

Équations différentielles linéaires

Cours	2	
1	Généralités	2
1.1	Équation différentielle linéaire, système différentiel linéaire	2
1.2	Principe de superposition	3
1.3	Problème de Cauchy	3
1.4	Représentation d'une équation différentielle scalaire linéaire d'ordre n	3
2	Ensemble des solutions d'une équation différentielle linéaire	4
2.1	Théorème de Cauchy linéaire	4
2.2	Structure de l'ensemble des solutions — équations homogènes	5
2.3	Structure de l'ensemble des solutions — équations complète	6
3	Annexes	7
3.1	Annexe : théorème de Cauchy linéaire	7
3.2	Annexe : un résultat utile	9
3.3	Complément : le wronskien	9
Exercices	10	
Exercices	10	
Petits problèmes d'entraînement	10	

Sauf mention contraire, I désigne un intervalle de \mathbb{R} et E un espace vectoriel normé de dimension finie.

1 Généralités

1.1 Équation différentielle linéaire, système différentiel linéaire

Définition.

- On appelle **équation différentielle linéaire** une équation de la forme :

$$x' = a(t) \cdot x + b(t) \quad (E)$$

où $a : I \rightarrow \mathcal{L}(E)$ et $b : I \rightarrow E$ sont des applications continues.

- Résoudre (E) , c'est déterminer les fonctions $x : I \rightarrow E$ de classe C^1 telles que :

$$\forall t \in I, x'(t) = a(t) \cdot x(t) + b(t)$$

- On appelle **équation différentielle homogène associée à (E)** l'équation :

$$x' = a(t) \cdot x \quad (H)$$

Remarque. $a(t)$ est une application linéaire, $a(t) \cdot x(t)$ désigne l'image par cette application linéaire du vecteur $x(t)$.

On pourrait la noter $a(t)(x(t))$.

Exemple. Rechercher les $M : \mathbb{R} \rightarrow \mathcal{M}_n(\mathbb{R})$ de classe C^1 telles que :

$$\forall t \in \mathbb{R}, M'(t) = t^2 M(t)$$

c'est vouloir résoudre une équation différentielle linéaire homogène, où $a : t \mapsto t^2 \text{Id}_{\mathcal{M}_n(\mathbb{R})}$.

Traduction matricielle.

Fixons $\mathcal{B} = (e_1, \dots, e_n)$ une base de E .

Notons $A(t) = \text{Mat}(a(t), \mathcal{B})$, $B(t) = \text{Mat}(b(t), \mathcal{B})$ et $X(t) = \text{Mat}(x(t), \mathcal{B})$.

- L'équation différentielle (E) s'écrit sous la forme d'un **système différentiel linéaire** :

$$X' = A(t)X + B(t) \quad (S)$$

où $A : I \rightarrow \mathcal{M}_n(\mathbb{K})$ et $B : I \rightarrow \mathcal{M}_{n1}(\mathbb{K})$ sont des applications continues.

- Résoudre (S) , c'est déterminer les fonctions $X : I \rightarrow \mathcal{M}_{n1}(\mathbb{K})$ de classe C^1 telles que :

$$\forall t \in I, X'(t) = A(t)X(t) + B(t)$$

- On appelle **système différentiel homogène associé à (S)** :

$$X' = A(t)X$$

Exemple. Rechercher les fonctions $x, y : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ de classe C^1 telles que :

$$\forall t \in \mathbb{R}, \begin{cases} x'(t) = 2x(t) + (1+t)y(t) + t^2 \\ y'(t) = \cos(t)x(t) + \sin(t)y(t) + 1+t \end{cases}$$

c'est vouloir résoudre le système différentiel linéaire :

$$X' = A(t)X + B(t)$$

où $A : t \mapsto \begin{pmatrix} 2 & 1+t \\ \cos t & \sin t \end{pmatrix}$ et $B : t \mapsto \begin{pmatrix} t^2 \\ 1+t \end{pmatrix}$.

Exemple. Le système de Lotka-Volterra qui modélise l'évolution d'une population de proies et de prédateur s'écrit :

$$\begin{cases} x'(t) = x(t)(\alpha - \beta y(t)) \\ y'(t) = y(t)(\delta x(t) - \gamma) \end{cases}$$

C'est un système différentiel, non linéaire. Son étude n'entre pas dans le cadre du programme.

