



## Equations différentielles linéaires

---

Exercices de Jean-Louis Rouget. Retrouver aussi cette fiche sur [www.maths-france.fr](http://www.maths-france.fr)

\* très facile \*\* facile \*\*\* difficulté moyenne \*\*\*\* difficile \*\*\*\*\* très difficile

I : Incontournable T : pour travailler et mémoriser le cours

### Exercice 1 \*\*IT

Résoudre sur l'intervalle  $I$  de  $\mathbb{R}$  proposé les équations différentielles suivantes :

- 1)  $x \ln xy' + y = x, I = ]1, +\infty[$     2)  $x(xy' + y - x) = 1, I = ]-\infty, 0[$   
3)  $2xy' + y = x^4, I = ]-\infty, 0[$     4)  $y' + 2y = x^2 - 3x, I = \mathbb{R}$   
5)  $y' + y = \frac{1}{1+2e^x}, I = \mathbb{R}$     6)  $y' \sin x - y \cos x + 1 = 0, I = ]0, \pi[$

[Correction ▼](#)

[005476]

### Exercice 2 \*\*\*I

Résoudre l'équation différentielle  $(1 - x^2)y' - 2xy = x^2$  sur chacun des intervalles  $I$  suivants :  $I = ]1, +\infty[$ ,  $I = ]-1, 1[$ ,  $I = ]-1, +\infty[$ ,  $I = \mathbb{R}$ .

[Correction ▼](#)

[005477]

### Exercice 3 \*\*\*

Résoudre sur  $] -\infty, 0[$  et  $]0, +\infty[$  l'équation différentielle :  $|x|y' + (x - 1)y = x^3$ .

[Correction ▼](#)

[005478]

### Exercice 4 \*\*

Résoudre sur  $\mathbb{R}$  les équations différentielles :

- 1)  $y'' - 2y' + 2y = x \cos x \operatorname{ch} x$     2)  $y'' + 6y' + 9y = x^2 e^{2x}$     3)  $y'' - 2y' + y = \operatorname{ch} x$   
4)  $y'' - 2ky' + (1 + k^2)y = e^x \sin x, k \in \mathbb{R} \setminus \{1\}$

[Correction ▼](#)

[005479]

### Exercice 5 \*\*

On considère l'équation différentielle  $(E) : ax^2y'' + bxy' + cy = 0$  ( $a, b, c$  réels,  $a \neq 0$ ) pour  $x \in ]0, +\infty[$ .

1. Soit  $y$  une fonction deux fois dérivable sur  $]0, +\infty[$ . Pour  $t \in \mathbb{R}$ , on pose  $z(t) = y(e^t)$ . Vérifier que  $y$  est deux fois dérivable sur  $]0, +\infty[$  si et seulement si  $z$  est deux fois dérivable sur  $\mathbb{R}$ .
2. Effectuer le changement d'inconnue précédent dans l'équation différentielle  $(E)$  et vérifier que la résolution de  $(E)$  se ramène à la résolution d'une équation linéaire du second ordre à coefficients constants.
3. Résoudre sur  $]0, +\infty[$ , l'équation différentielle  $x^2y'' - xy' + y = 0$ .

[Correction ▼](#)

[005480]

### Exercice 6 \*\*

Soit  $a$  un réel non nul. Soit  $f$  continue sur  $\mathbb{R}$  et périodique de période  $T \neq 0$ . Montrer que l'équation différentielle  $y' + ay = f$  admet une et une seule solution périodique sur  $\mathbb{R}$ , de période  $T$ .

[Correction ▼](#)

[005481]

## Correction de l'exercice 1 ▲

Les équations différentielles à résoudre dans cet exercice sont toutes linéaires du premier ordre. On note  $(E)$  l'équation différentielle proposée et  $(E_H)$  l'équation homogène associée.

1. Les fonctions  $x \mapsto \frac{1}{x \ln x}$  et  $x \mapsto \frac{1}{\ln x}$  sont continues sur  $I$  et on sait que les solutions de  $(E)$  sur  $I$  sont de la forme  $f_0 + \lambda f_1$  où  $f_0$  est une solution particulière de  $(E)$  et  $f_1$  est une solution particulière non nulle de  $(E_H)$ .

Soit  $f$  une fonction dérivable sur  $I$ .

$$\begin{aligned} f \text{ solution de } (E) \text{ sur } I &\Leftrightarrow \forall x \in I, x \ln x f'(x) + f(x) = x \Leftrightarrow \forall x \in I, \ln x f'(x) + \frac{1}{x} f(x) = 1 \\ &\Leftrightarrow \forall x \in I, (\ln x \cdot f)'(x) = 1 \Leftrightarrow \exists \lambda \in \mathbb{R} / \forall x \in I, f(x) = \frac{x + \lambda}{\ln x} \end{aligned}$$

2. Les fonctions  $x \mapsto \frac{1}{x}$  et  $x \mapsto 1 + \frac{1}{x^2}$  sont continues sur  $I$  et on sait que les solutions de  $(E)$  sur  $I$  sont de la forme  $f_0 + \lambda f_1$  où  $f_0$  est une solution particulière de  $(E)$  et  $f_1$  est une solution particulière non nulle de  $(E_H)$ .

