

Chapitre A7

Équations différentielles

Définition

Une *équation différentielle* est une équation dont l'inconnue est une fonction, supposée au moins une fois dérivable, et qui relie cette fonction à ses dérivées.

I. Équations différentielles linéaires du premier ordre

Soit D une partie de \mathbb{R} .

Dans cette partie on cherche toutes les fonctions $f : D \rightarrow \mathbb{R}$ vérifiant :

$$\forall t \in D \quad f'(t) - a(t)f(t) = b(t)$$

où a et b sont deux fonctions continues de D dans \mathbb{R} .

On dit que l'on résout l'équation différentielle :

$$(E) \quad y' - a(t)y = b(t)$$

A. Structure de l'ensemble des solutions

Proposition : Principe de superposition

Soit a , b_1 et b_2 trois fonctions. On considère les équations :

$$\begin{aligned} (E_1) \quad y' - a(t)y &= b_1(t) \\ (E_2) \quad y' - a(t)y &= b_2(t) \\ (E) \quad y' - a(t)y &= b_1(t) + b_2(t) \end{aligned}$$

Si y_1 est une solution de (E_1) et y_2 est une solution de (E_2) alors $y = y_1 + y_2$ est solution de (E) .

Démonstration. Comme y_1 est solution de (E_1) et y_2 est une solution de (E_2) alors :

$$\begin{aligned} y_1' - a(t)y_1 &= b_1(t) \\ y_2' - a(t)y_2 &= b_2(t) \end{aligned}$$

Par somme :

$$(y_1' + y_2') - a(t)(y_1 + y_2) = b_1(t) + b_2(t)$$

Ceci donne :

$$(y_1 + y_2)' - a(t)(y_1 + y_2) = b_1(t) + b_2(t)$$

Ainsi $y_1 + y_2$ est solution de (E) . □

Définition

Soit a et b deux fonctions. Soit (E) l'équation différentielle :

$$(E) \quad y' - a(t)y = b(t)$$

Alors l'équation

$$(H) \quad y' - a(t)y = 0$$

est appelée *équation homogène* associée à (E) .

Proposition

On conserve les notations ci-dessus, et on note

- \mathcal{E} l'ensemble des solutions de l'équation (E) ,
- \mathcal{H} l'ensemble des solutions de l'équation (H) .