1.2 Principe de superposition

Proposition. Si x_1, x_2 sont solutions de deux équations différentielles linéaires ayant la même équation homogène associée : $x' = a(t) \cdot x + b_1(t)$ et $x' = a(t) \cdot x + b_2(t)$ respectivement, alors $x_1 + x_2$ est solution de l'équation :

$$x' = a(t) \cdot x + (b_1(t) + b_2(t))$$

1.3 Problème de Cauchy

Définition. On appelle **problème de Cauchy** l'association d'une équation différentielle linéaire et d'une **condition initiale** :

$$\begin{cases} x' = a(t) \cdot x + b(t) \\ x(t_0) = x_0 \end{cases}$$

où $t_0 \in I$ et $x_0 \in E$.

Théorème.

La recherche des fonctions $x : I \rightarrow E$ de classe \mathcal{C}^1 telles que

$$\begin{cases} \forall t \in I, x'(t) = a(t) \cdot x(t) + b(t) \\ x(t_0) = x_0 \end{cases}$$

est équivalente à la recherche des fonctions $x : I \rightarrow E$ continues telles que :

$$\forall t \in I, x(t) = x_0 + \int_{t_0}^t a(u) \cdot x(u) + b(u) \, du$$

Remarque. On dit qu'on a mis sous forme intégrale le problème de Cauchy.

Traduction matricielle.

Un **problème de Cauchy** pour un système différentiel linéaire s'écrit :

$$\begin{cases} X' = A(t)X + B(t) \\ X(t_0) = X_0 \end{cases}$$

où $t_0 \in I$ et $X_0 \in \mathcal{M}_{n1}(\mathbb{K})$.

1.4 Représentation d'une équation différentielle scalaire linéaire d'ordre n

Définition.

- On appelle **équation différentielle linéaire scalaire d'ordre n** une équation de la forme :

$$y^{(n)} = a_{n-1}(t)y^{(n-1)} + \cdots + a_1(t)y' + a_0(t)y + b(t) \quad (E)$$

où $a_0, a_1, \dots, a_{n-1}, b : I \rightarrow \mathbb{K}$ sont des applications continues.

- Résoudre (E) , c'est déterminer les fonctions $f : I \rightarrow \mathbb{K}$ de classe \mathcal{C}^k telles que :

$$\forall t \in I, f^{(n)}(t) = a_{n-1}(t)f^{(n-1)}(t) + \cdots + a_1(t)f'(t) + a_0(t)f(t) + b(t)$$

- On appelle **équation différentielle homogène associée à (E)** l'équation :

$$y^{(n)} = a_{n-1}(t)y^{(n-1)} + \cdots + a_1(t)y' + a_0(t)y \quad (E_0)$$

Remarque. Il importe que l'équation différentielle soit « normalisée », c'est-à-dire que le coefficient devant $y^{(n)}$ soit 1.

Théorème.

Une équation différentielle linéaire scalaire d'ordre n peut être représentée par le système différentiel linéaire :

$$X' = A(t)X + B(t)$$

en posant dans $\mathcal{M}_{n1}(\mathbb{K})$ et $\mathcal{M}_n(\mathbb{K})$:

$$X(t) = \begin{pmatrix} y(t) \\ y'(t) \\ \vdots \\ y^{(n-2)}(t) \\ y^{(n-1)}(t) \end{pmatrix} \quad A(t) = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & 0 & 1 & \ddots & \vdots \\ \vdots & & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & \cdots & \cdots & 0 & 1 \\ a_0(t) & a_1(t) & \cdots & a_{n-2}(t) & a_{n-1}(t) \end{pmatrix} \quad B(t) = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ b(t) \end{pmatrix}$$

Remarque. On reconnaît la transposée d'une matrice compagnon.

Définition. On appelle problème de Cauchy pour une équation différentielle linéaire scalaire d'ordre n l'association d'une équation différentielle et d'une condition initiale :

$$\begin{cases} y^{(n)} = a_{n-1}(t)y^{(n-1)} + \cdots + a_1(t)y' + a_0(t)y + b(t) \\ y(t_0) = y_0, \quad y'(t_0) = y_1, \quad \dots, \quad y^{(n-1)}(t_0) = y_{n-1} \end{cases}$$

où $t_0 \in I$ et $y_0, y_1, \dots, y_{n-1} \in \mathbb{K}$.