Soit  $f$  une fonction dérivable sur  $I$ .

$$\begin{aligned} f \text{ solution de } (E) \text{ sur } I &\Leftrightarrow \forall x \in I, x(xf'(x) + f(x) - x) = 1 \Leftrightarrow \forall x \in I, (xf)'(x) = x + \frac{1}{x} \\ &\Leftrightarrow \exists \lambda \in \mathbb{R} / \forall x \in I, xf(x) = \frac{x^2}{2} + \ln(-x) + \lambda \Leftrightarrow \exists \lambda \in \mathbb{R} / \forall x \in I, f(x) = \frac{x}{2} + \frac{\ln(-x) + \lambda}{x}. \end{aligned}$$

Les solutions de  $(E)$  sur  $I$  sont les fonctions de la forme  $x \mapsto \frac{x}{2} + \frac{\ln(-x) + \lambda}{x}$ ,  $\lambda \in \mathbb{R}$ .

3. Les fonctions  $x \mapsto \frac{1}{2x}$  et  $x \mapsto \frac{x^3}{2}$  sont continues sur  $I = ]-\infty, 0[$  et on sait que les solutions de  $(E)$  sur  $I$  sont de la forme  $f_0 + \lambda f_1$  où  $f_0$  est une solution particulière de  $(E)$  et  $f_1$  est une solution particulière non nulle de  $(E_H)$ .

Soit  $f$  une fonction dérivable sur  $I$ .

$$\begin{aligned} f \text{ solution de } (E) \text{ sur } I &\Leftrightarrow \forall x \in I, f'(x) + \frac{1}{2x} f(x) = \frac{x^3}{2} \\ \forall x \in I, e^{\ln|x|/2} f'(x) + \frac{1}{2x} e^{\ln|x|/2} f(x) &= \frac{x^3}{2} e^{\ln|x|/2} \Leftrightarrow \forall x \in I, (\sqrt{-x} f)'(x) = -\frac{1}{2} (-x)^{7/2} \\ &\Leftrightarrow \exists \lambda \in \mathbb{R} / \forall x \in I, \sqrt{-x} f(x) = \frac{1}{9} (-x)^{9/2} + \lambda \\ &\Leftrightarrow \exists \lambda \in \mathbb{R} / \forall x \in I, f(x) = \frac{1}{9} x^4 + \frac{\lambda}{\sqrt{-x}} \end{aligned}$$

Les solutions de  $(E)$  sur  $I$  sont les fonctions de la forme  $x \mapsto \frac{x^4}{9} + \frac{\lambda}{\sqrt{-x}}$ ,  $\lambda \in \mathbb{R}$ .

4. Les fonctions  $x \mapsto 2$  et  $x \mapsto x^2 - 3x$  sont continues sur  $\mathbb{R}$  et on sait que les solutions de  $(E)$  sur  $\mathbb{R}$  sont de la forme  $f_0 + \lambda f_1$  où  $f_0$  est une solution particulière de  $(E)$  et  $f_1$  est une solution particulière non nulle de  $(E_H)$ .

Soit  $f$  une fonction dérivable sur  $\mathbb{R}$ .

$$\begin{aligned} f \text{ solution de } (E) \text{ sur } \mathbb{R} &\Leftrightarrow \forall x \in \mathbb{R}, f'(x) + 2f(x) = x^2 - 3x \\ &\Leftrightarrow \forall x \in \mathbb{R}, e^{2x} f'(x) + 2e^{2x} f(x) = (x^2 - 3x)e^{2x} \Leftrightarrow \forall x \in \mathbb{R}, (e^{2x} f)'(x) = (x^2 - 3x)e^{2x} \end{aligned}$$

Recherche d'une primitive sur  $\mathbb{R}$  de la fonction  $x \mapsto (x^2 - 3x)e^{2x}$ .

**1ère méthode.** Deux intégrations par parties fournissent :

$$\begin{aligned} \int (x^2 - 3x)e^{2x} dx &= \frac{1}{2}(x^2 - 3x)e^{2x} - \frac{1}{2} \int (2x - 3)e^{2x} dx \\ &= \frac{1}{2}(x^2 - 3x)e^{2x} - \frac{1}{4}(2x - 3)e^{2x} + \frac{1}{2} \int e^{2x} dx \\ &= \frac{1}{4}(2x^2 - 8x + 3)e^{2x} + \frac{1}{4}e^{2x} + C = \frac{1}{2}(x^2 - 4x + 2)e^{2x} + C \end{aligned}$$

**2ème méthode.** Cherchons les primitives de  $x \mapsto (x^2 - 3x)e^{2x}$  sous la forme  $x \mapsto (ax^2 + bx + c)e^{2x}$ .

$$((ax^2 + bx + c)e^{2x})' = (2(ax^2 + bx + c) + (2ax + b))e^{2x} = (2ax^2 + 2(a+b)x + b + 2c)e^{2x}.$$

