille libre, donc

$$\sum_{i=1}^n \alpha_i \vec{v}_i = \vec{0}_E \Rightarrow \forall i = 1, \dots, n, \alpha_i = 0.$$

Ceci termine la démonstration.

Caractérisation de l'injectivité

Sommaire
Concepts

Exemples
Exercices
Documents

2.1.9 Caractérisation de surjective, bijective

Exercices :

[Exercice A.1.10](#)

Théorème 2.1.3. Soit $u \in \mathcal{L}(E; F)$. Alors les deux propositions suivantes sont équivalentes :

- (i) u est surjective de E dans F ,
- (ii) $\text{Im } u = F$.

Démonstration – Dire que u est surjective c'est, par *définition*, dire que $\text{Im } u = F$ (la linéarité ne joue aucun rôle ici!).

Proposition 2.1.7. Soit $u \in \mathcal{L}(E; F)$ une application surjective. Alors l'image par u d'une famille génératrice de E est une famille génératrice de F .

Démonstration – On a montré dans le Théorème 2.1.1 que l'image par u d'une famille génératrice de E était une famille génératrice de $\text{Im } u$.

Quand u est surjective on a $\text{Im } u = F$.

Ce qui termine la démonstration.

[Sommaire](#)
[Concepts](#)

[Exemples](#)
[Exercices](#)
[Documents](#)

Proposition 2.1.8. *Les propositions suivantes sont équivalentes :*

- (i) *u est bijective,*
- (ii) *$\text{Ker } u = \{\vec{0}_E\}$ et $\text{Im } u = F$,*
- (iii) *l'image par u d'une base de E est une base de F .*

Pour le point (iii), on suppose que E et F ne sont pas réduits à $\{\vec{0}\}$.

Démonstration– (i) $\iff$ (ii) est une conséquence immédiate des Théorèmes 2.1.2 et 2.1.3. Montrer en exercice que (i) $\iff$ (iii).

**Caractérisation
de surjective,
bijective**

[Sommaire](#)
[Concepts](#)

[Exemples](#)
[Exercices](#)
[Documents](#)

2.1.10 Isomorphismes

Exercices :

[Exercice A.1.11](#)

Définition 2.1.4. *Un peu de vocabulaire :*

- **Homomorphisme** : *une application linéaire d'un espace vectoriel E dans un espace vectoriel F est un homomorphisme de E dans F .*
- **Endomorphisme** : *une application linéaire d'un espace vectoriel E dans le même espace vectoriel E est un endomorphisme de E .*
Dans ce cas $\mathcal{L}(E; E)$ est souvent noté plus simplement $\mathcal{L}(E)$.
- **Isomorphisme** : *une application linéaire bijective d'un espace vectoriel E dans un espace vectoriel F est un isomorphisme de E dans F .*
*On dit que deux espaces vectoriels E et F sont **isomorphes** s'il existe un isomorphisme u de E dans F .*
Si E et F sont isomorphes, alors il existe au moins un isomorphisme entre E et F , mais, bien sûr, toute application linéaire entre E et F n'est pas un isomorphisme.
- **Automorphisme** : *une application linéaire bijective d'un espace vectoriel E dans le même espace vectoriel E est un automorphisme de E .*

Proposition 2.1.9. E et F sont isomorphes $\iff \dim E = \dim F$.

[Sommaire](#)
[Concepts](#)

[Exemples](#)
[Exercices](#)
[Documents](#)

Démonstration – Soit $u \in \mathcal{L}(E; F)$.

Si l'application u est un isomorphisme, elle est bijective. Donc, d'après la Proposition 2.1.8, l'image par u d'une base de E est une base de F . Ces bases ont donc le même nombre d'éléments, d'où l'égalité des dimensions de E et F . La réciproque est proposée en exercice, voir l'énoncé.

Une application u est bijective de E dans F si et seulement si elle admet une application réciproque u^{-1} définie de F dans E . Un isomorphisme admet donc une application réciproque. On a de plus :

Proposition 2.1.10. *Si u est un isomorphisme, alors u^{-1} est un isomorphisme.*

Démonstration – u^{-1} est bijective puisqu'elle est inversible. Il suffit donc de montrer sa linéarité. Soient $\vec{y}_1$ et $\vec{y}_2$ deux vecteurs de F , posons

$$\vec{x} = u^{-1}(\vec{y}_1) + u^{-1}(\vec{y}_2) \quad \text{et} \quad \vec{z} = u^{-1}(\vec{y}_1 + \vec{y}_2),$$

alors la linéarité de u implique que

$$u(\vec{x}) = u(u^{-1}(\vec{y}_1) + u^{-1}(\vec{y}_2)) = u(u^{-1}(\vec{y}_1)) + u(u^{-1}(\vec{y}_2)) = \vec{y}_1 + \vec{y}_2 = u(u^{-1}(\vec{y}_1 + \vec{y}_2)) = u(\vec{z})$$

or u est injective donc

$$\vec{x} = \vec{z} \iff u^{-1}(\vec{y}_1) + u^{-1}(\vec{y}_2) = u^{-1}(\vec{y}_1 + \vec{y}_2).$$

Démontrer de manière analogue que

$$u^{-1}(\lambda \vec{y}) = \lambda u^{-1}(\vec{y}),$$

ce qui termine de démontrer que u^{-1} est linéaire.

Sommaire
Concepts

Exemples
Exercices
Documents

2.1.1.1 Isomorphisme entre E et K^n

Exercices :

[Exercice A.1.12](#)

Soit E un espace vectoriel de dimension $n \geq 1$, muni d'une base $\mathcal{E} = (\vec{e}_1, \vec{e}_2, \dots, \vec{e}_n)$. Alors pour tout $\vec{x} \in E$, ses composantes $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$ sur la base $\mathcal{E}$ sont uniques, et on a :

$$\vec{x} = \sum_{j=1}^n \alpha_j \vec{e}_j.$$

On peut alors définir l'application ϕ de E dans $\mathbb{K}^n$:

$$\phi(\vec{x}) = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n).$$

Attention - L'application ϕ dépend de la base $\mathcal{E}$ choisie.

Théorème 2.1.4. *L'application ϕ définie par*

$$\vec{x} \in E \mapsto \phi(\vec{x}) = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n) \in \mathbb{K}^n$$

est un isomorphisme de E sur $\mathbb{K}^n$.

Comme tout $\vec{x} \in E$ admet une décomposition unique sur la base $\mathcal{E}$, l'application ϕ est bien définie. Démontrer en exercice qu'elle est linéaire et bijective.

Attention, $\vec{x}$ n'est pas égal à $(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n)$.

[Sommaire](#)
[Concepts](#)

[Exemples](#)
[Exercices](#)
[Documents](#)

2.1.12 Formes linéaires

Si vous découvrez ce chapitre pour la première fois, vous pouvez, dans un premier temps, ne pas étudier cette partie sur les formes linéaires.

$\mathbb{K}$ est un espace vectoriel sur lui-même, il est donc possible de choisir $F = \mathbb{K}$. On a alors la définition suivante :

Définition 2.1.5. *On appelle **forme linéaire** sur E une application linéaire de E dans $\mathbb{K}$, c'est donc un élément de $\mathcal{L}(E; \mathbb{K})$.*

Par exemple :

1. $a_1, a_2, \dots, a_n$ étant fixés dans $\mathbb{R}$, on peut définir l'application $u : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ par

$$\vec{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n) \mapsto u(\vec{x}) = a_1 x_1 + a_2 x_2 + \dots + a_n x_n.$$

Vérifier que u est une forme linéaire sur $\mathbb{R}^n$.

2. Soit $\mathcal{C}(0, 1)$ l'espace vectoriel des fonctions continues sur l'intervalle fermé $[0, 1]$, on peut définir l'application $u : \mathcal{C}(0, 1) \rightarrow \mathbb{R}$ par

$$u(f) = \int_0^1 f(t) dt.$$

Vérifier que u est une forme linéaire sur $\mathcal{C}(0, 1)$.

[Sommaire](#)
[Concepts](#)

[Exemples](#)
[Exercices](#)
[Documents](#)

Théorème 2.1.5. Soit E muni d'une base $\mathcal{E} = (\vec{e}_1, \vec{e}_2, \dots, \vec{e}_n)$, et soit u une forme linéaire sur E . Alors il existe n éléments de $\mathbb{K}$, notés $(\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n)$ tels que $\forall x \in E$, on a

$$u(\vec{x}) = u\left(\sum_{i=1}^n x_i \vec{e}_i\right) = \sum_{i=1}^n \beta_i x_i.$$

Démonstration – Ici $F = \mathbb{K}$, donc les $u(\vec{e}_k)$ sont des scalaires que l'on peut noter β_k . On a donc

$$u(\vec{x}) = u\left(\sum_{i=1}^n x_i \vec{e}_i\right) = \sum_{i=1}^n x_i u(\vec{e}_i) = \sum_{i=1}^n \beta_i x_i.$$

[Sommaire](#)
[Concepts](#)

[Exemples](#)
[Exercices](#)
[Documents](#)

2.2 Matrices

2.2.1	Matrices-définitions	24
2.2.2	Notations	27
2.2.3	Espace vectoriel des matrices	30
2.2.4	Produit de deux matrices	32
2.2.5	Calcul explicite de l'image d'un vecteur	36
2.2.6	Inverse d'une matrice carrée	38
2.2.7	Transposée d'une matrice	40
2.2.8	Changement de base-matrice de passage	42
2.2.9	Changement de base et composantes d'un vecteur	46
2.2.10	Changement de bases et matrices associées à une application linéaire	48
2.2.11	Matrices semblables	51
2.2.12	Rang	52
2.2.13	Rang et dimension du noyau d'une application linéaire	55
2.2.14	Noyau d'une matrice	58

[Sommaire](#)
[Concepts](#)

[Exemples](#)
[Exercices](#)
[Documents](#)

2.2.1 Matrices-définitions

Exercices :[Exercice A.1.13](#)[Exercice A.1.14](#)[Exercice A.1.15](#)[Exercice A.1.16](#)**Exemples :**[Exemple B.1.1](#)[Exemple B.1.2](#)

Soient E et F deux espaces vectoriels non réduits à $\{\vec{0}\}$. On munit E et F , respectivement, de bases $\mathcal{E} = (\vec{e}_1, \vec{e}_2, \dots, \vec{e}_n)$ et $\mathcal{F} = (\vec{f}_1, \vec{f}_2, \dots, \vec{f}_m)$. Noter que m et $n \geq 1$.

Soit $u \in \mathcal{L}(E; F)$.

Alors pour $j = 1, 2, \dots, n$, chacun des vecteurs $u(\vec{e}_j)$ a des composantes sur la base $\mathcal{F}$. On peut noter ces composantes

$$u(\vec{e}_j) = \sum_{i=1}^m a_{ij} \vec{f}_i.$$

On obtient donc $m \times n$ scalaires a_{ij} . On peut ranger ces scalaires dans un tableau possédant m lignes et n colonnes : dans la j^e colonne, on écrit les composantes de $u(\vec{e}_j)$ dans la base $\mathcal{F}$.

Définition 2.2.1. On appelle **matrice** associée à u quand on munit E et F des bases $\mathcal{E}$ et $\mathcal{F}$ le tableau A de scalaires décrit ci-dessus.

[Sommaire](#)
[Concepts](#)

[Exemples](#)
[Exercices](#)
[Documents](#)

La matrice A ainsi définie est explicitée par la figure suivante :

$$A = \begin{matrix} & \begin{matrix} u(\vec{e}_1) & u(\vec{e}_2) & \dots & u(\vec{e}_j) & \dots & u(\vec{e}_n) \end{matrix} \\ \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1j} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2j} & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ a_{i1} & a_{i2} & \dots & a_{ij} & \dots & a_{in} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \dots & a_{mj} & \dots & a_{mn} \end{pmatrix} & \begin{matrix} \vec{f}_1 \\ \vec{f}_2 \\ \vdots \\ \vec{f}_i \\ \vdots \\ \vec{f}_m \end{matrix} \end{matrix}$$

On appelle $\mathcal{M}_{mn}(\mathbb{K})$ l'ensemble des matrices à coefficients dans $\mathbb{K}$ possédant m lignes et n colonnes. Plus simplement, lorsque aucune ambiguïté n'est possible, on note cet ensemble $\mathcal{M}_{mn}$.

Définition 2.2.2.

- Si $m = n$, la matrice A est dite **carrée**.
- Si $m = 1$, on dit que A est une **matrice ligne** ou encore un **vecteur ligne**.
- Si $n = 1$, on dit que A est une **matrice colonne** ou encore un **vecteur colonne**.
- Si $m = n$ et si $a_{ij} = 0$ pour $i \neq j$, on dit que A est **diagonale**.
- Si $m = n$ et si $a_{ij} = 0$ pour $i \neq j$ et $a_{ii} = 1$, A s'appelle la **matrice identité**.
On note généralement la matrice identité I ou I_n .
- Si $m = n$ et si $a_{ij} = 0$ pour $i < j$, on dit que A est **triangulaire inférieure**.
- Si $m = n$ et si $a_{ij} = 0$ pour $i > j$, on dit que A est **triangulaire supérieure**.

Définition 2.2.3. Si A est carrée ($A \in \mathcal{M}_{nn}$), on définit la **trace** de A par :

$$\text{Tr}(A) = \sum_{i=1}^n a_{ii}.$$

Matrices- définitions

Sommaire
Concepts

Exemples
Exercices
Documents

Si E est le plan muni d'une base orthonormée $\mathcal{E} = (\vec{e}_1, \vec{e}_2)$ et si u est la rotation d'un angle θ , on a alors $E = F$ et on peut choisir $\mathcal{F} = \mathcal{E}$.

On a alors

$$u(\vec{e}_1) = \cos\theta \vec{e}_1 + \sin\theta \vec{e}_2, \quad u(\vec{e}_2) = -\sin\theta \vec{e}_1 + \cos\theta \vec{e}_2,$$

ce qui donne la matrice

$$A = \begin{pmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix}.$$

On vient de voir que, des bases étant choisies sur E et F , à toute application linéaire u , on associe une matrice A .

Réciproquement, étant donné une matrice quelconque A , est-il possible de trouver des espaces vectoriels E et F , des bases $\mathcal{E}$, $\mathcal{F}$ et une application linéaire u , tels que A soit la matrice associée à u quand on munit E et F des bases $\mathcal{E}$ et $\mathcal{F}$? La réponse est oui, on va le montrer.

Soit A une matrice possédant m lignes et n colonnes.

On peut choisir $E = \mathbb{K}^n$, $F = \mathbb{K}^m$,

On peut choisir les bases canoniques $\mathcal{E}$ et $\mathcal{F}$:

- Pour $j = 1, \dots, n$, $\vec{e}_j = (0, 0, \dots, 1, 0, \dots, 0)$ avec l'élément 1 de $\mathbb{K}$ en j^e position.
- Pour $i = 1, \dots, m$, $\vec{f}_i = (0, 0, \dots, 0, 1, \dots, 0)$ avec l'élément 1 de $\mathbb{K}$ en i^e position.

On définit u l'application linéaire de E dans F par

$$u(\vec{e}_j) = \sum_{i=1}^m a_{ij} \vec{f}_i, \quad \forall j = 1, \dots, n.$$

En effet, d'après la Proposition 2.1.4, $u(\vec{x})$ est alors défini pour tout $\vec{x}$ appartenant à E .

On construit la matrice associée à u quand on munit E et F des bases $\mathcal{E}$ et $\mathcal{F}$, et on obtient la matrice A .

Matrices- définitions

Sommaire
Concepts

Exemples
Exercices
Documents

2.2.2 Notations

1. Soit E un espace vectoriel de dimension n sur $\mathbb{K}$.

On fixe une base de E notée $\mathcal{E} = (\vec{e}_1, \vec{e}_2, \dots, \vec{e}_n)$.

Quel que soit $\vec{x} \in E$, ce vecteur se décompose sur la base $\mathcal{E}$. Si $x_1, x_2, \dots, x_n$ sont les composantes de $\vec{x}$ sur la base $\mathcal{E}$, on a $\vec{x} = \sum_{i=1}^n x_i \vec{e}_i$.

On définit l'application ϕ qui à $\vec{x} \in E$ associe $(x_1, x_2, \dots, x_n) \in \mathbb{K}^n$. On a vu que ϕ est une application bijective de E sur $\mathbb{K}^n$.

On peut aussi définir l'application ψ de E sur $\mathcal{M}_{n1}(K)$ qui à $\vec{x} \in E$ associe la matrice colonne

$\begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix} \in \mathcal{M}_{n1}(K)$. On peut montrer que l'application ψ est bijective de E sur $\mathcal{M}_{n1}(K)$.

Dans la suite de ce cours on notera $X = \psi(\vec{x}) = \begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix}$. Cette matrice colonne X dépend de la base $\mathcal{E}$ choisie.

2. Soit A une matrice appartenant à $\mathcal{M}_{nm}(K)$. Par exemple

$$A = \begin{pmatrix} 3 & 2 & 4 \\ 5 & 6 & 7 \end{pmatrix} \in \mathcal{M}_{23}(\mathbb{R}).$$

[Sommaire](#)
[Concepts](#)

[Exemples](#)
[Exercices](#)
[Documents](#)

On note

$$A_1 = \begin{pmatrix} 3 \\ 5 \end{pmatrix}, A_2 = \begin{pmatrix} 2 \\ 6 \end{pmatrix}, A_3 = \begin{pmatrix} 4 \\ 7 \end{pmatrix}, \quad A_1, A_2, A_3 \in \mathcal{M}_{21}.$$

A_j est la j^e colonne de A , j varie de 1 à m .

On note

$$\underline{A}_1 = (3, 2, 4), \underline{A}_2 = (5, 6, 7), \quad \underline{A}_1, \underline{A}_2 \in \mathcal{M}_{13}.$$

$\underline{A}_i$ est la i^e ligne de A , i varie de 1 à n .

3. Soit E un espace vectoriel de dimension n sur $\mathbb{K}$ et $\mathcal{E} = (\vec{e}_1, \vec{e}_2, \dots, \vec{e}_n)$ est une base de E .
Soient $\vec{x}_1, \vec{x}_2, \dots, \vec{x}_p$ p vecteurs appartenant à E .

On note x_{ij} la i^e composante du vecteur $\vec{x}_j$: $\vec{x}_j = \sum_{i=1}^n x_{ij} \vec{e}_i$.

On peut donc associer à la famille $\vec{x}_1, \vec{x}_2, \dots, \vec{x}_p$, une matrice $X \in \mathcal{M}_{np}$.

Par exemple : $E = \mathbb{R}^2$ est muni de la base canonique.

On définit les vecteurs $\vec{x}_1 = (1, 5)$, $\vec{x}_2 = (2, 6)$, $\vec{x}_3 = (4, 7)$, alors $x_{11} = 1$, $x_{21} = 5$, $x_{12} = 2$, $x_{22} = 6$, etc.

On a $X = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 4 \\ 5 & 6 & 7 \end{pmatrix}$.

Dans le cas où $p = 1$, on a un seul vecteur $\vec{x}$. L'indice j est alors inutile et on note x_i la i^e composante de $\vec{x}$ sur la base $\mathcal{E}$.

4. Les notations précédentes sont cohérentes. Dans l'exemple du paragraphe 3, on a 3 vecteurs de $\mathbb{R}^2$. On choisit la base canonique de $\mathbb{R}^2$. L'application ψ définie dans le paragraphe 1 permet d'associer à chacun des 3 vecteurs une matrice colonne appartenant à $\mathcal{M}_{21}$:

Sommaire
Concepts

Exemples
Exercices
Documents

— à $\vec{x}_1$ on associe la matrice colonne $X_1 = \begin{pmatrix} 1 \\ 5 \end{pmatrix}$,

— à $\vec{x}_2$ on associe $X_2 = \begin{pmatrix} 2 \\ 6 \end{pmatrix}$ et

— à $\vec{x}_3$ on associe $X_3 = \begin{pmatrix} 4 \\ 7 \end{pmatrix}$.

En utilisant le paragraphe 2, on peut définir la matrice

$$X = (X_1 \ X_2 \ X_3) = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 4 \\ 5 & 6 & 7 \end{pmatrix}$$

et on retrouve la matrice du paragraphe 3.

[Sommaire](#)
[Concepts](#)

[Exemples](#)
[Exercices](#)
[Documents](#)

2.2.3 Espace vectoriel des matrices

Exercices :

[Exercice A.1.17](#)

L'ensemble des matrices $\mathcal{M}_{mn}(\mathbb{K})$ peut être muni d'une structure d'espace vectoriel sur $\mathbb{K}$. Pour cela, on définit sur $\mathcal{M}_{mn}$ deux lois appelées somme de deux matrices et produit d'une matrice par un scalaire.

Définition 2.2.4. Somme de deux matrices

Si A et B sont 2 matrices appartenant à $\mathcal{M}_{mn}(\mathbb{K})$, on appelle **somme** de A et B , et on note $A + B$, la matrice $C \in \mathcal{M}_{mn}$ dont les coefficients sont

$$c_{ij} = a_{ij} + b_{ij}, \quad 1 \leq i \leq m, 1 \leq j \leq n. \quad (2.2.1)$$

La somme est une loi interne sur $\mathcal{M}_{mn}(\mathbb{K})$.

Si A (resp. B) est la matrice associée à une application linéaire u (resp. v) de E dans F alors la matrice $A + B$ est la matrice associée à l'application linéaire $u + v$.

Définition 2.2.5. Produit d'une matrice par un scalaire

Soit $A \in \mathcal{M}_{mn}(\mathbb{K})$ et $\lambda \in \mathbb{K}$, on appelle **produit** de A par λ , et on note λA , la matrice $C \in \mathcal{M}_{mn}(\mathbb{K})$ dont les coefficients sont

$$c_{ij} = \lambda a_{ij}, \quad 1 \leq i \leq m, 1 \leq j \leq n. \quad (2.2.2)$$

[Sommaire](#)
[Concepts](#)

[Exemples](#)
[Exercices](#)
[Documents](#)

Le produit par un scalaire est une loi externe sur $\mathcal{M}_{mn}(\mathbb{K})$.

Si A est la matrice associée à une application linéaire u de E dans F , alors la matrice λA est la matrice associée à l'application linéaire λu .

On vérifie que $\mathcal{M}_{mn}(\mathbb{K})$, muni des 2 lois précédentes, a une structure d'espace vectoriel sur $\mathbb{K}$.