Remarque. Il existe d'autres problèmes, dont l'étude n'est pas au programme, comme celui des conditions aux limites.

2 Ensemble des solutions d'une équation différentielle linéaire

2.1 Théorème de Cauchy linéaire

Théorème de Cauchy linéaire.

Si :

- I est un intervalle
- a et b sont continues sur I

alors le problème de Cauchy :

$$\begin{cases} x' = a(t) \cdot x + b(t) \\ x(t_0) = x_0 \end{cases}$$

admet une unique solution définie sur I .

Remarque. Ce théorème est un cas particulier d'un théorème plus général, le théorème de Cauchy-Lipschitz.

Traduction matricielle.

Si :

- I est un intervalle
- A et B sont continues sur I

alors le problème de Cauchy :

$$\begin{cases} X' = A(t)X + B(t) \\ X(t_0) = X_0 \end{cases}$$

admet une unique solution définie sur I .

Corollaire.

Si :

- I est un intervalle
- $a_0, a_1, \dots, a_{n-1}, b$ sont continues sur I

alors le problème de Cauchy :

$$\begin{cases} y^{(n)} = a_{n-1}(t)y^{(n-1)} + \dots + a_1(t)y' + a_0(t)y + b(t) \\ y(t_0) = y_0, y'(t_0) = y_1, \dots, y^{(n-1)}(t_0) = y_{n-1} \end{cases}$$

admet une unique solution définie sur I .**Exemple.** Soit $\phi : I \rightarrow \mathcal{M}_{n1}(\mathbb{K})$ une solution de l'équation homogène :

$$X' = A(t)X$$

où $A : I \rightarrow \mathcal{M}_n(\mathbb{K})$ est continue sur J . Montrer l'équivalence :

$$\exists t \in I, \phi(t) = 0 \iff \forall t \in I, \phi(t) = 0$$

2.2 Structure de l'ensemble des solutions — équations homogènes

Théorème.

Si :

- I est un intervalle
- a est continue sur I
- \mathcal{S}_H désigne l'ensemble des solutions l'équation différentielle linéaire homogène : $x' = a(t) \cdot x$

alors :

- \mathcal{S}_H est un sous-espace vectoriel de $\mathcal{C}^1(I, E)$
- pour $t_0 \in I$, $\mathcal{S}_H \rightarrow E$ est un isomorphisme d'espaces vectoriels
 - $x \mapsto x(t_0)$
- $\dim \mathcal{S}_H = \dim E$

Traduction matricielle. Si :

- I est un intervalle
- A est continue sur I
- \mathcal{S}_H désigne l'ensemble des solutions du système différentiel linéaire homogène : $X' = A(t)X$

alors :

- \mathcal{S}_H est un sous-espace vectoriel de $\mathcal{C}^1(I, \mathcal{M}_{n1}(\mathbb{K}))$
- pour $t_0 \in I$, $\mathcal{S}_H \rightarrow \mathcal{M}_{n1}(\mathbb{K})$ est un isomorphisme d'espaces vectoriels
 - $X \mapsto X(t_0)$
- $\dim \mathcal{S}_H = n$

Corollaire. Si :

- I est un intervalle
- a_0, a_1, \dots, a_{n-1} sont continues sur I
- \mathcal{S}_H désigne l'ensemble des solutions de l'équation différentielle linéaire scalaire homogène :

$$y^{(n)} = a_{n-1}(t)y^{(n-1)} + \dots + a_1(t)y' + a_0(t)y$$

alors :

- \mathcal{S}_H est un sous-espace vectoriel de $\mathcal{C}^n(I, \mathbb{K})$
- pour $t_0 \in I$, $\mathcal{S}_H \rightarrow \mathbb{K}^n$ est un isomorphisme d'espaces vectoriels
 - $y \mapsto (y(t_0), y'(t_0), \dots, y^{(n-1)}(t_0))$
- $\dim \mathcal{S}_H = n$

Remarque. À part dans le cas où $n = 1$, ou le cas où A est constant, on ne sait en général pas déterminer l'espace vectoriel \mathcal{S}_H des solutions de l'équation homogène.

Définition. Une base de \mathcal{S}_H s'appelle un **système fondamental de solutions** de l'équation homogène.

