

# Polycopié Complet de Calcul Différentiel L3 MIDO

Cours de Borris - Compilé par Gemini

13 novembre 2025

## Table des matières

<b>I Théorème d’Inversion Locale</b>	<b>2</b>
<b>1 Théorème d’inversion locale</b>	<b>2</b>
<b>2 Théorème de Hadamard</b>	<b>5</b>
<b>II Géométrie Différentielle</b>	<b>6</b>
<b>3 Un peu de géométrie différentielle</b>	<b>6</b>
<b>III Équations Différentielles</b>	<b>9</b>
<b>4 Équations Différentielles</b>	<b>9</b>
4.1 Introduction et Problème de Cauchy simple . . . . .	9
4.1.1 Problème de l’Unicité et Problème de Cauchy . . . . .	10
4.2 Équation différentielle du premier ordre . . . . .	10
4.3 Régularité des Solutions . . . . .	11
4.4 Théorèmes d’Existence et d’Unicité . . . . .	11
4.5 Corollaire de Cauchy-Lipschitz (Non-croisement) . . . . .	13
4.6 Convergence vers la frontière et sortie des compacts . . . . .	15
4.7 Caractérisation des solutions maximales . . . . .	16
4.8 Caractérisation des solutions maximales (Suite) . . . . .	18
4.9 Cauchy-Lipschitz (Cadre général) . . . . .	21
4.10 Preuve du Théorème de Cauchy-Lipschitz (Existence locale) . . . . .	22

# Première partie

## Théorème d'Inversion Locale

### 1 Théorème d'inversion locale

#### Définition 1: C<sup>1</sup>-difféomorphisme

Soient  $U$  un ouvert de  $E$ ,  $V$  un ouvert de  $F$ . On dit que  $f : U \rightarrow V$  est un  $\mathcal{C}^1$ -difféomorphisme lorsque :

- $f$  bijective
- $f \in \mathcal{C}^1$  et  $f^{-1} \in \mathcal{C}^1$

#### Remarque

La notion de difféomorphisme induit l'utilisation d'ouverts (naturel si on veut vérifier que l'application est différentiable).

Si  $f$  est un  $\mathcal{C}^1$ -difféomorphisme de  $U$  sur  $V$  :

$$\forall x \in U, f^{-1}(f(x)) = x \quad \text{et} \quad \forall y \in V, f(f^{-1}(y)) = y$$

Par dérivation en chaîne :

$$df^{-1}(f(x)) \circ df(x) = id_E \quad \text{et} \quad df(f^{-1}(y)) \circ df^{-1}(y) = id_F$$

$df(x)$  et  $df^{-1}(y)$  sont donc des applications linéaires inversibles, avec  $df(x) \in \mathcal{L}(E, F)$  et  $df^{-1}(y) \in \mathcal{L}(F, E)$ .

$$(df(x))^{-1} = df^{-1}(y) = df^{-1}(f(x)) \\ \implies \dim E = \dim F.$$

#### Théorème 1: Théorème d'inversion locale

Soient  $U$  un ouvert de  $E$ ,  $f : U \rightarrow F$  une application de classe  $\mathcal{C}^1$ . Supposons qu'il existe  $x_0 \in U$  tel que  $df(x_0)$  est inversible.

Alors il existe un ouvert  $U'$  de  $x_0$  ( $U' \subset U$ ) et  $V'$  un ouvert de  $y_0 = f(x_0)$  tels que  $f$  est un  $\mathcal{C}^1$ -difféomorphisme de  $U'$  sur  $V'$ .

De plus,  $\forall y \in V', df^{-1}(y) = [df(f^{-1}(y))]^{-1}$ .

*Démonstration.* On pose  $\Phi : U \times F \rightarrow F$

$$(x, y) \mapsto y - f(x)$$

$\Phi$  est une application de classe  $\mathcal{C}^1$  car  $f$  est de classe  $\mathcal{C}^1$ .

Calculons la différentielle partielle de  $\Phi$  par rapport à  $x$  au point  $(x_0, y_0)$  :

$$d\Phi_x(x_0, y_0) : E \rightarrow F$$

$$v \mapsto d\Phi_x(x_0, y_0)(v) = -df(x_0)(v)$$

On a  $d\Phi_x(x_0, y_0) = -df(x_0)$ .

C'est bien une application inversible (par hypothèse sur  $df(x_0)$ ). On peut donc appliquer le Théorème des Fonctions Implicites.

Vérifions le point de base :  $\Phi(x_0, y_0) = y_0 - f(x_0) = 0$  (car  $f(x_0) = y_0$ ).

Ainsi, il existe :

- $U_1$  un ouvert de  $x_0$  dans  $E$  (que nous nommerons  $U'$ )
- $V_1$  un ouvert de  $y_0$  dans  $F$  (que nous nommerons  $V'$ )
- $\varphi : V' \rightarrow U'$  une application de classe  $\mathcal{C}^1$

telle que :

$$\forall y \in V', \exists ! x \in U' \text{ tq. } \Phi(x, y) = 0, \text{ et cet } x \text{ est } x = \varphi(y)$$

Or,  $\Phi(x, y) = 0 \iff f(x) = y$ .