L'espace vectoriel $\mathcal{M}_{mn}$ a pour dimension $m \times n$. Démontrer ce résultat en exercice.

Espace vectoriel des matrices

[Sommaire](#)
[Concepts](#)

[Exemples](#)
[Exercices](#)
[Documents](#)

2.2.4 Produit de deux matrices

Exercices :

[Exercice A.1.18](#)

[Exercice A.1.19](#)

Définition 2.2.6. Produit de deux matrices -

Soit E un espace vectoriel sur $\mathbb{K}$ de dimension p et $\mathcal{E} = (\vec{e}_1, \dots, \vec{e}_p)$ une base de E .

Soit F un espace vectoriel sur $\mathbb{K}$ de dimension n et $\mathcal{F} = (\vec{f}_1, \dots, \vec{f}_n)$ une base de F .

Soit G un espace vectoriel sur $\mathbb{K}$ de dimension q et $\mathcal{G} = (\vec{g}_1, \dots, \vec{g}_q)$ une base de G .

Soit $v \in \mathcal{L}(E; F)$ et $u \in \mathcal{L}(F; G)$. On pose $w = u \circ v$ et on a donc $w \in \mathcal{L}(E; G)$.

Soit A la matrice associée à u quand on choisit les bases $\mathcal{F}$ et $\mathcal{G}$. On a $A \in \mathcal{M}_{qn}(\mathbb{K})$.

Soit B la matrice associée à v quand on choisit les bases $\mathcal{E}$ et $\mathcal{F}$. On a $B \in \mathcal{M}_{np}(\mathbb{K})$.

Soit C la matrice associée à $w = u \circ v$ quand on choisit les bases $\mathcal{E}$ et $\mathcal{G}$. On a $C \in \mathcal{M}_{qp}(\mathbb{K})$.

On définit le **produit** des matrices A et B par $AB = C$,

$$\begin{array}{ccccc} E & \xrightarrow{v} & F & \xrightarrow{u} & G \\ \mathcal{E} = (\vec{e}_1, \dots, \vec{e}_p) & B & \mathcal{F} = (\vec{f}_1, \dots, \vec{f}_n) & A & \mathcal{G} = (\vec{g}_1, \dots, \vec{g}_q) \end{array}$$

$$\begin{array}{ccc} E & \xrightarrow{w=u \circ v} & G \\ \mathcal{E} = (\vec{e}_1, \dots, \vec{e}_p) & C = AB & \mathcal{G} = (\vec{g}_1, \dots, \vec{g}_q) \end{array}$$

[Sommaire](#)
[Concepts](#)

[Exemples](#)
[Exercices](#)
[Documents](#)

Proposition 2.2.1. Soit $A \in \mathcal{M}_{qn}(\mathbb{K})$ et $B \in \mathcal{M}_{np}(\mathbb{K})$, le produit de deux matrices A et B est la matrice $C \in \mathcal{M}_{qp}(\mathbb{K})$ dont les éléments sont définis par

$$c_{ij} = \sum_{k=1}^n a_{ik} b_{kj} \quad \forall i = 1, \dots, q, \forall j = 1, \dots, p, \quad (2.2.3)$$

ce qui s'écrit sous forme développée $c_{ij} = a_{i1}b_{1j} + a_{i2}b_{2j} + \dots + a_{in}b_{nj}$.

Démonstration – D'après la définition de C , on a :

$$w(\vec{e}_j) = \sum_{i=1}^q c_{ij} \vec{g}_i. \quad (2.2.4)$$

D'autre part, on a $w(\vec{e}_j) = u(v(\vec{e}_j))$.

D'après la définition de B , on a

$$v(\vec{e}_j) = \sum_{k=1}^n b_{kj} \vec{f}_k.$$

On utilise la linéarité de u :

$$w(\vec{e}_j) = u(v(\vec{e}_j)) = u\left(\sum_{k=1}^n b_{kj} \vec{f}_k\right) = \sum_{k=1}^n b_{kj} u(\vec{f}_k). \quad (2.2.5)$$

D'après la définition de A , on a

$$u(\vec{f}_k) = \sum_{i=1}^q a_{ik} \vec{g}_i. \quad (2.2.6)$$

Produit de deux matrices

Sommaire
Concepts

Exemples
Exercices
Documents

En utilisant (2.2.6) et (2.2.5), on obtient

$$w(\vec{e}_j) = u(v(\vec{e}_j)) = \sum_{k=1}^n \left(b_{kj} \sum_{i=1}^q a_{ik} \vec{g}_i \right) = \sum_{i=1}^q \left(\sum_{k=1}^n a_{ik} b_{kj} \right) \vec{g}_i. \quad (2.2.7)$$

La décomposition du vecteur $w(\vec{e}_j)$ sur la base $\mathcal{G}$ est unique. En comparant les expressions (2.2.4) et (2.2.7), on obtient la formule (2.2.3) de la définition.

L'élément c_{ij} de la matrice $C = AB$ est égal au produit terme par terme de la i^e ligne de A par la j^e colonne de B . En effet, on a :

$$\underline{A}_i = (a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{in}), \quad B_j = \begin{pmatrix} b_{1j} \\ b_{2j} \\ \vdots \\ b_{nj} \end{pmatrix}.$$

Donc

$$c_{ij} = \underline{A}_i B_j, \quad \forall i = 1, \dots, q, \forall j = 1, \dots, p.$$

Le produit de 2 matrices est dit ligne par colonne

Attention! Le produit de A par B est possible si et seulement si le nombre de colonnes de A est égal au nombre de lignes de B !

Par exemple, si $A \in \mathcal{M}_{23}(\mathbb{K})$, $B \in \mathcal{M}_{34}(\mathbb{K})$, le produit AB existe et $AB \in \mathcal{M}_{24}(\mathbb{K})$. Par contre le produit BA n'est pas possible.

Même si AB et BA existent (par exemple $A \in \mathcal{M}_{23}(\mathbb{K})$, $B \in \mathcal{M}_{32}(\mathbb{K})$), en général on a $AB \neq BA$. Cette

Produit de deux matrices

Sommaire
Concepts

Exemples
Exercices
Documents

non-commutativité du produit de matrices provient de la non-commutativité de la composition des applications (même si elles sont linéaires).

Si $A \in \mathcal{M}_{mn}$, $B \in \mathcal{M}_{np}$ et $C \in \mathcal{M}_{pq}$, alors les produits BC , $A(BC)$, AB , $(AB)C$ existent. Il suffit de vérifier, par exemple, que le nombre de colonnes de A est égal au nombre de lignes de BC . On peut citer la proposition suivante :

Proposition 2.2.2. — Soit $A \in \mathcal{M}_{mn}$, $B \in \mathcal{M}_{np}$ et $C \in \mathcal{M}_{pq}$, alors le produit est **associatif**, c'est-à-dire

$$A(BC) = (AB)C.$$

— Soit $A \in \mathcal{M}_{qn}$ et $D \in \mathcal{M}_{qn}$, si $B \in \mathcal{M}_{np}$ et $C \in \mathcal{M}_{np}$, alors le produit est **distributif par rapport à la somme**, c'est-à-dire

$$\begin{aligned} A(B + C) &= AB + AC, & \text{et} \\ (A + D)B &= AB + DB. \end{aligned}$$

Démonstration – On déduit facilement ces propriétés des propriétés similaires sur la composition et la somme des applications.

Produit de deux matrices

[Sommaire](#)
[Concepts](#)

[Exemples](#)
[Exercices](#)
[Documents](#)

2.2.5 Calcul explicite de l'image d'un vecteur

Exercices :

[Exercice A.1.20](#)

Soit E un espace vectoriel sur $\mathbb{K}$ de dimension n et $\mathcal{E} = (\vec{e}_1, \dots, \vec{e}_n)$ une base de E .

Soit F un espace vectoriel sur $\mathbb{K}$ de dimension m et $\mathcal{F} = (\vec{f}_1, \dots, \vec{f}_m)$ une base de F .

Soit $u \in \mathcal{L}(E; F)$ et A la matrice associée à u quand on choisit les bases $\mathcal{E}$ et $\mathcal{F}$.

On a $A \in \mathcal{M}_{mn}(\mathbb{K})$.

Soit $\vec{x} \in E$, on note $\vec{y} = u(\vec{x})$.

Si on connaît les composantes $x_1, \dots, x_n$ de $\vec{x}$ dans la base $\mathcal{E}$, alors la matrice A permet d'obtenir les composantes $y_1, \dots, y_m$ de $\vec{y}$ dans la base $\mathcal{F}$.

On a vu dans la Proposition 2.1.5 que

$$y_i = \sum_{j=1}^n a_{ij} x_j, \quad \forall i = 1, \dots, m.$$

Si on range les composantes des vecteurs $\vec{x}$ et $\vec{y}$ dans les matrices colonnes X et Y , cette relation s'écrit sous la forme d'un produit matriciel :

$$Y = AX, \quad \text{où} \quad X = \begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix}, \quad Y = \begin{pmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_m \end{pmatrix}.$$

[Sommaire](#)
[Concepts](#)

[Exemples](#)
[Exercices](#)
[Documents](#)

Le i^e terme de ce produit AX est égal au produit de la i^e ligne de A par la matrice colonne X . La matrice colonne AX contient les composantes de $u(\vec{x})$ dans la base $\mathcal{F}$.

**Calcul explicite
de l'image d'un
vecteur**

[Sommaire](#)
[Concepts](#)

[Exemples](#)
[Exercices](#)
[Documents](#)

2.2.6 Inverse d'une matrice carrée

Exercices :

[Exercice A.1.21](#)

Définition 2.2.7. Soit A une matrice carrée, $A \in \mathcal{M}_{nn}$.

On dit que A est **inversible**, ou **régulière**, s'il existe une matrice carrée C appartenant à $\mathcal{M}_{nn}$ telle que $AC = CA = I$, où I est la matrice identité appartenant à $\mathcal{M}_{nn}$.

Quand elle existe, la matrice C est unique. Elle s'appelle l'inverse de A et on la note $C = A^{-1}$

Proposition 2.2.3. 1. Soit A une matrice carrée. S'il existe une matrice C telle que $AC = I$, alors la matrice A est inversible et $C = A^{-1}$.

2. Soit A une matrice carrée. S'il existe une matrice C telle que $CA = I$, alors la matrice A est inversible et $C = A^{-1}$.

Démonstration – On montrera dans le chapitre sur les déterminants que s'il existe C telle que $AC = I$, alors A est inversible. On admet que A est inversible et on montre alors que $C = A^{-1}$:

$$AC = I \implies A^{-1}(AC) = A^{-1}I \implies (A^{-1}A)C = A^{-1} \implies C = A^{-1}.$$

Le deuxième point se démontre de façon similaire, mais, attention, le produit n'est pas commutatif.

[Sommaire](#)
[Concepts](#)

[Exemples](#)
[Exercices](#)
[Documents](#)

Proposition 2.2.4. *Si A et B sont deux matrices carrées inversibles appartenant à $\mathcal{M}_{nn}$, alors la matrice carrée AB est inversible et on a :*

$$(AB)^{-1} = B^{-1}A^{-1}.$$

Faire la démonstration en exercice.

Proposition 2.2.5. *Soient E et F deux espaces vectoriels de même dimension et soient $\mathcal{E}$ une base de E et $\mathcal{F}$ une base de F .*

Si $u \in \mathcal{L}(E; F)$ est une application bijective et si A est la matrice associée à u quand on choisit les bases $\mathcal{E}$ et $\mathcal{F}$,

alors A est inversible et A^{-1} est la matrice associée à u^{-1} quand on choisit les bases $\mathcal{F}$ et $\mathcal{E}$.

Démonstration – L'application u est bijective, donc u^{-1} l'application linéaire réciproque existe et on a $u \circ u^{-1} = id_F$. Si on note C la matrice associée à u^{-1} quand on choisit les bases $\mathcal{F}$ et $\mathcal{E}$, on a donc $AC = I$, donc A est inversible et $C = A^{-1}$.

Inverse d'une matrice carrée

[Sommaire](#)
[Concepts](#)

[Exemples](#)
[Exercices](#)
[Documents](#)

2.2.7 Transposée d'une matrice

Exercices :

[Exercice A.1.22](#)

Définition 2.2.8. Si $A \in \mathcal{M}_{mn}$, on appelle **transposée** de A la matrice notée A^T appartenant à $\mathcal{M}_{nm}$ obtenue en échangeant les lignes et les colonnes, on a donc

$$(A^T)_{ij} = a_{ji}, \quad \forall i = 1, \dots, n, \forall j = 1, \dots, m.$$

En utilisant les notations habituelles pour les lignes et les colonnes de A , on a les égalités suivantes :

$$(A_i)^T = \underline{A}_i^T.$$

Si X et Y appartiennent à $\mathcal{M}_{m1}(\mathbb{K})$, alors $X^T Y = Y^T X$ est un scalaire de $\mathbb{K}$ et plus précisément on a :

$$X^T Y = Y^T X = \sum_{i=1}^m x_i y_i.$$

Proposition 2.2.6. Soit $A \in \mathcal{M}_{mn}$, $C \in \mathcal{M}_{mn}$ et $B \in \mathcal{M}_{np}$, alors

1. $(A^T)^T = A$
2. $(A + C)^T = A^T + C^T$

[Sommaire](#)
[Concepts](#)

[Exemples](#)
[Exercices](#)
[Documents](#)

$$3. (\lambda A)^T = \lambda A^T$$

$$4. (AB)^T = B^T A^T.$$

Démonstration – On peut démontrer très facilement les propriétés 1, 2 et 3.

$$4. ((AB)^T)_{ij} = (AB)_{ji} = \sum_{k=1}^n a_{jk} b_{ki}.$$

$$(B^T A^T)_{ij} = \sum_{k=1}^n (B^T)_{ik} (A^T)_{kj} = \sum_{k=1}^n b_{ki} a_{jk}.$$

Ce qui termine la démonstration.

Définition 2.2.9. Soit A appartenant à $\mathcal{M}_{nn}$.

On dit que A est *symétrique* si $A^T = A$.

On dit que A est *antisymétrique* si $A^T = -A$.

A est symétrique si et seulement si $\forall i = 1, \dots, n, \forall j = 1, \dots, n, a_{ji} = a_{ij}$.

A est antisymétrique si et seulement si $\forall i = 1, \dots, n, \forall j = 1, \dots, n, a_{ji} = -a_{ij}$. En particulier, les termes diagonaux d'une matrice antisymétrique sont nuls, $\forall i = 1, \dots, n, a_{ii} = 0$.

Transposée d'une matrice

Sommaire
Concepts

Exemples
Exercices
Documents

2.2.8 Changement de base-matrice de passage

Exercices :

[Exercice A.1.23](#)

Soit E un espace vectoriel sur $\mathbb{K}$ de dimension n .

Soient $\mathcal{E} = (\vec{e}_1, \vec{e}_2, \dots, \vec{e}_n)$ et $\mathcal{E}' = (\vec{e}'_1, \vec{e}'_2, \dots, \vec{e}'_n)$ deux bases de E . Les n vecteurs de $\mathcal{E}'$ ont donc des composantes sur la base $\mathcal{E}$. On peut ranger ces n^2 scalaires dans une matrice appartenant à $\mathcal{M}_{nn}(\mathbb{K})$. Cette matrice, appelée matrice de passage, est définie de la façon suivante :

Définition 2.2.10. Soit $\mathcal{E} = (\vec{e}_1, \vec{e}_2, \dots, \vec{e}_n)$ et $\mathcal{E}' = (\vec{e}'_1, \vec{e}'_2, \dots, \vec{e}'_n)$ deux bases de E .

Si, pour $1 \leq i \leq n$, on note $p_{1i}, p_{2i}, \dots, p_{ni}$ les composantes du vecteur $\vec{e}'_i$ sur la base $\mathcal{E}$, on définit ainsi une matrice P appelée **matrice de passage** de la base $\mathcal{E}$ à la base $\mathcal{E}'$. La matrice P est donc obtenue en mettant en colonnes les composantes des vecteurs de la “nouvelle base” $\mathcal{E}'$ dans “l’ancienne base” $\mathcal{E}$:

$$P = \begin{pmatrix} \vec{e}'_1 & \dots & \vec{e}'_j & \dots & \vec{e}'_n \\ p_{11} & \dots & p_{1j} & \dots & p_{1n} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ p_{i1} & \dots & p_{ij} & \dots & p_{in} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ p_{n1} & \dots & p_{nj} & \dots & p_{nn} \end{pmatrix} \begin{matrix} \vec{e}_1 \\ \vdots \\ \vec{e}_i \\ \dots \\ \vec{e}_n \end{matrix}.$$

[Sommaire](#)
[Concepts](#)

[Exemples](#)
[Exercices](#)
[Documents](#)

Si u est un endomorphisme de E , pour associer une matrice A à u , il faut choisir une base sur E ensemble de départ, et une base sur E ensemble d'arrivée. Très souvent on choisit la même base, mais ce n'est pas obligatoire.

Proposition 2.2.7. *Soit E un espace vectoriel.*

Soient $\mathcal{E} = (\vec{e}_1, \vec{e}_2, \dots, \vec{e}_n)$ et $\mathcal{E}' = (\vec{e}'_1, \vec{e}'_2, \dots, \vec{e}'_n)$ deux bases de E .

L'application identité de E dans E est un endomorphisme de E , noté Id_E .

On munit E , espace vectoriel de départ, de la base $\mathcal{E}'$ et on munit E , espace vectoriel d'arrivée, de la base $\mathcal{E}$. La matrice associée à l'endomorphisme Id_E quand on choisit ces bases est P , la matrice de passage de la base $\mathcal{E}$ à la base $\mathcal{E}'$:

$$\begin{array}{ccc} E & \xrightarrow{\text{Id}_E} & E \\ \mathcal{E}' & P & \mathcal{E} \end{array} .$$

Démonstration – On utilise la définition de la matrice associée à l'application linéaire Id_E . Les colonnes de cette matrice contiennent les composantes des images des vecteurs de $\mathcal{E}'$ (base de l'espace vectoriel de départ) dans $\mathcal{E}$ (base de l'espace vectoriel d'arrivée) :

$$\vec{e}'_j = \text{Id}_E(\vec{e}'_j) = \sum_{i=1}^n p_{ij} \vec{e}_i, \quad \forall j = 1, \dots, n. \quad (2.2.8)$$

Proposition 2.2.8. *La matrice P de passage de la base $\mathcal{E}$ à la base $\mathcal{E}'$ est inversible et son inverse P^{-1} est la matrice de passage de $\mathcal{E}'$ à $\mathcal{E}$.*

Démonstration – La matrice P est associée à l'application Id_E lorsque l'on munit E de la base $\mathcal{E}'$ au départ et de la base $\mathcal{E}$ à l'arrivée. Or l'application Id_E est bijective, donc P est inversible. P^{-1} est alors associée à l'application réciproque. Cette application réciproque est Id_E lorsque l'on

Changement de base-matrice de passage

Sommaire
Concepts

Exemples
Exercices
Documents

munit E de la base $\mathcal{E}$ au départ et de la base $\mathcal{E}'$ à l'arrivée. P^{-1} est donc la matrice de passage de la base $\mathcal{E}'$ à la base $\mathcal{E}$.

Proposition 2.2.9. *Soit E un espace vectoriel de dimension n .*

Soit $\mathcal{E} = (\vec{e}_1, \vec{e}_2, \dots, \vec{e}_n)$ une base de E .

Soit $Q \in \mathcal{M}_{nn}$ une matrice dont les termes sont notés q_{ij} . On définit les vecteurs

$$\vec{e}'_j = \sum_{i=1}^n q_{ij} \vec{e}_i \quad \forall j = 1, \dots, n.$$

Alors, on a l'équivalence suivante :

$$(\vec{e}'_1, \vec{e}'_2, \dots, \vec{e}'_n) \text{ est une base de } E \iff Q \text{ est inversible.}$$

Démonstration –

Si $\mathcal{E}' = (\vec{e}'_1, \vec{e}'_2, \dots, \vec{e}'_n)$ est une base de E , alors Q est la matrice de passage de $\mathcal{E}$ dans $\mathcal{E}'$, donc Q est inversible.

Montrons la réciproque : on suppose Q inversible, on veut montrer que $(\vec{e}'_1, \vec{e}'_2, \dots, \vec{e}'_n)$ est une base

Changement de base-matrice de passage

Sommaire
Concepts

Exemples
Exercices
Documents

de E . $\dim E = n$, la famille contient n vecteurs, il suffit donc de montrer que la famille est libre.

$$\begin{aligned}
 \sum_{j=1}^n x_j \vec{e}'_j = \vec{0} &\iff \sum_{j=1}^n x_j \sum_{i=1}^n q_{ij} \vec{e}_i = \vec{0} \\
 &\iff \sum_{i=1}^n \left(\sum_{j=1}^n q_{ij} x_j \right) \vec{e}_i = \vec{0} \quad (\text{on change l'ordre des sommes}) \\
 &\iff \sum_{j=1}^n q_{ij} x_j = 0, \forall i = 1, 2, \dots, n \quad (\text{car } (\vec{e}_1, \vec{e}_2, \dots, \vec{e}_n) \text{ est une base de } E) \\
 &\iff QX = 0 \quad \text{où } X = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \dots \\ x_n \end{pmatrix} \\
 &\iff X = 0 \quad (\text{car } Q \text{ est inversible}) \\
 &\iff x_j = 0, \forall j = 1, \dots, n.
 \end{aligned}$$

**Changement de
base-matrice de
passage**

Sommaire
Concepts

Exemples
Exercices
Documents

2.2.9 Changement de base et composantes d'un vecteur

Exercices :

[Exercice A.1.24](#)

Soit E un espace vectoriel et soient $\mathcal{E}$ et $\mathcal{E}'$ deux bases de E . Un même vecteur $\vec{x}$ a des composantes sur $\mathcal{E}$ et sur $\mathcal{E}'$. Quelle relation lie ces composantes ?

Proposition 2.2.10. Soit E un espace vectoriel et soient $\mathcal{E}$ et $\mathcal{E}'$ deux bases de E . Soit $\vec{x} \in E$.