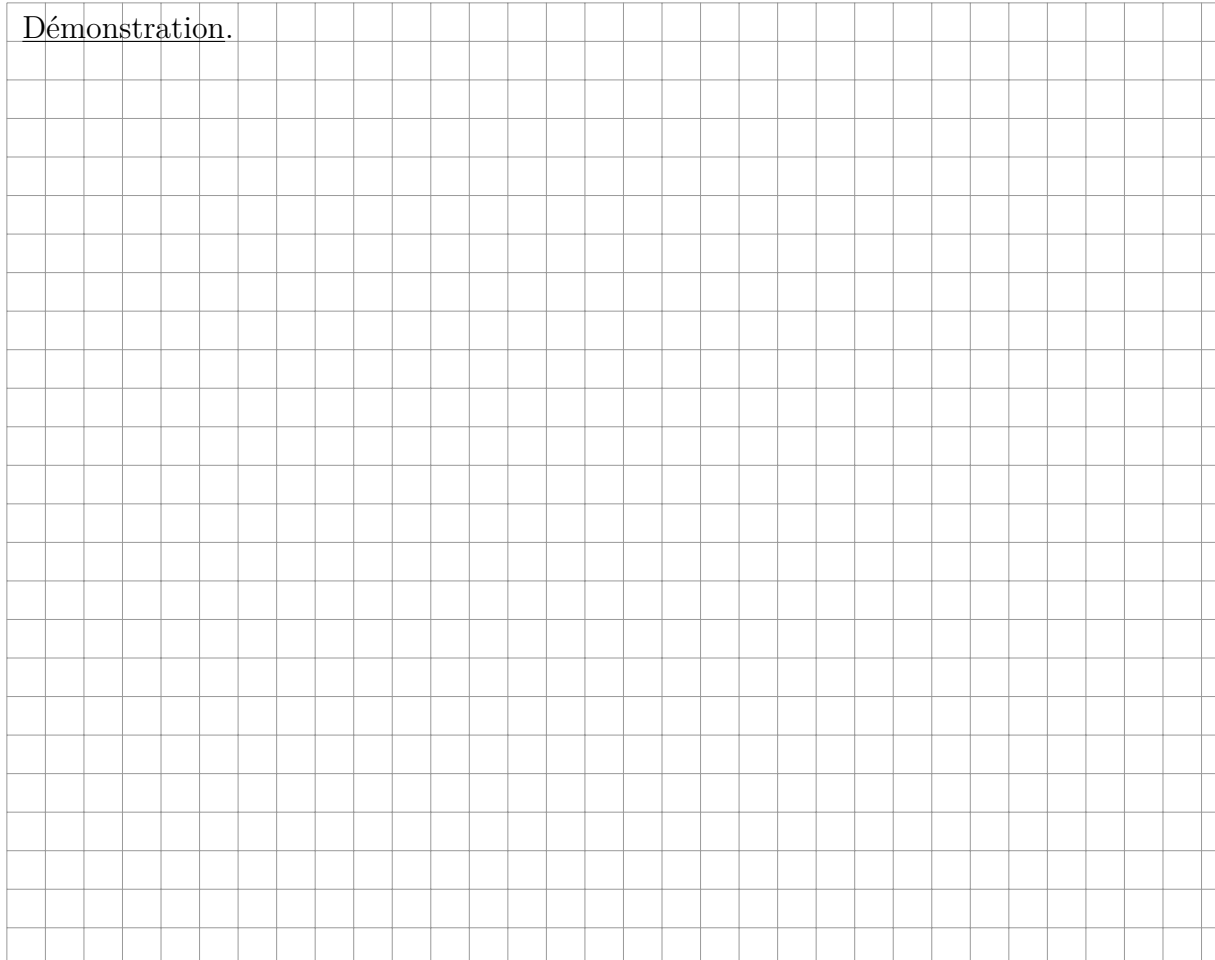
Soit y_1 une solution de (E) . Alors :

$$\mathcal{E} = \{y_0 + y_1 \mid y_0 \in \mathcal{H}\}$$

Remarque. Il suffit donc de connaître une seule solution y_1 de \mathcal{E} , alors les autres sont obtenues en lui additionnant les solutions de (H) .

On dit que y_1 est une *solution particulière* de (E) .

Démonstration.



B. Résolution de l'équation homogène

Théorème

Soit a une fonction de I dans \mathbb{R} , où I est un intervalle non-vide de \mathbb{R} . Soit (H) l'équation différentielle homogène :

$$(H) \quad y' - a(t)y = 0$$

Soit A une primitive de a . Alors les solutions de l'équation (H) sont les fonctions :

$$\begin{aligned} y_0 : I &\longrightarrow \mathbb{R} \\ t &\longmapsto \lambda e^{A(t)} \end{aligned}$$