Donc,

$$((ax^2 + bx + c)e^{2x})' = (x^2 - 3x)e^{2x} \Leftrightarrow \begin{cases} 2a = 1 \\ 2(a+b) = -3 \\ b + 2c = 0 \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} a = \frac{1}{2} \\ b = -2 \\ c = 1 \end{cases}.$$

**Résolution de (E).**

$$\begin{aligned} f \text{ solution de (E) sur } \mathbb{R} &\Leftrightarrow \forall x \in \mathbb{R}, (e^{2x}f)'(x) = (x^2 - 3x)e^{2x} \Leftrightarrow \exists \lambda \in \mathbb{R} / \forall x \in \mathbb{R}, e^{2x}f(x) = \left(\frac{x^2}{2} - 2x + 1\right)e^{2x} + \lambda \\ &\Leftrightarrow \exists \lambda \in \mathbb{R} / \forall x \in \mathbb{R}, f(x) = \frac{x^2}{2} - 2x + 1 + \lambda e^{-2x}. \end{aligned}$$

Les solutions de (E) sur  $\mathbb{R}$  sont les fonctions de la forme  $x \mapsto \frac{x^2}{2} - 2x + 1 + \lambda e^{-2x}, \lambda \in \mathbb{R}$ .

5. Les fonctions  $x \mapsto 1$  et  $x \mapsto \frac{1}{1+2e^x}$  sont continues sur  $\mathbb{R}$  et on sait que les solutions de (E) sur  $\mathbb{R}$  sont de la forme  $f_0 + \lambda f_1$  où  $f_0$  est une solution particulière de (E) et  $f_1$  est une solution particulière non nulle de  $(E_H)$ .

Soit  $f$  une fonction dérivable sur  $\mathbb{R}$ .

$$\begin{aligned} f \text{ solution de (E) sur } \mathbb{R} &\Leftrightarrow \forall x \in \mathbb{R}, f'(x) + f(x) = \frac{1}{1+2e^x} \Leftrightarrow \forall x \in \mathbb{R}, e^x f'(x) + e^x f(x) = \frac{e^x}{1+2e^x} \\ &\Leftrightarrow \exists \lambda \in \mathbb{R} / \forall x \in \mathbb{R}, e^x f(x) = \frac{1}{2} \ln(1+2e^x) + \lambda \\ &\Leftrightarrow \exists \lambda \in \mathbb{R} / \forall x \in \mathbb{R}, f(x) = \left(\frac{1}{2} \ln(1+2e^x) + \lambda\right)e^{-x} \end{aligned}$$

Les solutions de (E) sur  $\mathbb{R}$  sont les fonctions de la forme  $x \mapsto \left(\frac{1}{2} \ln(1+2e^x) + \lambda\right)e^{-x}, \lambda \in \mathbb{R}$ .

6. Les fonctions  $x \mapsto -\frac{\cos x}{\sin x}$  et  $x \mapsto -\frac{1}{\sin x}$  sont continues sur  $I = ]0, \pi[$  et on sait que les solutions de (E) sur  $\mathbb{R}$  sont de la forme  $f_0 + \lambda f_1$  où  $f_0$  est une solution particulière de (E) et  $f_1$  est une solution particulière non nulle de  $(E_H)$ .

Mais  $x \mapsto \sin x$  est une solution non nulle de  $(E_H)$  sur  $I$  et  $x \mapsto \cos x$  est une solution de (E) sur  $]0, \pi[$ .

Les solutions de (E) sur  $]0, \pi[$  sont les fonctions de la forme  $x \mapsto \lambda \sin x + \cos x, \lambda \in \mathbb{R}$ .

L'équation différentielle à résoudre dans cet exercice est linéaire du premier ordre. On note  $(E)$  l'équation différentielle proposée et  $(E_H)$  l'équation homogène associée.

Soit  $I$  l'un des deux intervalles  $] -1, 1[$  ou  $]1, +\infty[$ . Les fonctions  $x \mapsto \frac{-2x}{1-x^2}$  et  $x \mapsto \frac{x^2}{1-x^2}$  sont continues sur  $I$  et on sait que les solutions de  $(E)$  sur  $I$  sont de la forme  $f_0 + \lambda f_1$  où  $f_0$  est une solution particulière de  $(E)$  et  $f_1$  est une solution particulière non nulle de  $(E_H)$ .

Résolution de  $(E)$  sur  $I$ . Soit  $f$  une fonction dérivable sur  $I$ .

$$\begin{aligned} f \text{ solution de } (E) \text{ sur } I &\Leftrightarrow \forall x \in I, (1-x^2)f'(x) - 2xf(x) = x^2 \\ &\Leftrightarrow \forall x \in I, ((1-x^2)f)'(x) = x^2 \Leftrightarrow \exists \lambda \in \mathbb{R} / \forall x \in I, (1-x^2)f(x) = \frac{x^3}{3} + \lambda \\ &\Leftrightarrow \exists \lambda \in \mathbb{R} / \forall x \in I, f(x) = \frac{x^3 + \lambda}{3(1-x^2)}, \end{aligned}$$

(en renommant  $\lambda$  la constante  $3\lambda$ ).

