

Apéritif

Soit f continue et positive sur $[1, +\infty[$ telle qu'il existe $a, b > 0$ telles que, pour tout $x \geq 1$, on a $f(x) \leq a + b \int_1^x \frac{f(t)}{t^2} dt$. Montrer que f est bornée.

Re-apéritif

On cherche des solutions à variables séparées en coordonnées sphériques pour l'équation de Laplace $\Delta u = 0$, plus précisément sous la forme $u(r, \theta, \varphi) = r^k a(\theta) b(\varphi)$. On rappelle que le laplacien en sphérique s'écrit : $\Delta u = \frac{1}{r^2} \partial_r(r^2 \partial_r u) + \frac{1}{r^2} \frac{1}{\sin \theta} \partial_\theta(\sin \theta \partial_\theta u) + \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \partial_\varphi^2 u$.

Montrer que b''/b est une constante C et en posant $z = \cos \theta$ et $w(z) = a(\theta)$, montrer que si $C = 0$, alors w vérifie l'équation de Legendre

$$(1 - z^2) w''(z) - 2z w'(z) + k(k + 1) w(z) = 0.$$

I. Stabilité, Introduction

Soit Ω un ouvert de $\mathbb{R} \times \mathbb{R}^N$ et $f : \Omega \rightarrow \mathbb{R}^N$. On s'intéresse à l'équation différentielle

$$x' = f(t, x), \quad (t, x) \in \Omega, t \in \mathbb{R}, x \in \mathbb{R}^N, \quad (\mathcal{E})$$

pour laquelle on suppose que l'on a existence et unicité pour le problème de Cauchy.

On note $x_{t_0, x_0}(t)$ la solution de (\mathcal{E}) telle que $x(t_0) = x_0$.

Définition 1, Stabilité : La solution $x_{t_0, x_0}(t)$ est dite stable (à droite) si

- i) $\exists \alpha > 0$ tel que $\forall x_1 \in U$ tel que $\|x_0 - x_1\| \leq \alpha$, la solution $x_{t_0, x_1}(t)$ est définie pour tout $t \geq t_0$,
- ii) $\forall \varepsilon > 0, \exists 0 < \eta < \alpha$ tel que $\forall x_1 \in U, \|x_0 - x_1\| \leq \eta \Rightarrow \|x_{t_0, x_0}(t) - x_{t_0, x_1}(t)\| \leq \varepsilon, \forall t \geq t_0$.

Définition 2, Stabilité asymptotique : La solution $x_{t_0, x_0}(t)$ est dite asymptotiquement stable (à droite) si elle est stable et si $\exists \delta > 0$ tel que $x_{t_0, x_0}(t) - x_{t_0, x_1}(t) \xrightarrow[t \rightarrow +\infty]{} 0$ pour tout $x_1 \in U$ tel que $\|x_0 - x_1\| \leq \delta$.

Exercice 3 (A propos des définitions)

- 1) Illustrer graphiquement les deux notions qui viennent d'être introduites, ainsi que l'instabilité.
- 2) Que peut-on dire des solutions de l'équation $x' = x$, puis de $x' = -x$.

II. Stabilité, Cas des équations linéaires

On s'intéresse plus précisément ici au cas de $x' = A(t)x$, équation notée (\mathcal{L}) , où $A \in C(I, \mathcal{L}(\mathbb{C}^N))$. On a alors toujours l'existence globale et l'unicité et donc le *i*) de la définition de la stabilité est toujours vérifiée.

Dans le cas $A(t) = A$, on a le résultat suivant :

Théorème 1 : Notant λ_j les valeurs propres de A . Alors les solutions de $x' = Ax$ sont

- a) asymptotiquement stables si et seulement si $\operatorname{Re} \lambda_j < 0$ pour tout j ,
- a) stables si et seulement si ($\operatorname{Re} \lambda_j < 0$ ou ($\operatorname{Re} \lambda_j = 0$ et le bloc correspondant est diagonalisable)) pour tout j .

Exercice 4 (Stabilité dans les cas linéaire)

Soit $\Phi(t)$ une matrice fondamentale pour (\mathcal{L}) .

1) On suppose que x_{t_0, x_0} est une solution stable pour (\mathcal{L}) .

a) En écrivant la définition de la stabilité, quelle propriété obtient-on sur Φ ?

b) En déduire que toute solution de (\mathcal{L}) est stable.

2) Montrer que si x_{t_0, x_0} est asymptotiquement stable pour (\mathcal{L}) , alors toutes les solutions de (\mathcal{L}) sont asymptotiquement stables.

3) Montrer que toutes les solutions de (\mathcal{L}) sont stables si et seulement si toutes les solutions de (\mathcal{L}) sont bornées (à droite).

4) Que peut-on dire sous cet aspect de l'équation $x' = 1$?

Exercice 5 (Cas constant, preuve du théorème)

1) Traiter tout d'abord le cas $N = 1$.

2) Traiter le cas où A est diagonalisable.

3) Traiter le cas où $A = \begin{pmatrix} \lambda & * & * \\ 0 & \ddots & * \\ 0 & 0 & \lambda \end{pmatrix} = \lambda I + N$. Ensuite, conclure dans le cas général.