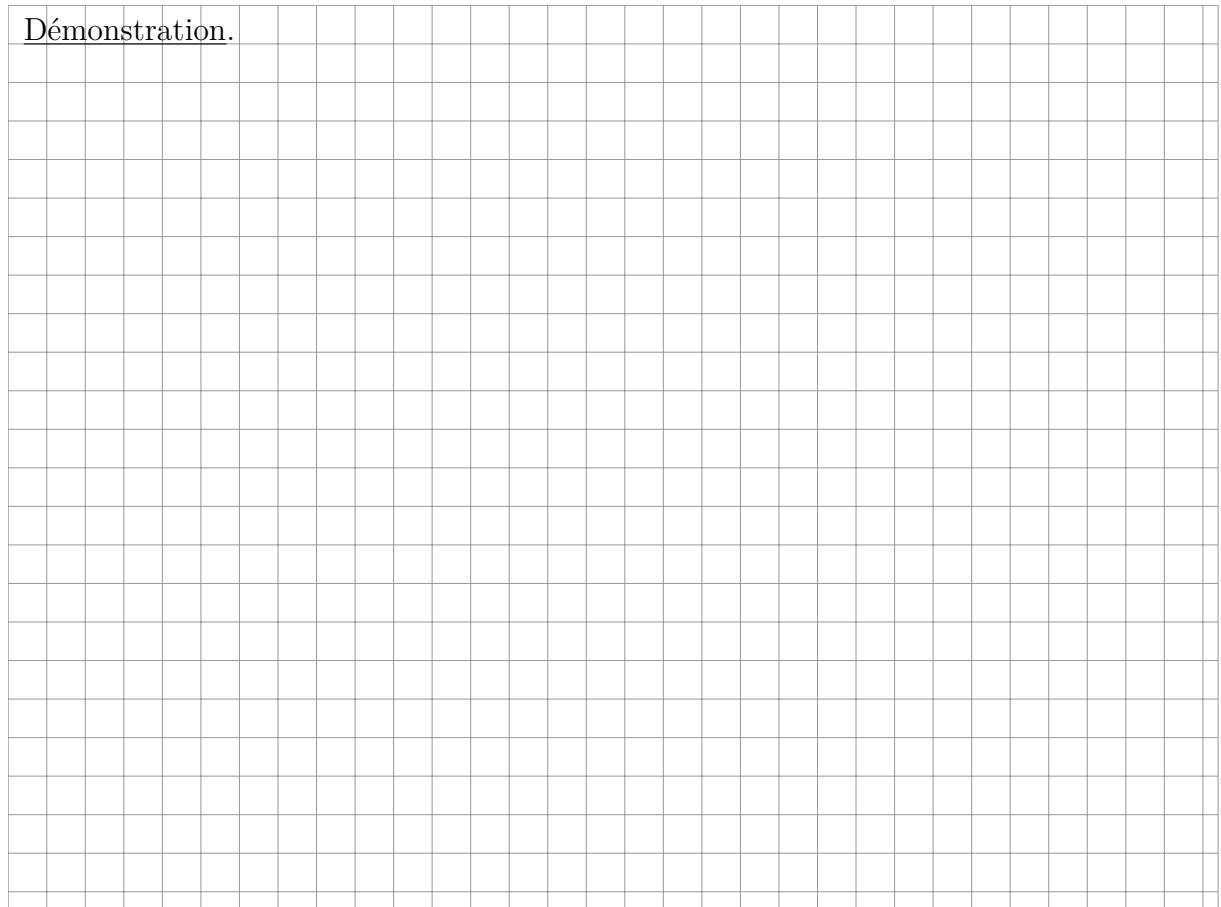
où λ est une constante réelle.

Remarque. Ainsi l'ensemble des solutions de (H) est :

$$\mathcal{H} = \left\{ \begin{array}{l} I \longrightarrow \mathbb{R} \\ t \longmapsto \lambda e^{A(t)} \end{array} \middle| \lambda \in \mathbb{R} \right\}$$

Exemple 1. Si a est une constante, alors les solutions de l'équation $y' - ay = 0$ sont les fonctions $y_0 : t \mapsto \lambda e^{at}$ où $\lambda \in \mathbb{R}$.

Démonstration.



► Exercice 1.

C. Recherche d'une solution particulière

1. Solutions évidentes

Exemple 2. Donner une solution particulière des équations suivantes.