Si  $I = ] -1, +\infty[$ .

Soit  $f$  une éventuelle solution de  $(E)$  sur  $I$ . Les restrictions de  $f$  à  $] -1, 1[$  et  $]1, +\infty[$  sont encore solution de  $(E)$  et donc de la forme précédente. Par suite, nécessairement, il existe deux constantes  $\lambda_1$  et  $\lambda_2$  telles que, pour  $-1 < x < 1$ ,  $f(x) = \frac{x^3 + \lambda_1}{3(1-x^2)}$  et pour  $x > 1$ ,  $f(x) = \frac{x^3 + \lambda_2}{3(1-x^2)}$ . Enfin, l'équation impose  $f(1) = -\frac{1}{2}$ .

En résumé, une éventuelle solution de  $(E)$  sur  $I$  est nécessairement de la forme :

$$\forall x > -1, f(x) = \begin{cases} \frac{x^3 + \lambda_1}{3(1-x^2)} & \text{si } -1 < x < 1 \\ -\frac{1}{2} & \text{si } x = 1 \\ \frac{x^3 + \lambda_2}{3(1-x^2)} & \text{si } x > 1 \end{cases}.$$

Réciproquement,  $f$  ainsi définie, est dérivable sur  $] -1, 1[$  et solution de  $(E)$  sur  $] -1, 1[$ , dérivable sur  $]1, +\infty[$  et solution de  $(E)$  sur  $]1, +\infty[$  et, si  $f$  est dérivable en 1,  $f$  vérifie encore  $(E)$  pour  $x = 1$ . Donc,  $f$  est solution de  $(E)$  sur  $] -1, +\infty[$  si et seulement si  $f$  est dérivable en 1.

Pour  $-1 < x < 1$ ,

$$\frac{f(x) - f(1)}{x - 1} = \frac{\frac{x^3 + \lambda_1}{3(1-x^2)} + \frac{1}{2}}{x - 1} = \frac{2x^3 + 2\lambda_1 + 3(1-x^2)}{6(1-x^2)(x-1)}$$

Quand  $x$  tend vers 1 par valeurs inférieures, le dénominateur de la fraction tend vers 0 et le numérateur tend vers  $2(1 + \lambda_1)$ . Donc, si  $\lambda_1 \neq -1$ ,  $f$  n'est pas dérivable à gauche en 1. De même, si  $\lambda_2 \neq -1$ ,  $f$  n'est pas dérivable à droite en 1. Ainsi, si  $f$  est solution de  $(E)$  sur  $I$ , nécessairement  $\lambda_1 = \lambda_2 = -1$ . Dans ce cas, pour  $x \in ] -1, +\infty[ \setminus \{1\}$ ,

$$f(x) = \frac{x^3 - 1}{3(1-x^2)} = \frac{(x-1)(x^2+x+1)}{3(1-x)(1+x)} = -\frac{x^2+x+1}{3(x+1)},$$

ce qui reste vrai pour  $x = 1$ . Ainsi, si  $f$  est une solution de  $(E)$  sur  $] -1, +\infty[$ , nécessairement pour  $x > -1$ ,  $f(x) = -\frac{x^2+x+1}{3(x+1)}$ . Réciproquement,  $f$  ainsi définie est dérivable sur  $] -1, +\infty[$  et en particulier en 1.  $f$  est donc solution de  $(E)$  sur  $] -1, +\infty[$ .

Sur  $] -1, +\infty[$ ,  $(E)$  admet une et une seule solution à savoir la fonction  $x \mapsto -\frac{x^2+x+1}{3(x+1)}$ .

Si  $I = \mathbb{R}$ , soit  $f$  une éventuelle solution de  $(E)$  sur  $\mathbb{R}$ . La restriction de  $f$  à  $] -1, +\infty[$  est nécessairement la fonction précédente. Mais cette fonction tend vers  $-\infty$  quand  $x$  tend vers  $-1$  par valeurs supérieures. Donc  $f$  ne peut être continue sur  $\mathbb{R}$  et  $(E)$  n'a pas de solution sur  $\mathbb{R}$ .

### Correction de l'exercice 3 ▲

**Résolution** de  $(E)$  sur  $]0, +\infty[$ .

Soit  $f$  une fonction dérivable sur  $]0, +\infty[$ .

$$\begin{aligned}
f \text{ solution de } (E) \text{ sur } ]0, +\infty[ &\Leftrightarrow \forall x \in ]0, +\infty[, |x|f'(x) + (x-1)f(x) = x^3 \\
&\Leftrightarrow \forall x \in ]0, +\infty[, xf'(x) + (x-1)f(x) = x^3 \Leftrightarrow \forall x \in ]0, +\infty[, f'(x) + (1 - \frac{1}{x})f(x) = x^2 \\
&\Leftrightarrow \forall x \in ]0, +\infty[, e^{x-\ln x} f'(x) + (1 - \frac{1}{x})e^{x-\ln x} f(x) = e^{x-\ln x} x^2 \\
&\Leftrightarrow \forall x \in ]0, +\infty[, (\frac{e^x}{x} f)'(x) = xe^x = ((x-1)e^x)' \\
&\Leftrightarrow \exists \lambda \in \mathbb{R} / \forall x \in ]0, +\infty[, f(x) = xe^{-x}((x-1)e^x + \lambda) = x^2 - x + \lambda xe^{-x}
\end{aligned}$$

Les solutions de (E) sur  $]0, +\infty[$  sont les fonctions de la forme  $x \mapsto x^2 - x + \lambda xe^{-x}$ ,  $\lambda \in \mathbb{R}$ .

