

VII Équations différentielles linéaires

24 octobre 2016

\mathbb{K} désigne \mathbb{R} ou \mathbb{C} .

1. Résultats d'analyse

On se fonde ici sur les notions d'analyse vues en terminale : continuité, dérivabilité, intégrales. Elles seront définies ultérieurement.

1.1. Dérivabilité d'une fonction à valeurs réelles.

Rappel : si une fonction $f : A \rightarrow \mathbb{R}$, avec $A \subset \mathbb{R}$, est dérivable en $a \in A$, alors le graphe de f admet une tangente en a , d'équation $y = (x - a)f'(a) + f(a)$.

Proposition 1.1.1.

Soit f et g deux fonctions réelles définies sur $A \subset \mathbb{R}$, dérivables, soit $\lambda \in \mathbb{R}$.

1. La fonction $f + \lambda \cdot g$ est dérivable sur A et $(f + \lambda \cdot g)' = f' + \lambda \cdot g'$.
2. La fonction fg est dérivable sur A et $(fg)' = f'g + fg'$.

Proposition 1.1.2.

Soit $f : A \rightarrow \mathbb{R}$ et $g : B \rightarrow \mathbb{R}$, avec $A \subset \mathbb{R}$, $B \subset \mathbb{R}$ et $f(A) \subset B$. Si f et g sont dérivables, alors $g \circ f$ est aussi dérivable et $(g \circ f)' = f' \times (g' \circ f)$.

Corollaire 1.1.3.

On retrouve ainsi les résultats usuels

1. Si $f : A \rightarrow \mathbb{R}$ est dérivable et ne s'annule pas, alors $1/f$ est dérivable et $\left(\frac{1}{f}\right)' = -\frac{f'}{f^2}$.
2. Si $f : A \rightarrow \mathbb{R}$ et $g : A \rightarrow \mathbb{R}$ sont dérivables et si g ne s'annule pas, alors f/g est dérivable et $\left(\frac{f}{g}\right)' = \frac{f' \times g - f \times g'}{g^2}$.

Remarque 1.1.4.

On retrouve aussi les formules vues en terminale :

dérivée de la puissance, de l'exponentielle et du logarithme d'une fonction.

1.2. Continuité et dérivabilité d'une fonction à valeurs complexes.

I est toujours un intervalle de \mathbb{R} et $f : I \rightarrow \mathbb{C}$.

Définition 1.2.1.

On appelle *partie réelle* de f la fonction $\operatorname{Re}(f) : I \rightarrow \mathbb{R}$,
 $x \mapsto \operatorname{Re}(f(x))$.

De même on appelle *partie imaginaire* de f la fonction $\operatorname{Im}(f) : I \rightarrow \mathbb{R}$,
 $x \mapsto \operatorname{Im}(f(x))$.

On peut alors décomposer f en $\operatorname{Re}(f) + i \operatorname{Im}(f)$.

Exemple 1.2.2.

$f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{C}$, $x \mapsto (2 + i)e^{(1+i)x}$.

Définition 1.2.3. (i) On dit que f est *continue* (resp. *dérivable*) en a si $\operatorname{Re}(f)$ et $\operatorname{Im}(f)$ le sont. Dans le cas où f est dérivable, on appelle *dérivée* de f en a notée $f'(a)$ le complexe $f'(a) = (\operatorname{Re}(f))'(a) + i(\operatorname{Im}(f))'(a)$.

(ii) On dit que f est *continue* (resp. *dérivable*) sur un intervalle si elle l'est en tout point de cet intervalle.

(iii) On note (notations non officielles) $\mathcal{C}(I, \mathbb{K})$ et $\mathcal{D}(I, \mathbb{K})$ l'ensemble des fonctions respectivement continues et dérivables de I dans \mathbb{K} .

Définition 1.2.4 (Dérivées successives.).

On définit par récurrence les dérivées successives d'une fonction $f : I \rightarrow \mathbb{C}$.

- $f^{(0)} = f$.
- Si f est dérivable, $f^{(1)} = f'$.
- Pour tout entier naturel n , si $f^{(n)}$ est définie et est dérivable, alors on définit $f^{(n+1)} = (f^{(n)})'$.

Remarque 1.2.5.

On notera souvent f'' au lieu de $f^{(2)}$, un peu plus rarement f''' au lieu de $f^{(3)}$. Les physiciens utilisent souvent les notations \dot{f} , \ddot{f} et \dddot{f} pour indiquer des dérivées successives par rapport à la variable temps.

Définition 1.2.6. (i) On note $\mathcal{C}^1(I, \mathbb{K})$ l'ensemble des fonctions continuellement dérivables sur I : $\mathcal{C}^1(I, \mathbb{K}) = \{f \in \mathcal{D}(I, \mathbb{K}) \mid f' \in \mathcal{C}(I, \mathbb{K})\}$.

(ii) Si $n \in \mathbb{N}$, on note $\mathcal{D}^n(I, \mathbb{K})$ l'ensemble des fonctions n fois dérivables sur I : ce sont les fonctions f telles que $f^{(n)}$ est définie. On note aussi $\mathcal{C}^n(I, \mathbb{K})$ l'ensemble des fonctions n fois continuellement dérivables : $\mathcal{C}^n(I, \mathbb{K}) = \{f \in \mathcal{D}^n(I, \mathbb{K}) \mid f^{(n)} \in \mathcal{C}(I, \mathbb{K})\}$.

(iii) On note $\mathcal{C}^\infty(I, \mathbb{K})$ l'intersection $\bigcap_{n \in \mathbb{N}} \mathcal{C}^n(I, \mathbb{K})$.



On ne dérive ici que des fonctions d'une variable réelle.

Remarque 1.2.7.

Si f est dans $\mathcal{C}^n(I, \mathbb{K})$, on dit que f est de *classe* \mathcal{C}^n sur I .

Théorème 1.2.8.

Soit $\varphi \in \mathcal{D}(I, \mathbb{K})$. L'application $x \mapsto e^{\varphi(x)}$ est dérivable sur I de dérivée l'application $x \mapsto \varphi'(x)e^{\varphi(x)}$.

Démonstration.

On dérive $e^{\operatorname{Re}(\varphi)}$ (on obtient $(\operatorname{Re}(\varphi))' \times e^{\operatorname{Re}(\varphi)}$), puis on dérive d'un côté $\operatorname{Re}(e^{\varphi(x)}) = e^{\operatorname{Re}(\varphi)} \cos \operatorname{Im} \varphi$ et $\operatorname{Im}(e^{\varphi(x)}) = e^{\operatorname{Re}(\varphi)} \sin \operatorname{Im} \varphi$ de l'autre. \square

Exemple 1.2.9.

Dériver la fonction de l'exemple 1.2.2.

Remarque 1.2.10.

On a les mêmes formules que dans le cas réel pour la dérivée d'une combinaison linéaire, d'un produit ainsi que d'un quotient de fonctions.

1.3. Rappels d'intégration**Définition 1.3.1.**

Soit $f : I \rightarrow \mathbb{C}$ et $F : I \rightarrow \mathbb{C}$. On dit que F est **UNE primitive** de f si F est dérivable sur I , de dérivée f .

Théorème 1.3.2.

On rappelle que I est un INTERVALLE.

Soit $f : I \rightarrow \mathbb{K}$ dérivable. La fonction f est constante si et seulement si $\forall x \in I, f'(x) = 0$.

Exercice 1.3.3.