(E_1)	$y' + y = 3$	$y(t) =$		$y' + y = t + 1$	$y(t) =$	
	$y' + y = e^t$	$y(t) =$		$y' + y = 3 + e^t$	$y(t) =$	
(E_2)	$2t y' + y = \sqrt{t}$	$y(t) =$		$2t y' + y = t^2$	$y(t) =$	
(E_3)	$(\cos t)y' + (\sin t)y = 1$	$y(t) =$				
	$(\cos t)y' + (\sin t)y = 0$	$y(t) =$				
(E_4)	$(2 - t)y' + 3y = t^2 + 2t - 8$	$y(t) =$				

► Exercice 2.

2. Variation de la constante

Méthode

On a calculé les solutions de l'équation homogène, qui sont de la forme :

$$y(t) = \lambda e^{A(t)}$$

où λ est une constante. On fait varier cette constante, c'est à dire qu'elle devient une fonction de t , *i.e.*, on pose

$$y(t) = \lambda(t) e^{A(t)}$$

où λ est une fonction dérivable. On résout ensuite l'équation (E) .

Exemple 3. Résoudre sur l'intervalle \mathbb{R}_+^* l'équation :

$$y' - \frac{1}{t}y = 1$$

Remarque. Cette méthode n'aboutit pas toujours, car on ne sait pas toujours intégrer la fonction $\lambda'(t)$. On peut le constater par exemple en essayant de résoudre l'équation :

$$y' - 2ty = 2t^3$$

D. Problème de Cauchy

Remarque. Un *problème de Cauchy* est la donnée d'une équation différentielle ainsi que d'une condition initiale, c'est-à-dire de la valeur de la fonction inconnue en un point.

Louis-Augustin Cauchy (1789 – 1857).

Théorème de Cauchy

Si I est un intervalle, a et b sont deux fonctions continues sur I , t_0 un élément de I et y_0 un réel, alors il existe une et une seule solution de l'équation différentielle

$$y'(t) - a(t)y(t) = b(t)$$

satisfaisant la condition initiale $y(t_0) = y_0$.

Démonstration. Notons (E) l'équation différentielle concernée.

L'équation homogène associée à (E) admet les solutions $y_0(t) = \lambda e^{A(t)}$ où λ est une constante réelle, A étant une primitive de a . La fonction A existe en vertu du théorème fondamental, car a est continue et I est un intervalle.

Par variation de la constante on obtient que $y(t) = \lambda(t)e^{A(t)}$ est solution de l'équation non homogène si et seulement si $\lambda'(t) = b(t)e^{-A(t)}$. La fonction $t \mapsto b(t)e^{-A(t)}$ admet une primitive par le théorème fondamental, car b est continue et I est un intervalle.

Notons Λ une telle primitive.

Les solutions de (E) sont alors les fonctions

$$y(t) = (\lambda + \Lambda(t))e^{A(t)}$$

où λ est une constante réelle.

La condition initiale $y(t_0) = y_0$ équivaut à $\lambda = y_0 e^{-A(t_0)} - \Lambda(t_0)$, ce réel existe et il est unique, donc l'équation (E) admet une et une seule solution vérifiant $y(t_0) = y_0$. \square

Remarque. On peut poser :

$$\forall t \in I \quad A(t) = \int_{t_0}^t a(u) \, du \quad \text{et} \quad \Lambda(t) = \int_{t_0}^t b(u) e^{-A(u)} \, du.$$

Alors A est une primitive de a et Λ est une primitive de $t \mapsto b(t)e^{-A(t)}$. La solution de l'équation (E) est :

$$y : t \mapsto (y_0 + \Lambda(t))e^{A(t)}.$$

On peut expliciter cette solution si on sait expliciter les primitives de a et de $t \mapsto b(t)e^{-A(t)}$.

► Exercice 3.

II. Équations différentielles linéaires du second ordre

Dans cette partie on résout les équations de la forme

$$(E) \quad ay'' + by' + cy = d(t)$$

où a, b, c sont des constantes et d est une fonction, éventuellement complexe. Il s'agit des équations différentielles linéaires du second ordre à coefficients constants.