**Résolution** de (E) sur  $] -\infty, 0[$ .

Soit  $f$  une fonction dérivable sur  $] -\infty, 0[$ .

$$\begin{aligned}
f \text{ solution de } (E) \text{ sur } ] -\infty, 0[ &\Leftrightarrow \forall x \in ]0, +\infty[, -xf'(x) + (x-1)f(x) = x^3 \\
&\Leftrightarrow \forall x \in ] -\infty, 0[, f'(x) + (-1 + \frac{1}{x})f(x) = -x^2 \\
&\Leftrightarrow \forall x \in ] -\infty, 0[, e^{-x+\ln|x|} f'(x) + (-1 + \frac{1}{x})e^{-x+\ln|x|} f(x) = -e^{-x+\ln|x|} x^2 \\
&\Leftrightarrow \forall x \in ] -\infty, 0[, (-xe^{-x}y)' = x^3 e^{-x} (*)
\end{aligned}$$

Déterminons une primitive de la fonction  $x \mapsto -x^3 e^{-x}$  de la forme  $(ax^3 + bx^2 + cx + d)e^{-x}$ .

$$((ax^3 + bx^2 + cx + d)e^{-x})' = -(ax^3 + bx^2 + cx + d) + (3ax^2 + 2bx + c)e^{-x} = (-ax^3 + (3a-b)x^2 + (2b-c)x + c-d)e^{-x},$$

et

$$((ax^3 + bx^2 + cx + d)e^{-x})' = x^3 e^{-x} \Leftrightarrow \begin{cases} -a = -1 \\ 3a - b = 0 \\ 2b - c = 0 \\ c - d = 0 \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} a = 1 \\ b = 3 \\ c = 6 = d \end{cases}.$$

Par suite,

$$\begin{aligned}
(*) &\Leftrightarrow \exists \lambda \in \mathbb{R} / \forall x \in ] -\infty, 0[, xe^{-x}f(x) = (x^3 + 3x^2 + 6x + 6)e^{-x} + \lambda \\
&\Leftrightarrow \exists \lambda \in \mathbb{R} / \forall x \in ] -\infty, 0[, f(x) = x^2 + 3x + 6 + \frac{\lambda e^x + 6}{x}.
\end{aligned}$$

Les solutions de (E) sur  $] -\infty, 0[$  sont les fonctions de la forme  $x \mapsto x^2 + 3x + 6 + \frac{\lambda e^x + 6}{x}$ ,  $\lambda \in \mathbb{R}$ .

On peut montrer que l'équation admet une et une seule solution sur  $\mathbb{R}$  en recollant les expressions précédentes, mais en ce début d'année, on manque encore d'outils.

### Correction de l'exercice 4 ▲

1. L'équation caractéristique de l'équation homogène  $y'' - 2y' + 2y = 0$  est  $r^2 - 2r + 2 = 0$  dont les racines sont  $1 - i$  et  $1 + i$ . Les solutions de l'équation homogène sont les fonctions de la forme  $x \mapsto e^x(\lambda \cos x + \mu \sin x)$ ,  $(\lambda, \mu) \in \mathbb{R}^2$ . L'équation avec second membre s'écrit

$$y'' - 2y' + 2y = \frac{x}{4}(e^{(1+i)x} + e^{(-1+i)x} + e^{(1-i)x} + e^{(-1-i)x}).$$

On applique alors le principe de superposition des solutions.

Recherche d'une solution particulière de l'équation  $y'' - 2y' + 2y = xe^{(1+i)x}$ .

$1 + i$  est racine simple de l'équation caractéristique et donc l'équation précédente admet une solution particulière de la forme  $f : x \mapsto (ax^2 + bx)e^{(1+i)x}$ . D'après la formule de LEIBNIZ :

$$\begin{aligned} f'' - 2f' + 2f &= (((1+i)^2(ax^2 + bx) + 2(1+i)(2ax + b) + 2a) \\ &\quad - 2((1+i)(ax^2 + bx) + (2ax + b)) + 2(ax^2 + bx))e^{(1+i)x} \\ &= (2(1+i)(2ax + b) + 2a - 2((2ax + b)))e^{(1+i)x} = (2i(2ax + b) + 2a)e^{(1+i)x} \\ &= (4iax + 2a + 2ib)e^{(1+i)x} \end{aligned}$$

puis,

$$f'' - 2f' + 2f = xe^{(1+i)x} \Leftrightarrow 4ia = 1 \text{ et } 2ib + 2a = 0 \Leftrightarrow a = -\frac{i}{4} \text{ et } b = \frac{1}{4}.$$

Une solution particulière de l'équation  $y'' - 2y' + 2y = xe^{(1+i)x}$  est  $x \mapsto \frac{1}{4}(-ix^2 + x)e^{(1+i)x}$ . Par conjugaison, une solution particulière de l'équation  $y'' - 2y' + 2y = xe^{(1-i)x}$  est  $x \mapsto \frac{1}{4}(ix^2 + x)e^{(1-i)x}$ .