Proposer un contre-exemple au théorème précédent dans le cas où I n'est pas un intervalle.

Corollaire 1.3.4.

Toutes les primitives d'une même fonction *sur un intervalle* diffèrent d'une constante, et quand cette constante parcourt \mathbb{K} , on obtient toutes les primitives. Autrement dit, si F est une primitive de f , $\{F + \lambda, \lambda \in \mathbb{K}\}$ est l'ensemble de toutes les primitives de f .

Démonstration.

Soit F et G deux primitives d'une même application sur un intervalle. Alors $F' = G'$, donc $(F - G)'$ est nulle sur cet intervalle, donc $F - G$ est constante sur cet intervalle. Donc toutes les primitives d'une même application diffèrent d'une constante.

Réciproquement, si F est une primitive de f , il est aisé de voir que $F + \lambda$ est une primitive de f pour tout $\lambda \in \mathbb{K}$. \square

Exercice 1.3.5.

Déterminer l'ensemble des primitives de la fonction inverse, définie sur \mathbb{R}^* .

Il convient de connaître toutes les primitives du formulaire.

Exercice 1.3.6.

Soient a, b, c trois réels. Calculer les primitives de

$$x \mapsto \frac{1}{ax^2 + bx + c}.$$

Traiter également le cas $a, b, c \in \mathbb{C}$.

Définition 1.3.7.

Soient $a, b \in I$ et $f \in \mathcal{C}(I, \mathbb{C})$. On appelle *intégrale de f sur $[a, b]$* le complexe $\int_a^b \operatorname{Re}(f)(t) dt + i \int_a^b \operatorname{Im}(f)(t) dt$, noté $\int_a^b f(t) dt$ ou $\int_a^b f$.



L'interprétation en terme d'aire ne veut rien dire pour une fonction à valeurs complexes.

Exemple 1.3.8.

$\int_0^{2\pi} (1+i)e^{ix} dx = 0$. (2 méthodes : en séparant parties réelle et imaginaire, ou en primitivant directement).

Théorème 1.3.9 (Le théorème fondamental de l'analyse).

Soit $f \in \mathcal{C}(I, \mathbb{K})$. Soit $a \in I$.

- (i) La fonction : $\begin{cases} I \rightarrow \mathbb{K} \\ x \mapsto \int_a^x f(t) dt \end{cases}$ est une primitive de f .
- (ii) Soit $A \in \mathbb{K}$. La fonction F : $\begin{cases} I \rightarrow \mathbb{K} \\ x \mapsto A + \int_a^x f(t) dt \end{cases}$ est la seule primitive de f telle que $F(a) = A$.

Remarque 1.3.10.

C'est ce théorème qui assure que « $\int_a^b f(t) dt = F(b) - F(a)$ ».

Exercice 1.3.11.

Soient a et b deux réels. Calculer les primitives de $x \mapsto e^{ax} \cos(bx)$ et celles de $x \mapsto e^{ax} \sin(bx)$.

1.4. Méthodes de calcul**a. Intégration par parties****Théorème 1.4.1.**

Soient $u, v \in \mathcal{C}^1(I, \mathbb{R})$ et $a, b \in I$. Alors $\int_a^b u'v = [uv]_a^b - \int_a^b uv'$.

Démonstration.

Puisque u, v sont de classe \mathcal{C}^1 , $u'v + uv'$ est continue, donc admet une primitive F sur I . Or uv est une primitive de $u'v + uv'$, et on finit avec le théorème fondamental. \square

Exemple 1.4.2.

Les grands classiques :

- Trouver une primitive de \ln . Idem avec Arctan .
- Trouver une primitive du produit d'un polynôme et d'une exponentielle : par exemple $(x^2 + 1)e^x$.
- Trouver une primitive du produit d'une fonction trigonométrique et d'une exponentielle : par exemple $\cos(x)e^{2x}$.
- Trouver une primitive du produit d'un polynôme et d'une fonction trigonométrique : par exemple $x^2 \cos x$.

b. Changement de variable**Théorème 1.4.3.**

Soit $\varphi \in \mathcal{C}^1(I, \mathbb{R})$ et $f \in \mathcal{C}^0(J, \mathbb{R})$, où J est un intervalle de \mathbb{R} .

On suppose que $\varphi(I) \subset J$. Soient $a, b \in I$.

Alors $\int_{\varphi(a)}^{\varphi(b)} f(t) dt = \int_a^b \varphi'(t) \cdot (f \circ \varphi)(t) dt$.

Remarque 1.4.4.

Moyen mnémotechnique : on écrit " $x = \varphi(t)$ " (**au brouillon seulement** !). Alors $dx = \varphi'(t) dt$, donc $\int f(x) dx = \int f(\varphi(t)) \varphi'(t) dt$. Reste le problème des bornes. Quand t va de a à b , $x = \varphi(t)$ va de $\varphi(a)$ à $\varphi(b)$. Et voilà ...

Démonstration.

$\varphi \in \mathcal{C}^1$, $f \in \mathcal{C}^0$, donc $\varphi' \cdot f \circ \varphi \in \mathcal{C}^0$, donc f admet une primitive F , et $\varphi' \cdot f \circ \varphi$ admet $F \circ \varphi$ comme primitive.

On déduit alors le résultat du théorème fondamental :

$$\begin{aligned} \int_{\varphi(a)}^{\varphi(b)} f(t) dt &= [F]_{\varphi(a)}^{\varphi(b)} = F(\varphi(b)) - F(\varphi(a)) \\ &= [F \circ \varphi]_a^b = \int_a^b f(\varphi(t)) \varphi'(t) dt \end{aligned}$$

□

Remarque 1.4.5.

Les seuls changements de variables que l'on se permettra de ne pas justifier sont ceux affines (on les signalera quand même !).

Exemple 1.4.6.

Calculons l'aire de l'ellipse d'équation $\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1$. Le quart supérieur droit de cette ellipse peut être paramétré par $\left(x, b\sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2}}\right)$, x allant de 0 à a .

On calcule donc $I = \int_0^a b\sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2}} dx$.
On effectue le changement de variable $x = a \cos \theta$ et on obtient : $I = -ab \int_{\pi/2}^0 \sin^2 \theta d\theta = ab \int_0^{\pi/2} \frac{1 - \cos(2\theta)}{2} d\theta = \frac{1}{4}\pi ab - \frac{ab}{2} \left[\frac{1}{2} \sin(2\theta)\right]_0^{\pi/2} = \frac{1}{4}\pi ab$.

L'aire de l'ellipse est donc πab .

Proposition 1.4.7.

Soit $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ une application continue.

1. Si f est paire et $a \in \mathbb{R}$ alors $\int_{-a}^a f(t) dt = 2 \int_0^a f(t) dt = 2 \int_0^a f(t) dt$.
2. Si f est impaire et $a \in \mathbb{R}$ alors $\int_{-a}^a f(t) dt = 0$ et $\int_{-a}^0 f(t) dt = - \int_0^a f(t) dt$.
3. Si f est T -périodique ($T > 0$) et $a \in \mathbb{R}$ alors $\int_0^T f(t) dt = \int_a^{a+T} f(t) dt$.