On a donc  $f(x) = y \iff x = \varphi(y)$ . Ceci signifie que  $f$  est bijective de  $U'$  sur  $V'$ , et que son application inverse  $f^{-1}$  est  $\varphi$ .

On a  $f^{-1} = \varphi$ , et on sait que  $\varphi$  est de classe  $\mathcal{C}^1$ .

Donc  $f : U' \rightarrow V'$  est un  $\mathcal{C}^1$ -difféomorphisme de  $U'$  sur  $V'$ . □

### Définition 2: Difféomorphisme local

Une application  $f : \Omega \rightarrow \mathbb{R}^n$  (avec  $\Omega$  un ouvert de  $\mathbb{R}^n$ ) de classe  $\mathcal{C}^1$  est un  $\mathcal{C}^1$ -difféomorphisme local si :

$\forall x \in \Omega$ , il existe  $U_x$  un voisinage ouvert de  $x$  et  $V_x$  un voisinage ouvert de  $f(x)$  tq  $f : U_x \rightarrow V_x$  est un  $\mathcal{C}^1$ -difféomorphisme.

### Proposition 1: Caractérisation Difféomorphisme local

$f : \Omega \rightarrow \mathbb{R}^n$  de classe  $\mathcal{C}^1$  est un  $\mathcal{C}^1$ -difféomorphisme local si et seulement si  $\forall x \in \Omega$ ,  $df(x) \in \mathcal{L}(\mathbb{R}^n, \mathbb{R}^n)$  est inversible.

*Démonstration.* ( $\Rightarrow$ ) Si  $f$  est un  $\mathcal{C}^1$ -diff. local.  $\forall x \in \Omega$ ,  $\exists U_x, V_x$  ouverts tq  $f : U_x \rightarrow V_x$  est un  $\mathcal{C}^1$ -diff. Donc  $f^{-1}(f(x)) = x$  et  $df^{-1}(f(x)) \circ df(x) = id_{\mathbb{R}^n}$ . Donc  $df(x)$  est inversible.

( $\Leftarrow$ )  $\forall x \in \mathbb{R}^n$ ,  $df(x)$  est inversible. D'après le Th. d'Inversion Locale,  $\forall x$ ,  $\exists U_x$  (voisinage de  $x$ ) et  $V_x$  (voisinage de  $f(x)$ ) tq  $f : U_x \rightarrow V_x$  est un  $\mathcal{C}^1$ -diff. C'est la définition d'un  $\mathcal{C}^1$ -difféomorphisme local. □

### Corollaire 1: Application ouverte

Soit  $f : \Omega \rightarrow \mathbb{R}^n$  un  $\mathcal{C}^1$ -difféomorphisme local. L'application  $f$  est ouverte :

Si  $U$  est un ouvert de  $\mathbb{R}^n$  (avec  $U \subset \Omega$ ), alors  $f(U)$  est un ouvert.

*Démonstration.* Soit  $y \in f(U)$ . Il existe  $x \in U$  tq  $y = f(x)$ . Comme  $f$  est un  $\mathcal{C}^1$ -diff. local,  $df(x)$  est inversible. Donc il existe par le Th. d'Inversion Locale un voisinage de  $x$ ,  $U_x$ , et un voisinage de  $f(x)$ ,  $V_x$ , tq  $f : U_x \rightarrow V_x$  est un  $\mathcal{C}^1$ -diff.

On choisit  $U_x$  assez petit pour que  $U_x \subset U$ . On en déduit que  $f(U_x) = V_x$ . On a  $y = f(x) \in V_x$  (qui est ouvert) et  $V_x = f(U_x) \subset f(U)$ .

On a trouvé un voisinage ouvert de  $y$  (c'est  $V_x$ ) inclus dans  $f(U)$ . On en déduit que  $f(U)$  est ouvert. □

### Remarque

Un  $\mathcal{C}^1$ -diff. local n'est pas toujours injectif (globalement).

Exemple :  $f : \mathbb{R}^2 \rightarrow f(\mathbb{R}^2)$

$$(x, y) \mapsto (e^x \cos y, e^x \sin y)$$

$f$  est  $\mathcal{C}^\infty$  de  $\mathbb{R}^2$  sur  $\mathbb{R}^2 \setminus \{(0, 0)\}$ , mais pas injective :  $\forall (x, y) \in \mathbb{R}^2, f(x, y) = f(x, y + 2\pi)$ .