Exemple. Déterminer une système fondamental de solutions du système :

$$\begin{cases} x'(t) = tx(t) - y(t) \\ y'(t) = x(t) + ty(t) \end{cases}$$

On pourra commencer par chercher un système dont sont solutions $u : t \mapsto e^{-t^2/2}x(t)$ et $v : t \mapsto e^{-t^2/2}y(t)$.

2.3 Structure de l'ensemble des solutions — équations complète

Théorème.

Si :

- I est un intervalle
- a et b sont continues sur I
- \mathcal{S}_E désigne l'ensemble des solutions l'équation différentielle linéaire : $x' = a(t) \cdot x + b(t)$

alors :

- \mathcal{S}_E est un sous-espace affine de $\mathcal{C}^1(I, E)$ de direction \mathcal{S}_H :

$$\mathcal{S}_E = x_{\text{part}} + \mathcal{S}_H$$

et qui est de dimension $\dim E$.

Traduction matricielle. Si :

- I est un intervalle
- A et B sont continues sur I
- \mathcal{S} désigne l'ensemble des solutions du système différentiel linéaire : $X' = A(t)X + B(t)$

alors :

- \mathcal{S} est un sous-espace affine de $\mathcal{C}^1(I, \mathcal{M}_{n1}(\mathbb{K}))$ dirigé par \mathcal{S}_H :

$$\mathcal{S} = X_{\text{part}} + \mathcal{S}_H$$

et qui est de dimension n .

Corollaire. Si :

- I est un intervalle
- $a_0, a_1, \dots, a_{n-1}, b$ sont continues sur I
- \mathcal{S} désigne l'ensemble des solutions de l'équation différentielle linéaire scalaire :

$$y^{(n)} = a_{n-1}(t)y^{(n-1)} + \dots + a_1(t)y' + a_0(t)y + b(t)$$

alors :

- \mathcal{S} est un sous-espace affine de $\mathcal{C}^n(I, \mathbb{K})$ dirigé par \mathcal{S}_H :

$$\mathcal{S} = y_{\text{part}} + \mathcal{S}_H$$

et qui est de dimension n .

3 Annexes

3.1 Annexe : théorème de Cauchy linéaire

Théorème.

Si :

- I est un intervalle
- A et B sont continues sur I

alors le problème de Cauchy :

$$\begin{cases} X' = A(t)X + B(t) \\ X(t_0) = X_0 \end{cases}$$

admet une unique solution définie sur I .

Preuve. On munit $\mathcal{M}_n(\mathbb{K})$ d'une norme sous-multiplicative,

par exemple une norme d'opérateur subordonnée à une norme sur $\mathcal{M}_{n1}(\mathbb{K})$.

- La mise sous forme intégrale du problème de Cauchy nous amène donc à chercher les fonctions continues $X : I \rightarrow \mathcal{M}_{n1}(\mathbb{K})$ telles que :

$$\forall t \in I, \quad X(t) = X_0 + \int_{t_0}^t (A(u)X(u) + B(u)) \, du$$

Pour $X \in \mathcal{C}^0(I, \mathcal{M}_{n1}(\mathbb{K}))$, on définit :

$$\Phi(X) : t \mapsto X_0 + \int_{t_0}^t (A(u)X(u) + B(u)) \, du$$

de sorte que l'on cherche X telle que $\Phi(X) = X$, c'est-à-dire un point fixe de Φ .

- Commençons par montrer l'existence d'une solution.

On définit par récurrence la suite $(X_n)_{n \in \mathbb{N}}$ en posant :

$$X_0 : t \mapsto X_0$$

$$\text{et, } \forall n \in \mathbb{N}, X_{n+1} = \Phi(X_n)$$

Travaillons pour $t \in K = [t_0, b] \subset I$, segment sur lequel les fonctions continues admettent une borne supérieure (le travail sur $[a, t_0] \subset I$ est analogue).