Démonstration. 1. On considère $\int_0^a f(t) dt$ et on pose $x = -t$.

$$\begin{aligned} \text{Donc } \int_0^a f(t) dt &= \int_0^{-a} -f(-x) dx = \\ &= - \int_0^{-a} f(x) dx = \int_{-a}^0 f(x) dx. \end{aligned}$$

2. Comme le point précédent avec $\int_0^a f(t) dt =$

$$\int_0^{-a} -f(-x) dx = \int_0^{-a} f(x) dx = - \int_{-a}^0 f(x) dx.$$

3. On peut commencer à regarder à partir d'un dessin, dans le cas où $-T < a < 0$.

On a :

$$\int_a^{a+T} f(t) dt = \int_a^0 f(t) dt + \int_0^{a+T} f(t) dt$$

Or par changement de variable $x = t + T$, on obtient

$$\int_a^0 f(t) dt = \int_{a+T}^T f(x) dx.$$

On en déduit que

$$\int_a^{a+T} f(t) dt = \int_{a+T}^T f(t) dt + \int_0^{a+T} f(t) dt = \int_0^T f(t) dt$$

On peut remarquer que l'hypothèse $-T < a < 0$ qui a nourri notre intuition ne joue en fait aucun rôle : elle n'est utilisée nulle part dans la démonstration.

Nous avons donc le résultat attendu. □

2. Généralités

2.1. Cadre

- On s'intéressera à des équations différentielles dont les solutions sont à valeurs dans \mathbb{K} , avec $\mathbb{K} = \mathbb{R}$ ou $\mathbb{K} = \mathbb{C}$.
- On considérera I un intervalle ouvert de \mathbb{R} .
- On s'intéressera uniquement à des équations différentielles *linéaires*.

Définition 2.1.1 (Équation différentielle linéaire).

Soit n un entier naturel non nul, et a_0, \dots, a_{n-1} et b des applications continues de I dans \mathbb{K} , alors

- On appelle *équation différentielle linéaire d'ordre n* l'équation

$$\begin{aligned} y^{(n)} + a_{n-1}(t)y^{(n-1)} + \dots \\ + a_1(t)y' + a_0(t)y = b(t) \quad (\mathcal{E}) \end{aligned}$$

- Une *solution* de cette équation est une application $f : I \rightarrow \mathbb{K}$ n fois dérivable sur I vérifiant

$$\begin{aligned} \forall t \in I \quad f^{(n)}(t) + a_{n-1}(t)f^{(n-1)}(t) \\ + \dots + a_1(t)f'(t) + a_0(t)f(t) = b(t) \end{aligned}$$

- L'équation (\mathcal{E}) est dite *homogène* si $b = 0_{\mathbb{K}I}$
- L'équation homogène associée à (\mathcal{E}) est

$$y^{(n)} + a_{n-1}(t)y^{(n-1)} + \dots + a_1(t)y' + a_0(t)y = 0 \quad (\mathcal{H})$$

Remarque 2.1.2.

Nous ne nous intéresserons pas dans le reste de ce chapitre au cas plus général d'une équation

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

où on a également affecté $y^{(n)}$ d'un coefficient $a_n(t)$.

En effet :

- Si a_n ne s'annule pas, il suffit de diviser cette équation par $a_n(t)$ pour se ramener au cas étudié ici.
- Si a_n s'annule, il est difficile de donner des résultats généraux. En pratique, si on rencontre une telle équation où a_n s'annule, on cherchera en général les solutions sur les intervalles où a_n ne s'annule pas et on regardera au cas par cas comment recoller les solutions aux points où a_n s'annule.

Définition 2.1.3 (Problème de Cauchy).

Soit

- $t_0 \in I$
- y_0, \dots, y_{n-1} des éléments de \mathbb{K}

La recherche des solutions f de (\mathcal{E}) vérifiant les *conditions initiales* suivantes :

$$\begin{aligned} f(t_0) &= y_0 \\ \text{et } f'(t_0) &= y_1 \\ &\dots \\ \text{et } f^{(n-1)}(t_0) &= y_{n-1} \end{aligned}$$

est appelé *problème de Cauchy linéaire d'ordre n*

Exemple 2.1.4.

En physique les déplacements d'un mobile sont régis par l'équation de la dynamique reliant la dérivée seconde de la position et les forces qui s'appliquent au mobile, qui dépendent en général de sa position et ou de sa vitesse. Il s'agit donc d'une équation différentielle d'ordre 2.¹ Il est raisonnable de penser que le problème de Cauchy a alors une unique solution : une position initiale et une vitesse initiale étant données, une seule trajectoire est possible.

2.2. Structure de l'ensemble des solutions**Proposition 2.2.1.**

Soit

- $n \in \mathbb{N}$
- (\mathcal{E}) une équation différentielle linéaire d'ordre n , d'ensemble de solutions $S_{\mathcal{E}}$
- (\mathcal{H}) l'équation homogène associée, d'ensemble de solutions $S_{\mathcal{H}}$

Alors

1. $S_{\mathcal{E}} \subset \mathcal{C}^n(I, \mathbb{K})$
2. $S_{\mathcal{H}}$ est non vide et est stable par combinaisons linéaires.
3. Pour tout $y_0 \in S_{\mathcal{E}}$ fixé, on a

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

4. En particulier, $S_{\mathcal{E}}$ est l'ensemble vide ou un singleton ou un ensemble infini.

Démonstration.

Sous les hypothèses de l'énoncé :

1. Toute solution f est nécessairement n fois dérivable et pour tout $t \in I$,

$$\begin{aligned} f^{(n)}(t) &= b(t) - a_{n-1}(t)f^{(n-1)}(t) - \dots \\ &\quad - a_1(t)f'(t) - a_0(t)f(t) \end{aligned}$$

Or $b, a_{n-1}, f^{(n-1)}, \dots, a_0, f$ sont des applications continues. Donc $f^{(n)}$ est continue, donc $f \in \mathcal{C}^n(I, \mathbb{K})$.

2. L'application nulle est une solution triviale de $S_{\mathcal{H}}$, donc $S_{\mathcal{H}}$ est non vide.

1. En général linéaire dans les problèmes de prépa mais dans la vraie vie c'est parfois plus compliqué.

Pour toute application f n fois dérivable et tout $t \in I$, notons $\psi_f(t)$ le scalaire

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

On a alors $f \in S_{\mathcal{H}} \iff \forall t \in I \quad \psi_f(t) = 0$ (ou, de façon plus concise : $f \in S_{\mathcal{H}} \iff \psi_f = 0_{\mathbb{K}I}$).

Soit alors f et g deux applications n fois dérivables de I dans \mathbb{K} et λ et μ deux éléments de \mathbb{K} . Alors $\lambda f + \mu g$ est évidemment n fois dérivable. Et pour tout $t \in I$, on a $\psi_{\lambda f + \mu g}(t) = \lambda \psi_f(t) + \mu \psi_g(t)$ (autrement dit $\psi_{\lambda f + \mu g} = \lambda \psi_f + \mu \psi_g$).

En particulier, si f et g sont solutions de l'équation homogène, on a $\psi_f = 0$ et $\psi_g = 0$, donc $\psi_{\lambda f + \mu g} = 0$ donc $\lambda f + \mu g \in S_{\mathcal{H}}$.

3. Soit $y_0 \in S_{\mathcal{E}}$ fixé. On a donc, pour tout $t \in I$, $\psi_{y_0}(t) = b(t)$

Soit alors $f : I \rightarrow \mathbb{K}$ une application n fois dérivable. On a

$$\begin{aligned} f \in S_{\mathcal{E}} &\iff \psi_f = b \\ &\iff \psi_f = \psi_{y_0} \\ &\iff \psi_{f-y_0} = 0 \\ &\iff f - y_0 \in S_{\mathcal{H}} \end{aligned}$$

Donc pour tout $f \in S_{\mathcal{E}}$, f s'écrit sous la forme $y_0 + y$ où $y \in S_{\mathcal{H}}$. Donc $S_{\mathcal{E}} \subset \{y_0 + y \mid y \in S_{\mathcal{H}}\}$.

