



Équations différentielles linéaires

Sommaire

I	Systèmes différentiels linéaires d'ordre 1	2
I.1	Généralités	2
I.2	Systèmes homogènes à coefficients constants	3
I.3	Exponentielles de matrices (compléments)	4
II	“Equa diffs” linéaires scalaires d'ordre 1	6
II.1	Définitions	6
II.2	Solution générale de l'équation (E)	6
II.3	Méthode de variation de la constante	6
III	Equations différentielles linéaires scalaires d'ordre 2	7
III.1	Définitions	7
III.2	Réduction à un système linéaire d'ordre 1	7
III.3	Problème de Cauchy	7
III.4	Structure de l'ensemble des solutions. Wronskien	7
III.5	Méthode de variation des constantes	8
III.6	Cas où on connaît une solution de (H)	8
III.7	Utilisation de séries entières	9
III.8	Cas des équations à coefficients constants	9

I Systèmes différentiels linéaires d'ordre 1

NB : seuls les systèmes différentiels linéaires $X' = AX$, où A est une matrice constante de $\mathcal{M}_n(\mathbb{K})$, sont au programme de la classe PC. Tout le reste est en complément.

I.1 Généralités

Définition

Soient I un intervalle de \mathbb{R} , non vide ni réduit à un point, et n un entier naturel.

Soit $t \mapsto A(t)$ une application continue sur I , à valeurs dans $\mathcal{M}_n(\mathbb{K})$.

Soit $t \mapsto B(t)$ une application continue sur I à valeurs dans \mathbb{K}^n .

Soit $t \mapsto X(t)$ une application définie sur I à valeurs dans \mathbb{K}^n .

On dit que l'application X est solution sur I du système $(S) : X' = A(t)X + B(t)$, si :

- L'application X est dérivable sur I .
- Pour tout t de I , on a l'égalité $X'(t) = A(t)X(t) + B(t)$.

Remarques et définitions

- On dit que S est un système différentiel linéaire d'ordre 1.
- Le système $(H) : X' = A(t)X$ est appelé *système homogène* associé à (S) .
- Toute solution de (S) ou de (H) sur I est nécessairement de classe \mathcal{C}^1 sur I .

Définition (Problème de Cauchy)

Le problème de Cauchy consiste à chercher s'il existe une solution $t \mapsto X(t)$ de (S) prenant en un point donné t_0 de I une valeur donnée X_0 dans \mathbb{K}^n .

Proposition

Pour le système (S) , et donc pour le système (H) , le problème de Cauchy admet une solution unique, sur l'intervalle I tout entier.

Proposition (Structure de l'ensemble des solutions de (H))

L'ensemble \mathcal{S}_H des solutions de (H) sur I est un espace vectoriel de dimension n .

Proposition (Structure de l'ensemble des solutions de (S))

La solution générale de (S) s'obtient en ajoutant, à la solution générale de (H) , une solution particulière X_0 de (S) .

Conséquence

Si Z_1, Z_2, \dots, Z_n forment une base de \mathcal{S}_H la solution générale de (S) s'écrit donc :

$X : t \mapsto X_0(t) + \lambda_1 Z_1(t) + \lambda_2 Z_2(t) + \dots + \lambda_n Z_n(t)$, où $\lambda_1, \dots, \lambda_n$ sont des éléments de \mathbb{K} .

Proposition (Principe de superposition des solutions)

On suppose que le “second membre” $B(t)$ de (S) s'écrit $B(t) = \alpha_1 B_1(t) + \dots + \alpha_k B_k(t)$, où les applications B_1, \dots, B_k sont continues de I dans \mathbb{K}^n , et où les α_j sont dans \mathbb{K} .

On suppose en outre que les applications $X_j : I \subset \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{K}^n$ sont des solutions particulières du système $(S_j) : X' = A(t)X + B_j(t)$.

Alors l'application $X = \alpha_1 X_1 + \dots + \alpha_k X_k$ est une solution particulière de (S) sur I .

I.2 Systèmes homogènes à coefficients constants

Si l'application matricielle $t \mapsto A(t)$ est constante, on dit que le système différentiel homogène (H) est à coefficients constants.