Si P est la matrice de passage de $\mathcal{E}$ à $\mathcal{E}'$, si $(x_1, x_2, \dots, x_n)$ sont les composantes de $\vec{x}$ dans la base $\mathcal{E}$, si $(x'_1, x'_2, \dots, x'_n)$ sont les composantes de $\vec{x}$ dans la base $\mathcal{E}'$,

si on note $X = \begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix}$ et $X' = \begin{pmatrix} x'_1 \\ \vdots \\ x'_n \end{pmatrix}$, alors on a

$$X = PX' \iff X' = P^{-1}X.$$

Démonstration – On décompose le vecteur $\vec{x}$ sur la base $\mathcal{E}'$:

$$\vec{x} = \sum_{j=1}^n x'_j \vec{e}'_j.$$

[Sommaire](#)
[Concepts](#)

[Exemples](#)
[Exercices](#)
[Documents](#)

On utilise la définition de la matrice P donnée par (2.2.8)

$$\vec{x} = \sum_{j=1}^n x'_j \left(\sum_{i=1}^n p_{ij} \vec{e}_i \right) = \sum_{i=1}^n \left(\sum_{j=1}^n p_{ij} x'_j \right) \vec{e}_i.$$

Or $(x_1, x_2, \dots, x_n)$ sont les composantes de $\vec{x}$ dans la base $\mathcal{E}$ on a donc

$$x_i = \sum_{j=1}^n p_{ij} x'_j \iff X = P X'.$$

**Changement de
base et
composantes
d'un vecteur**

[Sommaire](#)
[Concepts](#)

[Exemples](#)
[Exercices](#)
[Documents](#)

2.2.10 Changement de bases et matrices associées à une application linéaire

Exercices :

[Exercice A.1.25](#)

Soit E un espace vectoriel et soient $\mathcal{E}$ et $\mathcal{E}'$ deux bases de E .

Soit u un endomorphisme de E .

Soit A la matrice associée à u quand on choisit la base $\mathcal{E}$ (au départ et à l'arrivée).

Soit A' la matrice associée à u quand on choisit la base $\mathcal{E}'$ (au départ et à l'arrivée).

Quelle relation lie les matrices A et A' ?

Théorème 2.2.1. *Soit E un espace vectoriel et soient $\mathcal{E}$ et $\mathcal{E}'$ deux bases de E .*

Soit $u \in \mathcal{L}(E; E)$. Si A est la matrice associée à u quand on choisit la base $\mathcal{E}$, si A' est la matrice associée à u quand on choisit la base $\mathcal{E}'$ et si P est la matrice de passage de $\mathcal{E}$ à $\mathcal{E}'$, alors on a la relation

$$A' = P^{-1}AP.$$

Démonstration – Dans le diagramme suivant, pour chacune des applications linéaires, on a noté la base choisie sur l'ensemble de départ, la base choisie sur l'ensemble d'arrivée et la matrice

[Sommaire](#)
[Concepts](#)

[Exemples](#)
[Exercices](#)
[Documents](#)

associée avec ce choix des bases :

$$\begin{array}{ccccccc} E & \xrightarrow{\text{Id}_E} & E & \xrightarrow{u} & E & \xrightarrow{\text{Id}_E} & E \\ \mathcal{E}' & & \mathcal{E} & & \mathcal{E} & & \mathcal{E}' \\ & P & & A & & P^{-1} & \end{array}$$

$$\begin{array}{ccc} E & \xrightarrow{u} & E \\ \mathcal{E}' & & \mathcal{E}' \\ & A' & \end{array}$$

On utilise le résultat qui lie composition d'applications linéaires et produit des matrices associées :

$$u = \text{Id}_E \circ u \circ \text{Id}_E, \text{ donc } A' = P^{-1}AP.$$

Une autre démonstration possible : si l'on note $\tilde{y} = u(\tilde{x})$, si X, Y, X', Y' sont les vecteurs colonnes habituels, on a

$$\left\{ \begin{array}{l} Y = AX \\ Y = PY' \\ X = PX' \\ Y' = A'X' \end{array} \right. \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} PY' = APX' \\ Y' = A'X' \end{array} \right. \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} Y' = P^{-1}APX' \\ Y' = A'X' \end{array} \right. \Rightarrow A'X' = (P^{-1}AP)X'.$$

La relation précédente est vraie quel que soit le vecteur colonne X' donc $A' = P^{-1}AP$.

Plus généralement, on a le théorème suivant.

Théorème 2.2.2. Soit $u \in \mathcal{L}(E; F)$. Si $\mathcal{E}$ et $\mathcal{E}'$ sont deux bases de E , si $\mathcal{F}$ et $\mathcal{F}'$ sont deux bases de F , si on note P la matrice de passage de $\mathcal{E}$ à $\mathcal{E}'$, si on note Q la matrice de passage de $\mathcal{F}$ à $\mathcal{F}'$, si A est

**Changement de
bases et matrices
associées à une
application
linéaire**

Sommaire
Concepts

Exemples
Exercices
Documents

la matrice associée à u quand on choisit les bases $\mathcal{E}$ et $\mathcal{F}$, si A' est la matrice associée à u quand on choisit les bases $\mathcal{E}'$ et $\mathcal{F}'$, alors on a

$$A' = Q^{-1}AP.$$

Démonstration – Le diagramme correspondant s'écrit

$$\begin{array}{ccccccc} E & \xrightarrow{\text{Id}_E} & E & \xrightarrow{u} & F & \xrightarrow{\text{Id}_F} & F \\ \mathcal{E}' & & \mathcal{E} & & \mathcal{F} & & \mathcal{F}' \\ & P & & A & & Q^{-1} & \end{array}$$

$$\begin{array}{ccc} E & \xrightarrow{u} & F \\ \mathcal{E}' & & \mathcal{F}' \\ & A' & \end{array}$$

On peut terminer le raisonnement comme dans le théorème précédent.

Changement de bases et matrices associées à une application linéaire

Sommaire
Concepts

Exemples
Exercices
Documents

2.2.11 Matrices semblables

Définition 2.2.11. *S'il existe P inversible telle que $A' = P^{-1}AP$, A et A' sont dites **semblables**.*

Bien sûr, les matrices associées au même endomorphisme $u \in \mathcal{L}(E; E)$ sont semblables.

Proposition 2.2.11.

- *Si A et B sont semblables, alors A^T et B^T sont semblables.*
- *Si A et B sont semblables et si B et C sont semblables, alors A et C sont semblables.*
- *Si A et B sont semblables, leurs traces sont égales.*

Démontrer cette proposition.

[Sommaire](#)
[Concepts](#)

[Exemples](#)
[Exercices](#)
[Documents](#)

2.2.12 Rang

Exercices :

[Exercice A.1.26](#)[Exercice A.1.27](#)

Définition 2.2.12. Soit $u \in \mathcal{L}(E; F)$, on appelle **rang** de u et on note $\text{rang}(u)$ la dimension de $\text{Im } u$.

$\text{Im } u$ est inclus dans F , donc $\text{rang}(u) \leq \dim F$. De plus $\text{rang}(u) = \dim F$ si et seulement si u est surjective.

D'autre part, l'image d'une base de E est une famille génératrice de $\text{Im } u$, donc on a $\text{rang}(u) \leq \dim E$.

Définition 2.2.13. Soit $A \in \mathcal{M}_{mn}$, on appelle $\text{Im } A$ le sous-espace vectoriel de $\mathcal{M}_{m1}$ défini par :

$$Y \in \text{Im } A \iff \exists X \in \mathcal{M}_{n1}, Y = AX.$$

On vérifie facilement que $\text{Im } A$ est bien un sous-espace vectoriel de $\mathcal{M}_{m1}$.

Proposition 2.2.12. Soit $A \in \mathcal{M}_{mn}$, $\text{Im } A$ est le sous-espace vectoriel engendré par les colonnes de A , c'est-à-dire :

$$\text{Im } A = \text{Vect}\langle A_1, \dots, A_n \rangle.$$

[Sommaire](#)
[Concepts](#)

[Exemples](#)
[Exercices](#)
[Documents](#)

Démontrer cette proposition en exercice.

Définition 2.2.14. Soit $A \in \mathcal{M}_{mn}$. On appelle *rang de A* et on note $\text{rang}(A)$, la dimension du sous-espace vectoriel $\text{Im } A$.

Proposition 2.2.13. Soit $u \in \mathcal{L}(E; F)$. Si on choisit une base $\mathcal{E}$ sur E et une base $\mathcal{F}$ sur F , si on définit A la matrice associée à u , alors $\text{rang}(u) = \text{rang}(A)$.

Démonstration – On définit l'application ϕ de F sur $\mathcal{M}_{m1}$ qui à tout vecteur $\vec{y}$ de F associe le vecteur colonne Y de $\mathcal{M}_{m1}$ contenant les composantes de $\vec{y}$ dans la base $\mathcal{F}$.

Comme dans le Théorème 2.1.4, on peut démontrer que ϕ est un isomorphisme de F dans $\mathcal{M}_{m1}$. On note $\mathcal{E} = (\vec{e}_1, \dots, \vec{e}_n)$.

D'après la définition de A , on a $\phi(u(\vec{e}_i)) = A_i$.

Or $\text{Im } u = \text{Vect}\langle u(\vec{e}_1), \dots, u(\vec{e}_n) \rangle$. Donc $\phi(\text{Im } u) = \text{Vect}\langle A_1, \dots, A_n \rangle = \text{Im } A$. Donc $\text{Im } u$ et $\text{Im } A$ sont isomorphes. Donc $\dim \text{Im } u = \dim \text{Im } A$, donc $\text{rang } u = \text{rang } A$.

Proposition 2.2.14.

1. Si A et A' sont semblables, alors elles ont le même rang.
2. A et A^T ont le même rang.

Démonstration – A et A' sont associées à la même application linéaire, donc elles ont le même rang.

La deuxième partie sera démontrée dans un chapitre suivant.

Calcul pratique

Il résulte de la Définition 2.2.14 et de la proposition précédente que le calcul pratique du rang

Sommaire
Concepts

Exemples
Exercices
Documents

d'une matrice se ramène au calcul du nombre maximal de colonnes linéairement indépendantes ou du nombre maximal de lignes linéairement indépendantes. On choisit l'un ou l'autre suivant que l'un se calcule plus facilement que l'autre.

On peut aussi déduire le rang d'une matrice à partir du rang de l'application linéaire u associée, si celui-ci est connu.

On verra dans le chapitre sur les déterminants une autre façon de calculer le rang d'une matrice.

Rang

[Sommaire](#)
[Concepts](#)

[Exemples](#)
[Exercices](#)
[Documents](#)

2.2.13 Rang et dimension du noyau d'une application linéaire

Exercices :

[Exercice A.1.28](#)

Théorème 2.2.3. Soit $u \in \mathcal{L}(E; F)$, alors

$$\dim(\text{Ker } u) + \text{rang } u = \dim E.$$

Démonstration – Si $\text{Ker } u = E$, alors u est l'application nulle, donc $\text{Im } u = \{\vec{0}\}$, donc $\text{rang } u = 0$. Le théorème est alors vérifié.

Si $\text{Ker } u$ est strictement inclus dans E , alors $\dim(\text{Ker } u) < \dim E$.

On note $q = \dim(\text{Ker } u)$, et $n = \dim E$. Soit $\mathcal{B} = (\vec{e}_1, \vec{e}_2, \dots, \vec{e}_q)$ une base de $\text{Ker } u$. On complète cette famille libre de E pour obtenir une base $\mathcal{B}'$ de E

$$\mathcal{B}' = (\vec{e}_1, \vec{e}_2, \dots, \vec{e}_q, \vec{e}_{q+1}, \dots, \vec{e}_n).$$

On va montrer que $\mathcal{C} = (u(\vec{e}_{q+1}), \dots, u(\vec{e}_n))$ est une base de $\text{Im } u$.

$\mathcal{C}$ est une famille génératrice de $\text{Im } u$, en effet $u(\vec{e}_{q+1}), \dots, u(\vec{e}_n)$ appartiennent à $\text{Im } u$ et de plus quel que soit $\vec{y} \in \text{Im } u$, il existe $\vec{x} \in E$ tel que $\vec{y} = u(\vec{x})$.

[Sommaire](#)
[Concepts](#)

[Exemples](#)
[Exercices](#)
[Documents](#)

Le vecteur $\vec{x}$ se décompose sur la base $\mathcal{B}' : \vec{x} = \sum_{i=1}^n x_i \vec{e}_i$.

On utilise la linéarité de u , on a donc

$$\vec{y} = u(\vec{x}) = \sum_{i=1}^n x_i u(\vec{e}_i) = \sum_{i=q+1}^n x_i u(\vec{e}_i).$$

Ceci termine de démontrer que la famille $\mathcal{C}$ est une famille génératrice de $\text{Im } u$.

$\mathcal{C}$ est une famille libre, en effet

$$\sum_{i=q+1}^n \alpha_i u(\vec{e}_i) = \vec{0}_F \implies u\left(\sum_{i=q+1}^n \alpha_i \vec{e}_i\right) = \vec{0}_F \implies \sum_{i=q+1}^n \alpha_i \vec{e}_i \in \text{Ker } u.$$

Or $\mathcal{B}$ est une base de $\text{Ker } u$, donc il existe des scalaires $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_q$ tels que

$$\sum_{i=q+1}^n \alpha_i \vec{e}_i = \sum_{i=1}^q \beta_i \vec{e}_i \iff -\sum_{i=1}^q \beta_i \vec{e}_i + \sum_{i=q+1}^n \alpha_i \vec{e}_i = \vec{0}.$$

Or la famille $\mathcal{B}'$ est libre, donc $\alpha_i = 0$ pour $i = q+1, \dots, n$ (et $\beta_j = 0$ pour $j = 1, \dots, q$). Ceci termine de démontrer que la famille $\mathcal{C}$ est libre.

Donc $\mathcal{C}$ est une base de $\text{Im } u$. Cette famille contient $n - q$ vecteurs donc

$$\text{rang}(u) = \dim(\text{Im } u) = n - q = \dim E - \dim(\text{Ker } u).$$

Du théorème précédent découle le résultat très important suivant :

Proposition 2.2.15. Soit $u \in \mathcal{L}(E; F)$.

Si E et F sont deux espaces vectoriels de même dimension. Alors les propositions suivantes sont équivalentes

**Rang et
dimension du
noyau d'une
application
linéaire**

Sommaire
Concepts

Exemples
Exercices
Documents

- (i) u injective,
- (ii) u surjective,
- (iii) u bijective.

Démonstration – Il suffit de montrer que (i) $\iff$ (ii).

$$\begin{aligned} u \text{ injective} &\iff \text{Ker } u = \{\vec{0}_E\} \iff \dim(\text{Im } u) = \dim E \quad (\text{Théorème 2.2.3}) \\ &\iff \dim F = \dim(\text{Im } u) \quad \text{car } \dim E = \dim F \text{ par hypothèse} \\ &\iff F = \text{Im } u \quad \text{car } \text{Im } u \text{ est un sous-espace vectoriel de } F \\ &\iff u \text{ surjective.} \end{aligned}$$

**Rang et
dimension du
noyau d'une
application
linéaire**

[Sommaire](#)
[Concepts](#)

[Exemples](#)
[Exercices](#)
[Documents](#)

2.2.14 Noyau d'une matrice

Exercices :

[Exercice A.1.29](#)

[Exercice A.1.30](#)

Définition 2.2.15. Soit $A \in \mathcal{M}_{mn}$, on appelle noyau de A le sous-espace vectoriel de $\mathcal{M}_{n1}$ noté $\text{Ker } A$, défini par :

$$\text{Ker } A = \{X \in \mathcal{M}_{n1}, AX = 0\}.$$

On montre facilement que $\text{Ker } A$ est un sous-espace vectoriel de $\mathcal{M}_{n1}$.

Théorème 2.2.4. Si $A \in \mathcal{M}_{mn}$, alors

$$\dim(\text{Ker } A) + \dim(\text{Im } A) = n = \text{nombre de colonnes de } A.$$

Démonstration – On définit l'application linéaire u de $\mathcal{M}_{n1}$ dans $\mathcal{M}_{m1}$ par $u(X) = AX$ on a alors $\text{Ker } u = \text{Ker } A$, $\text{Im } u = \text{Im } A$, de plus $\dim \mathcal{M}_{n1} = n$ et le Théorème 2.2.3 permet donc de déduire le résultat.

On peut énoncer un autre résultat important :

Proposition 2.2.16. Soit A une matrice carrée appartenant à $\mathcal{M}_{nn}$. Alors on a les équivalences suivantes :

$$A \text{ inversible} \iff \text{Ker } A = \{0\} \iff \text{rang } A = n.$$

[Sommaire](#)
[Concepts](#)

[Exemples](#)
[Exercices](#)
[Documents](#)

Démonstration – L'application linéaire u définie par $u(X) = AX$ est un endomorphisme de $\mathcal{M}_n$ (ici $m = n$). On utilise la Proposition 2.2.15 et on a :

$$u \text{ inversible} \iff u \text{ bijective} \iff u \text{ bijective} \iff u \text{ injective} \iff \text{Ker } u = \{\vec{0}\}.$$

La matrice associée à u quand on choisit la base canonique de $\mathcal{M}_n$ est A .

On a donc :

$$A \text{ inversible} \iff u \text{ inversible}.$$

On utilise le Théorème 2.2.4 :

$$\text{Ker } u = \{\vec{0}\} \iff \text{Ker } A = \{0\} \iff \dim(\text{Ker } A) = 0 \iff \dim(\text{Im } A) = n \iff \text{rang } A = n.$$

Ce qui termine de démontrer les équivalences :

$$A \text{ inversible} \iff u \text{ inversible} \iff \text{Ker } u = \{\vec{0}\} \iff \text{Ker } A = \{0\} \iff \text{rang } A = n.$$

On verra une autre propriété caractéristique des matrices inversibles dans le chapitre sur les déterminants.

Noyau d'une matrice

[Sommaire](#)
[Concepts](#)

[Exemples](#)
[Exercices](#)
[Documents](#)

Annexe A

Exercices

A.1	Exercices du chapitre 2	62
A.2	Exercices de TD	94

[Sommaire](#)
[Concepts](#)

[Exemples](#)
[Exercices](#)
[Documents](#)

A.1 Exercices du chapitre 2

A.1.1	Ch2-Exercice 1 : applications linéaires ou non	63
A.1.2	Ch2-Exercice 2 : noyau = sous espace vectoriel	65
A.1.3	Ch2-Exercice 3 : noyau et image d'applications linéaires	66
A.1.4	Ch2-Exercice 4 : images de familles liée et génératrice	67
A.1.5	Ch2-Exercice 5 : projection sur seV : linéarité, noyau, image	68
A.1.6	Ch2-Exercice 6 : projection sur seV : idempotence	69
A.1.7	Ch2-Exercice 7 : linéarité de la composée d'applications linéaires	70
A.1.8	Ch2-Exercice 8 : image de vecteur par appl. lin. définie sur une base . .	71
A.1.9	Ch2-Exercice 9 : image de famille libre et de base, injectivité	72
A.1.10	Ch2-Exercice 10 : bijectivité et image d'une base	73
A.1.11	Ch2-Exercice 11 : isomorphisme canonique entre E et F	74
A.1.12	Ch2-Exercice 12 : isomorphisme canonique entre E et K^n	75
A.1.13	Ch2-Exercice 13 : matrice de l'application identité	76
A.1.14	Ch2-Exercice 14 : matrice de la dérivation sur l'espace des polynômes .	77
A.1.15	Ch2-Exercice 15 : application définie par une matrice	78
A.1.16	Ch2-Exercice 16 : matrice d'une application linéaire	79
A.1.17	Ch2-Exercice 17 : espace vectoriel des matrices, base de $\mathcal{M}_{mn}$	80
A.1.18	Ch2-Exercice 18 : produit (non commutatif) de matrices	81
A.1.19	Ch2-Exercice 19 : produit à gauche, à droite par une matrice diagonale	82
A.1.20	Ch2-Exercice 20 : produit matrice $\times$ vecteur	83
A.1.21	Ch2-Exercice 21 : inverse du produit de matrices	84
A.1.22	Ch2-Exercice 22 : lignes, colonnes de la transposée de matrice	85

Sommaire
Concepts

Exemples
Exercices
Documents

A.1.23	Ch2-Exercice 23 : changement de base : matrice de passage (dim = 2) .	86
A.1.24	Ch2-Exercice 24 : changement de base : composantes d'un vecteur . . .	87
A.1.25	Ch2-Exercice 25 : changement de base : matrices d'une appl. linéaire .	88
A.1.26	Ch2-Exercice 26 : image d'une matrice engendrée par ses colonnes . .	89
A.1.27	Ch2-Exercice 27 : rangs de matrices	90
A.1.28	Ch2-Exercice 28 : injectivité, surjectivité, bijectivité selon les dimensions	91
A.1.29	Ch2-Exercice 29 : noyau d'une matrice = sous espace vectoriel	92
A.1.30	Ch2-Exercice 30 : inversibilité de deux matrices 3×3	93

[Sommaire](#)
[Concepts](#)

[Exemples](#)
[Exercices](#)
[Documents](#)

Exercice A.1.1 Ch2-Exercice 1 : applications linéaires ou non

Les applications suivantes sont-elles linéaires ?

1. L'application $u : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$, définie par $u(x) = \cos x$.
2. L'application $u : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$, définie par $u(x) = \alpha x + \beta$, où α et β sont donnés dans $\mathbb{R}$; discuter suivant les valeurs de α et β .
3. L'application $u : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$, définie par

$$u(\vec{x}) = a_1 x_1 + a_2 x_2 + \dots + a_n x_n,$$

où $(a_1, a_2, \dots, a_n)$ sont donnés dans $\mathbb{R}$.

4. La projection d'un vecteur de l'espace sur un plan Π parallèlement à une droite Δ donnée.
5. Soit $\mathbb{R}_k[X]$ l'espace vectoriel des polynômes sur $\mathbb{R}$ de degré au plus k , dont on note les éléments P . On définit $u : \mathbb{R}_k[X] \rightarrow \mathbb{R}_{k-1}[X]$ par $u(P) = P'$, (P' est la dérivée de P).
6. L'application $u : \mathbb{K}_k[X] \rightarrow \mathbb{K}_{2k}[X]$ définie par $u(P) = P^2$.
7. Soit $\mathcal{C}(0, 1)$ l'espace vectoriel des fonctions numériques continues sur l'intervalle fermé $[0, 1]$, dont on note ϕ les éléments. On définit alors $u : \mathcal{C}(0, 1) \rightarrow \mathbb{R}$ par $u(\phi) = \int_0^1 \phi(t) dt$.