$$\begin{aligned} \|X_2(t) - X_1(t)\| &= \|\Phi(X_1)(t) - \Phi(X_0)(t)\| \\ &= \left\| \int_{t_0}^t A(u)(X_1(u) - X_0(u)) du \right\| \\ &\leq \int_{t_0}^t \|A(u)(X_1(u) - X_0(u))\| du \\ &\quad \text{par inégalité triangulaire} \\ &\leq \int_{t_0}^t \|A(u)\| \|X_1(u) - X_0(u)\| du \\ &\quad \text{par sous-multiplicativité} \\ &\leq \int_{t_0}^t \|A\|_\infty^K \|X_1 - X_0\|_\infty^K du \\ &= \|A\|_\infty^K \|X_1 - X_0\|_\infty^K (t - t_0) \end{aligned}$$

puis

$$\begin{aligned} \|X_3(t) - X_2(t)\| &= \|\Phi(X_2)(t) - \Phi(X_1)(t)\| \\ &= \left\| \int_{t_0}^t A(u)(X_2(u) - X_1(u)) du \right\| \\ &\leq \int_{t_0}^t \|A(u)(X_2(u) - X_1(u))\| du \\ &\quad \text{par inégalité triangulaire} \\ &\leq \int_{t_0}^t \|A(u)\| \|X_2(u) - X_1(u)\| du \\ &\quad \text{par sous-multiplicativité} \\ &\leq \int_{t_0}^t \|A\|_\infty^K \|A\|_\infty^K \|X_1 - X_0\|_\infty^K (u - t_0) du \\ &\quad \text{par la majoration précédente} \\ &= (\|A\|_\infty^K)^2 \|X_1 - X_0\|_\infty^K \frac{(t - t_0)^2}{2} \end{aligned}$$

Alors, par récurrence, pour tout $n \geq 1$:

$$\begin{aligned} \|X_{n+1}(t) - X_n(t)\| &\leq \frac{(\|A\|_\infty^K(t - t_0))^n}{n!} \|X_1 - X_0\|_\infty^K \\ &\leq \frac{(\|A\|_\infty^K(b - t_0))^n}{n!} \|X_1 - X_0\|_\infty^K \\ &\quad \text{indépendant de } t \\ &\quad \text{t.g. d'une série convergente} \end{aligned}$$

Donc $\sum (X_{n+1} - X_n)$ converge normalement, donc uniformément sur K . Par le lien suite-série, la suite $(X_n)_n$ converge sur K ; on note X sa limite.

On a :

$$\begin{aligned} \|X(t) - X_n(t)\| &= \left\| \sum_{k=n}^{+\infty} X_{k+1}(t) - X_k(t) \right\| \\ &\leq \sum_{k=n}^{+\infty} \|X_{k+1} - X_k\|_\infty^K \\ &\quad \text{indépendant de } t \\ &\quad \text{de limite nulle comme reste} \\ &\quad \text{d'une série convergente} \end{aligned}$$

donc la convergence de $(X_n)_n$ vers X est uniforme sur K . Par transfert de continuité, X est continue sur K

Par définition, on a :

$$\forall n, X_{n+1}(t) = X_0 + \int_{t_0}^t (A(u)X_n(u) + B(u)) du$$

Par convergence uniforme sur le segment $[t_0, t]$, on a à la limite :

$$X(t) = X_0 + \int_{t_0}^t (A(u)X(u) + B(u)) du$$

ce qui justifie que X est solution du problème de Cauchy sur K .

- Justifions maintenant l'unicité de la solution.

Soit $X, Y : I \rightarrow \mathcal{M}_{n1}(\mathbb{K})$ deux solutions du problème de Cauchy, et $Z = X - Y$.

Pour $t \in I$, on a :

$$\begin{aligned} Z'(t) &= X'(t) - Y'(t) \\ &= (A(t)X(t) + B(t)) - (A(t)Y(t) + B(t)) \\ &= A(t)Z(t) \\ \text{et } Z(t_0) &= X(t_0) - Y(t_0) \\ &= 0 \end{aligned}$$

En mettant sous forme intégrale ce problème de Cauchy, on a donc :

$$Z(t) = 0 + \int_{t_0}^t A(u)Z(u) du$$

On travaille maintenant pour $t \geq t_0$, mais le raisonnement est analogue lorsque $t \leq t_0$.