Recherche d'une solution particulière de l'équation  $y'' - 2y' + 2y = xe^{(-1+i)x}$ .

$-1 + i$  n'est pas racine de l'équation caractéristique et donc l'équation précédente admet une solution particulière de la forme  $f : x \mapsto (ax + b)e^{(-1+i)x}$ . D'après la formule de LEIBNIZ :

$$\begin{aligned} f'' - 2f' + 2f &= (((-1+i)^2(ax + b) + 2(-1+i)a) - 2((-1+i)(ax + b) + a) + 2(ax + b))e^{(-1+i)x} \\ &= ((ax + b)(-2i - 2(-1+i) + 2) + 2(-1+i)a - 2a)e^{(-1+i)x} \\ &= (4(1-i)(ax + b) - 2(2-i)a)e^{(-1+i)x} = (4(1-i)ax - 2(2-i)a + 4(1-i)b)e^{(-1+i)x} \end{aligned}$$

puis,

$$\begin{aligned} f'' - 2f' + 2f = xe^{(-1+i)x} &\Leftrightarrow 4(1-i)a = 1 \text{ et } 4(1-i)b - 2(2-i)a = 0 \\ &\Leftrightarrow a = \frac{1+i}{8} \text{ et } b = \frac{(2-i)(1+i)}{16(1-i)} = \frac{(3+i)(1+i)}{32} = \frac{1+2i}{16}. \end{aligned}$$

Une solution particulière de l'équation  $y'' - 2y' + 2y = xe^{(-1+i)x}$  est  $x \mapsto \frac{1}{16}(2(1+i)x + 1 + 2i)e^{(-1+i)x}$ . Par conjugaison, une solution particulière de l'équation  $y'' - 2y' + 2y = xe^{(-1-i)x}$  est  $x \mapsto \frac{1}{16}(2(1-i)x + 1 - 2i)e^{(-1-i)x}$ .

Une solution particulière de l'équation  $y'' - 2y' + 2y = x \cos x \operatorname{ch} x$  est donc

$$\begin{aligned} &\frac{1}{4}(2\operatorname{Re}(\frac{1}{4}(-ix^2 + x)e^{(1+i)x} + \frac{1}{16}(2(1+i)x + 1 + 2i)e^{(-1+i)x})) \\ &= \frac{1}{32}\operatorname{Re}(4(-ix^2 + x)(\cos x + i \sin x)e^x + (2x + 1 + 2(x+1)i)(\cos x + i \sin x)e^{-x}) \\ &= \frac{1}{32}(4(x \cos x + x^2 \sin x)e^x + ((2x + 1) \cos x - 2(x + 1) \sin x)e^{-x}) \end{aligned}$$

Les solutions sur  $\mathbb{R}$  de l'équation proposée sont les fonctions de la forme  $x \mapsto (\frac{1}{8}(x \cos x + x^2 \sin x) + \lambda \cos x + \mu \sin x)e^x + ((2x + 1) \cos x - 2(x + 1) \sin x)e^{-x}$ ,  $(\lambda, \mu) \in \mathbb{R}^2$ .

2. L'équation caractéristique de l'équation homogène  $y'' + 6y' + 9y = 0$  est  $r^2 + 6r + 9 = 0$  qui admet la racine double  $r = -3$ . Les solutions de l'équation homogène sont les fonctions de la forme  $x \mapsto e^{-3x}(\lambda x + \mu)$ ,  $(\lambda, \mu) \in \mathbb{R}^2$ .

2 n'est pas racine de l'équation caractéristique et donc l'équation proposée admet une solution particulière de la forme  $f : x \mapsto (ax^2 + bx + c)e^{2x}$ . D'après la formule de LEIBNIZ :

$$\begin{aligned} f'' + 6f' + 9f &= ((4(ax^2 + bx + c) + 4(2ax + b) + 2a) + 6(2(ax^2 + bx + c) + (2ax + b)) + 9(ax^2 + bx + c))e^{2x} \\ &= (25(ax^2 + bx + c) + 10(2ax + b) + 2a)e^{2x} = (25ax^2 + (20a + 25b)x + 2a + 10b + 25c)e^{2x} \end{aligned}$$

puis,

$$f'' + 6f' + 9f = x^2 e^{2x} \Leftrightarrow 25a = 1 \text{ et } 20a + 25b = 0 \text{ et } 2a + 10b + 25c = 0 \Leftrightarrow a = \frac{1}{25} \text{ et } b = -\frac{4}{125} \text{ et } c = \frac{6}{625}.$$

Une solution particulière de l'équation  $y'' + 6y' + 9y = x^2 e^{2x}$  est  $x \mapsto \frac{1}{625}(25x^2 - 20x + 6)e^{2x}$ .