[retour au cours](#)

[Sommaire](#)
[Concepts](#)

[Exemples](#)
[Exercices](#)
[Documents](#)

Solution

Exercice A.1.1

Ch2-Exercice 1 :
applications
linéaires ou non

[Sommaire](#)
[Concepts](#)

[Exemples](#)
[Exercices](#)
[Documents](#)

Exercice A.1.2 Ch2-Exercice 2 : noyau = sous espace vectoriel

Montrer que $\text{Ker } u$ est un sous-espace vectoriel de E .

[retour au cours](#)

[Sommaire](#)
[Concepts](#)

[Exemples](#)
[Exercices](#)
[Documents](#)

Exercice A.1.3 Ch2-Exercice 3 : noyau et image d'applications linéaires

On reprend les applications de l'Exercice [A.1.1](#). Lorsque ces applications sont linéaires déterminer leur noyau et leur image.

[retour au cours](#)

[Solution](#)

[Sommaire](#)
[Concepts](#)

[Exemples](#)
[Exercices](#)
[Documents](#)

Exercice A.1.4 Ch2-Exercice 4 : images de familles liée et génératrice

Démontrer le théorème suivant : Soit $u \in \mathcal{L}(E; F)$, alors on a les propriétés suivantes :

- l'image par u de toute famille liée de E est une famille liée de F ,
- l'image par u de toute famille génératrice de E est une famille génératrice de $\text{Im } u$.

[retour au cours](#)

[Solution](#)

[Sommaire](#)
[Concepts](#)

[Exemples](#)
[Exercices](#)
[Documents](#)

Exercice A.1.5 Ch2-Exercice 5 : projection sur seV : linéarité, noyau, image

Soit un espace vectoriel E , F_1 et F_2 deux sous-espaces vectoriels de E tels que $E = F_1 \oplus F_2$, on appelle **projection** ou encore **projecteur** sur F_1 parallèlement à F_2 l'application u de E dans E définie par :

$$u(\vec{x}) = \vec{x}_1 \quad \text{si } \vec{x} = \vec{x}_1 + \vec{x}_2, \text{ où } \vec{x}_1 \in F_1, \vec{x}_2 \in F_2.$$

Montrer que la projection ainsi définie est une application linéaire. Déterminer son noyau et son image.

[retour au cours](#)

[Solution](#)

[Sommaire](#)
[Concepts](#)

[Exemples](#)
[Exercices](#)
[Documents](#)

Exercice A.1.6 Ch2-Exercice 6 : projection sur seV : idempotence

Montrer que si u est une projection, alors $u = u \circ u$. On démontrera la réciproque de cette propriété en TD.

[retour au cours](#)[Solution](#)[Sommaire](#)
[Concepts](#)[Exemples](#)
[Exercices](#)
[Documents](#)

Exercice A.1.7 Ch2-Exercice 7 : linéarité de la composée d'applications linéaires

Vérifier que $w = u \circ v$ est bien un élément de $\mathcal{L}(E; G)$.

[retour au cours](#)[Solution](#)[Sommaire](#)
[Concepts](#)[Exemples](#)
[Exercices](#)
[Documents](#)

Exercice A.1.8 Ch2-Exercice 8 : image de vecteur par appl. lin. définie sur une base

Soient E un espace vectoriel de dimension 3 et $\mathcal{E} = (\vec{e}_1, \vec{e}_2, \vec{e}_3)$ une base de E .

Soient F un espace vectoriel de dimension 2 et $\mathcal{F} = (\vec{f}_1, \vec{f}_2)$ une base de F .

Soit $u \in \mathcal{L}(E; F)$, telle que $u(\vec{e}_1) = \vec{f}_1 + \vec{f}_2$, $u(\vec{e}_2) = \vec{f}_1 - \vec{f}_2$ et $u(\vec{e}_3) = \vec{f}_1 - 2\vec{f}_2$.

Calculer l'expression de $u(\vec{x})$ pour $\vec{x}$ quelconque de E .

[retour au cours](#)

[Solution](#)

[Sommaire](#)
[Concepts](#)

[Exemples](#)
[Exercices](#)
[Documents](#)

Exercice A.1.9 Ch2-Exercice 9 : image de famille libre et de base, injectivité

1. Soit $u \in \mathcal{L}(E; F)$. On suppose que u est injective.
 - (a) Montrer que si la famille $(u(\vec{x}_1), \dots, u(\vec{x}_p))$ est liée, alors la famille $(\vec{x}_1, \dots, \vec{x}_p)$ est liée.
 - (b) Montrer que l'image d'une base de E est une base de $\text{Im } u$.
2. Soit $u \in \mathcal{L}(E; F)$, E de type fini. Montrer que les deux propositions suivantes sont équivalentes :
 - (i) u est injective,
 - (ii) il existe une base $\mathcal{B} = (\vec{e}_1, \dots, \vec{e}_n)$ de E telle que $(u(\vec{e}_1), \dots, u(\vec{e}_n))$ soit libre.

[retour au cours](#)[Solution](#)[Sommaire](#)
[Concepts](#)[Exemples](#)
[Exercices](#)
[Documents](#)

Exercice A.1.10 Ch2-Exercice 10 : bijectivité et image d'une base

Soit $u \in \mathcal{L}(E; F)$, où E et F ne sont pas réduits à $\{\vec{0}\}$. On définit les propositions suivantes :

- (i) u est bijective,
- (ii) l'image par u d'une base de E est une base de F .

Montrer que (i) $\iff$ (ii).

[retour au cours](#)

[Solution](#)

[Sommaire](#)
[Concepts](#)

[Exemples](#)
[Exercices](#)
[Documents](#)

Exercice A.1.11 Ch2-Exercice 11 : isomorphisme canonique entre E et F

Soient E et F deux espaces de même dimension n , soient $(\vec{e}_1, \vec{e}_2, \dots, \vec{e}_n)$ et $(\vec{f}_1, \vec{f}_2, \dots, \vec{f}_n)$ des bases de E et F . On définit une application linéaire u de la manière suivante

$$\forall i \in \{1, \dots, n\}, \quad u(\vec{e}_i) = \vec{f}_i.$$

Montrer qu'alors u est bijective de E sur F .

[retour au cours](#)

[Solution](#)

[Sommaire](#)
[Concepts](#)

[Exemples](#)
[Exercices](#)
[Documents](#)

Exercice A.1.12 Ch2-Exercice 12 : isomorphisme canonique entre E et K^n

Soit E un espace vectoriel de dimension n , muni d'une base $\mathcal{E} = (\vec{e}_1, \vec{e}_2, \dots, \vec{e}_n)$. Alors pour tout $\vec{x} \in E$, il existe un unique $(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n) \in \mathbb{K}^n$ tel que $\vec{x}$ s'écrit

$$\vec{x} = \sum_{j=1}^n \alpha_j \vec{e}_j.$$

On peut associer à $\vec{x} \in E$ le vecteur $(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n)$ de $\mathbb{K}^n$ des composantes de $\vec{x}$ dans la base $\mathcal{E}$. Montrer que l'application $\phi : E \rightarrow \mathbb{K}^n$ définie par $\vec{x} \mapsto (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n)$ est un isomorphisme de E sur $\mathbb{K}^n$.

[retour au cours](#)[Solution](#)[Sommaire](#)
[Concepts](#)[Exemples](#)
[Exercices](#)
[Documents](#)

Exercice A.1.13 Ch2-Exercice 13 : matrice de l'application identité

Soit l'application identité $\text{Id}_E : E \rightarrow E$ définie par $\text{Id}_E(\vec{x}) = \vec{x}$ pour tout $\vec{x}$ de E . Montrer que la matrice de Id_E est la matrice identité I_n , lorsque l'on munit l'espace E de la base $\mathcal{E} = (\vec{e}_1, \vec{e}_2, \dots, \vec{e}_n)$.

[retour au cours](#)[Solution](#)[Sommaire](#)
[Concepts](#)[Exemples](#)
[Exercices](#)
[Documents](#)

Exercice A.1.14 Ch2-Exercice 14 : matrice de la dérivation sur l'espace des polynômes

On suppose $E = F = \mathbb{K}_3[X]$ et on munit $\mathbb{K}_3[X]$ de la base canonique (p_0, p_1, p_2, p_3) . On définit u telle que $u(p) = p'$. Déterminer alors la matrice de u .

[retour au cours](#)[Solution](#)[Sommaire](#)
[Concepts](#)[Exemples](#)
[Exercices](#)
[Documents](#)

Exercice A.1.15 Ch2-Exercice 15 : application définie par une matrice

Soit la matrice A définie par : $A = \begin{pmatrix} 3 & 4 & 5 \\ 1 & 2 & 6 \end{pmatrix}$ et u est l'application linéaire de $\mathbb{R}^3$ dans $\mathbb{R}^2$ dont la matrice est A lorsque l'on munit $\mathbb{R}^3$ et $\mathbb{R}^2$ de leurs bases canoniques. Que valent $u(\vec{e}_1)$, $u(\vec{e}_2)$, $\dots$, $u(\vec{e}_n)$? En déduire $u(\vec{x})$ pour $\vec{x} = (1, -1, 2)$.

[retour au cours](#)[Solution](#)[Sommaire](#)
[Concepts](#)[Exemples](#)
[Exercices](#)
[Documents](#)

Exercice A.1.16 Ch2-Exercice 16 : matrice d'une application linéaire

Soit u l'application linéaire de $\mathbb{R}^4$ dans $\mathbb{R}^3$ définie par

$$u(\vec{x}) = (x_1 - x_2 + x_3 + x_4, x_1 + 2x_2 - x_4, x_1 + x_2 + 3x_3 - 3x_4).$$

Déterminer la matrice A associée à u lorsque l'on munit $\mathbb{R}^3$ et $\mathbb{R}^4$ des bases canoniques.

[retour au cours](#)

[Solution](#)

[Sommaire](#)
[Concepts](#)

[Exemples](#)
[Exercices](#)
[Documents](#)

Exercice A.1.17 Ch2-Exercice 17 : espace vectoriel des matrices, base de $\mathcal{M}_{mn}$

1. Démontrer que $\mathcal{M}_{mn}$ est un espace vectoriel. En particulier quel est l'élément neutre pour l'addition? Quel est l'opposé de A ?
2. Déterminer une base de $\mathcal{M}_{mn}$. Quelle est la dimension de $\mathcal{M}_{mn}$?

[retour au cours](#)[Solution](#)[Sommaire](#)
[Concepts](#)[Exemples](#)
[Exercices](#)
[Documents](#)

Exercice A.1.18 Ch2-Exercice 18 : produit (non commutatif) de matrices

Calculer le produit AB (et BA lorsque cela est possible) dans les cas suivants :

$$— A = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}, B = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix},$$

$$— A = \begin{pmatrix} 1 & 2 & -1 \\ 0 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 0 \end{pmatrix}, B = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1 & 1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix}.$$

[retour au cours](#)

[Solution](#)

[Sommaire](#)
[Concepts](#)

[Exemples](#)
[Exercices](#)
[Documents](#)

Exercice A.1.19 Ch2-Exercice 19 : produit à gauche, à droite par une matrice diagonale

On définit les matrices $D = \begin{pmatrix} 2 & 0 & 0 \\ 0 & 3 & 0 \\ 0 & 0 & 4 \end{pmatrix}$, $D' = \begin{pmatrix} 5 & 0 \\ 0 & 6 \end{pmatrix}$, $B = \begin{pmatrix} 1 & 2 \\ -1 & 1 \\ 3 & -1 \end{pmatrix}$.

1. Calculer BD' , DB . Que se passe-t-il quand on multiplie une matrice à droite par une matrice diagonale? Et quand on multiplie une matrice à gauche par une matrice diagonale? Énoncer des résultats généraux.
2. Par quelle matrice L doit-on multiplier B à gauche pour que $LB = \underline{B}_2$? Par quelle matrice C doit-on multiplier B à droite pour que $BC = B_1$?

[retour au cours](#)

Solution

[Sommaire](#)
[Concepts](#)

[Exemples](#)
[Exercices](#)
[Documents](#)

Exercice A.1.20 Ch2-Exercice 20 : produit matrice $\times$ vecteur

Reprendre l'Exercice [A.1.15](#). Que vaut X ? Calculer AX et comparer avec ce qui a été trouvé alors.

[retour au cours](#)[Solution](#)[Sommaire](#)
[Concepts](#)[Exemples](#)
[Exercices](#)
[Documents](#)

Exercice A.1.21 Ch2-Exercice 21 : inverse du produit de matrices

Démontrer que le produit de deux matrices carrées inversibles de même dimension est inversible et démontrer que $(AB)^{-1} = B^{-1}A^{-1}$.

[retour au cours](#)[Solution](#)[Sommaire](#)
[Concepts](#)[Exemples](#)
[Exercices](#)
[Documents](#)

Exercice A.1.22 Ch2-Exercice 22 : lignes, colonnes de la transposée de matrice

Soit la matrice $B = \begin{pmatrix} 1 & 2 \\ -1 & 1 \\ 3 & -1 \end{pmatrix}$.

Expliciter $\underline{B}_1, \underline{B}_2, \underline{B}_3, B_1, B_2, \underline{B}_1^T, \underline{B}_2^T, (B^T)_1, (B^T)_2, (B^T)_3, (\underline{B}_1)^T, (\underline{B}_2)^T, (\underline{B}_3)^T, (B_1)^T, (B_2)^T$.

Vérifier sur cet exemple que : $(B_j)^T = \underline{B}_j^T$ pour $j = 1, 2$ (les transposées des colonnes de B sont les lignes de B^T).

Bien sûr ces résultats se généralisent à une matrice B quelconque.

[retour au cours](#)

[Solution](#)

[Sommaire](#)
[Concepts](#)

[Exemples](#)
[Exercices](#)
[Documents](#)

Exercice A.1.23 Ch2-Exercice 23 : changement de base : matrice de passage ($\dim = 2$)

Soit E un espace vectoriel muni d'une base $\mathcal{E} = (\vec{e}_1, \vec{e}_2)$. On définit les vecteurs $\vec{e}'_1 = \vec{e}_1 + \vec{e}_2$, $\vec{e}'_2 = 2\vec{e}_1 - \vec{e}_2$.

- Montrer que $\mathcal{E}' = (\vec{e}'_1, \vec{e}'_2)$ forme une base de E .
- Que vaut P matrice de passage de $\mathcal{E}$ dans $\mathcal{E}'$?

[retour au cours](#)

[Solution](#)

[Sommaire](#)
[Concepts](#)

[Exemples](#)
[Exercices](#)
[Documents](#)

Exercice A.1.24 Ch2-Exercice 24 : changement de base : composantes d'un vecteur

Reprendre l'Exercice [A.1.23](#)

- Exprimer $\vec{e}_1$ et $\vec{e}_2$ en fonction de $\vec{e}'_1$ et $\vec{e}'_2$.
- Si x_1 et x_2 sont les composantes du vecteur $\vec{x}$ dans la base $\mathcal{E}$, en déduire x'_1 et x'_2 ses composantes dans la base $\mathcal{E}'$.
- Vérifier que $X = PX'$.
- Que vaut P^{-1} matrice de passage de $\mathcal{E}'$ dans $\mathcal{E}$? Effectuer le produit PP^{-1} .

[retour au cours](#)

[Solution](#)

[Sommaire](#)
[Concepts](#)

[Exemples](#)
[Exercices](#)
[Documents](#)

Exercice A.1.25 Ch2-Exercice 25 : changement de base : matrices d'une appl. linéaire

On reprend les données de l'Exercice [A.1.23](#). On définit $u \in \mathcal{L}(E; E)$ par

$$u(\vec{e}_1) = \vec{e}_1 + 3\vec{e}_2, u(\vec{e}_2) = 2\vec{e}_1 - \vec{e}_2$$

- Quelle est la matrice A de u dans la base $\mathcal{E}$?
- Exprimer $u(\vec{e}'_1), u(\vec{e}'_2)$ en fonction de $\vec{e}_1$ et $\vec{e}_2$.
- En déduire $u(\vec{e}'_1), u(\vec{e}'_2)$ en fonction de $\vec{e}'_1$ et $\vec{e}'_2$.
- En déduire A' .
- Calculer $P^{-1}AP$.

[retour au cours](#)

[Solution](#)

[Sommaire](#)
[Concepts](#)

[Exemples](#)
[Exercices](#)
[Documents](#)

Exercice A.1.26 Ch2-Exercice 26 : image d'une matrice engendrée par ses colonnes

Soit $A \in \mathcal{M}_{mn}$, montrer que $\text{Im } A$ est un sous espace vectoriel. Montrer plus précisément que $\text{Im } A = \text{Vect}\langle A_1, \dots, A_n \rangle$.

[retour au cours](#)[Solution](#)[Sommaire](#)
[Concepts](#)[Exemples](#)
[Exercices](#)
[Documents](#)

Exercice A.1.27 Ch2-Exercice 27 : rangs de matrices

Déterminer le rang des matrices A suivantes :

— Si $E = E_1 \oplus E_2$, A est la matrice de la projection sur E_1 parallèlement à E_2 .

— A est la matrice de la rotation dans le plan.

— $A = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 3 & 1 & 1 \end{pmatrix}.$

[retour au cours](#)

[Solution](#)

[Sommaire](#)
[Concepts](#)

[Exemples](#)
[Exercices](#)
[Documents](#)

Exercice A.1.28 Ch2-Exercice 28 : injectivité, surjectivité, bijectivité selon les dimensions

On définit les 5 propositions :

- a) f est injective.
- b) f est surjective.
- c) f est bijective.
- d) f n'est pas injective.
- e) f n'est pas surjective.

Dans chacun des cas suivants, énoncer parmi les 5 propositions ci-dessus lesquelles sont exactes (sans hypothèse supplémentaire) :

- 1. f est linéaire de $\mathbb{R}^3$ dans $\mathbb{R}^4$.
- 2. f est linéaire de $\mathbb{R}^3$ dans $\mathbb{R}^3$.
- 3. f est linéaire de $\mathbb{R}^4$ dans $\mathbb{R}^3$.
- 4. f est linéaire injective de $\mathbb{R}^3$ dans $\mathbb{R}^4$.
- 5. f est linéaire injective de $\mathbb{R}^3$ dans $\mathbb{R}^3$.
- 6. f est linéaire surjective de $\mathbb{R}^3$ dans $\mathbb{R}^2$.
- 7. f est linéaire surjective de $\mathbb{R}^5$ dans $\mathbb{R}^5$.

[retour au cours](#)

[Solution](#)

[Sommaire](#)
[Concepts](#)

[Exemples](#)
[Exercices](#)
[Documents](#)

Exercice A.1.29 Ch2-Exercice 29 : noyau d'une matrice = sous espace vectoriel

Montrer que si $A \in \mathcal{M}_{np}$, alors $\text{Ker } A$ est un sous-espace vectoriel de $\mathcal{M}_{p1}$.

[retour au cours](#)[Solution](#)[Sommaire](#)
[Concepts](#)[Exemples](#)
[Exercices](#)
[Documents](#)

Exercice A.1.30 Ch2-Exercice 30 : inversibilité de deux matrices 3×3

Les matrices suivantes sont-elles inversibles?

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 2 & -3 \\ 3 & -1 & 5 \\ 2 & 3 & -4 \end{pmatrix}, \quad B = \begin{pmatrix} 1 & 2 & -3 \\ 3 & -1 & 5 \\ 2 & 3 & 1 \end{pmatrix}.$$

[retour au cours](#)

[Solution](#)

[Sommaire](#)
[Concepts](#)

[Exemples](#)
[Exercices](#)
[Documents](#)

A.2 Exercices de TD

A.2.1	TD2-Exercice 1 : application linéaire de R^2 dans R^2 , image, noyau . . .	95
A.2.2	TD2-Exercice 2 : application linéaire de R^4 dans R^3 , image, noyau . . .	96
A.2.3	TD2-Exercice 3 : noyau et image de u^2 , projecteur	97
A.2.4	TD2-Exercice 4 : famille génératrice, dérivée de polynôme	98
A.2.5	TD2-Exercice 5 : image d'une famille libre	99
A.2.6	TD2-Exercice 6 : application linéaire sur des espaces de fonctions . . .	100
A.2.7	TD2-Exercice 7 : application linéaire sur des espaces des polynômes . .	102
A.2.8	TD2-Exercice 8 : sous espaces vectoriels de matrices	103
A.2.9	TD2-Exercice 9 : commutant d'une matrice 2×2	105
A.2.10	TD2-Exercice 10 : trace du produit de matrices	106
A.2.11	TD2-Exercice 11 : formule du binôme de Newton pour les matrices . .	107
A.2.12	TD2-Exercice 12 : matrices d'une application dans 2 bases, passage . .	108
A.2.13	TD2-Exercice 13 : matrices d'une rotation dans R^3	110
A.2.14	TD2-Exercice 14 : rangs de matrices	111
A.2.15	TD2-Exercice 15 : noyau, image d'une appl. lin. définie par une matrice	113
A.2.16	TD2-Exercice 16 : matrices de rang 1	114
A.2.17	TD2-Exercice 17 : propriétés d'un projecteur	115
A.2.18	TD2-Exercice 18 : noyau et rang de la composée de 2 appl. lin.	116

Sommaire
Concepts

Exemples
Exercices
Documents

Exercice A.2.1 TD2-Exercice 1 : application linéaire de $\mathbb{R}^2$ dans $\mathbb{R}^2$, image, noyau

1. Soit $f : \begin{array}{ccc} \mathbb{R}^2 & \rightarrow & \mathbb{R}^2 \\ (x_1, x_2) & \mapsto & (x_1 + x_2, -x_1 - x_2) \end{array}$

(a) Montrer que f est une application linéaire.

(b) Déterminer $\text{Ker } f$ et $\text{Im } f$.

(Réponse : $\text{Ker } f = \{\vec{x} \in \mathbb{R}^2, x_1 = -x_2\}$, $\text{Im } f = \{\vec{y} \in \mathbb{R}^2, y_1 = -y_2\}$).

(c) Calculer $f \circ f$. Le résultat était-il prévisible?

2. E, F et G étant des espaces vectoriels, soient $f \in \mathcal{L}(E; F)$ et $g \in \mathcal{L}(F; G)$. Montrer que :

$$g \circ f = 0 \iff \text{Im } f \subset \text{Ker } g.$$

Question 1a [Aide 1](#)

Question 1b [Aide 1](#)

Question 1c [Aide 1](#)

Question 2 [Aide 1](#) [Aide 2](#)

[Sommaire](#)
[Concepts](#)

[Exemples](#)
[Exercices](#)
[Documents](#)

Exercice A.2.2 TD2-Exercice 2 : application linéaire de $\mathbb{R}^4$ dans $\mathbb{R}^3$, image, noyau

Soit $f : \mathbb{R}^4 \rightarrow \mathbb{R}^3$
 $(x_1, x_2, x_3, x_4) \mapsto (x_1 - x_2 + x_3 + x_4, x_1 + 2x_3 - x_4, x_1 + x_2 + 3x_3 - 3x_4)$.