Réciproquement, pour tout $y \in S_{\mathcal{H}}$, l'application f définie par $f = y_0 + y$ est n fois dérivable et $f - y_0 \in S_{\mathcal{H}}$, donc $f \in S_{\mathcal{E}}$. Donc $\{y_0 + y \mid y \in S_{\mathcal{H}}\} \subset S_{\mathcal{E}}$.

On a donc bien $S_{\mathcal{E}} = \{y_0 + y \mid y \in S_{\mathcal{H}}\}$.

4. On sait que $S_{\mathcal{H}}$ n'est pas vide puisqu'il contient au moins l'application nulle. Supposons qu'il contienne au moins une autre application f . Alors pour tout $\lambda \in \mathbb{K}$, λf appartient également à $S_{\mathcal{H}}$. Donc ou bien $S_{\mathcal{H}}$ est réduit à un élément, ou bien il est infini.

D'après le point précédent, si $S_{\mathcal{E}}$ possède au moins un élément y_0 , on a $S_{\mathcal{E}} = \{y_0 + y \mid y \in S_{\mathcal{H}}\}$. Donc $y \mapsto y_0 + y$ est une bijection de $S_{\mathcal{H}}$ sur $S_{\mathcal{E}}$, donc $S_{\mathcal{E}}$ est ou bien réduit à un élément (y_0) ou bien est infini.

Donc ou bien $S_{\mathcal{E}}$ est vide, ou il est réduit à un élément, ou il est infini. \square

Remarque 2.2.2.

Nous retrouvons ici le même type de structure de l'ensemble des solutions que dans le cas des systèmes linéaires. Ce n'est pas une coïncidence : un même type de structure algébrique se cache derrière (les espaces vectoriels et affines) !

Théorème 2.2.3 (Principe de superposition).

Soit n un entier, $a_0, \dots, a_{n-1}, b_1, b_2$ des applications continues de I dans \mathbb{K} et $(\lambda_1, \lambda_2) \in \mathbb{K}^2$. Notons a_n la fonction constante égale à 1. On considère les équations

$$\sum_{i=0}^n a_i y^{(i)} = b_1 \quad (\mathcal{E}_1)$$

$$\sum_{i=0}^n a_i y^{(i)} = b_2 \quad (\mathcal{E}_2)$$

$$\sum_{i=0}^n a_i y^{(i)} = \lambda_1 b_1 + \lambda_2 b_2 \quad (\mathcal{E})$$

Alors pour toute solution y_1 de \mathcal{E}_1 et toute solution y_2 de \mathcal{E}_2 , $\lambda_1 y_1 + \lambda_2 y_2$ est une solution de \mathcal{E} .

Démonstration.

On reprend les notations de la démonstration de la proposition 2.2.1. Soit y_1 et y_2 des solutions respectives de \mathcal{E}_1 et \mathcal{E}_2 . On a $\psi_{y_1} = b_1$ et $\psi_{y_2} = b_2$. Or $\psi_{\lambda_1 y_1 + \lambda_2 y_2} = \lambda_1 \psi_{y_1} + \lambda_2 \psi_{y_2}$. Donc $\psi_{\lambda_1 y_1 + \lambda_2 y_2} = \lambda_1 b_1 + \lambda_2 b_2$. \square

Théorème 2.2.4 (Solutions du problème de Cauchy linéaire).

Soit n un entier naturel et \mathcal{E} une équation différentielle linéaire d'ordre n . Alors, pour tout choix des conditions initiales, le problème de Cauchy linéaire d'ordre n admet une unique solution.

Remarque 2.2.5.

Ce théorème est hors-programme dans le cas général. Sa démonstration dans le cas général requiert en effet des outils d'analyse que nous n'avons pas encore à notre disposition.

En revanche, dans les cas $n = 1$ et $n = 2$, le résultat est au programme et sera démontré.

3. Équations linéaires du premier ordre

3.1. Résolution de l'équation homogène

Théorème 3.1.1.

Soit A une primitive de a sur I . Soit $a \in \mathcal{C}^0(I, \mathbb{K})$. Alors, l'ensemble des solutions de l'équation homogène $y' + ay = 0$ est

$$S_{\mathcal{H}} = \left\{ \begin{array}{l} I \rightarrow \mathbb{K} \\ t \mapsto Ke^{-A(t)} \end{array} \mid K \in \mathbb{K} \right\}.$$

Si de plus une condition initiale est fixée, alors la solution est unique. En particulier si y s'annule en un point, elle est identiquement nulle.

Démonstration.

Toute fonction de la forme $t \mapsto Ke^{-A(t)}$ est une solution (c'est évident, il n'y a qu'à dériver).

Réciproquement, soit y une solution. On pose $z(t) = y(t)e^{A(t)}$ pour $t \in I$. z est dérivable sur I et pour tout t , $z'(t) = y'(t)e^{A(t)} + y(t)A'(t)e^{A(t)} = (y'(t) + a(t)y(t))e^{A(t)} = 0$, donc z est une constante K .

Une condition initiale $y(t_0) = y_0$ étant donnée, elle est vérifiée si et seulement si $Ke^{-A(t_0)} = y_0$, c'est-à-dire si et seulement si $K = y_0e^{A(t_0)}$. Il y a alors une et une seule solution : $t \mapsto y_0e^{A(t_0)-A(t)}$. \square

Remarque 3.1.2.

On dit que l'ensemble des solutions a une structure de droite vectorielle, de vecteur directeur $t \mapsto e^{-A(t)}$.

Exercice 3.1.3.

Déterminer les intervalles de résolution puis résoudre les équations différentielles suivantes.

1. $y' + y = 0$
2. $y' + \frac{1}{\sqrt{1-x^2}}y = 0$ avec $y(1/2) = 1$.

Corollaire 3.1.4.

Une solution qui s'annule en un point ne peut être que la fonction nulle.

Démonstration.

En effet elle est solution d'un problème de Cauchy de la forme $y(t_0) = 0$. Or il existe une unique solution à ce problème et la fonction nulle est manifestement solution. \square

3.2. Résolution d'une équation avec second membre

Remarque 3.2.1.

On a déjà vu que si l'on connaissait une solution \tilde{y} de l'équation avec second membre, alors on pouvait construire toutes les solutions de l'équation avec second membre à partir de l'ensemble des solutions de l'équation homogène.

Dans le cas d'une équation d'ordre un, on dit que l'ensemble des solutions a une structure de droite affine, car l'ensemble des solutions est l'ensemble des $\tilde{y} + y$ pour y parcourant une droite vectorielle.

Théorème 3.2.2.

Soit a et b deux applications continues de I dans \mathbb{C} , et A une primitive de a .

Alors le problème de Cauchy $y' + ay = b$ et $y(t_0) = y_0$ admet une unique solution :

$$\left\{ \begin{array}{l} I \rightarrow \mathbb{K} \\ t \mapsto e^{A(t_0)-A(t)}y_0 + e^{-A(t)} \int_{t_0}^t e^{A(u)}b(u) du \end{array} \right.$$

Remarque 3.2.3.