Les solutions sur  $\mathbb{R}$  de l'équation proposée sont les fonctions de la forme  $x \mapsto \frac{1}{625}(25x^2 - 20x + 6)e^{2x} + (\lambda x + \mu)e^{-3x}$ ,  $(\lambda, \mu) \in \mathbb{R}^2$ .

3. L'équation caractéristique de l'équation homogène  $y'' - 2y' + y = 0$  est  $r^2 - 2r + 1 = 0$  qui admet la racine double  $r = 1$ . Les solutions de l'équation homogène sont les fonctions de la forme  $x \mapsto e^x(\lambda x + \mu)$ ,  $(\lambda, \mu) \in \mathbb{R}^2$ .

Le second membre s'écrit  $\frac{1}{2}(e^x + e^{-x})$ . Appliquons le principe de superposition des solutions.

Recherche d'une solution particulière de l'équation  $y'' - 2y' + y = e^x$ .

1 est racine double de l'équation caractéristique et donc l'équation proposée admet une solution particulière de la forme  $f : x \mapsto ax^2 e^x$ . D'après la formule de LEIBNIZ :

$$f'' - 2f' + f = ((ax^2 + 2(2ax) + 2a) - 2(ax^2 + (2ax)) + ax^2)e^{2x} = 2ae^x$$

puis,

$$f'' - 2f' + f = e^x \Leftrightarrow 2a = 1 \Leftrightarrow a = \frac{1}{2}.$$

Une solution particulière de l'équation  $y'' - 2y' + y = e^x$  est  $x \mapsto \frac{1}{2}x^2 e^x$ .

Recherche d'une solution particulière de l'équation  $y'' - 2y' + y = e^{-x}$ .

-1 n'est pas racine de l'équation caractéristique et donc l'équation proposée admet une solution particulière de la forme  $f : x \mapsto ae^{-x}$ .

$$f'' - 2f' + f = (a + 2a + a)e^{-x} = 4ae^{-x}$$

puis,

$$f'' - 2f' + f = e^{-x} \Leftrightarrow a = \frac{1}{4}.$$

Une solution particulière de l'équation  $y'' - 2y' + y = e^{-x}$  est  $x \mapsto \frac{1}{4}e^{-x}$ .

Les solutions sur  $\mathbb{R}$  de l'équation proposée sont les fonctions de la forme  $x \mapsto (\frac{x^2}{4} + \lambda x + \mu)e^x + \frac{1}{8}e^{-x}$ ,  $(\lambda, \mu) \in \mathbb{R}^2$ .

4. Soit  $k \in \mathbb{R}$ . L'équation caractéristique de l'équation homogène  $y'' - 2ky' + (1+k^2)y = 0$  est  $r^2 - 2kr + 1 + k^2 = 0$  dont le discriminant réduit vaut  $-1 = i^2$ . Cette équation admet donc pour racines  $k+i$  et  $k-i$ . Les solutions de l'équation homogène sont les fonctions de la forme  $x \mapsto e^{kx}(\lambda \cos x + \mu \sin x)$ ,  $(\lambda, \mu) \in \mathbb{R}^2$ . Le second membre s'écrit  $\text{Im}(e^{(1+i)x})$ . Résolvons donc l'équation  $y'' - 2y' + y = e^{(1+i)x}$ . Si  $k \neq 1$ ,  $1+i$  n'est pas racine de l'équation caractéristique et donc l'équation proposée admet une solution particulière de la forme  $f : x \mapsto ae^{(1+i)x}$ . Or,

$$f'' - 2kf' + (1+k^2)f = a((1+i)^2 - 2k(1+i) + 1+k^2)e^{(1+i)x} = ((k-1)^2 - 2(k-1)i)ae^{(1+i)x}$$

et donc,

$$f'' - 2kf' + (1+k^2)f = e^{(1+i)x} \Leftrightarrow a = \frac{1}{k-1} \frac{1}{k-1-2i} = \frac{k-1+2i}{(k-1)(k^2-2k+5)}.$$

Une solution particulière de l'équation  $y'' - 2y' + y = e^{(1+i)x}$  est  $x \mapsto \frac{k-1+2i}{(k-1)(k^2-2k+5)}e^{(1+i)x}$  et une solution particulière de l'équation  $y'' - 2y' + y = e^x \sin x$  est

$$\frac{1}{(k-1)(k^2-2k+5)} \text{Im}((k-1-2i)(\cos x + i \sin x)e^x) = \frac{1}{(k-1)(k^2-2k+5)}(-2 \cos x + (k-1) \sin x)e^x.$$

Si  $k \neq 1$ , les solutions de l'équation proposée sont les fonctions de la forme

$$x \mapsto \frac{1}{(k-1)(k^2-2k+5)}(-2 \cos x + (k-1) \sin x)e^x + (\lambda \cos x + \mu \sin x)e^{kx}, \quad (\lambda, \mu) \in \mathbb{R}.$$