1. Montrer que f est une application linéaire.
2. Déterminer une base de $\text{Ker } f$. (Réponse : $((-2, -1, 1, 0), (1, 2, 0, 1))$).
3. Déterminer une base de $\text{Im } f$. (Réponse : $((1, 1, 1), (-1, 0, 1))$).
4. Vérifier que $\dim \text{Ker } f + \dim \text{Im } f = 4$.

Question 1 [Aide 1](#)

Question 2 [Aide 1](#) [Aide 2](#) [Aide 3](#)

Question 3 [Aide 1](#) [Aide 2](#) [Aide 3](#)

[Sommaire](#)
[Concepts](#)

[Exemples](#)
[Exercices](#)
[Documents](#)

Exercice A.2.3 TD2-Exercice 3 : noyau et image de u^2 , projecteur

1. E est un espace vectoriel, soit $u \in \mathcal{L}(E; E)$, on note $u \circ u = u^2$, montrer que :
 - (a) $\text{Ker } u \subset \text{Ker } u^2$.
 - (b) $\text{Im } u^2 \subset \text{Im } u$.
 - (c) $\text{Ker } u = \text{Ker } u^2 \iff \text{Im } u \cap \text{Ker } u = \{\vec{0}\}$.
 - (d) $\text{Im } u = \text{Im } u^2 \iff E = \text{Im } u + \text{Ker } u$.
2. Soit E un espace vectoriel On appelle *projecteur* tout élément $p \in \mathcal{L}(E; E)$ tel que $p \circ p = p$.
 - (a) Montrer que si p est un projecteur alors $E = \text{Ker } p \oplus \text{Im } p$.
 - (b) Donner la décomposition unique de $\vec{x} \in E$.
 - (c) En déduire que p est la projection sur $\text{Im } p$, parallèlement à $\text{Ker } p$.

Question 1a [Aide 1](#) [Aide 2](#)Question 1b [Aide 1](#) [Aide 2](#)Question 1c [Aide 1](#) [Aide 2](#) [Aide 3](#)Question 1d [Aide 1](#) [Aide 2](#) [Aide 3](#)Question 2a [Aide 1](#) [Aide 2](#)Question 2b [Aide 1](#)Question 2c [Aide 1](#)[Sommaire](#)
[Concepts](#)[Exemples](#)
[Exercices](#)
[Documents](#)

Exercice A.2.4 TD2-Exercice 4 : famille génératrice, dérivée de polynôme

1. Soit $\mathbb{K}_n[X]$ l'espace vectoriel des polynômes p de degré inférieur ou égal à n .
Soit $u \in \mathcal{L}(\mathbb{K}_n[X]; \mathbb{K}_{n-1}[X])$ définie par : $u(p) = p'$ (dérivée de p).
Donner une base $(\dots, p_i, \dots)$ de $\mathbb{K}_n[X]$.
Calculer $(\dots, u(p_i), \dots)$ et montrer qu'elle est génératrice de $\mathbb{K}_{n-1}[X]$.
2. De façon plus générale, on suppose que $u \in \mathcal{L}(E; F)$.
 - (a) Montrer que l'image d'une famille génératrice de E est génératrice de $\text{Im } u$.
 - (b) Si $(u(\vec{x}_1), \dots, u(\vec{x}_p))$ est une famille génératrice de $\text{Im } u$ peut-on dire que $(\vec{x}_1, \dots, \vec{x}_p)$ est une famille génératrice de E ? Si oui le démontrer, si non donner une condition supplémentaire sur u pour que la réponse soit oui.
 - (c) L'image par u d'une famille génératrice de E est-elle génératrice de F ?

Question 1 [Aide 1](#)Question 2a [Aide 1](#)Question 2b [Aide 1](#) [Aide 2](#)Question 2c [Aide 1](#) [Aide 2](#) [Aide 3](#)[Sommaire](#)
[Concepts](#)[Exemples](#)
[Exercices](#)
[Documents](#)

Exercice A.2.5 TD2-Exercice 5 : image d'une famille libre

Soit $u \in \mathcal{L}(E; E)$, et soient $\vec{x}_1, \dots, \vec{x}_n$ des éléments de E . On définit les propositions suivantes

$P_1 : (\vec{x}_1, \dots, \vec{x}_n)$ est libre.

$P_2 : (u(\vec{x}_1), \dots, u(\vec{x}_n))$ est libre.

1. Démontrer une implication correcte entre P_1 et P_2
2. À quelle condition sur u a-t-on équivalence entre P_1 et P_2 ?

Question 1 [Aide 1](#) [Aide 2](#) [Aide 3](#)

Question 2 [Aide 1](#) [Aide 2](#)

[Sommaire](#)
[Concepts](#)

[Exemples](#)
[Exercices](#)
[Documents](#)

Exercice A.2.6 TD2-Exercice 6 : application linéaire sur des espaces de fonctions

1. On définit les fonctions p_0, p_1, p_2, f_3, f_4 par

$$\forall t \in \mathbb{R}, \quad p_0(t) = 1, \quad p_1(t) = t, \quad p_2(t) = t^2, \quad f_3(t) = e^t, \quad f_4(t) = te^t.$$

Soit la famille $\mathcal{F} = (p_0, p_1, p_2, f_3, f_4)$. Montrer que cette famille est libre.

2. Soit $E = \mathbb{R}_2[X]$ l'espace vectoriel des polynômes de degré ≤ 2 à coefficients réels et soit F l'espace vectoriel engendré par la famille $\mathcal{F}$.

On définit u par $u(p) = f_3 p' + p$, où p' est la dérivée de p .

- (a) Montrer que u est linéaire de $E = \mathbb{R}_2[X]$ dans F .
- (b) u est-elle injective?
- (c) Donner une base de $\text{Im } u$. (Réponse : $(p_0, p_1 + f_3, p_2 + 2f_4)$ est une base de $\text{Im } u$).
3. Donner la matrice A représentant u (préciser les bases choisies pour $\mathbb{R}_2[X]$ et F).

$$\text{(Réponse : } A = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 2 \end{pmatrix} \text{)}.$$

4. Étudier l'injectivité de u à l'aide de la matrice A .

[Sommaire](#)
[Concepts](#)

[Exemples](#)
[Exercices](#)
[Documents](#)

Question 1 [Aide 1](#) [Aide 2](#) [Aide 3](#)
Question 2b [Aide 1](#) [Aide 2](#) [Aide 3](#)
Question 2c [Aide 1](#) [Aide 2](#)
Question 3 [Aide 1](#) [Aide 2](#)
Question 4 [Aide 1](#) [Aide 2](#) [Aide 3](#)

Exercice A.2.6

TD2-Exercice 7 :
application
linéaire sur des
espaces de
fonctions

[Sommaire](#)
[Concepts](#)

[Exemples](#)
[Exercices](#)
[Documents](#)

Exercice A.2.7 TD2-Exercice 7 : application linéaire sur des espaces des polynômes

Soit $\mathbb{R}_n[X]$ l'espace vectoriel des polynômes à coefficients réels de degré $\leq n$ muni de sa base canonique $\mathcal{B}_n$. On note p' la dérivée de p .

On définit u par $(u(p))(t) = p(t+1) - p(t) - p'(t)$ pour tout $t \in \mathbb{R}$.

1. Montrer que u est linéaire de $\mathbb{R}_n[X]$ dans $\mathbb{R}_{n-2}[X]$.
2. On choisit $n = 4$. Donner la matrice A de u par rapport aux bases $\mathcal{B}_n$ et $\mathcal{B}_{n-2}$.

(Réponse : $A = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 3 & 4 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 6 \end{pmatrix}$.)

Question 1 [Aide 1](#) [Aide 2](#)

Question 2 [Aide 1](#) [Aide 2](#)

[Sommaire](#)
[Concepts](#)

[Exemples](#)
[Exercices](#)
[Documents](#)

Exercice A.2.8 TD2-Exercice 8 : sous espaces vectoriels de matrices

1. On se place dans l'espace vectoriel $\mathcal{M}_{2,3}(\mathbb{R})$.

On note E le sous ensemble de $\mathcal{M}_{2,3}(\mathbb{R})$ composé des matrices M qui peuvent s'écrire :

$$M = \begin{pmatrix} a & b & 0 \\ b & 0 & -a \end{pmatrix}, a \text{ et } b \text{ étant 2 réels.}$$

Est-ce que E est un sous espace vectoriel de $\mathcal{M}_{2,3}(\mathbb{R})$? Si oui, donner une base de E et sa dimension. (Réponse : dimension 2).

2. On se place maintenant dans l'espace vectoriel $\mathcal{M}_{n,n}(\mathbb{R})$.

Questions : Pour chaque ensemble E défini ci-dessous, on montrera que E est un sous-espace vectoriel de $\mathcal{M}_{n,n}(\mathbb{R})$, on donnera une base de E et sa dimension.

- (a) On appelle *trace* d'une matrice carrée, la somme des termes de la diagonale principale.

On note $\mathcal{T}_n$ le sous-ensemble des matrices de $\mathcal{M}_{n,n}(\mathbb{R})$ ayant une trace nulle. Répondez aux *questions* pour $\mathcal{T}_n$,

(Réponse : la dimension vaut $n^2 - 1$).

- (b) Une matrice est dite *triangulaire supérieure* ("upper" en anglais) si tous les termes au-dessous de la diagonale sont nuls. De même, une matrice triangulaire *inférieure* ("lower") a tous ses termes au-dessus de la diagonale nuls. On note $\mathcal{U}_n$ (resp. $\mathcal{L}_n$) l'ensemble des matrices triangulaire supérieures (resp. inférieures) de $\mathcal{M}_{n,n}(\mathbb{R})$. Répondez aux *questions* pour $\mathcal{U}_n$ et $\mathcal{L}_n$. (Réponse : la dimension vaut $\frac{n(n+1)}{2}$).

- (c) Soit $\mathcal{D}_n = \mathcal{U}_n \cap \mathcal{L}_n$ l'ensemble des matrices diagonales. Répondez aux *questions* pour $\mathcal{D}_n$. (Réponse : la dimension vaut n).

- (d) Une matrice A est dite *symétrique* si $\forall i, j \in \{1, \dots, n\}, a_{ij} = a_{ji}$.
Elle est dite *antisymétrique* si $\forall i, j \in \{1, \dots, n\}, a_{ij} = -a_{ji}$.

Sommaire
Concepts

Exemples
Exercices
Documents

On note $\mathcal{S}_n$ (resp. $\mathcal{A}_n$) l'ensemble des matrices symétriques (resp. antisymétriques). Répondez aux *questions* pour $\mathcal{S}_n$ et $\mathcal{A}_n$.

(Réponse : les dimension respectives sont $\frac{n(n+1)}{2}$ et $\frac{n(n-1)}{2}$).

(e) Montrez que $\mathcal{M}_{n,n} = \mathcal{S}_n \oplus \mathcal{A}_n$.

Question 1 [Aide 1](#) [Aide 2](#) [Aide 3](#)

Question 2a [Aide 1](#) [Aide 2](#) [Aide 3](#)

Question 2b [Aide 1](#)

Question 2c [Aide 1](#)

Question 2d [Aide 1](#) [Aide 2](#) [Aide 3](#)

Question 2e [Aide 1](#) [Aide 2](#)

Exercice A.2.8

TD2-Exercice 9 :
sous espaces
vectoriels de
matrices

[Sommaire](#)
[Concepts](#)

[Exemples](#)
[Exercices](#)
[Documents](#)

Exercice A.2.9 TD2-Exercice 9 : commutant d'une matrice 2×2

Soient A une matrice fixée de $\mathcal{M}_{2,2}(\mathbb{R})$ et u_A l'application de $\mathcal{M}_{2,2}(\mathbb{R})$ dans $\mathcal{M}_{2,2}(\mathbb{R})$ définie par :

$$u_A(X) = XA - AX.$$

1. Montrez que u_A est linéaire pour toute matrice A .
2. On prend $A = \begin{pmatrix} 1 & -1 \\ 2 & 1 \end{pmatrix}$. Donnez une base de $\text{Ker } u_A$. En déduire sa dimension.

(Réponse : base de $\text{Ker } u_A$ est $\left(\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -2 & 0 \end{pmatrix} \right)$, la dimension est 2.)

3. On prend A de la forme $\begin{pmatrix} a & b \\ b & a \end{pmatrix}$.

Déterminer a et b tels que $AX = XA, \forall X \in \mathcal{M}_{2,2}(\mathbb{R})$.

- Question 1 [Aide 1](#)
Question 2 [Aide 1](#) [Aide 2](#)
Question 3 [Aide 1](#) [Aide 2](#)

[Sommaire](#)
[Concepts](#)

[Exemples](#)
[Exercices](#)
[Documents](#)

Exercice A.2.10 TD2-Exercice 10 : trace du produit de matrices

1. Soit $A \in \mathcal{M}_{m,n}(\mathbb{R})$ et $B \in \mathcal{M}_{n,m}(\mathbb{R})$. Comparer les traces de AB et BA .
2. Vérifier ce résultat en explicitant AB et BA quand $m = 1$.

Question 1 [Aide 1](#) [Aide 2](#) [Aide 3](#)

Question 2 [Aide 1](#)

[Sommaire](#)
[Concepts](#)

[Exemples](#)
[Exercices](#)
[Documents](#)

Exercice A.2.11 TD2-Exercice 11 : formule du binôme de Newton pour les matrices

1. Soient A et B des matrices de $\mathcal{M}_{n,n}(\mathbb{R})$, calculer $(A+B)^2$.

On note $I = A^0$ la matrice identité de $\mathcal{M}_{n,n}(\mathbb{R})$. À quelle condition est-il possible d'utiliser la formule du binôme pour calculer $(A+B)^n$?

2. On donne les matrices $A = \begin{pmatrix} 3 & 1 & 0 \\ 0 & 3 & 0 \\ 0 & 0 & 3 \end{pmatrix}$ et $J = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$.

Calculer J^2 et montrer que $A^n = 3^n I + a_n J$.

Question 1 [Aide 1](#) [Aide 2](#) [Aide 3](#)

Question 2 [Aide 1](#) [Aide 2](#)

[Sommaire](#)
[Concepts](#)

[Exemples](#)
[Exercices](#)
[Documents](#)

Exercice A.2.12 TD2-Exercice 12 : matrices d'une application dans 2 bases, passage

Soit $\mathcal{E} = (\vec{e}_1, \vec{e}_2, \vec{e}_3)$ la base canonique de $\mathbb{R}^3$ et soit u l'application linéaire de $\mathbb{R}^3$ dans $\mathbb{R}^3$, de matrice A relativement à $\mathcal{E}$ avec :

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

1. On se donne le vecteur $\vec{x} = (x_1, x_2, x_3)$ de $\mathbb{R}^3$. Calculez $u(\vec{x})$.
2. En déduire le noyau de u (on pourra en donner une base).
(Réponse : une base de $\text{Ker } u$ est $((1, -1, 1))$).
3. On pose $\vec{e}'_1 = \vec{e}_1 - \vec{e}_2 + \vec{e}_3$, $\vec{e}'_2 = \vec{e}_2$ et $\vec{e}'_3 = \vec{e}_3$.
 - (a) Montrez que $(\vec{e}'_1, \vec{e}'_2, \vec{e}'_3)$ est une base de $\mathbb{R}^3$.
 - (b) Exprimer $\vec{e}_1, \vec{e}_2, \vec{e}_3$ en fonction de $\vec{e}'_1, \vec{e}'_2, \vec{e}'_3$.
 - (c) Utiliser les questions précédentes pour obtenir la matrice A' de u dans la base $(\vec{e}'_1, \vec{e}'_2, \vec{e}'_3)$.

(Réponse : $A' = \begin{pmatrix} 0 & 2 & 0 \\ 0 & 2 & 1 \\ 0 & -4 & -2 \end{pmatrix}$.)

4. On définit la matrice $P = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \end{pmatrix}$ Que vaut P^{-1} ?

(Réponse : $P^{-1} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 1 \end{pmatrix}$.)

Sommaire
Concepts

Exemples
Exercices
Documents

5. Quelle relation lie A, A', P, P^{-1} ?

Question 1 [Aide 1](#)

Question 2 [Aide 1](#) [Aide 2](#) [Aide 3](#)

Question 3a [Aide 1](#) [Aide 2](#) [Aide 3](#)

Question 3c [Aide 1](#) [Aide 2](#) [Aide 3](#)

Question 4 [Aide 1](#) [Aide 2](#) [Aide 3](#) [Aide 4](#)

Question 5 [Aide 1](#)

Exercice A.2.12

TD2-Exercice 13 :
matrices d'une
application dans
2 bases, passage

[Sommaire](#)
[Concepts](#)

[Exemples](#)
[Exercices](#)
[Documents](#)

Exercice A.2.13 TD2-Exercice 13 : matrices d'une rotation dans R^3

On se place dans $\mathbb{R}^3$. On rappelle que si $\vec{x} = (x_1, x_2, x_3)$, $\vec{y} = (y_1, y_2, y_3)$ alors

- le produit scalaire de $\vec{x}$ par $\vec{y}$ est donné par $x_1y_1 + x_2y_2 + x_3y_3$,
- la norme de $\vec{x}$ est égale à $\sqrt{(x_1)^2 + (x_2)^2 + (x_3)^2}$

On note $(\vec{e}_1, \vec{e}_2, \vec{e}_3)$ la base canonique (elle est orthonormée).

On note ρ la rotation d'angle θ autour du vecteur $\vec{\omega} = (0, \frac{1}{\sqrt{2}}, \frac{1}{\sqrt{2}})$.

1. On pose $\vec{e}'_1 = \vec{e}_1, \vec{e}'_2 = \vec{\omega}$, déterminer $\vec{e}'_3$ tel que la base $(\vec{e}'_1, \vec{e}'_2, \vec{e}'_3)$ soit orthonormée directe.
2. Écrivez la matrice R' de la rotation ρ dans la base $(\vec{e}'_1, \vec{e}'_2, \vec{e}'_3)$.
3. Donnez la matrice de passage de la base $(\vec{e}_1, \vec{e}_2, \vec{e}_3)$ à la base $(\vec{e}'_1, \vec{e}'_2, \vec{e}'_3)$.
4. Écrivez la matrice R de la rotation ρ dans la base $(\vec{e}_1, \vec{e}_2, \vec{e}_3)$.

$$(\text{Réponse : } R = \begin{pmatrix} \cos \theta & -\frac{\sin \theta}{\sqrt{2}} & \frac{\sin \theta}{\sqrt{2}} \\ \frac{\sin \theta}{\sqrt{2}} & \frac{1+\cos \theta}{2} & \frac{1-\cos \theta}{2} \\ -\frac{\sin \theta}{\sqrt{2}} & \frac{1-\cos \theta}{2} & \frac{1+\cos \theta}{2} \end{pmatrix}.)$$

Question 1 [Aide 1](#) [Aide 2](#) [Aide 3](#)

Question 2 [Aide 1](#) [Aide 2](#) [Aide 3](#)

Question 3 [Aide 1](#) [Aide 2](#)

Question 4 [Aide 1](#) [Aide 2](#) [Aide 3](#)

[Sommaire](#)
[Concepts](#)

[Exemples](#)
[Exercices](#)
[Documents](#)

Exercice A.2.14 TD2-Exercice 14 : rangs de matrices

1. Déterminer le rang de la matrice A obtenue dans l'Exercice A.2.6 :

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

(Réponse : 3).

2. Déterminer le rang de la matrice A obtenue dans l'Exercice A.2.7 :

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 3 & 4 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 6 \end{pmatrix}.$$

(Réponse : 3).

3. Déterminer le rang de la matrice M obtenue dans la première question de l'Exercice A.2.8.
(Réponse : si $a = b = 0$, le rang est nul, il vaut 2 sinon).
4. Déterminer le rang de la matrice A obtenue dans l'Exercice A.2.12. (Réponse : 2).
5. Déterminer le rang de la matrice R obtenue dans l'Exercice A.2.13. (Réponse : 3)

Sommaire
Concepts

Exemples
Exercices
Documents

Question 1 [Aide 1](#) [Aide 2](#) [Aide 3](#) [Aide 4](#)
Question 2 [Aide 1](#) [Aide 2](#) [Aide 3](#) [Aide 4](#)
Question 3 [Aide 1](#) [Aide 2](#) [Aide 3](#)
Question 4 [Aide 1](#) [Aide 2](#) [Aide 3](#) [Aide 4](#)
Question 5 [Aide 1](#) [Aide 2](#) [Aide 3](#)

Exercice A.2.14

TD2-Exercice 15 :
rangs de matrices

[Sommaire](#)
[Concepts](#)

[Exemples](#)
[Exercices](#)
[Documents](#)

Exercice A.2.15 TD2-Exercice 15 : noyau, image d'une appl. lin. définie par une matrice

Soient E et F deux espaces vectoriels de bases respectives $(\vec{e}_1, \vec{e}_2, \vec{e}_3, \vec{e}_4)$ et $(\vec{f}_1, \vec{f}_2, \vec{f}_3)$.

Soit $u \in \mathcal{L}(E; F)$ dont la matrice est $\begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \end{pmatrix}$.

1. Déterminer une base de $\text{Ker } u$. (Réponse : $(\vec{e}_2 + \vec{e}_3 - \vec{e}_4)$).
2. Déterminer une base de $\text{Im } u$. (Réponse : $(\vec{f}_1, \vec{f}_2, \vec{f}_3)$).
3. Quel est le rang de u ?

Question 1 [Aide 1](#) [Aide 2](#)

Question 2 [Aide 1](#) [Aide 2](#) [Aide 3](#)

Question 3 [Aide 1](#)

[Sommaire](#)
[Concepts](#)

[Exemples](#)
[Exercices](#)
[Documents](#)

Exercice A.2.16 TD2-Exercice 16 : matrices de rang 1

1. Soient V_1 et $V_2 \in \mathcal{M}_{n,1}(\mathbb{R})$ non nuls.

Montrez que $\text{rang}(V_1 V_2^T) = 1$.