Exercice 6 (Equation linéaire perturbée par rapport à un état stable)

Soit $(\mathcal{L}_1) : x' = Ax$, et $(\mathcal{L}_2) : x' = (A + C(t))x$ avec $A \in \mathcal{L}(\mathbb{C}^N)$ et $C \in C([0, +\infty[, \mathcal{L}(\mathbb{C}^N))$.

1) On veut tout d'abord prouver le résultat :

Proposition 1 : On suppose que la solution nulle est asymptotiquement stable pour (\mathcal{L}_1) , alors il existe $C > 0$ tel que si $\|C(t)\| \leq C$ pour tout $t \geq 0$, alors la solution nulle est asymptotiquement stable pour (\mathcal{L}_2) .

a) Ecrire la solution $x_{0, x_0}(t)$ de (\mathcal{L}_2) sous forme intégrale.

b) Pourquoi existe-t'il $a > 0$ tel que $\|e^{At}\| \leq C_1 e^{-at}$ pour tout $t \geq 0$?

c) Posant $u(t) = \|x_{0, x_0}(t)\| e^{at}$, montrer que $u(t) \leq C_1 \|x_0\| + C_1 C \int_0^t u(s) ds$ et conclure.

2) On veut maintenant prouver le résultat :

Proposition 2 : On suppose que la solution nulle est stable pour (\mathcal{L}_1) , et que $\int_0^{+\infty} \|C(t)\| dt \leq +\infty$, alors la solution nulle est stable pour (\mathcal{L}_2) .

a) Pourquoi existe-t'il $M > 0$ tel que $\|e^{At}\| \leq M$ pour tout $t \geq 0$?

b) Posant $u(t) = \|x_{0, x_0}(t)\|$, montrer que $u(t) \leq M \|x_0\| + M \int_0^t \|C(s)\| u(s) ds$ et conclure.

Exercice 7 (Equation quasi-linéaire)

Soit $(\mathcal{QL}) : x' = A(t)x + g(t, x)$ avec $A \in C([0, +\infty[, \mathcal{L}(\mathbb{C}^N))$, g continue sur $\mathbb{R} \times U$ où U est un ouvert de \mathbb{R}^N contenant 0 et $g(t, 0) = 0$ pour tout $t \geq 0$.

1) Montrer que toute solution de (\mathcal{QL}) est solution de l'équation intégrale $x(t) = \Phi(t)x_0 + \int_0^t \Phi(t)\Phi^{-1}(s)g(s, x(s)) ds$ où Φ est une matrice fondamentale pour (\mathcal{L}) .

2) On veut prouver le résultat :

Proposition 3 : On suppose que la solution nulle est stable pour (\mathcal{L}) , que $\|g(t, x)\| \leq C(t)\|x\|$ pour tout $t \geq 0$, $x \in U$ avec C continue, positive et telle que $\int_0^{+\infty} C(t) dt < +\infty$. Alors la solution $x_{0, x_0}(t)$ existe pour $t \geq 0$ et la solution nulle est stable pour (\mathcal{QL}) .

Remarque : l'existence globale n'est plus assurée car on n'a plus affaire à une équation linéaire, il faut donc la prouver.

a) On choisit Φ matrice fondamentale pour (\mathcal{L}) telle que $\Phi(0) = I$. Montrer qu'il existe $M_1 > 0$ et $M_2 > 0$ telle que $\|\Phi(t)\| \leq M_1$ et $\|\Phi(t)\Phi^{-1}(0)\| \leq M_2$ pour tout $t \geq 0$.

b) Montrer que la solution $x_{0,x_0}(t)$ de (\mathcal{QL}) est bornée et se prolonge sur \mathbb{R}^+ .

c) Conclure.

Exercice 8 (Stabilité sur des exemples)

1) La solution $x = 0$ est-elle asymptotiquement stable pour le système

$$x' = \begin{pmatrix} -2 & 0 & -1 \\ -1 & -1 & -1 \\ 2 & 0 & 1 \end{pmatrix} x.$$

2) La solution $x = 0$ est-elle stable pour le système

$$x' = \begin{pmatrix} -2 + e^{-t} & -2 \\ 2 & 1 + e^{-3t} \end{pmatrix} x.$$

III. Stabilité, Fonctions de Lyapounov

On s'intéresse à nouveau à l'équation (\mathcal{E}) et on suppose que $x = 0$ est solution, c'est-à-dire que $f(t, 0) = 0$ pour tout $t \geq t_0$.

On suppose que $f : \Omega \rightarrow \mathbb{R}^N$, avec $[t_0, +\infty[\times \overline{B_R(0)} \subset \Omega$, est continue et que l'on a unicité pour le problème de Cauchy.

On pose $S = \{(t, x) \in \mathbb{R}^{N+1}; t \geq T, \|x\| \leq r\}$ pour $T \geq t_0$ et $0 < r < R$.