### Correction de l'exercice 5 ▲

- Supposons  $y$  deux fois dérivable sur  $]0, +\infty[$ . La fonction  $t \mapsto e^t$  est deux fois dérivable sur  $\mathbb{R}$  à valeurs dans  $]0, +\infty[$  et la fonction  $x \mapsto y(x)$  est deux fois dérivable sur  $]0, +\infty[$ . Donc, puisque pour tout réel  $t$ ,  $z(t) = y(e^t)$ , la fonction  $z$  est deux fois dérivable sur  $\mathbb{R}$  en tant que composée de fonctions deux fois dérivables. Réciproquement, supposons que  $z$  est deux fois dérivable sur  $\mathbb{R}$ . La fonction  $x \mapsto \ln x$  est deux fois dérivable sur  $]0, +\infty[$  à valeurs dans  $\mathbb{R}$  et la fonction  $t \mapsto z(t)$  est deux fois dérivable sur  $\mathbb{R}$ . Donc, puisque pour tout réel strictement positif  $x$ ,  $y(x) = z(\ln x)$ , la fonction  $y$  est deux fois dérivable sur  $]0, +\infty[$ .
- Pour  $t$  réel, posons donc  $x = e^t$  puis,  $z(t) = y(x) = y(e^t)$ . Alors,  $z'(t) = e^t y'(e^t) = xy'(x)$  puis  $z''(t) = e^t y'(e^t) + (e^t)^2 y''(e^t) = xy'(x) + x^2 y''(x)$ . Donc,  $xy'(x) = z'(t)$  et  $x^2 y''(x) = z''(t) - xy'(x) = z''(t) - z'(t)$ . Par suite,

$$ax^2 y''(x) + bxy'(x) + cy(x) = a(z''(t) - z'(t)) + bz'(t) + cz(t) = az''(t) + (b-a)z'(t) + cz(t).$$

Donc,

$$\forall x > 0, ax^2 y''(x) + bxy'(x) + cy(x) = 0 \Leftrightarrow \forall t \in \mathbb{R}, az''(t) + (b-a)z'(t) + cz(t) = 0.$$

- On applique le 2) avec  $a = 1$ ,  $b = -1$  et  $c = 1$ . L'équation à résoudre sur  $\mathbb{R}$  est alors  $z'' - 2z' + z = 0$ . Les solutions de cette équation sur  $\mathbb{R}$  sont les fonctions de la forme  $t \mapsto (\lambda t + \mu)e^t$ ,  $(\lambda, \mu) \in \mathbb{R}^2$ . Les solutions sur  $]0, +\infty[$  de l'équation initiale sont donc les fonctions de la forme  $x \mapsto \lambda x \ln x + \mu x$ ,  $(\lambda, \mu) \in \mathbb{R}^2$ .

---

**Correction de l'exercice 6 ▲**

---

On sait que les solutions sur  $\mathbb{R}$  de l'équation proposée sont les fonctions de la forme :

$$g : x \mapsto \lambda e^{-ax} + e^{-ax} \int_0^x e^{at} f(t) dt, \lambda \in \mathbb{R}.$$

Dans ce cas, pour  $x \in \mathbb{R}$ ,  $g(x+T) = \lambda e^{-a(x+T)} + e^{-a(x+T)} \int_0^{x+T} e^{at} f(t) dt$ . Or,

$$\begin{aligned} \int_0^{x+T} e^{at} f(t) dt &= \int_0^x e^{at} f(t) dt + \int_x^{x+T} e^{at} f(t) dt = \int_0^x e^{at} f(t) dt + \int_0^T e^{a(u+T)} f(u+T) du \\ &= \int_0^x e^{at} f(t) dt + e^{aT} \int_0^T e^{au} f(u) du. \end{aligned}$$

Donc,

$$\begin{aligned} g(x+T) &= \lambda e^{-a(x+T)} + e^{-a(x+T)} \int_0^x e^{at} f(t) dt + e^{-ax} \int_0^T e^{au} f(u) du \\ &= \lambda e^{-a(x+T)} + e^{-a(x+T)} \int_0^T e^{at} f(t) dt + g(x) - \lambda e^{-ax}. \end{aligned}$$

Par suite,

$$\begin{aligned} g \text{ est } T\text{-périodique} &\Leftrightarrow \forall x \in \mathbb{R}, \lambda e^{-a(x+T)} + e^{-a(x+T)} \int_0^T e^{at} f(t) dt - \lambda e^{-ax} = 0 \\ &\Leftrightarrow \lambda(1 - e^{-aT}) = e^{-aT} \int_0^T e^{at} f(t) dt \Leftrightarrow \lambda = \frac{e^{-aT}}{1 - e^{-aT}} \int_0^T e^{at} f(t) dt \end{aligned}$$

( $e^{-aT} \neq 1$  car  $a \neq 0$  et  $T \neq 0$ ). D'où l'existence et l'unicité d'une solution  $T$ -périodique :

$$\forall x \in \mathbb{R}, g(x) = \frac{e^{-aT}}{1 - e^{-aT}} \int_0^T e^{at} f(t) dt e^{-ax} + e^{-ax} \int_0^x e^{at} f(t) dt.$$

---