2. Réciproquement, montrez que si $A \in \mathcal{M}_{n,n}(\mathbb{R})$ et $\text{rang}(A) = 1$, alors $\exists V_1, V_2 \in \mathcal{M}_{n,1}(\mathbb{R})$ tels que $A = V_1 V_2^T$.

3. Application : $A = \begin{pmatrix} 2 & 1 & 3 \\ 4 & 2 & 6 \\ 6 & 3 & 9 \end{pmatrix}$.

Question 1 [Aide 1](#) [Aide 2](#) [Aide 3](#)

Question 2 [Aide 1](#) [Aide 2](#) [Aide 3](#)

Question 3 [Aide 1](#) [Aide 2](#)

[Sommaire](#)
[Concepts](#)

[Exemples](#)
[Exercices](#)
[Documents](#)

Exercice A.2.17 TD2-Exercice 17 : propriétés d'un projecteur

Soit $u \in \mathcal{L}(E; E)$ vérifiant $u^2 = u$, montrer directement (sans utiliser l'Exercice [A.2.3](#)) que :

1. $\text{Ker } u \cap \text{Im } u = \{\vec{0}\}$.
2. $E = \text{Ker } u \oplus \text{Im } u$.

Question 1 [Aide 1](#) [Aide 2](#)

Question 2 [Aide 1](#) [Aide 2](#)

[Sommaire](#)
[Concepts](#)

[Exemples](#)
[Exercices](#)
[Documents](#)

Exercice A.2.18 TD2-Exercice 18 : noyau et rang de la composée de 2 appl. lin.

Soient E, F, G, H des espaces vectoriels de dimension finie.

1. Soit $u \in \mathcal{L}(E; F)$, $v \in \mathcal{L}(F; G)$.
 - (a) Montrer que $\text{Ker } u \subset \text{Ker}(v \circ u)$
 - (b) On suppose que v est bijective.
 - Montrer que $\text{Ker } u = \text{Ker}(v \circ u)$.
 - En déduire que u et $v \circ u$ ont le même rang.
 - (c) Soit B une matrice inversible, montrer que A et BA ont le même rang (pour toute matrice A pour laquelle le produit est possible)
2. Soit $w \in \mathcal{L}(H; E)$, $u \in \mathcal{L}(E; F)$.
 - (a) Montrer que $\text{Im}(u \circ w) \subset \text{Im } u$.
 - (b) On suppose que w est bijective.
 - Montrer que $\text{Im}(u \circ w) = \text{Im } u$.
 - En déduire que u et $u \circ w$ ont le même rang.
 - (c) Soit B une matrice inversible, montrer que A et AB ont le même rang (pour toute matrice A pour laquelle le produit est possible).

Question 1a [Aide 1](#) [Aide 2](#)

Question 1b [Aide 1](#) [Aide 2](#) [Aide 3](#)

Question 1c [Aide 1](#)

Question 2a [Aide 1](#)

Question 2b [Aide 1](#)

Question 2c [Aide 1](#)

[Sommaire](#)
[Concepts](#)

[Exemples](#)
[Exercices](#)
[Documents](#)

Annexe B

Exemples

B.1	Exemples du chapitre 2	118

[Sommaire](#)
[Concepts](#)

[Exemples](#)
[Exercices](#)
[Documents](#)

B.1 Exemples du chapitre 2

B.1.1	Quelques matrices particulières	119
B.1.2	Projection en dimension 5	120

[Sommaire](#)
[Concepts](#)

[Exemples](#)
[Exercices](#)
[Documents](#)

Exemple B.1.1 Quelques matrices particulières

On prend n et/ou $m = 4$. Voici des exemples de matrices ligne R , colonne C , diagonale D , identité I_4 , triangulaire supérieure U (“upper” en anglais) et triangulaire inférieure L (“lower” en anglais) :

$$R = (a_{11} \ a_{12} \ a_{13} \ a_{14}), \ C = \begin{pmatrix} a_{11} \\ a_{21} \\ a_{31} \\ a_{41} \end{pmatrix}, \ D = \begin{pmatrix} a_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a_{22} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a_{33} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a_{44} \end{pmatrix}, \ I_4 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix},$$

$$U = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ 0 & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ 0 & 0 & a_{33} & a_{34} \\ 0 & 0 & 0 & a_{44} \end{pmatrix}, \ L = \begin{pmatrix} a_{11} & 0 & 0 & 0 \\ a_{21} & a_{22} & 0 & 0 \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & 0 \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{pmatrix}.$$

La trace d’une matrice carrée est la somme de ses termes diagonaux. Il vient donc :

$$\text{Tr}(D) = \text{Tr}(U) = \text{Tr}(L) = a_{11} + a_{22} + a_{33} + a_{44}, \quad \text{et} \quad \text{Tr}(I_4) = 4.$$

[retour au cours](#)

[Sommaire](#)
[Concepts](#)

[Exemples](#)
[Exercices](#)
[Documents](#)

Exemple B.1.2 Projection en dimension 5

Soit $E = F \oplus G$ muni de la base $\mathcal{E} = \mathcal{F} \cup \mathcal{G}$ ($\mathcal{F}$ base de F , $\mathcal{G}$ base de G) avec $\mathcal{F} = (\vec{f}_1, \vec{f}_2, \vec{f}_3)$, $\mathcal{G} = (\vec{g}_1, \vec{g}_2)$ ($\dim E = 5$, $\dim F = 3$ et $\dim G = 2$). On reprend l'exemple de la projection. La matrice de u , projection sur F parallèlement à G , s'écrit alors

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

puisque $u(\vec{f}_j) = \vec{f}_j$, pour $j = 1, 2, 3$ et $u(\vec{g}_k) = \vec{0}$, pour $k = 1, 2$.

[retour au cours](#)

[Sommaire](#)
[Concepts](#)

[Exemples](#)
[Exercices](#)
[Documents](#)

Annexe C

Documents

C.1	Documents du chapitre 2	122

[Sommaire](#)
[Concepts](#)

[Exemples](#)
[Exercices](#)
[Documents](#)

C.1 Documents du chapitre 2

C.1.1	Anneaux $\mathcal{L}(E; E)$	123

Sommaire
Concepts

Exemples
Exercices
Documents

Document C.1.1 Anneaux $\mathcal{L}(E; E)$

Si $F = E$ on peut munir $\mathcal{L}(E; E)$ d'une structure d'anneau pour la loi de composition des applications. On notera Id_E l'application identité de E dans E : c'est l'élément neutre pour la loi “ $\circ$ ” de l'anneau.

Attention : cet anneau n'est pas commutatif.

Exemple : dans le plan, si on compose une rotation et une projection, ces deux applications ne commutent pas en général.

[retour au cours](#)

[Sommaire](#)
[Concepts](#)

[Exemples](#)
[Exercices](#)
[Documents](#)

Index des concepts

Le gras indique un grain où le concept est défini; l'italique indique un renvoi à un exercice ou un exemple le gras italique à un document, et le romain à un grain où le concept est mentionné.	E
	Espace vectoriel $\mathcal{L}(E; F)$ 5
	Espace vectoriel des matrices 30
A	F
Application linéaire entre espaces de dimension finie 12	Formes linéaires 21
Application linéaire-définition 4	I
C	Image d'une famille liée, image d'une famille gé- nératrice de E 8
Calcul explicite de l'image d'un vecteur 36	Injective 14
Changement de base et composantes d'un vec- teur 46	Inverse d'une matrice carrée 38
Changement de bases et matrices associées à une application linéaire 48	Isomorphisme entre E et K^n 20
Composition 11	Isomorphismes 18
	M
	Matrice de passage 42

[Sommaire](#)
[Concepts](#)

[Exemples](#)
[Exercices](#)
[Documents](#)

Matrices semblables	51
Matrices-définitions	24

N

Notations	27
Noyau d'une matrice	58
Noyau et image	6

P

Produit de deux matrices	32
Projection	9

R

Rang	52
Rang et dimension du noyau	55

S

Surjective, bijective	16

T

Transposée d'une matrice	40

[Sommaire](#)
[Concepts](#)

[Exemples](#)
[Exercices](#)
[Documents](#)

Solution de l'exercice A.1.1

1) non, 2) non si $\beta \neq 0$, oui si $\beta = 0$, 3) 4) 5) oui, 6) non, 7) oui.

[Retour à l'exercice ▲](#)

Solution de l'exercice A.1.3

- 2) - si $\alpha = \beta = 0$, $\text{Ker } u = \mathbb{R}$, $\text{Im } u = \{\vec{0}\}$,
- si $\alpha \neq 0$ et $\beta = 0$, $\text{Ker } u = \{\vec{0}\}$, $\text{Im } u = \mathbb{R}$.

3) $\text{Ker } u = \{\vec{x} \in \mathbb{R}^n \mid a_1 x_1 + a_2 x_2 + \dots + a_n x_n = 0\}$, $\text{Im } u = \mathbb{R}$.

4) $\text{Ker } u = \Delta$, $\text{Im } u = \Pi$.

5) $\text{Ker } u = \mathbb{R}_0[X]$ (polynômes constants), $\text{Im } u = \mathbb{R}_{n-1}[X]$.

7) $\text{Ker } u = \left\{ \phi \in \mathcal{C}(0, 1) \mid \int_0^1 \phi(t) dt = 0 \right\}$, $\text{Im } u = \mathbb{R}$.

[Retour à l'exercice ▲](#)

Solution de l'exercice A.1.4

- On suppose que $(\vec{x}_1, \dots, \vec{x}_p)$ est une famille liée de E , donc il existe $\lambda_1, \dots, \lambda_p$ non tous nuls tels que : $\lambda_1 \vec{x}_1 + \dots + \lambda_p \vec{x}_p = \vec{0}$. On a donc $u(\lambda_1 \vec{x}_1 + \dots + \lambda_p \vec{x}_p) = u(\vec{0}) = \vec{0}$ et donc $\lambda_1 u(\vec{x}_1) + \dots + \lambda_p u(\vec{x}_p) = \vec{0}$, ce qui montre que $(u(\vec{x}_1), \dots, u(\vec{x}_p))$ est une famille liée.
- On commence par remarquer que les vecteurs $u(\vec{x}_1), \dots, u(\vec{x}_p)$ appartiennent à $\text{Im } u$.
De plus soit $\vec{y} \in \text{Im } u$ alors il existe $\vec{x} \in E$ tel que $\vec{y} = u(\vec{x})$. Si $(\vec{x}_1, \dots, \vec{x}_p)$ est une famille génératrice de E , $\vec{x}$ peut s'écrire $\vec{x} = \sum_{i=1}^p \alpha_i \vec{x}_i$, on a donc
$$\begin{cases} \vec{y} = u(\vec{x}) = \sum_{i=1}^p \alpha_i u(\vec{x}_i), \\ u(\vec{x}_i) \in \text{Im } u, \end{cases} \quad \text{donc } (u(\vec{x}_1), \dots, u(\vec{x}_p)) \text{ est une famille génératrice de } \text{Im } u.$$

[Retour à l'exercice ▲](#)

Solution de l'exercice A.1.5

On vérifie facilement que $u(\vec{x} + \vec{y}) = u(\vec{x}) + u(\vec{y})$, $u(\lambda \vec{x}) = \lambda u(\vec{x})$

$\text{Im } u = F_1$, $\text{Ker } u = F_2$

[Retour à l'exercice ▲](#)

Solution de l'exercice A.1.6

On a bien sûr $u(\vec{x}_1) = \vec{x}_1$, donc $u \circ u(\vec{x}) = u(\vec{x}) \forall \vec{x} \in E$ on a donc $u \circ u = u$. Vous pouvez illustrer ce résultat en pensant aux projections géométriques classiques sur un plan ou une droite.

[Retour à l'exercice ▲](#)

Solution de l'exercice A.1.7

$$\left\{ \begin{array}{l} (u \circ v)(\vec{x} + \vec{y}) = (u \circ v)(\vec{x}) + (u \circ v)(\vec{y}) \\ (u \circ v)(\lambda \vec{x}) = \lambda(u \circ v)(\vec{x}) \end{array} \right\} \text{ ces 2 propriétés se vérifient très facilement.}$$

[Retour à l'exercice ▲](#)

Solution de l'exercice A.1.8

Il vient

$$u(\vec{x}) = u(x_1 \vec{e}_1 + x_2 \vec{e}_2 + x_3 \vec{e}_3) = x_1 u(\vec{e}_1) + x_2 u(\vec{e}_2) + x_3 u(\vec{e}_3) = (x_1 + x_2 + x_3) \vec{f}_1 + (x_1 - x_2 - 2x_3) \vec{f}_2.$$

On voit donc que la donnée de $u(\vec{e}_1)$, $u(\vec{e}_2)$ et $u(\vec{e}_3)$ définit $u(\vec{x})$ pour tout $\vec{x}$.

(À condition bien sûr de connaître les composantes de $\vec{x}$ dans la base $\mathcal{E}$.)

[Retour à l'exercice ▲](#)

Solution de l'exercice A.1.9

1. (a) On sait que si u est injective, on a $(\vec{x}_1, \dots, \vec{x}_p)$ libre $\implies (u(\vec{x}_1), \dots, u(\vec{x}_p))$ libre, donc en utilisant la contraposée :
 $(u(\vec{x}_1), \dots, u(\vec{x}_p))$ liée $\implies (\vec{x}_1, \dots, \vec{x}_p)$ liée.
- (b) Une base de E est une famille libre, donc son image par u est une famille libre puisque u est injective.
Une base de E est une famille génératrice de E , donc son image par u est une famille génératrice de $\text{Im } u$.
L'image d'une base de E est donc une base de $\text{Im } u$.
2. **(ii) $\implies$ (i)** Soit $\vec{x}$ un vecteur tel que $u(\vec{x}) = \vec{0}_F$, on peut alors décomposer ce vecteur sur la base $\mathcal{E}$:
 $\vec{x} = \sum_{j=1}^n x_j \vec{e}_j$ et $\vec{0}_F = u(\vec{x}) = u(\sum_{j=1}^n x_j \vec{e}_j) = \sum_{j=1}^n x_j u(\vec{e}_j)$ et comme la famille $u(\mathcal{E})$ est libre par hypothèse cela implique que $x_1 = x_2 = \dots = x_n = 0$, soit $\vec{x} = \vec{0}_E$ et donc $\text{Ker } u = \{\vec{0}_E\}$.
- (i) $\implies$ (ii)** Puisque E est de type fini, il existe une base $\mathcal{B}$ de E , cette base est une famille libre, donc d'après la Proposition 2.1.6 son image par u est une famille libre.

[Retour à l'exercice ▲](#)

Solution de l'exercice A.1.10

On a d'une part : (i) $\implies u$ est injective $\implies$ l'image d'une famille libre est libre.

On a d'autre part : (i) $\implies u$ est surjective $\implies$ l'image d'une famille génératrice de E est génératrice de F .

Donc l'image d'une base de E est une base de F .

Réciproquement : soit $(\vec{x}_1, \dots, \vec{x}_n)$ une base de E . On suppose que l'image par u de cette base de E est une base de F

— Montrons que $\text{Ker } u = \{\vec{0}_E\}$: soit $\vec{x} = \sum_{i=1}^n \alpha_i \vec{x}_i$ dans $\text{Ker } u$.

On a $\vec{x} \in \text{Ker } u \iff u(\vec{x}) = \vec{0}_F$, donc $\sum_{i=1}^n \alpha_i u(\vec{x}_i) = \vec{0}_F$, donc $\alpha_1 = \alpha_2 = \dots = \alpha_n = 0$ et finalement $\vec{x} = \vec{0}_E$.

(On a utilisé l'hypothèse que $(u(\vec{x}_1), \dots, u(\vec{x}_n))$ est une base donc libre).

On vient donc de montrer que $\text{Ker } u = \{\vec{0}_E\}$, donc u est injective.

— Montrons que $\text{Im } u = F$: la famille $(u(\vec{x}_1), \dots, u(\vec{x}_n))$ est une base de F , donc engendre F .

Il vient par linéarité de u que pour tout $\vec{y} \in F$, $\vec{y} = \sum_{i=1}^n \alpha_i u(\vec{x}_i) = u\left(\sum_{i=1}^n \alpha_i \vec{x}_i\right)$, donc $\vec{y} \in \text{Im } u$.

On vient de montrer que $\text{Im } u = F$, donc que u est surjective.

Ceci termine de démontrer l'équivalence.

[Retour à l'exercice ▲](#)

Solution de l'exercice A.1.11

On démontre facilement que

$$\begin{aligned} u(\vec{x}) = \vec{0}_F &\implies \vec{x} = \vec{0}_E, & \text{donc} & \quad \text{Ker } u = \{\vec{0}_E\}, \\ \forall \vec{y} \in F, \exists \vec{x} \in E, \vec{y} = u(\vec{x}), & & \text{donc} & \quad \text{Im } u = F, \end{aligned}$$

donc u est bijective.

[Retour à l'exercice ▲](#)

Solution de l'exercice A.1.12

Comme tout $\vec{x} \in E$ admet une décomposition unique sur la base $\mathcal{E}$, l'application ϕ est bien définie. On montre facilement qu'elle est linéaire et injective et surjective.

[Retour à l'exercice ▲](#)

Solution de l'exercice A.1.13

Pour tout $i \in \{1, \dots, n\}$, $\text{Id}_E(\vec{e}_i) = \vec{e}_i$, donc $A = I$.

[Retour à l'exercice ▲](#)

Solution de l'exercice A.1.14

La matrice de u s'écrit dans la base canonique des polynômes

$$\begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 3 \end{pmatrix}.$$

[Retour à l'exercice ▲](#)

Solution de l'exercice A.1.15

$\vec{x} = \vec{e}_1 - \vec{e}_2 + 2\vec{e}_3$, donc $u(\vec{x}) = u(\vec{e}_1) - u(\vec{e}_2) + 2u(\vec{e}_3)$.

Or d'après la définition de A on a :
$$\begin{cases} u(\vec{e}_1) &= 3\vec{f}_1 + \vec{f}_2 \\ u(\vec{e}_2) &= 4\vec{f}_1 + 2\vec{f}_2 \\ u(\vec{e}_3) &= 5\vec{f}_1 + 6\vec{f}_2 \end{cases} .$$

On déduit donc de tout ce qui précède $u(\vec{x}) = 9\vec{f}_1 + 11\vec{f}_2$.

[Retour à l'exercice ▲](#)

Solution de l'exercice A.1.16

Pour obtenir A il suffit de déterminer $u(\vec{e}_1)$, $u(\vec{e}_2)$, $u(\vec{e}_3)$, $u(\vec{e}_4)$. Il vient

$$\left\{ \begin{array}{llll} u(\vec{e}_1) &= (1, 1, 1) &= \vec{f}_1 + \vec{f}_2 + \vec{f}_3 \\ u(\vec{e}_2) &= (-1, 2, 1) &= -\vec{f}_1 + 2\vec{f}_2 + \vec{f}_3 \\ u(\vec{e}_3) &= (1, 0, 3) &= \vec{f}_1 + 3\vec{f}_3 \\ u(\vec{e}_4) &= (1, -1, -3) &= \vec{f}_1 - \vec{f}_2 - 3\vec{f}_3 \end{array} \right. , \text{ d'où } A = \begin{pmatrix} 1 & -1 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 0 & -1 \\ 1 & 1 & 3 & -3 \end{pmatrix}.$$

Bien sûr pour obtenir $u(\vec{e}_1)$, on écrit $\vec{e}_1 = (1, 0, 0, 0)$, donc $x_1 = 1$, $x_2 = x_3 = x_4 = 0$.

Vous pourrez revenir à cet exercice après avoir étudié le calcul explicite de l'image d'un vecteur.

[Retour à l'exercice ▲](#)

Solution de l'exercice A.1.17

1. On démontre facilement que la somme est une loi de composition interne, associative, la matrice E dont tous les termes sont nuls (on la note $E = 0$) est l'élément neutre, la matrice B dont les termes sont les opposés de ceux de A ($B = -A$) est le symétrique de A . On a de plus
 $(\lambda\mu)A = \lambda(\mu A)$, $(\lambda + \mu)A = \lambda A + \mu A$, $\lambda(A + B) = \lambda A + \lambda B$ et $1A = A$.
2. Si l'on note E_{ij} la matrice dont tous les termes sont nuls sauf le terme situé en ligne i et colonne j qui vaut 1, alors

$$A = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n a_{ij} E_{ij}, \quad \text{où } \begin{cases} \forall i = 1, \dots, m, \\ \forall j = 1, \dots, n, \end{cases} \quad E_{ij} = \begin{pmatrix} 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \end{pmatrix}.$$

La famille des matrices $(E_{ij})_{1 \leq i \leq m, 1 \leq j \leq n}$ est donc génératrice de $\mathcal{M}_{mn}$, on montre facilement qu'elle est libre : c'est donc une base, la dimension de $\mathcal{M}_{mn}$ est donc mn .

[Retour à l'exercice ▲](#)

Solution de l'exercice A.1.18

$$— AB = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}, BA = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{pmatrix},$$

$$— AB = \begin{pmatrix} -2 & 3 \\ 0 & 0 \\ 2 & -1 \end{pmatrix}.$$

Une disposition pratique pour ce dernier produit est la suivante :

$$\begin{pmatrix} 1 & 2 & -1 \\ 0 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1 & 1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \times & \times \\ \otimes & \times \\ \times & \times \end{pmatrix}$$

Le terme $\otimes$ est obtenu par produit terme à terme de la ligne de A et de la colonne de B situées dans son prolongement. C'est-à-dire $\otimes = 0 \times 1 + 1 \times (-1) + 1 \times 1$. Bien sûr cette disposition qui est pratique quand on débute se révèle rapidement encombrante!

On ne peut pas effectuer le produit BA .

[Retour à l'exercice ▲](#)

Solution de l'exercice A.1.19

1. $BD' = \begin{pmatrix} 5B_1 & 6B_2 \end{pmatrix}$: le produit à droite d'une matrice B par une matrice diagonale D' revient à multiplier chacune des colonnes B_i par le scalaire d'_{ii} .

$DB = \begin{pmatrix} 2\underline{B}_1 \\ 3\underline{B}_2 \\ 4\underline{B}_3 \end{pmatrix}$: le produit à gauche d'une matrice B par une matrice diagonale D revient à multiplier chacune des lignes $\underline{B}_i$ par le scalaire d_{ii} .

2. $L = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}$ et $C = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$. Ce résultat se généralise bien sûr à une matrice B quelconque.