Si on note $X(t) = (x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t))$, et si A est la matrice de terme général a_{ij} , alors le système homogène (H) s'écrit :

$$\forall t \in I, \begin{cases} x'_1(t) = a_{11} x_1(t) + a_{12} x_2(t) + \dots + a_{1j} x_j(t) + \dots + a_{1n} x_n(t) \\ x'_2(t) = a_{21} x_1(t) + a_{22} x_2(t) + \dots + a_{2j} x_j(t) + \dots + a_{2n} x_n(t) \\ \dots \quad \dots \quad \dots \quad \dots \\ x'_i(t) = a_{i1} x_1(t) + a_{i2} x_2(t) + \dots + a_{ij} x_j(t) + \dots + a_{in} x_n(t) \\ \dots \quad \dots \quad \dots \quad \dots \\ x'_n(t) = a_{n1} x_1(t) + a_{n2} x_2(t) + \dots + a_{nj} x_j(t) + \dots + a_{nn} x_n(t) \end{cases}$$

Utilisation de la réduction de la matrice

– Cas où la matrice du système est diagonalisable

Notons $\lambda_1, \dots, \lambda_n$ les valeurs propres de A , chacune comptée autant de fois que sa multiplicité.

Il existe donc une matrice diagonale D (de coefficients diagonaux $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$) et une matrice P de $\mathcal{GL}(n, \mathbb{K})$ telles que $D = P^{-1}AP$.

On effectue le changement de fonction inconnue défini par $X(t) = PY(t)$.

Le système (H) devient alors :

$$(H') : Y'(t) = P^{-1}X'(t) = P^{-1}AX(t) = P^{-1}APY(t) = DY(t)$$

La k -ème ligne (L'_k) de (H') s'écrit $y'_k(t) = \lambda_k y_k(t)$: c'est une équation différentielle scalaire d'ordre 1 dont la solution générale est $y_k(t) = \alpha_k \exp(\lambda_k t)$, avec α_k dans \mathbb{K} .

On trouve alors la solution générale de (H) en revenant à $X = PY$.

Si on note u_1, \dots, u_n les vecteurs colonnes de P (qui sont vecteurs propres de A pour les valeurs propres $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$), la solution générale de (H) s'écrit :

$$X(t) = \alpha_1 \exp(\lambda_1 t) u_1 + \alpha_2 \exp(\lambda_2 t) u_2 + \dots + \alpha_n \exp(\lambda_n t) u_n$$

où $(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n)$ est un élément quelconque de \mathbb{K}^n .

On voit bien que \mathcal{S}_H est un espace vectoriel de dimension n sur \mathbb{K} , et qu'une base de cet espace vectoriel est formée des applications $t \mapsto \varphi_k(t) = \exp(\lambda_k t) u_k$, où (u_1, \dots, u_n) est une base de \mathbb{K}^n formée de vecteurs propres de A , pour les valeurs propres $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$.

Remarque : Pour résoudre (H) , le calcul de P^{-1} n'est pas nécessaire.

– Diagonalisation dans \mathbb{C} , pour un système réel

On suppose ici que $\mathbb{K} = \mathbb{R}$. Si A est diagonalisable dans \mathbb{C} (sans l'être dans \mathbb{R}) on peut résoudre (S) en utilisant la diagonalisation de A dans \mathbb{C} .

Avec les notations précédentes, on range les valeurs propres de A pour que $\lambda_2 = \overline{\lambda_1}$, $\lambda_4 = \overline{\lambda_3}$, $\lambda_{2p} = \lambda_{2p-1}$ (valeurs propres non réelles), avec les vecteurs propres $u_2 = \overline{u_1}, \dots, u_{2p} = \overline{u_{2p-1}}$, puis $\lambda_{2p+1}, \dots, \lambda_n$ (valeurs propres réelles).

A partir de la base de \mathcal{S}_H formée des applications $t \mapsto \varphi_k(t) = \exp(\lambda_k t) u_k$ (pour $1 \leq k \leq n$) on construit une base de solutions réelles de (H) de la manière suivante :

Pour tout k de $\{1, \dots, p\}$, on remplace φ_{2k} et $\varphi_{2k-1} = \overline{\varphi_{2k}}$ par $\operatorname{Re}(\varphi_{2k})$ et par $\operatorname{Im}(\varphi_{2k})$.