L'unicité est aisée à démontrer : si on dispose de deux solutions de ce problème, leur différence est une solution de l'équation homogène du problème s'annulant en t_0 , c'est donc l'application nulle.

On peut également assez directement montrer que l'application donnée est solution par calcul.

Nous donnons cependant ci-dessous une autre démonstration qui a l'avantage de permettre de retrouver la formule. Cette méthode est à connaître et s'appelle la *méthode de la variation de la constante*.

Démonstration.

Notons \mathcal{E} l'équation $y' + ay = b$, \mathcal{H} l'équation homogène associée, $S_{\mathcal{E}}$ et $S_{\mathcal{H}}$ les ensembles de solutions respectifs de ces deux équations et S l'ensemble des solutions du problème de Cauchy $y' + ay = b$ et $y(t_0) = y_0$.

On sait que $y_{\mathcal{H}} : t \mapsto e^{-A(t)}$ est une solution de \mathcal{H} .

Soit $y : I \rightarrow \mathbb{K}$ une application dérivable.

$y_{\mathcal{H}}$ étant dérivable et ne s'annulant pas, y peut s'écrire sous la forme $C \times y_{\mathcal{H}}$ où $C : I \rightarrow \mathbb{K}$ est une application dérivable.

Soit alors $t \in I$. On a

$$\begin{aligned} y' + ay &= C'y_{\mathcal{H}} + Cy'_{\mathcal{H}} + aCy_{\mathcal{H}} \\ &= C'y_{\mathcal{H}} + C(y'_{\mathcal{H}} + ay_{\mathcal{H}}) \end{aligned}$$

Or $y_{\mathcal{H}}$ est solution de \mathcal{H} , donc $y'_{\mathcal{H}} + ay_{\mathcal{H}} = 0$. Donc y est solution de \mathcal{E} si et seulement si $C'y_{\mathcal{H}} = b$, c'est-à-dire si et seulement si C' est l'application $t \mapsto e^{A(t)}b(t)$, c'est-à-dire si et seulement si C est une primitive de $t \mapsto e^{A(t)}b(t)$.

Par ailleurs, on a $y(t_0) = C(t_0)e^{-A(t_0)}$, donc $y(t_0) = y_0$ si et seulement si $C(t_0) = y_0e^{A(t_0)}$.

Donc y est solution du problème de Cauchy si et seulement si C est la primitive de $t \mapsto e^{A(t)}b(t)$ valant $y_0e^{A(t_0)}$ en t_0 , c'est-à-dire si et seulement si C est l'application

$$t \mapsto e^{A(t_0)}y_0 + \int_{t_0}^t e^{A(u)}b(u) du$$

C'est-à-dire si et seulement si y est l'application

$$t \mapsto e^{A(t_0)-A(t)}y_0 + e^{-A(t)} \int_{t_0}^t e^{A(u)}b(u) du$$

□

3.3. Résolution pratique

a. Schéma de résolution (à connaître !)

On effectuera *toujours* les actions suivantes, dans l'ordre.

1. Déterminer I .
2. Résoudre (E_H) .
3. Trouver une solution dite particulière (solution évidente, second membre d'une forme particulière ou méthode de variation de la constante).
4. S'occuper éventuellement des conditions initiales.
5. Donner les solutions.

Remarque 3.3.1.

On ne vous demande jamais que de trouver *une* solution particulière : faites le plus simplement possible ! Si vous ne voyez pas de solution évidente, la méthode de la variation de la constante est assez efficace et vous permet de retrouver la formule générale (une erreur est vite arrivée !). Il est permis de chercher une solution particulière au brouillon puis de l'exhiber sur sa copie, en justifiant qu'elle vérifie bien les conditions imposées.

Exemple 3.3.2.

On résout l'équation $y' + y = e^{2x}$ sur \mathbb{R} . Ses solutions sont les $x \mapsto \frac{1}{3}e^{2x} + Ke^{-x}$, avec $K \in \mathbb{K}$.

b. Seconds membres particuliers

On considère l'équation $y' + ay = b$, dans le cas où a est **une constante**. Si b est d'une des formes suivantes, alors la méthode de la variation de la constante (ainsi que certains arguments que nous développerons un peu plus tard) nous indique qu'il est possible à chaque fois de chercher une solution particulière sous une forme assez simple.

Polynôme - exponentielle Si $b : x \mapsto P(x)e^{\alpha x}$, où P est un polynôme de degré n , on cherche une solution particulière de la forme $Q(t)e^{\alpha t}$ avec Q de degré n si $\alpha \neq -a$, $n+1$ sinon.

Polynôme - fonction trigonométrique Si $b : x \mapsto P(x)\cos(\alpha x)$ (ou $P(x)\sin(\alpha x)$) et si $\mathbb{K} = \mathbb{R}$, on résout d'abord l'équation $y' + ay = P(t)e^{iat}$ avec la méthode du point précédent (Q sera alors à coefficients complexes), et on prend les parties réelles et imaginaires (explications).

Polynôme - fonction hyperbolique Si $b : x \mapsto P(x)\operatorname{ch}(\alpha x)$ (ou $P(x)\operatorname{sh}(\alpha x)$) et si $\mathbb{K} = \mathbb{R}$, on résout d'abord l'équation $y' + ay = P(t)e^{\alpha t}$ avec la méthode du premier point, on obtient une solution y_+ . On résout ensuite l'équation $y' + ay = P(t)e^{-\alpha t}$ avec la méthode du premier point, on obtient alors une solution y_- . Par superposition, on prend $\frac{y_+ + y_-}{2}$ pour ch et $\frac{y_+ - y_-}{2}$ pour sh .

On remarquera qu'il est souvent tout aussi rapide de procéder par variation de la constante ...

Exemple 3.3.3.

Trouver une solution particulière pour $y' + y = e^t$, pour $y' + y = \sin(t)$ et pour $y' + y = \operatorname{ch}(t)$.

Exemple 3.3.4.

Résoudre $y' + 2y = \operatorname{ch} t - (1+t)e^{-2t}$. On trouve $t \mapsto \frac{1}{6}e^t + \frac{1}{2}e^{-t} - (\frac{1}{2}t^2 + t + K)e^{-2t}$.

4. Équations différentielles du second ordre à coefficients constants

4.1. Définitions

Une équation différentielle linéaire du second ordre est une équation de la forme $y'' + \alpha y' + \beta y = d$ où α , β et f sont des applications continues, d'inconnue $y : I \rightarrow \mathbb{K}$ deux fois dérivable sur I .

Dans la suite de ce chapitre, on ne s'intéressera qu'au cas où α et β sont des constantes. Plus généralement, on s'intéressera aux équations de la forme $ay'' + by' + cy = d$, où a , b , c sont des constantes de \mathbb{K} avec $a \neq 0$ et $d \in \mathcal{C}(I, \mathbb{K})$, d'inconnue $y : I \rightarrow \mathbb{K}$ deux fois dérivable sur I . d est appelé le *second membre* de cette équation. On dit qu'elle est homogène si son second membre est nul. On appelle *équation homogène* associée à $ay'' + by' + cy = d$ l'équation $ay'' + by' + cy = 0$.

4.2. Résolution d'une équation homogène

On considère ici l'équation homogène $ay'' + by' + cy = 0$.

Théorème 4.2.1.

On appelle *polynôme caractéristique* de cette équation le polynôme $aX^2 + bX + c$. On note Δ son discriminant. On distingue deux grands cas, suivant que l'on veut les solutions complexes ou réelles de l'équation.