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

$$(H) \quad ay'' + by' + cy = 0$$

A. Structure de l'ensemble des solutions

Proposition : Principe de superposition

Soit a, b, c trois constantes, d_1 et d_2 deux fonctions. On considère les équations :

$$\begin{aligned} (E_1) \quad ay'' + by' + cy &= d_1(t) \\ (E_2) \quad ay'' + by' + cy &= d_2(t) \\ (E) \quad ay'' + by' + cy &= d_1(t) + d_2(t) \end{aligned}$$

Si y_1 est une solution de (E_1) et y_2 est une solution de (E_2) alors $y = y_1 + y_2$ est solution de (E) .

Démonstration. Similaire à celle pour le premier ordre. □

Proposition

On note \mathcal{E} l'ensemble des solutions de l'équation (E) , \mathcal{H} l'ensemble des solutions de l'équation homogène associée (H) .

Soit y_1 une solution de (E) . Alors :

$$\mathcal{E} = \{y_0 + y_1 \mid y_0 \in \mathcal{H}\}$$

Démonstration. Identique à celle pour le premier ordre. □

B. Résolution de l'équation homogène

Définition

Soit a, b, c trois réels et

$$(H) \quad ay'' + by' + cy = 0$$

une équation différentielle homogène. L'équation

$$(C) \quad a\lambda^2 + b\lambda + c = 0$$

d'inconnue $\lambda \in \mathbb{C}$ est appelé *équation caractéristique* de (H) .

Remarque. On suppose dans toute la suite que a est non-nul, c'est-à-dire que les équations sont bien du second ordre et non du premier.

Théorème

Avec les notations précédentes, en notant Δ le discriminant de (C) .

- Si $\Delta \neq 0$ alors l'équation (C) admet deux solutions λ_1 et λ_2 . Les solutions de (H) sont les fonctions

$$y(t) = \alpha e^{\lambda_1 t} + \beta e^{\lambda_2 t}$$

où α et β sont deux constantes.

- Si $\Delta = 0$ alors l'équation (C) admet une unique solution λ_0 . Les solutions de (H) sont les fonctions

$$y(t) = (\alpha t + \beta) e^{\lambda_0 t}$$

où α et β sont deux constantes.

Démonstration. Soit λ_1 et λ_2 les solutions de l'équation caractéristique (C) . (Ces solutions sont égales si $\Delta = 0$.)

Soit y une fonction quelconque. On définit la fonction z par : $z(t) = y(t)e^{-\lambda_1 t}$

On calcule alors :	$y(t) =$	
	puis $y'(t) =$	
	et $y''(t) =$	

Ainsi, y est solution de l'équation (H) si et seulement si

	$ay''(t) + by'(t) + cy(t) = 0$	
\iff		

De plus a est non-nul et l'exponentielle est non-nulle, donc y est solution de (H) si et seulement si z est solution de l'équation différentielle :

Il s'agit d'une équation différentielle du premier ordre en z' , ses solutions sont les fonctions z' définies pour tout $t \in \mathbb{R}$ par

où μ est une constante éventuellement complexe.

$$z(t) = \mu \frac{1}{\lambda_2 - \lambda_1} e^{(\lambda_2 - \lambda_1)t} + \alpha$$
$$z(t) = \alpha + \beta e^{(\lambda_2 - \lambda_1)t}$$
$$\forall t \in \mathbb{R} \quad y(t) = \alpha e^{\lambda_1 t} + \beta e^{\lambda_2 t}$$

Supposons maintenant que $\Delta = 0$. Dans ce cas $\lambda_1 - \lambda_2$ est nul donc l'équation (H') s'écrit :

Elle est vérifiée si et seulement si il existe une constante α telle que $z'(t) = \alpha$, ce qui est vérifié si et seulement si il existe une constante β telle que pour tout $t \in \mathbb{R}$:

Comme $y(t) = z(t)e^{\lambda_0 t}$ alors :

$$\forall t \in \mathbb{R} \quad y(t) = (\alpha t + \beta)e^{\lambda_0 t}$$

Ceci est bien le résultat annoncé par le théorème. \square

Théorème

Supposons que $\Delta < 0$. Alors on peut écrire $\lambda_1 = u + iv$ et $\lambda_2 = u - iv$, où u et v sont des réels. Les solutions de (H) sont alors les fonctions définies par :

$$y(t) = e^{ut}(A \cos(vt) + B \sin(vt))$$

où A et B sont des constantes réelles.

Démonstration. L'équation (H) est une équation à coefficients réels, donc *a fortiori* une équation à coefficients complexes. D'après le théorème précédent, nous savons que ses solutions complexes sont les fonctions de la forme

$$\forall t \in \mathbb{R} \quad y(t) = \alpha e^{\lambda_1 t} + \beta e^{\lambda_2 t}$$

où α et β sont des constantes complexes.

Ceci donne :

$$\forall t \in \mathbb{R} \quad y(t) = e^{ut}[(\alpha + \beta) \cos vt + i(\alpha - \beta) \sin vt]$$

On pose

$$\begin{cases} A = \alpha + \beta \\ B = i(\alpha - \beta) \end{cases} \quad \text{ce qui équivaut à} \quad \begin{cases} \alpha = \frac{1}{2}(A - iB) \\ \beta = \frac{1}{2}(A + iB) \end{cases}$$

Ceci donne :

$$\forall t \in \mathbb{R} \quad y(t) = e^{ut}(A \cos vt + B \sin vt)$$

Or la fonction y est réelle : $\forall t \in \mathbb{R} \quad y(t) \in \mathbb{R}$

Pour $t = 0$ et $t = \frac{\pi}{2v}$ on obtient $y(0) = A$ et $y(\frac{\pi}{2v}) = e^{\frac{u\pi}{2v}} B$, donc A et B sont réels.

Le théorème est démontré. □

► **Exercice 4.**

C. Résolution avec second membre

On résout les équations de la forme

$$(E) : \quad ay'' + by' + cy = Ke^{\mu t}$$

où a, b, c, K et μ sont des constantes, K et μ éventuellement complexes.

D'après le principe de superposition il suffit de trouver une solution particulière de (E) pour obtenir toutes ses solutions.

Méthode

On cherche une solution de la forme :

- $y(t) = Le^{\mu t}$ si μ n'est pas racine de l'équation caractéristique
i.e., $\mu \neq \lambda_1, \mu \neq \lambda_2$ ou $\mu \neq \lambda_0$
- $y(t) = Lte^{\mu t}$ si μ est racine simple de l'équation caractéristique
i.e., $\Delta \neq 0$ et $\mu = \lambda_1$ ou $\mu = \lambda_2$
- $y(t) = Lt^2e^{\mu t}$ si μ est racine double de l'équation caractéristique
i.e., $\Delta = 0$ et $\mu = \lambda_0$.

Exemple 4. Résoudre les équations :

$$\begin{aligned}(E_1) \quad y'' - y' - 2y &= e^t \\(E_2) \quad y'' - y' - 2y &= 2 \operatorname{ch} t \\(E_3) \quad y'' - y' - 2y &= 5 - 4t^3\end{aligned}$$

Remarque. Lorsque le second membre est polynomial, on cherche une solution polynomiale.