Pour tout $k > p$, on conserve les applications φ_k car elles sont à valeurs réelles.

– Utilisation de la trigonalisation (complément)

On suppose $\mathbb{K} = \mathbb{R}$ ou \mathbb{C} . La matrice A est (au besoin dans \mathbb{C}) trigonalisable.

Il existe deux matrices, P inversible, et T triangulaire supérieure, (de coefficients diagonaux les valeurs propres $\lambda_1, \dots, \lambda_n$ de A) telles que $T = P^{-1}AP$.

Les systèmes (S) et (H) deviennent, en posant encore $X = PY$, et $C(t) = P^{-1}B(t)$:

(S') : $Y'(t) = TY(t) + P^{-1}B(t)$, et (H) : $Y'(t) = TY(t)$.

La n -ième ligne (L'_n) de (S') est : $y'_n(t) = \lambda_n y_n(t) + c_n(t)$.

La solution générale de (L'_n) s'écrit $y_n(t) = \alpha \exp(\lambda_n t) + \beta_n(t)$ (où α est dans \mathbb{K} et où β est une solution particulière de (L'_n)).

On résout alors progressivement (E') de la dernière équation à la première.

On obtient enfin la solution générale de (E) en revenant à $X = PY$.

Remarque : là encore, le calcul de P^{-1} est inutile pour résoudre (H) .

I.3 Exponentielles de matrices (compléments)

Définition

Soit A une matrice de $\mathcal{M}_n(\mathbb{K})$.

L'exponentielle de A est la limite, dans $\mathcal{M}_n(\mathbb{K})$, de la suite de terme général $S_N = \sum_{k=0}^N \frac{1}{k!} A^k$.

On note $\exp(A) = \sum_{k=0}^{+\infty} \frac{1}{k!} A^k$.

Remarques et propriétés

– Pour tout λ de \mathbb{K} , $\exp(\lambda I_n) = \exp(\lambda) I_n$. En particulier $\exp(0_n) = I_n$.

– Si A, B commutent dans $\mathcal{M}_n(\mathbb{K})$, alors $\exp(A + B) = \exp(A) \exp(B)$.

– En particulier, pour tout A de $\mathcal{M}_n(\mathbb{K})$, $\exp(A)$ est une matrice carrée inversible et $\exp(-A) = (\exp(A))^{-1}$.

$\forall A \in \mathcal{M}_n(\mathbb{K})$, $\exp(A) \in \mathcal{GL}(n, \mathbb{K})$, et $\exp(-A) = (\exp(A))^{-1}$.

– Si $A = \operatorname{diag}(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n)$, alors $\exp(A) = \operatorname{diag}(\exp(\lambda_1), \dots, \exp(\lambda_n))$.



- L'application $t \mapsto f(t) = \exp(tA)$ est dérivable, et $f'(t) = A \exp(tA) = \exp(tA)A$.
- Supposons que A s'écrive $A = D + N$, avec D diagonale, N strictement triangulaire, et telles que $ND = DN$. Une telle décomposition apparaît quand on trigonalise A .

Soit r un entier tel que $N^r = 0$.

$$\text{Alors } \exp(A) = \exp(D) \exp(N) = \exp(D) \sum_{k=0}^{r-1} \frac{N^k}{k!}.$$

Utilisation de $\exp(tA)$ dans la résolution de (H)

Soit A une matrice de $\mathcal{M}_n(\mathbb{K})$. On considère le système linéaire $(H) : X'(t) = AX(t)$.

Soit t_0 un réel, et X_0 un élément de \mathbb{R}^n .

L'unique solution de (H) qui vaut X_0 au point t_0 est : $t \mapsto X(t) = \exp((t - t_0)A)X_0$.



II “Equa diffs” linéaires scalaires d’ordre 1

II.1 Définitions

Soit I un intervalle de \mathbb{R} , non réduit à un point.

Soient a et b deux fonctions continues sur I , à valeurs dans $\mathbb{K} = \mathbb{R}$ ou \mathbb{C} .

On dit que $x : I \rightarrow \mathbb{K}$ est solution de l’équation différentielle linéaire scalaire d’ordre 1

$$(E) : x' = a(t)x + b(t)$$

si l’application x est dérivable sur I et si, pour tout t de I , on a : $x'(t) = a(t)x(t) + b(t)$.