Définition 3, Fonction de Lyapounov : Il s'agit d'une fonction $V : U \rightarrow \mathbb{R}$, avec U ouvert et $S \subset U$, de classe C^1 sur S et telle que $V(t, 0) = 0$ pour tout $t \geq T$.

Définition 4, Semi-définie : Soit $V(t, x)$ une fonction de Lyapounov. On dit que $V(t, x)$ est semi-définie positive (respectivement négative) si $V(t, x) \geq 0$ pour tout $(t, x) \in S$ (respectivement ≤ 0).

Définition 5, Définie : Soit $V(t, x)$ une fonction de Lyapounov. On dit que $V(t, x)$ est définie positive (respectivement négative) s'il existe une forme quadratique $W(x)$ définie positive (respectivement négative) telle que $V(t, x) \geq W(x)$ pour tout $(t, x) \in S$ (respectivement $\leq W(x)$).

Définition 6, Borne supérieure infinitésimale : Soit $V(t, x)$ une fonction de Lyapounov. On dit que $V(t, x)$ a une borne supérieure infinitésimale si V est bornée et si $\forall \varepsilon > 0, \exists \beta > 0$ tel que $\forall t \geq T, \forall x, \|x\| \leq \beta, \text{ on a } |V(t, x)| \leq \varepsilon$ (continuité en $x = 0$ uniforme par rapport à t).

$$\text{On note } DV(t, x) = \frac{\partial V}{\partial t} + \sum_{n=1}^N \frac{\partial V}{\partial x_n} f_n(t, x).$$

Proposition 4 : On suppose qu'il existe une fonction de Lyapounov V définie positive telle que DV soit semi-définie négative. Alors la solution nulle est stable pour (\mathcal{E}) .

Proposition 5 : On suppose qu'il existe une fonction de Lyapounov V définie positive, ayant une borne supérieure infinitésimale et telle que DV soit définie négative. Alors la solution nulle est asymptotiquement stable pour (\mathcal{E}) .

Exercice 9 (A propos des définitions)

1) Etudier la fonction $V(t, x_1, x_2) = t(x_1^2 + x_2^2) - 2x_1x_2$ avec $T = 2$ et r quelconque du point de vue des définitions 4 et 5.

2) Etudier $V(t, x) = (x_1 + \dots + x_n) \sin t$ du point de vue de la définition 6.

3) Quel lien a-t-on entre DV et $V(t, x(t))$?

Exercice 10 (Théorème de stabilité via Lyapounov)

On cherche à prouver la proposition 4. Il existe donc $W(x)$ définie positive telle que $V(t, x) \geq W(x)$ sur S . Soit $x_0 \in \mathbb{R}^N$ tel que $\|x_0\| \leq r$. La solution $x_{T, x_0}(t)$ est définie sur un intervalle maximal $[T, t_{max}[$.

1) On suppose que $t_{max} < +\infty$.

a) Montrer que $V(t, x_{T, x_0}(t)) \leq V(T, x_0)$ pour $T \leq t \leq t_{max}$.

b) Soit $0 < \varepsilon < r$ et $\mu = \min_{\varepsilon \leq \|x\| \leq r} W(x) > 0$. Ecrire la définition de la continuité de $V(T, x)$ au voisinage de $x = 0$ pour obtenir $\|x_{T, x_0}(t)\| < \varepsilon$ pour tout $t \in [T, t_{max}[$.

2) Conclure.

Exercice 11 (Pendule sans frottement)

Soit l'équation $x'' + \sin x = 0$.

1) En posant $y = x'$ et $X = \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}$, mettre l'équation sous la forme $X' = f(X)$.

2) En cherchant une intégrale première (quantité conservée par les solutions) pour l'équation, obtenir $V(x, y) = \frac{1}{2}y^2 - \cos x + 1$.

3) Etudier la stabilité de $x = 0$ à l'aide de cette fonction de Lyapounov.

Exercice 12 (Théorème de stabilité asymptotique via Lyapounov)

On cherche à prouver la proposition 5. Il existe $W_1(x)$ et $W_2(x)$ définie positive telles que $V(t, x) \geq W_1(x)$ et $-DV(t, x) \leq W_2(x)$ sur S . On sait déjà que $x = 0$ est stable.

Supposons la propriété (*) suivante : $\exists \alpha > 0$ tel que $\forall t \geq T$, si $\|x_{T, x_0}(t)\| \leq r$, alors $V(t, x_{T, x_0}(t)) \leq \alpha$.

1) En utilisant la définition de la borne supérieure infinitésimale montrer l'existence d'un $\beta > 0$ tel que $\|x_{T, x_0}(t)\| > \beta$.

2) On pose $\mu = \min_{\beta \leq \|x\| \leq r} W_2(x) > 0$. Montrer que $V(t, x_{T, x_0}(t)) \leq V(T, x_0) - \mu(t - T)$ pour $t \geq T$. En déduire que (*) est fausse.

3) En déduire que $W(x_{T, x_0}(t)) \xrightarrow{t \rightarrow +\infty} 0$ et conclure.

4) Montrer que la solution nulle de $x' = x(y^2 - 1)$, $y' = y(x^2 - 1)$ est asymptotiquement stable.