$$\begin{aligned} \|Z(t)\| &= \left\| \int_{t_0}^t A(u)Z(u) du \right\| \\ &\leq \int_{t_0}^t \|A(u)Z(u)\| du \text{ par inég. triangulaire} \quad (*) \\ &\leq \int_{t_0}^t \|A(u)\| \|Z(u)\| du \text{ car } \|\cdot\| \text{ sous-multiplicative} \\ &\leq \int_{t_0}^t \|A\|_\infty^{[t_0,t]} \|Z\|_\infty^{[t_0,t]} du \\ &= (t - t_0) \|A\|_\infty^{[t_0,t]} \|Z\|_\infty^{[t_0,t]} \end{aligned}$$

donc, en reportant dans $(*)$:

$$\begin{aligned} \|Z(t)\| &\leq \int_{t_0}^t \|A(u)\| \|Z(u)\| du \\ &\leq \int_{t_0}^t \|A(u)\| (u - t_0) \|A\|_\infty^{[t_0,t]} \|Z\|_\infty^{[t_0,t]} du \\ &\leq (\|A\|_\infty^{[t_0,t]})^2 \|Z\|_\infty^{[t_0,t]} \int_{t_0}^t (u - t_0) du \\ &= (\|A\|_\infty^{[t_0,t]})^2 \|Z\|_\infty^{[t_0,t]} \frac{(t - t_0)^2}{2} \end{aligned}$$

Par récurrence, on établit alors, pour tout $n \in \mathbb{N}^*$:

$$\|Z(t)\| \leq \frac{((t - t_0) \|A\|_\infty^{[t_0,t]})^n}{n!} \|Z\|_\infty^{[t_0,t]}$$

On reconnaît le terme général d'une série exponentielle, convergente. En faisant $n \rightarrow +\infty$, on en déduit donc :

$$\|Z(t)\| = 0$$

et donc $X(t) = Y(t)$.

□

3.2 Annexe : un résultat utile

Proposition. Soit $X : I \rightarrow \mathcal{M}_{n1}(\mathbb{K})$ une solution du système différentiel linéaire homogène :

$$X' = A(t)X$$

où $A : I \rightarrow \mathcal{M}_n(\mathbb{K})$ est continue sur I . On dispose de l'alternative : soit X est constante nulle, soit X ne s'annule pas.

Remarque. On peut reformuler en :

$$\begin{aligned} \exists t_0 \in I, X(t_0) &= 0_{\mathcal{M}_{n1}(\mathbb{K})} \\ \implies \forall t \in I, X(t) &= 0_{\mathcal{M}_{n1}(\mathbb{K})} \end{aligned}$$

Preuve. On suppose que X s'annule en t_0 . Alors X est solution du problème de Cauchy :

$$\begin{cases} X' = A(t)X \\ X(t_0) = 0_{\mathcal{M}_{n1}(\mathbb{K})} \end{cases}$$

dont $t \mapsto 0_{\mathcal{M}_{n1}(\mathbb{K})}$ est une solution évidente. Par unicité de la solution d'un problème de Cauchy, $X = (t \mapsto 0_{\mathcal{M}_{n1}(\mathbb{K})})$. \square

3.3 Complément : le wronskien

Définition. Si $X_1, \dots, X_n \in \mathcal{C}^1(I, \mathcal{M}_{n1}(\mathbb{K}))$ sont n solutions de l'équation différentielle linéaire homogène :

$$X' = A(t)X$$

où $A : I \rightarrow \mathcal{M}_n(\mathbb{K})$ est continue, on appelle **wronskien** associé à X_1, \dots, X_n :

$$W : t \mapsto \det(X_1(t), \dots, X_n(t))$$

Remarque. Le déterminant est calculé dans la base canonique de $\mathcal{M}_{n1}(\mathbb{K})$.

Théorème.

Sont équivalentes :

- (i) (X_1, \dots, X_n) base de \mathcal{S}_H
- (ii) W est nulle : $\forall t \in I, W(t) \neq 0$
- (iii) W s'annule : $\exists t_0 \in I, W(t_0) \neq 0$

Preuve.

$$(i) \implies (ii)$$

On suppose que (X_1, \dots, X_n) est une base de \mathcal{S}_H . Pour tout $t \in I$ fixé, on sait que :

$$\begin{array}{rcl} \Phi : \mathcal{S}_H & \rightarrow & \mathcal{M}_{n1}(\mathbb{K}) \\ X & \mapsto & X(t) \end{array}$$

est un isomorphisme d'espace vectoriel. Sa matrice relativement aux bases (X_1, \dots, X_n) de \mathcal{S}_H et canonique de $\mathcal{M}_{n1}(\mathbb{K})$ est, par blocs colonnes :

$$A = (X_1(t) | \dots | X_n(t))$$

On a donc :

$$0 \neq \det(A) = W(t)$$

$$(ii) \implies (iii)$$

Cette implication est claire.