L’équation $(H) : x' = a(t)x$ est appelée équation linéaire homogène associée.

Le cas d’une équation différentielle $a(t)x' + b(t)x + c(t) = 0$ se ramène au cas précédent, si on se place sur un intervalle sur lequel la fonction a ne s’annule pas.

II.2 Solution générale de l’équation (E)

- Le problème de Cauchy pour (E) admet une solution unique sur I .
Autrement dit il existe une solution unique $t \mapsto x(t)$ sur I telle que $x(t_0) = x_0$, avec t_0 donné dans I et x_0 donné dans \mathbb{K} .
- La solution générale de l’équation (E) s’écrit comme la somme d’une solution particulière de (E) et de la solution générale de l’équation homogène (H) .
- L’ensemble des solutions de (H) est une droite vectorielle qui est engendrée par l’application $t \mapsto \exp(A(t))$, où $t \mapsto A(t)$ est une primitive quelconque de $t \mapsto a(t)$.
- L’unique solution de (H) qui vaut x_0 en t_0 est $x(t) = x_0 \exp \int_{t_0}^t a(t) dt$.
- Quand l’équation homogène est écrite sous la forme $a(t)x' + b(t)x = 0$, et à condition de se placer sur un intervalle sur lequel $t \mapsto a(t)$ ne s’annule pas, alors la solution générale de (H) est $x \mapsto \lambda \exp A(t)$, où A est une primitive de $-\frac{b}{a}$ et où λ est un élément quelconque de \mathbb{K} .

II.3 Méthode de variation de la constante

- Soit $t \mapsto h(t)$ une solution non nulle de l’équation (H) .
Rappelons qu’une telle solution ne s’annule en aucun point de I (problème de Cauchy).
- On cherche des solutions de (E) sous la forme $t \mapsto x(t) = \lambda(t)h(t)$, où λ est dérivable.
Dire qu’une telle fonction x est solution de (E) sur I équivaut à : $\forall t \in I, \lambda'(t)h(t) = b(t)$.
- Si $t \mapsto \mu(t)$ est une primitive de l’application $t \mapsto \frac{b(t)}{h(t)}$, on en déduit $\lambda(t) = \mu(t) + \alpha$.
On trouve des solutions de (E) sur I en écrivant : $x(t) = (\mu(t) + \alpha)h(t) = \mu(t)h(t) + \alpha h(t)$.
- Dans cette écriture, μh est une solution particulière de (E) , correspondant au cas $\alpha = 0$, et αh est la solution générale de (H) . On obtient donc ainsi toutes les solutions de (E) sur I .



III Equations différentielles linéaires scalaires d'ordre 2

III.1 Définitions

- Soit I un intervalle de \mathbb{R} .
Soient a, b, c trois applications continues sur I à valeurs dans $\mathbb{K} = \mathbb{R}$ ou \mathbb{C} .
On note $x : t \mapsto x(t)$ la fonction inconnue, à valeurs dans \mathbb{K} .
- On considère ici les équations :
(E) : $x''(t) + a(t)x'(t) + b(t)x(t) = c(t)$, et (H) : $x''(t) + a(t)x'(t) + b(t)x(t) = 0$.
(E) est appelée une équation différentielle linéaire scalaire d'ordre 2.
On dit que (H) est l'équation linéaire homogène associée à (E).
- Les solutions de (E) et (H) sont nécessairement de classe \mathcal{C}^2 sur I .

III.2 Réduction à un système linéaire d'ordre 1

- Soit $t \mapsto x(t)$ une application définie sur I , de classe \mathcal{C}^1 , à valeurs dans \mathbb{K} .
On lui associe l'application $t \mapsto X(t) = \begin{pmatrix} x(t) \\ x'(t) \end{pmatrix}$.
- Alors l'équation (E) équivaut au système :

$$(S) : \begin{pmatrix} x(t) \\ x'(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -b(t) & -a(t) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x(t) \\ x'(t) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ c(t) \end{pmatrix}$$

qui est du type $X'(t) = AX(t) + B(t)$.

De même l'équation (H) équivaut au système homogène (S_H) : $X'(t) = AX(t)$.