Méthode : second membre trigonométrique

Supposons que μ soit un complexe. Dans ce cas, si y est solution de :

$$ay'' + by' + cy = Ke^{\mu t}$$

alors $\operatorname{Re}(y)$ et $\operatorname{Im}(y)$ sont solutions respectivement de :

$$ay'' + by' + cy = K \operatorname{Re}(e^{\mu t}) \quad \text{et} \quad ay'' + by' + cy = K \operatorname{Im}(e^{\mu t})$$

En particulier pour résoudre les équations

$$(E_1) \quad ay'' + by' + cy = K \cos \omega t \quad \text{et} \quad (E_2) \quad ay'' + by' + cy = K \sin \omega t$$

il suffit de résoudre l'équation :

$$(E) \quad ay'' + by' + cy = Ke^{i\omega t}$$

Si y est solution de (E) alors $\operatorname{Re}(y)$ est solution de (E_1) et $\operatorname{Im}(y)$ est solution de (E_2) .

Exemple 5. Résolution de l'équation :

$$y'' - y' - 2y = 10 \cos t$$

► **Exercice 5.**

D. Problème de Cauchy

Théorème de Cauchy

Soit t_0 un réel, y_0 et z_0 deux éléments de \mathbb{C} . Alors l'équation

$$ay'' + by' + cy = Ke^{\mu t}$$

admet une unique solution telle que $y(t_0) = y_0$ et $y'(t_0) = z_0$.

Démonstration. Supposons que $\Delta \neq 0$. Alors les solutions sont de la forme :

$$\forall t \in \mathbb{R} \quad y(t) = \alpha e^{\lambda_1 t} + \beta e^{\lambda_2 t} + y_1(t)$$

où α et β sont deux constantes éléments de \mathbb{C} , et y_1 est une solution particulière. Ceci donne :

$$\forall t \in \mathbb{R} \quad y'(t) = \alpha \lambda_1 e^{\lambda_1 t} + \beta \lambda_2 e^{\lambda_2 t} + y_1'(t)$$

Les conditions initiales $y(t_0) = y_0$ et $y'(t_0) = z_0$ équivalent alors au système

$$\begin{cases} e^{\lambda_1 t_0} \alpha + e^{\lambda_2 t_0} \beta = y_0 - y_1(t_0) \\ \lambda_1 e^{\lambda_1 t_0} \alpha + \lambda_2 e^{\lambda_2 t_0} \beta = z_0 - y_1'(t_0) \end{cases}$$

dont les inconnues sont α et β . Il s'agit d'un système de deux équations à deux inconnues. Son déterminant est :

$$D = e^{(\lambda_1 + \lambda_2)t_0} (\lambda_2 - \lambda_1)$$

Comme le discriminant Δ de l'équation caractéristique est supposé non-nul alors les deux racines λ_1 et λ_2 sont distinctes, et donc le déterminant D est non-nul.

Le système admet ainsi une unique solution (α, β) , ce qui montre qu'une unique fonction y est solution de l'équation différentielle munie de ses conditions initiales.

Supposons maintenant que $\Delta = 0$. alors les solutions de l'équation différentielle sont de la forme

$$\forall t \in \mathbb{R} \quad y(t) = (\alpha t + \beta) e^{\lambda_0 t} + y_1(t)$$

où α et β sont deux constantes éléments de \mathbb{C} et y_1 est une solution particulière. Ceci donne :

$$\forall t \in \mathbb{R} \quad y'(t) = (\lambda_0 \alpha t + \lambda_0 \beta + \alpha) e^{\lambda_0 t} + y_1'(t)$$

Les conditions initiales $y(t_0) = y_0$ et $y'(t_0) = z_0$ sont équivalentes au système

$$\begin{cases} t_0 e^{\lambda_0 t_0} \alpha + e^{\lambda_0 t_0} \beta = y_0 - y_1(t_0) \\ (\lambda_0 t_0 + 1) e^{\lambda_0 t_0} \alpha + \lambda_0 e^{\lambda_0 t_0} \beta = z_0 - y_1'(t_0) \end{cases}$$

Le déterminant de ce système est $D = -e^{2\lambda_0 t_0}$, il est non-nul donc ce système a une unique solution (α, β) , *i.e.*, il existe une unique solution y de l'équation différentielle munie de ses conditions initiales. \square

► Exercice 6.