Solutions complexes : a , b , c sont des complexes et on cherche les solutions à valeurs complexes.

- (i) Si $\Delta \neq 0$ alors les solutions sont les applications de la forme

$$\begin{cases} I \rightarrow \mathbb{C} \\ t \mapsto \lambda e^{r_1 t} + \mu e^{r_2 t} \end{cases}$$

pour $(\lambda, \mu) \in \mathbb{C}^2$, où r_1 et r_2 sont les racines du polynôme caractéristique.

- (ii) Si $\Delta = 0$ alors les solutions sont les applications de la forme

$$\begin{cases} I \rightarrow \mathbb{C} \\ t \mapsto (\lambda t + \mu)e^{rt} \end{cases}$$

pour $(\lambda, \mu) \in \mathbb{C}^2$, où r est la racine (double) du polynôme caractéristique.

Solutions réelles : a , b et c sont des réels et on cherche les solutions à valeurs réelles.

- (i) Si $\Delta > 0$ alors les solutions sont les applications de la forme

$$\begin{cases} I \rightarrow \mathbb{R} \\ t \mapsto \lambda e^{r_1 t} + \mu e^{r_2 t} \end{cases}$$

pour $(\lambda, \mu) \in \mathbb{R}^2$, où r_1 et r_2 sont les racines (réelles) du polynôme caractéristique.

- (ii) Si $\Delta = 0$ alors les solutions sont les applications de la forme

$$\begin{cases} I \rightarrow \mathbb{R} \\ t \mapsto (\lambda t + \mu)e^{rt} \end{cases}$$

pour $(\lambda, \mu) \in \mathbb{R}^2$, où r est la racine (double réelle) du polynôme caractéristique.

- (iii) Si $\Delta < 0$ alors les deux racines du polynôme caractéristique sont des complexes conjugués de la forme $r + i\omega$ et $r - i\omega$ où $r \in \mathbb{R}$ et $\omega \in \mathbb{R}_+^*$. Alors les solutions de l'équation différentielle sont les applications de la forme

$$\begin{cases} I \rightarrow \mathbb{R} \\ t \mapsto (\lambda \cos(\omega t) + \mu \sin(\omega t))e^{rt} \end{cases}$$

pour $(\lambda, \mu) \in \mathbb{R}^2$. Ce sont aussi les applications de la forme

$$\begin{cases} I \rightarrow \mathbb{R} \\ t \mapsto A \cos(\omega t + \varphi)e^{rt} \end{cases}$$

où $A \in \mathbb{R}^+$ et $\varphi \in]-\pi, \pi]$.

De plus, si une condition initiale est imposée, les constantes sont fixées de manière unique.

Remarque 4.2.2.

Dans tous les cas, les solutions sont les combinaisons linéaires de deux solutions linéairement indépendantes. On dit que cet ensemble a une structure de plan vectoriel.

Démonstration.

On note (E_H) l'équation homogène et S_H son ensemble de solutions.

Solutions complexes Soit r une racine du polynôme caractéristique. Alors $y : t \mapsto e^{rt}$ est solution de (E_H) car pour tout $t \in I$, $ay''(t) + by'(t) + cy(t) = (ar^2 + br + c)e^{rt}$.

On sait que les racines du polynôme caractéristique sont les $(-b \pm \delta)/(2a)$ pour δ racine carrée de Δ . Donc elles sont distinctes de $-b/(2a)$ si et seulement si $\Delta \neq 0$.

Cherchons les solutions grâce à la méthode de la variation de la constante. Soit $f : I \rightarrow \mathbb{C}$. On écrit f sous la forme $f(t) = K(t)e^{rt}$ où $K : I \rightarrow \mathbb{C}$ est une application deux fois dérivable.

On calcule $f' = K'e^{rt} + Kre^{rt}$ et $f'' = (K'' + 2K'r + Kr^2)e^{rt}$. Alors f est solution si et seulement si $a(K'' + 2K'r + Kr^2) + b(K' + Kr) + cK = 0$ si et seulement si $a(K'' + 2K'r) + bK' = 0$ car $K(ar^2 + br + c) = 0$ si et seulement si $aK'' + K'(2ar + b) = 0$ si et seulement si $K'' + K'(2r + b/a) = 0$. Distinguons deux cas :

$\Delta \neq 0$ ie $r \neq -b/(2a)$: Alors $-2r - b/a \neq 0$, donc K' est de la forme $t \mapsto k_1 e^{(-2r-b/a)t}$. Donc K est de la forme $t \mapsto k_2 e^{(-2r-b/a)t} + k_3$, donc pour tout $t \in I$, on a $f(t) = k_2 e^{(-r-b/a)t} + k_3 e^{rt} = k_2 e^{rt} + k_3 e^{rt}$. Donc f est de la forme voulue, et réciproquement, toute fonction de cette forme est solution.

$\Delta = 0$: Alors $r = -b/(2a)$, donc $(2r + b/a) = 0$. Donc K est de la forme $t \mapsto kt + k_1$, donc f est de la forme $t \mapsto (kt + k_1)e^{rt}$. Réciproquement, toute application de cette forme est solution. On sait en effet que $t \mapsto e^{rt}$ est solution, il suffit donc de vérifier que $t \mapsto te^{rt}$ est également solution. Pour cela, posons $f : t \mapsto te^{rt}$. Soit $t \in I$. Alors $af''(t) + bf'(t) + cf(t) = (ar^2t + 2ar + brt + b + ct)e^{rt} = (ar^2 + br + c)te^{rt} + (2ar + b)e^{rt} = 0$.

Solutions réelles Les cas $\Delta > 0$ et $\Delta = 0$ se traitent exactement comme dans le cas complexe. Étudions le cas $\Delta < 0$.

Remarquons tout d'abord que pour tout $A \in \mathbb{R}^+$, tout $\varphi \in]-\pi, \pi]$ et tout $t \in I$, on a

$$\begin{aligned} & A \cos(\omega t + \varphi) e^{rt} \\ &= A \cos \varphi \cos(\omega t) e^{rt} - A \sin \varphi \sin(\omega t) e^{rt} \end{aligned}$$

Donc $s : t \mapsto A \cos(\omega t + \varphi) e^{rt}$ s'exprime comme combinaison linéaire à coefficients réels de $s_1 : t \mapsto e^{rt} \cos(\omega t)$ et $s_2 : t \mapsto e^{rt} \sin(\omega t)$.

Réciproquement, si $(\lambda, \mu) \in \mathbb{R}^2$, avec $(\lambda, \mu) \neq (0, 0)$, posons $A = \sqrt{\lambda^2 + \mu^2}$ et $\varphi \in]-\pi, \pi]$ tel que $\cos \varphi = \frac{\lambda}{\sqrt{\lambda^2 + \mu^2}}$ et $\sin \varphi = -\frac{\mu}{\sqrt{\lambda^2 + \mu^2}}$. Alors,

$$\begin{aligned} & \lambda \cos(\omega t) + \mu \sin(\omega t) \\ &= \sqrt{\lambda^2 + \mu^2} \left(\frac{\lambda}{\sqrt{\lambda^2 + \mu^2}} \cos(\omega t) + \frac{\mu}{\sqrt{\lambda^2 + \mu^2}} \sin(\omega t) \right) \\ &= A(\cos(\omega t) \cos(\varphi) + \sin(\omega t) \sin(\varphi)) \\ &= A \cos(\omega t + \varphi). \end{aligned}$$

Ainsi, $t \mapsto (\lambda \cos(\omega t) + \mu \sin(\omega t))e^{rt}$ est bien de la forme $t \mapsto A \cos(\omega t + \varphi) e^{rt}$.