III.3 Problème de Cauchy

Proposition

- || Soit (t_0, x_0, m) un triplet quelconque de $I \times \mathbb{K}$.
- || L'équation (E) possède une solution et une seule qui vérifie $x(t_0) = x_0$ et $x'(t_0) = m$.
- || L'intervalle de définition de cette solution est I tout entier.

Interprétation

Si $\mathbb{K} = \mathbb{R}$, il existe donc une unique "courbe intégrale" qui passe par le point (x_0, y_0) avec une tangente de coefficient directeur m , et cette courbe intégrale est "définie" sur tout I .

III.4 Structure de l'ensemble des solutions. Wronskien

Proposition

- || Pour tout t_0 de I , l'application $h \mapsto (h(t_0), h'(t_0))$ est un isomorphisme de $\mathcal{S}(H)$ sur \mathbb{K}^2 .
- || L'ensemble des solutions de (H) est donc un plan vectoriel, inclus dans $\mathcal{C}^2(I, \mathbb{K})$.

Définition

Soient h et k deux solutions de (H) .

Le *wronskien* de h et k est l'application W définie sur I par : $\forall t \in I, W(t) = \begin{vmatrix} h(t) & k(t) \\ h'(t) & k'(t) \end{vmatrix}$.

Proposition

Deux solutions h, k de (H) forment une base de $\mathcal{S}(H)$ si et seulement si leur wronskien $W(t)$ est non nul en un point : il est alors non nul en tout point.

Remarques

- Comme d'habitude, la solution générale de l'équation (E) s'obtient en ajoutant la solution générale de (H) à une solution particulière de (E) .
- Si h, k est une base de solutions de (H) , et si y_0 est une solution particulière de (E) , la solution générale de (E) s'écrit donc : $y(t) \equiv y_0(t) + \lambda h(t) + \mu k(t)$.

III.5 Méthode de variation des constantes

Proposition

Soit h, k une base de solutions de l'équation homogène (H) .

Soit f une application de classe \mathcal{C}^2 sur I , à valeurs dans \mathbb{K} .

Alors il existe un unique couple (λ, μ) d'applications de classe \mathcal{C}^1 tel que :

$$\forall t \in I, \begin{pmatrix} f(t) \\ f'(t) \end{pmatrix} = \lambda(t) \begin{pmatrix} h(t) \\ h'(t) \end{pmatrix} + \mu(t) \begin{pmatrix} k(t) \\ k'(t) \end{pmatrix}.$$

Le couple (λ, μ) vérifie : $\forall t \in I, \lambda'(t)h(t) + \mu'(t)k(t) = 0$.

- La méthode de variation des constantes consiste à chercher la solution générale $x(t)$ de (E) , à partir d'un système fondamental h, k de solutions de (H) , en cherchant $x(t)$ sous la forme suivante : $\forall t \in I, x(t) = \lambda(t)h(t) + \mu(t)k(t)$,
et avec la condition supplémentaire : $\forall t \in I, \lambda'(t)h(t) + \mu'(t)k(t) = 0$.
- Quand on exprime qu'une telle fonction x est solution de (E) , on est conduit au système :

$$\forall t \in I, \begin{cases} \lambda'(t)h'(t) + \mu'(t)k'(t) = c(t) \\ \lambda'(t)h(t) + \mu'(t)k(t) = 0 \end{cases}$$
- Pour tout t de I , ce système possède une solution unique $(\lambda'(t), \mu'(t))$.
Il ne reste plus qu'à primitiver $\lambda'(t)$ et $\mu'(t)$, pour obtenir la solution générale de (E) .

III.6 Cas où on connaît une solution de (H)

- Il n'y a pas de méthode générale permettant de trouver une base de solutions de (H) (sauf cas particulier). Mais supposons connue une solution h de (H) , ne s'annulant pas sur un sous-intervalle J de I .
On peut alors chercher les solutions $t \mapsto x(t)$ de (E) sur J , en effectuant le changement de fonction inconnue définie par : $x(t) = h(t)y(t)$.