[Retour à l'exercice ▲](#)

Solution de l'exercice A.1.20

On a $X = \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \\ 2 \end{pmatrix}$, $AX = Y \begin{pmatrix} 9 \\ 11 \end{pmatrix}$, donc $u(\vec{x}) = (9, 11) = 9\vec{f}_1 + 11\vec{f}_2$. On retrouve bien sûr le même résultat.

[Retour à l'exercice ▲](#)

Solution de l'exercice A.1.21

On pose $M = AB$, $N = B^{-1}A^{-1}$, on montre en utilisant l'associativité que $MN = NM = I$, donc $N = M^{-1}$, c'est-à-dire $B^{-1}A^{-1} = (AB)^{-1}$

[Retour à l'exercice ▲](#)

Solution de l'exercice A.1.22

$$B = \begin{pmatrix} 1 & 2 \\ -1 & 1 \\ 3 & -1 \end{pmatrix}, \quad B^T = \begin{pmatrix} 1 & -1 & 3 \\ 2 & 1 & -1 \end{pmatrix},$$

$$\underline{B}_1 = (1 \ 2), \underline{B}_2 = (-1 \ 1), \underline{B}_3 = (3 \ -1), \underline{B}_1^T = (1 \ -1 \ 3), \underline{B}_2^T = (2 \ 1 \ -1),$$

$$B_1 = \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \\ 3 \end{pmatrix}, B_2 = \begin{pmatrix} 2 \\ 1 \\ -1 \end{pmatrix},$$

$$(B^T)_1 = \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \end{pmatrix}, (B^T)_2 = \begin{pmatrix} -1 \\ 1 \end{pmatrix}, (B^T)_3 = \begin{pmatrix} 3 \\ -1 \end{pmatrix},$$

$$(\underline{B}_1)^T = \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \end{pmatrix}, (\underline{B}_2)^T = \begin{pmatrix} -1 \\ 1 \end{pmatrix}, (\underline{B}_3)^T = \begin{pmatrix} 3 \\ -1 \end{pmatrix},$$

$$(B_1)^T = (1 \ -1 \ 3), (B_2)^T = (2 \ 1 \ -1).$$

[Retour à l'exercice ▲](#)

Solution de l'exercice A.1.23

1. On montre que $(\vec{e}'_1, \vec{e}'_2)$ est une famille libre. En effet, soient λ_1 et λ_2 tels que $\lambda_1 \vec{e}'_1 + \lambda_2 \vec{e}'_2 = \vec{0}$. Alors on exprime $\vec{e}'_1, \vec{e}'_2$ en fonction de $\vec{e}_1, \vec{e}_2$, on utilise le fait que $\mathcal{E}$ est libre et on obtient que $\lambda_1 = \lambda_2 = 0$.

Or une famille libre de 2 éléments est une base.

2. $P = \begin{pmatrix} 1 & 2 \\ 1 & -1 \end{pmatrix}$.

[Retour à l'exercice ▲](#)

Solution de l'exercice A.1.24

1. On calcule

$$\begin{cases} \vec{e}'_1 &= \vec{e}_1 + \vec{e}_2 \\ \vec{e}'_2 &= 2\vec{e}_1 - \vec{e}_2 \end{cases} \iff \begin{cases} \vec{e}_1 &= \frac{1}{3}\vec{e}'_1 + \frac{1}{3}\vec{e}'_2 \\ \vec{e}_2 &= \frac{2}{3}\vec{e}'_1 - \frac{1}{3}\vec{e}'_2 \end{cases}.$$

2. Il vient

$$\vec{x} = x_1\vec{e}_1 + x_2\vec{e}_2 = x_1\left(\frac{1}{3}\vec{e}'_1 + \frac{1}{3}\vec{e}'_2\right) + x_2\left(\frac{2}{3}\vec{e}'_1 - \frac{1}{3}\vec{e}'_2\right) = \left(\frac{1}{3}x_1 + \frac{2}{3}x_2\right)\vec{e}'_1 + \left(\frac{1}{3}x_1 - \frac{1}{3}x_2\right)\vec{e}'_2,$$

donc

$$x'_1 = \frac{1}{3}x_1 + \frac{2}{3}x_2, \quad x'_2 = \frac{1}{3}x_1 - \frac{1}{3}x_2.$$

$$3. \quad PX' = \begin{pmatrix} x'_1 + 2x'_2 \\ x'_1 - x'_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} = X.$$

$$4. \quad P^{-1} = \begin{pmatrix} \frac{1}{3} & \frac{2}{3} \\ \frac{1}{3} & -\frac{1}{3} \end{pmatrix}, \text{ on a obtenu } P^{-1} \text{ à partir de 1. On vérifie bien sûr que } PP^{-1} = P^{-1}P = I.$$

[Retour à l'exercice ▲](#)

Solution de l'exercice A.1.25

- $A = \begin{pmatrix} 1 & 2 \\ 3 & -1 \end{pmatrix}.$
- $u(\vec{e}'_1) = u(\vec{e}_1) + u(\vec{e}_2) = 3\vec{e}_1 + 2\vec{e}_2, u(\vec{e}'_2) = 2u(\vec{e}_1) - u(\vec{e}_2) = 7\vec{e}_2.$
- $u(\vec{e}'_1) = \vec{e}'_1 + \vec{e}'_2 + \frac{4}{3}\vec{e}'_1 - \frac{2}{3}\vec{e}'_2 = \frac{7}{3}\vec{e}'_1 + \frac{1}{3}\vec{e}'_2, u(\vec{e}'_2) = \frac{14}{3}\vec{e}'_1 - \frac{7}{3}\vec{e}'_2.$
- $A' = \begin{pmatrix} \frac{7}{3} & \frac{14}{3} \\ \frac{1}{3} & -\frac{7}{3} \end{pmatrix} = P^{-1}AP.$

[Retour à l'exercice ▲](#)

Solution de l'exercice A.1.26

On démontre immédiatement que $\text{Im } A$ est un sous espace vectoriel. On a de plus :

$$Y \in \text{Im } A \iff \exists X \in \mathbb{K}^n, Y = AX \iff \exists (x_i)_{i=1, \dots, n} \in \mathbb{K}^n, Y = \sum_{i=1}^n x_i A_i \iff Y \in \text{Vect}\langle A_1, \dots, A_n \rangle.$$

[Retour à l'exercice ▲](#)

Solution de l'exercice A.1.27

- $\text{rang } A = \dim E_1$. Voir Exemple [B.1.2](#).
- $\text{rang } A = 2$. Voir la définition de la matrice de rotation dans le plan d'angle θ au paragraphe [Matrices-définitions](#).
- $\text{rang } A = 2$ car (A_1, A_2, A_3) est une famille liée et que (A_1, A_2) est une famille libre.

[Retour à l'exercice ▲](#)

Solution de l'exercice A.1.28

1. e)
2. rien sans hypothèses supplémentaires.
3. d)
4. a) e)
5. a), b), c)
6. b), d)
7. a), b), c)

[Retour à l'exercice ▲](#)

Solution de l'exercice A.1.29

$\text{Ker } A$ n'est pas vide puisque $0 \in \text{Ker } A$.

On vérifie de plus la stabilité.

Si $X, X' \in \text{Ker } A$, $a \in \mathbb{K}$, alors $X + X' \in \text{Ker } A$ et $aX \in \text{Ker } A$.

[Retour à l'exercice ▲](#)

Solution de l'exercice A.1.30

On constate que la recherche du noyau de A revient à chercher les coefficients x_1, x_2, x_3 qui vérifient $x_1 A_1 + x_2 A_2 + x_3 A_3 = 0$. Ceci revient à étudier si les colonnes A_1, A_2, A_3 forment une famille libre, ce qui permet de savoir si le rang de A vaut 3. Dans le cas de A , on trouve des coefficients non nuls possibles, donc $\text{Ker } A \neq \{0\}$, ou encore $\text{rang } A < 3$, ce qui permet de conclure que A n'est pas inversible.

Dans le cas de B , la seule solution est $x_1 = x_2 = x_3 = 0$, donc B est inversible.

[Retour à l'exercice ▲](#)

Aide 1, Question 1a, Exercice A.2.1

Voir le paragraphe "[Application linéaire-définition](#)".

[Retour à l'exercice ▲](#)

Aide 1, Question 1b, Exercice A.2.1

Montrer que

$$f(\vec{x}) = \vec{0} \iff x_1 = x_2$$

$$\{\exists \vec{x}, \vec{y} = f(\vec{x})\} \iff y_1 = y_2.$$

Attention, montrez bien les équivalences. En déduire $\text{Ker } f$ et $\text{Im } f$.

[Retour à l'exercice ▲](#)

Aide 1, Question 1c, Exercice A.2.1

On a montré $\text{Ker } f = \text{Im } f$, quelle conséquence cela a-t-il sur $f \circ f$?

[Retour à l'exercice ▲](#)

Aide 1, Question 2, Exercice A.2.1

Raisonnez précisément par équivalences.

[Retour à l'exercice ▲](#)

Aide 2, Question 2, Exercice A.2.1

- Que signifie qu'une application est nulle?
- Quelle est la définition de $g \circ f$?
- Quelle est la définition de $\text{Im } f$?

[Retour à l'exercice ▲](#)

Aide 1, Question 1, Exercice A.2.2

Voir le paragraphe "[Application linéaire-définition](#)".

[Retour à l'exercice ▲](#)

Aide 1, Question 2, Exercice A.2.2

Voir le paragraphe "[Noyau et image](#)".

[Retour à l'exercice ▲](#)

Aide 2, Question 2, Exercice A.2.2

Écrire les conditions pour que $\vec{x} \in \text{Ker } f$, en déduire une famille génératrice de $\text{Ker } f$, montrer que cette famille est libre.

[Retour à l'exercice ▲](#)

Aide 3, Question 2, Exercice A.2.2

En raisonnant par équivalences montrer par exemple que

$$\vec{x} \in \text{Ker } f \iff \vec{x} = x_3 \vec{f}_3 + x_4 \vec{f}_4 \quad \text{avec } \vec{f}_3 = (-2, -1, 1, 0), \vec{f}_4 = (1, 2, 0, 1).$$

Vérifier que $\vec{f}_3, \vec{f}_4 \in \text{Ker } f$ et qu'ils forment une famille libre. Conclure.

[Retour à l'exercice ▲](#)

Aide 1, Question 3, Exercice A.2.2

Voir le paragraphe "[Noyau et image](#)".

[Retour à l'exercice ▲](#)

Aide 2, Question 3, Exercice A.2.2

Déterminer une famille génératrice de $\text{Im } f$.

[Retour à l'exercice ▲](#)

Aide 3, Question 3, Exercice A.2.2

Calculer $f(\vec{e}_1), f(\vec{e}_2), f(\vec{e}_3), f(\vec{e}_4)$ et extraire de cette famille génératrice une base de $\text{Im } f$. Bien sûr la base de $\text{Im } f$ n'est pas unique, il se peut que vous obteniez une base de $\text{Im } f$ différente de celle proposée dans la solution. Dans tous les cas toutes les bases ont le même nombre de vecteurs, si vous trouvez que $(\vec{g}_1, \vec{g}_2)$ est une base de $\text{Im } f$, vous devez montrer que les vecteurs $\vec{g}'_1 = (1, 1, 1), \vec{g}'_2 = (-1, 0, 1)$ sont des combinaisons linéaires de $\vec{g}_1, \vec{g}_2$.

[Retour à l'exercice ▲](#)

Aide 1, Question 1a, Exercice A.2.3

Montrer que si $\vec{x} \in \text{Ker } u$ alors $\vec{x} \in \text{Ker } u^2$.

[Retour à l'exercice ▲](#)

Aide 2, Question 1a, Exercice A.2.3

Si u est linéaire , on a toujours $u(\vec{0}) = \vec{0}$.

[Retour à l'exercice ▲](#)

Aide 1, Question 1b, Exercice A.2.3

Montrer que si $\vec{y} \in \text{Im } u^2$ alors $\vec{y} \in \text{Im } u$.

[Retour à l'exercice ▲](#)

Aide 2, Question 1b, Exercice A.2.3

$$u^2(\vec{x}) = u(u(\vec{x})).$$

[Retour à l'exercice ▲](#)

Aide 1, Question 1c, Exercice A.2.3

Revoir le paragraphe "[Noyau et image](#)".

[Retour à l'exercice ▲](#)

Aide 2, Question 1c, Exercice A.2.3

Proposez une démonstration claire, la rigueur de la rédaction est ici très importante. Par exemple, pour montrer que la proposition P implique la proposition Q , montrez que Q (la conclusion) est vraie en utilisant le fait que P (l'hypothèse) est vraie. Pour montrer que 2 propositions sont équivalentes on démontre souvent une double implication.

Pour démontrer que $A \subset B$ il faut montrer que tout élément de A appartient à B (en général ceci se démontre par une série d'implications).

Pour démontrer que $A = B$, on peut montrer que $A \subset B$ et $B \subset A$ comme précédemment. Ou encore on montre que $x \in A \iff x \in B$ (on utilise alors une série d'équivalences).

[Retour à l'exercice ▲](#)

Aide 3, Question 1c, Exercice A.2.3

Supposer que $\text{Ker } u = \text{Ker } u^2$, prendre un élément quelconque de $\text{Im } u \cap \text{Ker } u$, montrer que cet élément est nul (en utilisant bien sûr l'hypothèse $\text{Ker } u = \text{Ker } u^2$).

Démontrer ensuite la réciproque, c'est-à-dire on suppose que $\text{Im } u \cap \text{Ker } u = \vec{0}$ et on montre que $\text{Ker } u = \text{Ker } u^2$ (par double inclusion, penser aux questions qui ont été traitées avant).

[Retour à l'exercice ▲](#)

Aide 1, Question 1d, Exercice A.2.3

Revoir le paragraphe "[Noyau et image](#)".

[Retour à l'exercice ▲](#)

Aide 2, Question 1d, Exercice A.2.3

Proposez une démonstration claire, la rigueur de la rédaction est ici très importante. Par exemple, pour montrer que la proposition P implique la proposition Q , montrez que Q (la conclusion) est vraie en utilisant le fait que P (l'hypothèse) est vraie. Pour montrer que 2 propositions sont équivalentes on démontre souvent une double implication.

Pour démontrer que $A \subset B$ il faut montrer que tout élément de A appartient à B (en général ceci se démontre par une série d'implications).

Pour démontrer que $A = B$, on peut montrer que $A \subset B$ et $B \subset A$ comme précédemment. Ou encore on montre que $x \in A \iff x \in B$ (on utilise alors une série d'équivalences).

[Retour à l'exercice ▲](#)

Aide 3, Question 1d, Exercice A.2.3

On suppose que $\text{Im } u = \text{Im } u^2$.

On choisit $\vec{x} \in E$, on sait (pourquoi?) $\exists \vec{z} \in E, u(\vec{x}) = u^2(\vec{z})$. On peut alors écrire que $\vec{x} = u(\vec{z}) + (\vec{x} - u(\vec{z}))$! En déduire que $E = \text{Im } u + \text{Ker } u$.

Réciproquement, on suppose que $E = \text{Im } u + \text{Ker } u$.

Soit $\vec{x} \in \text{Im } u$ alors $\exists \vec{z}_1 \in \text{Im } u, \vec{z}_2 \in \text{Ker } u$ tels que $\vec{x} = u(\vec{z}_1 + \vec{z}_2)$. Pourquoi?

En déduire qu'il existe $\vec{y}$ tel que $\vec{x} = u^2(\vec{y})$ et donc que $\vec{x} \in \text{Im } u^2$.

On en déduit que $\text{Im } u \subset \text{Im } u^2$.

En utilisant les questions précédentes on obtient l'égalité des deux ensembles.

[Retour à l'exercice ▲](#)

Aide 1, Question 2a, Exercice A.2.3

Revoir dans le chapitre 1 la définition de somme directe.

[Retour à l'exercice ▲](#)

Aide 2, Question 2a, Exercice A.2.3

On a alors $p^2 = p$, on peut utiliser 1(c) et 1(d) et conclure.

[Retour à l'exercice ▲](#)

Aide 1, Question 2b, Exercice A.2.3

Inspirez-vous de l'aide 3 de la question 1(d).

[Retour à l'exercice ▲](#)

Aide 1, Question 2c, Exercice A.2.3

Revoir le paragraphe "[Projection](#)".

[Retour à l'exercice ▲](#)

Aide 1, Question 1, Exercice A.2.4

Quelle est la base canonique de $\mathbb{K}_n[X]$?

[Retour à l'exercice ▲](#)

Aide 1, Question 2a, Exercice A.2.4

Voir l'Exercice [A.1.4](#)

[Retour à l'exercice ▲](#)

Aide 1, Question 2b, Exercice A.2.4

Essayez de démontrer cette propriété sans hypothèse supplémentaire. Si vous n'y arrivez pas, essayez de trouver un contre-exemple pour prouver qu'elle est fausse.

[Retour à l'exercice ▲](#)

Aide 2, Question 2b, Exercice A.2.4

La question 1 fournit un contre-exemple.

On cherche l'hypothèse supplémentaire :

Soit $\vec{x} \in E$, alors $u(\vec{x})$ s'écrit $u(\vec{x}) = \alpha_1 u(\vec{x}_1) + \dots + \alpha_p u(\vec{x}_p)$. Pourquoi?

Quelle hypothèse faut-il ajouter pour pouvoir déduire que $\vec{x} = \alpha_1 \vec{x}_1 + \dots + \alpha_p \vec{x}_p$?

[Retour à l'exercice ▲](#)

Aide 1, Question 2c, Exercice A.2.4

Revoir la question 2(a).

[Retour à l'exercice ▲](#)

Aide 2, Question 2c, Exercice A.2.4

A-t-on $\operatorname{Im} u = F$?

[Retour à l'exercice ▲](#)

Aide 3, Question 2c, Exercice A.2.4

Si u n'est pas surjective, la réponse est "non".

[Retour à l'exercice ▲](#)

Aide 1, Question 1, Exercice A.2.5

Une des implications découle immédiatement du Théorème 2.1.1.

[Retour à l'exercice ▲](#)

Aide 2, Question 1, Exercice A.2.5

$P_2 \implies P_1$ est la contraposée de la première assertion du Théorème 2.1.1. Donc l'implication est démontrée. Essayez maintenant de la démontrer directement sans utiliser le théorème.

[Retour à l'exercice ▲](#)

Aide 3, Question 1, Exercice A.2.5

On suppose que P_2 est vraie. On doit montrer que pour tous scalaires $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$:

$$\alpha_1 \vec{x}_1 + \alpha_2 \vec{x}_2 + \dots + \alpha_n \vec{x}_n = \vec{0} \implies \alpha_1 = \alpha_2 = \dots = \alpha_n = 0$$

[Retour à l'exercice ▲](#)

Aide 1, Question 2, Exercice A.2.5

N'avez-vous pas déjà démontré dans le cours que sous certaines hypothèses $P_1 \implies P_2$?

[Retour à l'exercice ▲](#)

Aide 2, Question 2, Exercice A.2.5

Revoir l'Exercice [A.1.9](#)

[Retour à l'exercice ▲](#)

Aide 1, Question 1, Exercice A.2.6

Voir la définition de "famille libre" dans le Chapitre 1.

[Retour à l'exercice ▲](#)

Aide 2, Question 1, Exercice A.2.6

On rappelle que si une fonction est nulle alors sa dérivée est nulle. Attention, faites bien la différence entre “ f est la fonction nulle” et “la fonction f s’annule pour la valeur $t = 75$ ”.

[Retour à l'exercice ▲](#)

Aide 3, Question 1, Exercice A.2.6

Utiliser les dérivées et des valeurs particulières de t .

[Retour à l'exercice ▲](#)

Aide 1, Question 2b, Exercice A.2.6

Revoir le paragraphe "[Injective](#)".

[Retour à l'exercice ▲](#)

Aide 2, Question 2b, Exercice A.2.6

On note 0 l'application nulle.

Écrire $u(p) = 0$

[Retour à l'exercice ▲](#)

Aide 3, Question 2b, Exercice A.2.6

Utiliser 1) pour montrer que $u(p) = 0 \iff p = 0$.

[Retour à l'exercice ▲](#)

Aide 1, Question 2c, Exercice A.2.6

Revoir le paragraphe "[Noyau et image](#)".

[Retour à l'exercice ▲](#)

Aide 2, Question 2c, Exercice A.2.6

Calculer l'image par u des éléments de $\mathcal{F}$.

[Retour à l'exercice ▲](#)

Aide 1, Question 3, Exercice A.2.6

Voir le paragraphe "[Matrices-définitions](#)".

[Retour à l'exercice ▲](#)

Aide 2, Question 3, Exercice A.2.6

Calculer l'image des vecteurs de base de $\mathbb{R}_2[X]$ et calculer leurs composantes dans une base de F .

[Retour à l'exercice ▲](#)

Aide 1, Question 4, Exercice A.2.6

Utiliser A pour traduire $u(p) = 0$.

[Retour à l'exercice ▲](#)

Aide 2, Question 4, Exercice A.2.6

Calculer AX .

[Retour à l'exercice ▲](#)

Aide 3, Question 4, Exercice A.2.6

Montrer que $AX = 0 \iff X = 0$.

[Retour à l'exercice ▲](#)

Aide 1, Question 1, Exercice A.2.7

Voir le paragraphe "[Application linéaire-définition](#)".

[Retour à l'exercice ▲](#)

Aide 2, Question 1, Exercice A.2.7

N'oubliez pas que $u(p + q)$, $u(p)$, $u(q)$ et $u(\lambda p)$ sont des polynômes. On rappelle que pour montrer l'égalité de deux polynômes p_1 et p_2 par exemple, il suffit de montrer que $p_1(t) = p_2(t)$ pour tout $t \in \mathbb{R}$.

N'oubliez pas de montrer que $u(p) \in \mathbb{R}_{n-2}[X]$, pour cela décomposez p sur la base canonique.

[Retour à l'exercice ▲](#)

Aide 1, Question 2, Exercice A.2.7

Voir le paragraphe "[Matrices-définitions](#)".

[Retour à l'exercice ▲](#)

Aide 2, Question 2, Exercice A.2.7

Calculer les composantes de $u(p_0), u(p_1), \dots, u(p_4)$ dans la base de $\mathbb{R}_{n-2}[X]$ et rangez ces coefficients correctement dans la matrice A .

[Retour à l'exercice ▲](#)

Aide 1, Question 1, Exercice A.2.8

Revoir dans le chapitre 1 la caractérisation de sous-espace vectoriel et la définition de base.