Les deux formes de solutions données dans l'énoncé sont donc équivalentes.

Il suffit maintenant de vérifier que s_1 et s_2 sont des solutions à valeurs réelles pour vérifier que s l'est également.

Or d'après ce qui précède, $c_1 : t \mapsto e^{(r+i\omega)t}$ et $c_2 : t \mapsto e^{(r-i\omega)t}$ sont des solutions à valeurs complexes de l'équation et toute combinaison linéaire de ces solutions est une solution et s_1 et s_2 sont des combinaisons linéaires de c_1 et c_2 (en effet $s_1 = (c_1 + c_2)/2$ et $s_2 = (c_1 - c_2)/(2i)$).

Donc s_1 et s_2 sont des solutions à valeurs complexes de l'équation. Or s_1 et s_2 sont évidemment à valeurs réelles donc ce sont des solutions à valeurs réelles de l'équation et toutes leurs combinaisons linéaires (à coefficients réels) le sont également, et s également.

Réciproquement il suffit de montrer que toutes les solutions s'expriment sous la forme $t \mapsto \alpha \cos(\omega t + \varphi) e^{rt}$, où $\alpha \in \mathbb{R}^+$ et $\varphi \in]-\pi, \pi]$ pour conclure.

Soit f une solution à valeurs réelles. Alors, comme c'est aussi une solution à valeurs complexes, elle s'écrit sous la forme

$$t \mapsto \lambda e^{(r+i\omega)t} + \mu e^{(r-i\omega)t}$$

où λ et μ sont des complexes.

Or $f(0)$ est réel donc $\lambda + \mu \in \mathbb{R}$, donc $\text{Im}(\lambda) = -\text{Im}(\mu)$. De même $f(\pi/(2\omega)) \in \mathbb{R}$, donc $\lambda i e^r - \mu i e^{-r} \in \mathbb{R}$, donc $\text{Re}(\lambda) = \text{Re}(\mu)$. Donc $\mu = \bar{\lambda}$. Notons λ sous la forme $\rho e^{i\varphi}$, où $\rho \in \mathbb{R}^+$ et $\varphi \in]-\pi, \pi]$.

On a alors, pour tout $t \in I$

$$\begin{aligned} f(t) &= \rho e^{rt} e^{i\omega t + i\varphi} + \rho e^{rt} e^{-i\omega t - i\varphi} \\ &= 2\rho \cos(\omega t + \varphi) e^{rt} \end{aligned}$$

Donc f s'écrit bien sous la forme cherchée. □

Exemple 4.2.3. 1. Solutions complexes et

réelles de $y'' + y' + 2y = 0$. On trouve

$$t \mapsto \lambda e^{\frac{-1-i\sqrt{7}}{2}t} + \mu e^{\frac{-1+i\sqrt{7}}{2}t}$$

$$= e^{-\frac{1}{2}t} \left(\lambda e^{\frac{-i\sqrt{7}}{2}t} + \mu e^{\frac{i\sqrt{7}}{2}t} \right)$$

2. $y'' + 2y' + y = 0$, avec $y(1) = 1$, $y'(1) = 0$
alors $\lambda = e$, $\mu = 0$.

Théorème 4.2.4.

Le problème de Cauchy $ay'' + by' + cy = 0$ et $y(t_0) = y_0$ et $y'(t_0) = y'_0$, admet une unique solution.

Démonstration.

(hors programme) Nous traitons ici le cas où on cherche une solution à valeurs complexes et où le polynôme caractéristique a deux racines distinctes r_1 et r_2 . Alors les solutions de l'équation différentielle considérées sont les applications y de la forme $t \mapsto \lambda e^{r_1 t} + \mu e^{r_2 t}$ où λ et μ sont deux complexes. On a $y(t_0) = \lambda e^{r_1 t_0} + \mu e^{r_2 t_0}$ et $y'(t_0) = \lambda r_1 e^{r_1 t_0} + \mu r_2 e^{r_2 t_0}$.

Pour montrer que le problème de Cauchy admet une unique solution, il suffit de montrer que le système

$$\begin{cases} \lambda e^{r_1 t_0} + \mu e^{r_2 t_0} = y_0 \\ \lambda r_1 e^{r_1 t_0} + \mu r_2 e^{r_2 t_0} = y'_0 \end{cases}$$

d'inconnues λ et μ admet une unique solution.

On peut s'en assurer par le calcul, ou on peut simplement remarquer que pour que ce système admette une unique solution, il suffit que l'équation

$$\lambda \begin{pmatrix} e^{r_1 t_0} \\ r_1 e^{r_1 t_0} \end{pmatrix} + \mu \begin{pmatrix} e^{r_2 t_0} \\ r_2 e^{r_2 t_0} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} y_0 \\ y'_0 \end{pmatrix}$$

admette une unique solution.

Pour cela, il suffit de montrer que les vecteurs $\begin{pmatrix} e^{r_1 t_0} \\ r_1 e^{r_1 t_0} \end{pmatrix}$ et $\begin{pmatrix} e^{r_2 t_0} \\ r_2 e^{r_2 t_0} \end{pmatrix}$ forment une base de \mathbb{R}^2 . Il suffit de vérifier qu'ils sont linéairement indépendants, ce qui est le cas puisque leur déterminant vaut $e^{r_1 t_0} r_2 e^{r_2 t_0} - r_1 e^{r_1 t_0} e^{r_2 t_0}$, qui est égal à $(r_2 - r_1)e^{(r_1 + r_2)t_0}$, qui est non nul puisque $r_1 \neq r_2$. \square

4.3. Résolution d'une équation avec second membre

Théorème 4.3.1.

Si l'on connaît une solution \tilde{y} de l'équation avec second membre alors on en connaît toutes les solutions : l'ensemble S des solutions de l'équation avec second membre est $S = \{y_H + \tilde{y} \mid y_H \in S_H\}$.

Remarque 4.3.2.

On a déjà vu que si l'on connaissait une solution de l'équation \tilde{y} avec second membre, alors on pouvait construire toutes les solutions de l'équation avec second membre à partir de l'ensemble des solutions de l'équation homogène.

Dans le cas d'une équation d'ordre deux à coefficients constants, on dit que l'ensemble des solutions a une structure de plan affine, car l'ensemble des solutions est l'ensemble des $\tilde{y} + y$ pour y parcourant un plan vectoriel.

• Cas particulier de seconds membres (le seul au programme) : $P(t)e^{\alpha t}$: P polynôme de degré n . on cherche une solution particulière de la forme $Q(t)e^{\alpha t}$ avec Q de degré :

- (i) $\leq n$ si α n'est pas racine du poly. carac.
- (ii) $\leq n + 1$ si α est racine simple (i.e. $\Delta \neq 0$).
- (iii) $\leq n + 2$ si α est double.

Exemple 4.3.3. 1. Résoudre $y'' - y = 2 + e^{2t}$.

Solutions homogène : $t \mapsto \lambda e^t + \mu e^{-t}$, solutions particulières : -2 (second membre 2), et $\frac{1}{3}e^{2t}$.

2. Résoudre $y'' + 2y' + y = (1 + x)e^{-x}$. Solutions homogène : $x \mapsto (\lambda x + \mu)e^{-x}$, solution particulière : $y(x) = \left(\frac{1}{2}x^2 + \frac{1}{6}x^3\right)e^{-x}$.