- Avec ces notations, la fonction x est solution de (E) sur l'intervalle J si et seulement si, pour tout t de J :

$$y''(t) + \left(2\frac{h'(t)}{h(t)} + a(t)\right) y'(t) = \frac{c(t)}{h(t)}$$

Le changement $z = y'(t)$ ramène alors à une équation différentielle linéaire d'ordre 1.

III.7 Utilisation de séries entières

- Dans certains cas, on cherche une solution de (E) (ou de (H)) qui soit développable en série entière au voisinage de l'origine.
- Pour que cela soit possible, il faut que les coefficients $a(t), b(t), c(t)$ de l'équation soient eux-mêmes développables en série entière.
Un cas fréquent est celui où $a(t), b(t), c(t)$ sont des polynômes.
- On injecte alors dans (E) le développement de $x(t)$, dont on suppose à priori que le rayon de convergence R est strictement positif, les coefficients a_n étant indéterminés.
On regroupe les termes par degrés, et on identifie.
Cette identification permet de le plus souvent de trouver des relations de récurrence entre les coefficients a_n et de les calculer (éventuellement en fonction d'un ou de deux d'entre eux, par exemple a_0 ou a_1 , qui resteraient alors indéterminés).
On vérifie enfin que le rayon de convergence est strictement positif.
- Si possible, on exprime cette série entière à l'aide de fonctions élémentaires.

III.8 Cas des équations à coefficients constants

Soient a et b deux éléments de \mathbb{K} .

Soit $t \mapsto c(t)$ une application continue, de I dans \mathbb{K} .

On considère ici les équations différentielles $\begin{cases} (E) : x'' + ax' + bx = c(t) \\ (H) : x'' + ax' + bx = 0 \end{cases}$

Le système linéaire associé à (E) s'écrit

$$(S) \quad \begin{pmatrix} x(t) \\ x'(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -b & -a \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x(t) \\ x'(t) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ c(t) \end{pmatrix}$$

Le polynôme caractéristique de la matrice de ce système est : $\chi = \det(A - \lambda I_2) = \lambda^2 + a\lambda + b$.

L'équation $(C) : a\lambda^2 + b\lambda + c = 0$ est appelée *équation caractéristique* de (E) et de (H) .

Résolution de (H)

- **Résolution de (H) si $\mathbb{K} = \mathbb{C}$**

Notons $\Delta = a^2 - 4b$ le discriminant de (C) .

- ◇ Si $\Delta \neq 0$: (C) a deux solutions distinctes λ_1 et λ_2 .

Une base de solutions de (H) est $t \mapsto \exp(\lambda_1 t)$, $t \mapsto \exp(\lambda_2 t)$.

- ◇ Si $\Delta = 0$: (C) a une solution double λ .

Une base de solutions de (H) est : $t \mapsto \exp(\lambda t)$ et $t \mapsto t \exp(\lambda t)$.



– **Résolution de (H) si $\mathbb{K} = \mathbb{R}$**

- ◇ Si $\Delta = 0$ voir ci-dessus.
- ◇ Si $\Delta > 0$ voir le cas $\Delta \neq 0$ ci-dessus.
- ◇ Si $\Delta < 0$: (C) a deux solutions non réelles $\lambda_1 = \alpha + i\beta$ et $\lambda_2 = \overline{\lambda_1}$ (avec $\alpha, \beta \in \mathbb{R}$).
Une base de solutions de (H) est : $t \mapsto \exp(\alpha t) \cos(\beta t)$, et $t \mapsto \exp(\alpha t) \sin(\beta t)$.

– **Cas d'un second membre du type $\exp(\alpha t)P(t)$**

Soient α un élément de \mathbb{K} , et P est un polynôme à coefficients dans \mathbb{K} .

On considère l'équation (E) : $x'' + ax' + bx = \exp(\alpha t)P(t)$,

- ◇ Si α n'est pas racine de l'équation caractéristique (C) :
(E) a une unique solution $\exp(\alpha t)Q(t)$, où Q est un polynôme de même degré que P .
- ◇ Si α est racine simple de l'équation caractéristique (C) :
(E) a une unique solution $\exp(\alpha t)tQ(t)$, où Q est un polynôme de même degré que P .
- ◇ Si α est racine double de l'équation caractéristique (C) :
(E) a une unique solution $\exp(\alpha t)t^2Q(t)$ où Q est un polynôme de même degré que P .