$$(iii) \implies (i)$$

Par contraposée. On suppose que (X_1, \dots, X_n) n'est pas une base de \mathcal{S}_H , donc n'est pas libre. Ainsi, il existe $\lambda_1, \dots, \lambda_n$ non tous nuls tels que :

$$\forall t \in I, \lambda_1 X_1(t) + \dots + \lambda_n X_n(t) = 0$$

Ainsi, pour tout t , $(X_1(t), \dots, X_n(t))$ est liée donc $W(t) = \det(X_1(t), \dots, X_n(t)) = 0$. On a montré la négation de (iii). \square

Exercices**670.1**

L'espace $\mathcal{M}_{n1}(\mathbb{R})$ est muni de sa structure euclidienne usuelle. Pour $A \in \mathcal{M}_n(\mathbb{R})$, montrer que les assertions suivantes sont équivalentes :

- (i) A est antisymétrique ;
- (ii) Si X est solution de $X' = AX$, alors $\|X\|$ est constante.

670.2

Soit $T > 0$, $A : \mathbb{R} \rightarrow \mathcal{M}_n(\mathbb{R})$ et $B : \mathbb{R} \rightarrow \mathcal{M}_{n1}(\mathbb{R})$ deux applications continues et T -périodiques. On considère ϕ une solution sur \mathbb{R} de l'équation :

$$X' = A(t)X + B(t)$$

Montrer que ϕ est T -périodique si et seulement si elle vérifie $\phi(T) = \phi(0)$.
On remarquera que ϕ est T -périodique si et seulement si $\phi = \psi$, où $\psi : t \mapsto \phi(t+T)$.

Petits problèmes d'entraînement**670.3**

Soit $A \in \mathcal{M}_n(\mathbb{R})$, supposée non inversible.

- (a) Justifier qu'il existe un hyperplan vectoriel de $\mathcal{M}_{n1}(\mathbb{R})$ qui contient $\text{Im } A$.
- (b) En déduire que les solutions du système différentiel : $X'(t) = AX(t)$ prennent leurs valeurs dans un hyperplan affine, c'est-à-dire le translaté d'un hyperplan vectoriel.

670.4

Soit $A, B, C \in \mathcal{M}_n(\mathbb{K})$.

- (a) On suppose dans cette question que $AB = BA$. En dérivant :

$$t \mapsto \exp(t(A+B)) \exp(-tA) \text{ et } t \mapsto \exp(tB)$$

montrer que $\exp(A+B) = \exp(A)\exp(B)$.

On ne suppose plus que A et B commutent, et on note $[A, B] = AB - BA$.

- (b) En commençant par traiter le cas où $n = 1$, déterminer toutes les fonctions $M : \mathbb{R} \rightarrow \mathcal{M}_n(\mathbb{K})$ de classe \mathcal{C}^1 telles que :

$$\forall t \in \mathbb{R}, M'(t) = tM(t)C$$

- (c) On suppose que $C = [A, B]$, $AC = CA$ et $BC = CB$. Utiliser $t \mapsto \exp(tA) \exp(tB) \exp(-t(A+B))$ pour montrer que :

$$\exp(A+B) = \exp(A) \exp(B) \exp\left(-\frac{1}{2}[A, B]\right)$$

670.5

- (a) Soit $M, N \in \mathcal{M}_n(\mathbb{K})$ deux matrices. On note C_1, \dots, C_n les colonnes de N . Utiliser la définition du déterminant pour montrer que :

$$\sum_{i=1}^n \det(C_1, \dots, MC_i, \dots, C_n) = \text{tr}(M) \det(N)$$

- (b) Soit $A : I \rightarrow \mathcal{M}_n(\mathbb{K})$. On s'intéresse au système différentiel sur I :

$$X'(t) = A(t)X(t)$$

On considère n solutions X_1, \dots, X_n , et on note :

$$w(t) = \det(X_1(t), \dots, X_n(t))$$

Déduire de la question précédente que, si $t_0 \in I$:

$$\forall t \in I, w(t) = w(t_0) \exp\left(\int_{t_0}^t \text{tr}(A(u)) \, du\right)$$

Que penser du cas où A est constante ?