5. Un peu de physique : circuits RL et RLC

Des équations différentielles apparaissent fréquemment en physique. Par exemple les oscillateurs, qu'ils soient mécaniques ou électriques mènent à des équations différentielle du second ordre. Ainsi l'étude du pendule simple conduit à

une équation du second ordre, avec ou sans terme de degré 1, suivant que les frottements sont pris en compte ou non.

Nous étudierons ici des circuits électriques.

Remarque : on adopte exceptionnellement les notations des physiciens : i pour l'intensité et j pour le complexe correspondant au point $(0, 1)$, et donc $j^2 = -1$.

5.1. Circuit RL

- On place en série : un générateur fournissant une tension constante U , une résistance R et une inductance L , et enfin un interrupteur, ouvert aux temps $t < 0$. Au temps $t = 0$ on ferme l'interrupteur, et on veut déterminer l'évolution de l'intensité : pour $t < 0$ on a évidemment $i = 0$.

On sait que la tension aux bornes de la résistance est Ri , celle aux bornes de l'inductance est $L \frac{di}{dt} = Li'(t)$. Avec la loi des mailles : $Li' + Ri = U$. On pose : $\tau = \frac{L}{R}$, appelée *constante de temps* du circuit. On va donc résoudre l'équation diff $i' + \frac{i}{\tau} = \frac{U}{L}$, sur \mathbb{R}_+ .

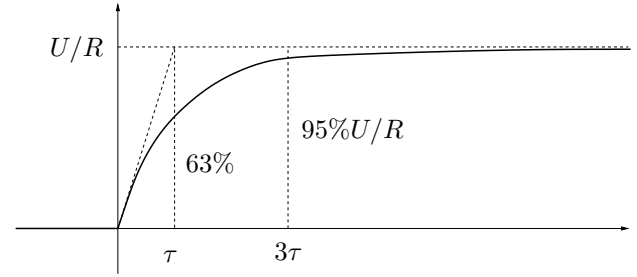
- On commence par résoudre l'équation homogène : $t \mapsto Ke^{-t/\tau}$, $K \in \mathbb{R}$.

- On cherche une solution particulière : le second membre est une constante, on cherche donc une solution constante : ici $i = \frac{\tau U}{L} = \frac{U}{R}$ convient.

- Pour finir, on détermine K pour satisfaire la condition initiale : $i(0) = 0$. On obtient $K = -\frac{U}{R}$.

- Traçons le graphe de i .

On observe un régime *transitoire* (pour t proche de 0) et un régime *permanent* (pour t proche de $+\infty$). On peut déterminer graphiquement τ , en traçant l'asymptote horizontale, puis la tangente en 0, qui a pour équation $y = i'(0)t + i(0)$, soit $y = \frac{U}{R\tau}t$. Pour $t = \tau$, ces droites se coupent.



On considère que le régime permanent est atteint à partir de $t = 3\tau$. On a les approximations suivantes : $i(\tau) = \frac{U}{R}(1 - 1/e) \approx 0.63 \frac{U}{R}$ et $i(3\tau) = \frac{U}{R}(1 - e^{-3}) \approx 0.95 \frac{U}{R}$.

5.2. Circuit RLC

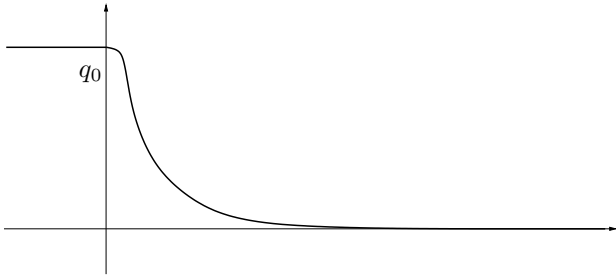
- Cette fois-ci on enlève le générateur de tension, mais on rajoute un condensateur de capacité C en série, et on veut étudier l'évolution de la charge q du condensateur. On sait que : $q = Cu_C$ et $i = \frac{dq}{dt} = q'$. On a donc : $Li' + Ri + q/C = 0$,

mais on pose $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$, appelée *pulsation*

propre du circuit, et $Q = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}}$, appelée *facteur de qualité*. Avec ces deux constantes, on obtient : $\frac{d^2q}{dt^2} + \frac{\omega_0}{Q} \frac{dq}{dt} + \omega_0^2 q = 0$.

- Réolvons l'équation homogène : Le discriminant du poly car est $\Delta = \frac{\omega_0^2}{Q^2} - 4\omega_0^2 = \left(\frac{\omega_0}{Q}\right)^2 (1 - 4Q^2)$. Il faut distinguer trois cas suivant la valeur de Q .

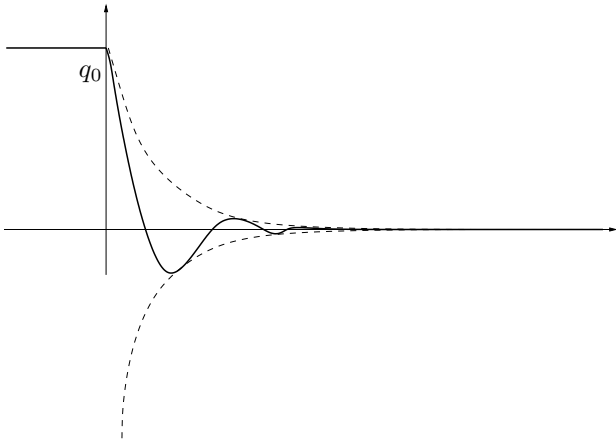
- Régime apériodique ($Q < 1/2$ i.e. $\Delta > 0$) : les racines du poly car sont $-\frac{\omega_0}{2Q} \pm \frac{\omega_0}{2Q} \sqrt{1 - 4Q^2}$, toutes les deux strictement négatives, et appelées ω_1 et ω_2 . Forme des solutions. On a : $q(0) = q_0$ et $q'(0) = 0$, car la charge q est constante pour $t \leq 0$, et q est continue. On a donc le graphe suivant :
- Régime critique ($Q = 1/2$ i.e. $\Delta = 0$) : une racine double, $-\omega_0$. Forme des solutions.



Dans tous les cas, la décroissance de q vers 0 est très rapide : exponentielle. Pendant le régime permanent, il ne se passe rien.

Même graphe qu'avant.

3. Régime pseudo-périodique ($Q > 1/2$ i.e. $\Delta < 0$) : les racines du polynôme caractéristique sont $-\frac{\omega_0}{2Q} \pm j\frac{\omega_0}{2Q}\sqrt{4Q^2 - 1}$. Forme des solutions, avec un cos et un déphasage. Une solution est comprise entre $|\lambda|e^{-\frac{\omega_0 t}{2Q}}$ et $-|\lambda|e^{-\frac{\omega_0 t}{2Q}}$. Graphe :



6. Méthode d'Euler

Comme on l'a vu, résoudre une équation différentielle revient à calculer une primitive d'une certaine fonction. Or il n'existe pas toujours de fonction élémentaire qui soit une primitive d'une fonction élémentaire donnée, ou alors on ne sait pas la trouver. Dans ce cas il est utile de savoir construire une approximation de la solution d'une équation différentielle de premier ordre. La méthode d'Euler est l'une des méthodes simples et classiques pour faire cela. Elle sera étudiée au second semestre en informatique.