[Retour à l'exercice ▲](#)

Aide 2, Question 1, Exercice A.2.8

On obtient facilement une famille génératrice de E . Montrer ensuite que cette famille génératrice est libre.

[Retour à l'exercice ▲](#)

Aide 3, Question 1, Exercice A.2.8

On écrit $M = aA + bB$ (une base de E est constituée de matrices de E).

[Retour à l'exercice ▲](#)

Aide 1, Question 2a, Exercice A.2.8

Revoir la caractérisation de sous-espace vectoriel.

[Retour à l'exercice ▲](#)

Aide 2, Question 2a, Exercice A.2.8

Choisir par exemple $n = 3$, soit $M \in \mathcal{T}_3$, et traduire cette propriété sur les coefficients de M .

[Retour à l'exercice ▲](#)

Aide 3, Question 2a, Exercice A.2.8

On a $m_{33} = -m_{11} - m_{22}$ donc en utilisant les notations classiques E_{ij} ,

$M = m_{11}(E_{11} - E_{33}) + m_{22}(E_{22} - E_{33}) + m_{12}E_{12} + m_{13}E_{13} + m_{21}E_{21} + m_{23}E_{23} + m_{31}E_{31} + m_{32}E_{32}$. On démontre facilement que les 8 matrices qui interviennent dans la décomposition précédente appartiennent à $\mathcal{T}_3$ et qu'elles forment une famille libre, c'est donc une base.

[Retour à l'exercice ▲](#)

Aide 1, Question 2b, Exercice A.2.8

Revoir la caractérisation de sous-espace vectoriel et reprendre les notations de l'Exercice [A.1.17](#).

[Retour à l'exercice ▲](#)

Aide 1, Question 2c, Exercice A.2.8

Revoir la caractérisation de sous-espace vectoriel et reprendre les notations de l'Exercice [A.1.17](#).

[Retour à l'exercice ▲](#)

Aide 1, Question 2d, Exercice A.2.8

Revoir la caractérisation de sous-espace vectoriel et reprendre les notations de l'Exercice [A.1.17](#).

[Retour à l'exercice ▲](#)

Aide 2, Question 2d, Exercice A.2.8

Si A est symétrique, montrer que l'on peut écrire

$$A = a_{11}A_{11} + a_{12}A_{12} + \dots + a_{1n}A_{1n} + a_{22}A_{22} + \dots + a_{2n}A_{2n} + \dots + a_{nn}A_{nn},$$

où $A_{11}, A_{12}, \dots, A_{1n}, A_{22}, \dots, A_{2n}, \dots, A_{nn}$ sont des matrices symétriques à déterminer à l'aide des notations de l'Exercice [A.1.17](#). Si vous ne voyez pas avec n quelconque, traitez d'abord un cas particulier : $n = 3$ par exemple.

[Retour à l'exercice ▲](#)

Aide 3, Question 2d, Exercice A.2.8

Montrer que la famille $(A_{11}, A_{12}, \dots, A_{1n}, A_{22}, \dots, A_{2n}, \dots, A_{nn})$ est libre. Conclure que la dimension de $\mathcal{S}_n$ vaut $\frac{n(n+1)}{2}$.
Démontrer de façon similaire que la dimension de $\mathcal{A}_n$ vaut $\frac{n(n-1)}{2}$.

[Retour à l'exercice ▲](#)

Aide 1, Question 2e, Exercice A.2.8

Montrer que $\mathcal{S}_n \cap \mathcal{A}_n = \{\vec{0}\}$.

[Retour à l'exercice ▲](#)

Aide 2, Question 2e, Exercice A.2.8

Quelle est la dimension de $\mathcal{S}_n \oplus \mathcal{A}_n$? En déduire que $\mathcal{M}_{n,n} = \mathcal{S}_n \oplus \mathcal{A}_n$.

Par curiosité, étant donnée $M \in \mathcal{M}_{n,n}$, essayez de construire $S \in \mathcal{S}_n$, $A \in \mathcal{A}_n$ tels que $M = S + A$. Vous pouvez vous inspirer de ce qui a été fait pour les fonctions paires et impaires dans le chapitre précédent.

[Retour à l'exercice ▲](#)

Aide 1, Question 1, Exercice A.2.9

Vérifier que

$$u_A(X + Y) = u_A(X) + u_A(Y)$$

$$u_A(\lambda X) = \lambda u_A(X).$$

N'oubliez pas que X et Y sont des matrices.

[Retour à l'exercice ▲](#)

Aide 1, Question 2, Exercice A.2.9

Écrire $X = \begin{pmatrix} x & y \\ z & t \end{pmatrix}$ et trouver les conditions sur x, y, z, t pour que $u_A(X) = 0$.

[Retour à l'exercice ▲](#)

Aide 2, Question 2, Exercice A.2.9

On obtient $\begin{cases} 2y + z = 0 \\ t - x = 0 \end{cases}$.

En déduire une famille génératrice de $\text{Ker } u_A$ et montrer que cette famille est libre.

Attention, vos calculs vous ont peut-être conduit à une autre base (Y_1, Y_2) que la base (X_1, X_2) proposée en solution.

Dans ce cas, vérifiez que les vecteurs X_1, X_2 sont des combinaisons linéaires des vecteurs Y_1, Y_2 .

[Retour à l'exercice ▲](#)

Aide 1, Question 3, Exercice A.2.9

Avant tout calcul, voyez-vous une matrice particulière A qui vérifie $AX = XA, \forall X$?

[Retour à l'exercice ▲](#)

Aide 2, Question 3, Exercice A.2.9

Si $A = I$ ou $A = \lambda I$, la propriété est démontrée.

On va montrer maintenant qu'il n'existe pas d'autres matrices qui vérifient cette propriété.

Choisir $X = \begin{pmatrix} x & y \\ z & t \end{pmatrix}$, traduire $AX = XA$ et ne pas oublier que l'égalité doit être vraie pour tout X .

[Retour à l'exercice ▲](#)

Aide 1, Question 1, Exercice A.2.10

Revoir le paragraphe "[Produit de deux matrices](#)".

[Retour à l'exercice ▲](#)

Aide 2, Question 1, Exercice A.2.10

Donner l'expression du terme de AB qui se trouve en ligne i et colonne i . Même question pour le terme de BA .

[Retour à l'exercice ▲](#)

Aide 3, Question 1, Exercice A.2.10

Calculer les traces et comparer.

[Retour à l'exercice ▲](#)

Aide 1, Question 2, Exercice A.2.10

Attention AB est un scalaire et BA est une matrice.

Que vaut AB ?

Expliciter les termes de BA et conclure.

[Retour à l'exercice ▲](#)

Aide 1, Question 1, Exercice A.2.11

$$(A + B)^2 = (A + B)(A + B).$$

[Retour à l'exercice ▲](#)

Aide 2, Question 1, Exercice A.2.11

Utiliser la distributivité du produit par rapport à la somme.

Attention : le produit n'est pas commutatif.

[Retour à l'exercice ▲](#)

Aide 3, Question 1, Exercice A.2.11

$$(A + B)^2 = A^2 + AB + BA + B^2.$$

La formule du binôme serait :

$$(A + B)^2 = A^2 + 2AB + B^2.$$

Lorsque $AB = BA$ (on dit que A et B commutent), la formule du binôme est alors valable pour $n = 2$.

Vérifiez maintenant par récurrence que lorsque A et B commutent, la formule est valable pour n quelconque. On rappelle la formule du binôme :

$$(A + B)^n = \sum_{i=0}^n C_n^i A^{n-i} B^i.$$

[Retour à l'exercice ▲](#)

Aide 1, Question 2, Exercice A.2.11

Écrire A comme une somme de 2 matrices et utiliser ce qui précède.

[Retour à l'exercice ▲](#)

Aide 2, Question 2, Exercice A.2.11

Avez-vous vérifié que les conditions énoncées pour appliquer la formule du binôme étaient satisfaites?

[Retour à l'exercice ▲](#)

Aide 1, Question 1, Exercice A.2.12

Voir le paragraphe "[Calcul explicite de l'image d'un vecteur](#)".

[Retour à l'exercice ▲](#)

Aide 1, Question 2, Exercice A.2.12

Voir le paragraphe "[Noyau et image](#)".

[Retour à l'exercice ▲](#)

Aide 2, Question 2, Exercice A.2.12

Trouver les conditions pour que $u(\vec{x}) = \vec{0}$.

[Retour à l'exercice ▲](#)

Aide 3, Question 2, Exercice A.2.12

En écrivant les conditions pour que $u(\vec{x}) = \vec{0}$, on trouve une famille libre, génératrice de $\text{Ker } u$.

[Retour à l'exercice ▲](#)

Aide 1, Question 3a, Exercice A.2.12

Comment allez-vous caractériser une base?

[Retour à l'exercice ▲](#)

Aide 2, Question 3a, Exercice A.2.12

Connaissez-vous la dimension de $\mathbb{R}^3$?

[Retour à l'exercice ▲](#)

Aide 3, Question 3a, Exercice A.2.12

Montrer que la famille $(\vec{e}'_1, \vec{e}'_2, \vec{e}'_3)$ est libre.

[Retour à l'exercice ▲](#)

Aide 1, Question 3c, Exercice A.2.12

Voir le paragraphe "[Matrices-définitions](#)".

[Retour à l'exercice ▲](#)

Aide 2, Question 3c, Exercice A.2.12

Calculez les composantes de $u(\vec{e}'_1), u(\vec{e}'_2), u(\vec{e}'_3)$ dans la base $(\vec{e}'_1, \vec{e}'_2, \vec{e}'_3)$.

[Retour à l'exercice ▲](#)

Aide 3, Question 3c, Exercice A.2.12

Pensez à utiliser la linéarité de u , les composantes de $u(\vec{e}_1), u(\vec{e}_2), u(\vec{e}_3)$ dans la base $(\vec{e}_1, \vec{e}_2, \vec{e}_3)$, et enfin les composantes de $\vec{e}_1, \vec{e}_2, \vec{e}_3$ dans la base $(\vec{e}'_1, \vec{e}'_2, \vec{e}'_3)$.

[Retour à l'exercice ▲](#)

Aide 1, Question 4, Exercice A.2.12

Revoir le paragraphe "[Matrice de passage](#)".

[Retour à l'exercice ▲](#)

Aide 2, Question 4, Exercice A.2.12

Qu'est ce qui relie cette matrice aux questions précédentes?

[Retour à l'exercice ▲](#)

Aide 3, Question 4, Exercice A.2.12

Il n'y a aucun calcul nouveau, utilisez la question précédente.

[Retour à l'exercice ▲](#)

Aide 4, Question 4, Exercice A.2.12

Les colonnes de P^{-1} contiennent les composantes des vecteurs $\vec{e}_1, \vec{e}_2, \vec{e}_3$ dans la base $(\vec{e}'_1, \vec{e}'_2, \vec{e}'_3)$.

[Retour à l'exercice ▲](#)

Aide 1, Question 5, Exercice A.2.12

Voir le paragraphe "[Changement de bases et matrices associées à une application linéaire](#)".

[Retour à l'exercice ▲](#)

Aide 1, Question 1, Exercice A.2.13

Rappeler la définition de "base orthonormée directe".

[Retour à l'exercice ▲](#)

Aide 2, Question 1, Exercice A.2.13

Vérifiez que $\vec{e}'_1, \vec{e}'_2$ sont orthonormés. Rappelez vos souvenirs de géométrie pour construire $\vec{e}'_3$

[Retour à l'exercice ▲](#)

Aide 3, Question 1, Exercice A.2.13

Utilisez le produit vectoriel.

[Retour à l'exercice ▲](#)

Aide 1, Question 2, Exercice A.2.13

Voir le paragraphe "[Matrices-définitions](#)".

[Retour à l'exercice ▲](#)

Aide 2, Question 2, Exercice A.2.13

Que vaut $\rho(\vec{e}'_1), \rho(\vec{e}'_2), \rho(\vec{e}'_3)$?

[Retour à l'exercice ▲](#)

Aide 3, Question 2, Exercice A.2.13

Faites une figure pour vous aider.

[Retour à l'exercice ▲](#)

Aide 1, Question 3, Exercice A.2.13

Voir le paragraphe "[Matrice de passage](#)".

[Retour à l'exercice ▲](#)

Aide 2, Question 3, Exercice A.2.13

Rappelez les composantes de $\vec{e}'_1, \vec{e}'_2, \vec{e}'_3$ dans la base $\vec{e}_1, \vec{e}_2, \vec{e}_3$. En déduire P .

[Retour à l'exercice ▲](#)

Aide 1, Question 4, Exercice A.2.13

Voir le paragraphe "[Changement de bases et matrices associées à une application linéaire](#)".

[Retour à l'exercice ▲](#)

Aide 2, Question 4, Exercice A.2.13

Comment allez-vous déterminer P^{-1} ? Est-ce une matrice de passage?

[Retour à l'exercice ▲](#)

Aide 3, Question 4, Exercice A.2.13

Effectuez le produit $PR'P^{-1}$.

[Retour à l'exercice ▲](#)

Aide 1, Question 1, Exercice A.2.14

Voir le paragraphe "[Rang](#)".

[Retour à l'exercice ▲](#)

Aide 2, Question 1, Exercice A.2.14

Dans l'Exercice [A.2.6](#), vous avez démontré des résultats sur u .

[Retour à l'exercice ▲](#)

Aide 3, Question 1, Exercice A.2.14

Que vaut la dimension de $\text{Im } u$?

[Retour à l'exercice ▲](#)

Aide 4, Question 1, Exercice A.2.14

Pouvait-on travailler directement sur les colonnes ou lignes de A ?

[Retour à l'exercice ▲](#)

Aide 1, Question 2, Exercice A.2.14

Voir le paragraphe "[Rang](#)".

[Retour à l'exercice ▲](#)

Aide 2, Question 2, Exercice A.2.14

Pourquoi peut-on affirmer que $\text{rang } A \leq 3$?

[Retour à l'exercice ▲](#)

Aide 3, Question 2, Exercice A.2.14

Comment voit-on immédiatement que $\text{rang } A \geq 1$?

[Retour à l'exercice ▲](#)

Aide 4, Question 2, Exercice A.2.14

Étudiez plus précisément les colonnes de A pour conclure.

[Retour à l'exercice ▲](#)

Aide 1, Question 3, Exercice A.2.14

Voir le paragraphe "[Rang](#)".

[Retour à l'exercice ▲](#)

Aide 2, Question 3, Exercice A.2.14

Est ce que l'on peut avoir $\text{rang } M = 0$?

[Retour à l'exercice ▲](#)

Aide 3, Question 3, Exercice A.2.14

Discuter suivant les valeurs de a et b .

[Retour à l'exercice ▲](#)

Aide 1, Question 4, Exercice A.2.14

Voir le paragraphe "[Rang](#)".

[Retour à l'exercice ▲](#)

Aide 2, Question 4, Exercice A.2.14

A et A' sont semblables.

[Retour à l'exercice ▲](#)

Aide 3, Question 4, Exercice A.2.14

Travailler sur les colonnes de A' .

[Retour à l'exercice ▲](#)

Aide 4, Question 4, Exercice A.2.14

Avait-on obtenu dans l'Exercice [A.2.12](#) des résultats sur u vous permettant de conclure quant au rang de A ?

[Retour à l'exercice ▲](#)

Aide 1, Question 5, Exercice A.2.14

Voir le paragraphe "[Rang](#)".

[Retour à l'exercice ▲](#)

Aide 2, Question 5, Exercice A.2.14

Pensez à u .

[Retour à l'exercice ▲](#)

Aide 3, Question 5, Exercice A.2.14

On aurait pu aussi étudier R' .

[Retour à l'exercice ▲](#)

Aide 1, Question 1, Exercice A.2.15

Voir le paragraphe "[Calcul explicite de l'image d'un vecteur](#)".

[Retour à l'exercice ▲](#)

Aide 2, Question 1, Exercice A.2.15

Montrer que :

$$u(\vec{x}) = \vec{0}_F \iff \begin{cases} x_1 = 0 \\ x_2 = x_3 = -x_4 \end{cases}$$

Bien raisonner par équivalences.

[Retour à l'exercice ▲](#)

Aide 1, Question 2, Exercice A.2.15

Si on a étudié le Chapitre 2 jusqu'au bout, on peut utiliser les résultats démontrés dans le paragraphe "[Rang et dimension du noyau](#)". On en déduit que $\text{Im } u = F$: pourquoi? Donc $(\vec{f}_1, \vec{f}_2, \vec{f}_3)$ est une base de $\text{Im } u$.

Essayons maintenant de résoudre cet exercice sans connaître ce résultat.

[Retour à l'exercice ▲](#)

Aide 2, Question 2, Exercice A.2.15

$(u(\vec{e}_1), u(\vec{e}_2), u(\vec{e}_3), u(\vec{e}_4))$ est génératrice de $\text{Im } u$, elle ne peut pas être libre : pourquoi ?
Montrez que la famille $(u(\vec{e}_1), u(\vec{e}_2), u(\vec{e}_3))$ est libre.

[Retour à l'exercice ▲](#)

Aide 3, Question 2, Exercice A.2.15

La famille $(u(\vec{e}_1), u(\vec{e}_2), u(\vec{e}_3))$ est génératrice de $\text{Im } u$, pourquoi?
C'est donc une base de $\text{Im } u$.

[Retour à l'exercice ▲](#)

Aide 1, Question 3, Exercice A.2.15

Voir le paragraphe "[Rang](#)" et utiliser la question précédente.

[Retour à l'exercice ▲](#)

Aide 1, Question 1, Exercice A.2.16

Voir le paragraphe "[Rang](#)".

[Retour à l'exercice ▲](#)

Aide 2, Question 1, Exercice A.2.16

Expliciter les colonnes de $V_1 V_2^T$ à l'aide de V_1 et des composantes de V_2 .

[Retour à l'exercice ▲](#)

Aide 3, Question 1, Exercice A.2.16

Montrer que toutes les colonnes de $V_1 V_2^T$ sont proportionnelles à V_1 et que l'une d'entre elles au moins est non nulle.

[Retour à l'exercice ▲](#)

Aide 1, Question 2, Exercice A.2.16

Voir le paragraphe "[Rang](#)".

[Retour à l'exercice ▲](#)

Aide 2, Question 2, Exercice A.2.16

Montrer qu'une colonne de A au moins est non nulle.

[Retour à l'exercice ▲](#)

Aide 3, Question 2, Exercice A.2.16

Montrer que toutes les autres colonnes de A sont proportionnelles à cette colonne non nulle, A_i par exemple. En déduire que $A = A_i L$ où L est un vecteur ligne non nul.

[Retour à l'exercice ▲](#)

Aide 1, Question 3, Exercice A.2.16

Les 3 colonnes de A sont proportionnelles.

[Retour à l'exercice ▲](#)

Aide 2, Question 3, Exercice A.2.16

$$A = \begin{pmatrix} 2A_2 & A_2 & 3A_2 \end{pmatrix} = A_2 \begin{pmatrix} 2 & 1 & 3 \end{pmatrix}.$$

[Retour à l'exercice ▲](#)

Aide 1, Question 1, Exercice A.2.17

On choisit $\vec{x} \in \text{Ker } u \cap \text{Im } u$ et on montre que $\vec{x} = \vec{0}$.

Écrire des implications très claires.

[Retour à l'exercice ▲](#)

Aide 2, Question 1, Exercice A.2.17

$$\vec{x} \in \text{Ker } u \cap \text{Im } u \iff \begin{cases} u(\vec{x}) = \vec{0} \\ \exists \vec{y}, \vec{x} = u(\vec{y}) \end{cases} \iff \begin{cases} \exists \vec{y}, \vec{x} = u(\vec{y}) \\ u(u(\vec{y})) = \vec{0} \end{cases} \iff \begin{cases} \exists \vec{y}, \vec{x} = u(\vec{y}) \\ u(\vec{y}) = \vec{0} \end{cases} \Rightarrow \vec{x} = \vec{0}.$$

[Retour à l'exercice ▲](#)

Aide 1, Question 2, Exercice A.2.17

$\text{Ker } u$ et $\text{Im } u$ sont en somme directe. Pourquoi?

[Retour à l'exercice ▲](#)

Aide 2, Question 2, Exercice A.2.17

On pose $H = \text{Ker } u \oplus \text{Im } u$, comparer les dimensions de H et de E . Conclure.

[Retour à l'exercice ▲](#)

Aide 1, Question 1a, Exercice A.2.18

Choisir $\vec{x} \in \text{Ker } u$ et montrer que $v \circ u(\vec{x}) = \vec{0}_G$.

[Retour à l'exercice ▲](#)

Aide 2, Question 1a, Exercice A.2.18

Ne pas oublier que si ν est linéaire, $\nu(\vec{0}_F) = \vec{0}_G$

[Retour à l'exercice ▲](#)

Aide 1, Question 1b, Exercice A.2.18

Il faut maintenant montrer l'inclusion $\text{Ker}(\nu \circ u) \subset \text{Ker } u$.

[Retour à l'exercice ▲](#)

Aide 2, Question 1b, Exercice A.2.18

$(\nu \circ u)(\vec{x}) = \vec{0}_G \Rightarrow u(\vec{x}) = \vec{0}_F$. Pourquoi?

[Retour à l'exercice ▲](#)

Aide 3, Question 1b, Exercice A.2.18

Voir le paragraphe "[Rang et dimension du noyau](#)".

[Retour à l'exercice ▲](#)

Aide 1, Question 1c, Exercice A.2.18

Appelons u l'application linéaire de $\mathbb{R}^n$ dans $\mathbb{R}^n$ dont B est la matrice dans la base canonique et appelons v l'application linéaire de $\mathbb{R}^p$ dans $\mathbb{R}^n$ dont A est la matrice dans la base canonique. Si B est inversible, u est bijective et on peut appliquer la question précédente.

[Retour à l'exercice ▲](#)

Aide 1, Question 2a, Exercice A.2.18

$\vec{y} \in \text{Im}(u \circ v) \implies \vec{y} \in \text{Im } u$. Pourquoi?

[Retour à l'exercice ▲](#)

Aide 1, Question 2b, Exercice A.2.18

Il faut montrer maintenant que

$$\operatorname{Im} u \subset \operatorname{Im}(u \circ w).$$

[Retour à l'exercice ▲](#)

Aide 1, Question 2c, Exercice A.2.18

S'inspirer de ce qui a été fait dans la question précédente.

[Retour à l'exercice ▲](#)