Calculons la Jacobienne  $Jf(x, y)$  :

$$Jf(x, y) = \begin{pmatrix} e^x \cos y & -e^x \sin y \\ e^x \sin y & e^x \cos y \end{pmatrix}$$

$$\begin{aligned} \det(Jf(x, y)) &= (e^x \cos y)(e^x \cos y) - (-e^x \sin y)(e^x \sin y) \\ &= e^{2x} \cos^2 y + e^{2x} \sin^2 y = e^{2x} > 0 \end{aligned}$$

Donc  $\forall (x, y) \in \mathbb{R}^2, df(x, y)$  est inversible, et  $f$  est un  $\mathcal{C}^\infty$ -diff. local.

### Proposition 2: Difféo local + injectif

Soit  $f : \Omega \rightarrow \mathbb{R}^n$  un  $\mathcal{C}^1$ -diff. local ( $\Omega$  ouvert de  $\mathbb{R}^n$ ). Si  $f$  est injective, alors  $f$  est un  $\mathcal{C}^1$ -diff. de  $\Omega$  sur  $f(\Omega)$ .

Démonstration.  $f : \Omega \rightarrow f(\Omega)$  avec  $f$  injective, donc  $f$  est bijective (par définition de  $f(\Omega)$ ).

De plus,  $f$  est un  $\mathcal{C}^1$ -diff. local, donc  $f$  est ouverte (d'après Cor. 1). Donc  $f(\Omega)$  est un ouvert.  $f$  va bien d'un ouvert vers un autre ouvert.

- $f$  est de classe  $\mathcal{C}^1$ .
- $f$  est un  $\mathcal{C}^1$ -diff. local donc  $\forall x \in \Omega, \exists U_x$  (voisinage ouvert de  $x$ ) et  $V_x$  (voisinage ouvert de  $f(x)$ ) tq  $f : U_x \rightarrow V_x$  est un  $\mathcal{C}^1$ -difféomorphisme.

En notant  $\tilde{f}_x : V_x \rightarrow U_x$  l'inverse de ce difféomorphisme, on a  $\tilde{f}_x = f^{-1}|_{V_x}$ . Cela signifie que  $f^{-1}$  est localement  $\mathcal{C}^1$ , donc  $f^{-1}$  est  $\mathcal{C}^1$  sur  $f(\Omega)$ .  $\square$

### Corollaire 2: Cas 1D

Soit  $I$  un intervalle ouvert de  $\mathbb{R}$ ,  $f : I \rightarrow \mathbb{R}$  une fonction de classe  $\mathcal{C}^1$ . Si  $f'$  ne s'annule pas sur  $I$ , alors  $f$  est un  $\mathcal{C}^1$ -difféomorphisme de  $I$  sur  $f(I)$ .

### Définition 3: Difféomorphisme Global

Soient  $\Omega$  et  $\Lambda$  deux ouverts de  $\mathbb{R}^n$ .

On dit que  $f : \Omega \rightarrow \Lambda$  est un  **$\mathcal{C}^1$ -difféomorphisme global** si  $f$  est un  $\mathcal{C}^1$ -difféomorphisme de  $\Omega$  sur  $\Lambda$ .

(C'est-à-dire,  $f$  est bijective, de classe  $\mathcal{C}^1$ , et son inverse  $f^{-1} : \Lambda \rightarrow \Omega$  est aussi de classe  $\mathcal{C}^1$ ).

### Théorème 2: Théorème d'Inversion Globale

Soit  $\Omega$  un ouvert de  $\mathbb{R}^n$  et  $f : \Omega \rightarrow \mathbb{R}^n$  une application de classe  $\mathcal{C}^1$ .

Si  $f$  est injective et  $f$  est un  **$C^1$ -difféomorphisme local** (i.e.  $\det(Jf(x)) \neq 0$  pour tout  $x \in \Omega$ ),  
Alors  $f$  est un  $C^1$ -difféomorphisme global de  $\Omega$  sur l'ouvert  $f(\Omega)$ .

## 2 Théorème de Hadamard

### Définition 4: Application propre

Soient  $X, Y$  des espaces métriques (de dim. finie). On dit que  $f : X \rightarrow Y$  est une application **propre** si  $f$  est continue et si  $\forall K \subset Y$  compact,  $f^{-1}(K)$  est un compact.

#### Remarque

$f$  continue  $\not\Rightarrow f$  propre.

En effet, soit  $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$  continue bornée (ex : arctan). Pour  $M$  assez grand,  $K = [-M, M]$  est compact.  $f^{-1}(K) = f^{-1}([-M, M]) = \mathbb{R}$ , qui n'est pas compact.

### Proposition 3: Caractérisation application propre ( $\mathbb{R}^n$ )

Une application continue  $f : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$  est propre

$\iff$

$\|f(x)\| \rightarrow +\infty$  quand  $\|x\| \rightarrow +\infty$ .

*Démonstration.* ( $\Leftarrow$ ) Supposons  $\|f(x)\| \rightarrow +\infty$  quand  $\|x\| \rightarrow +\infty$ . Ceci est équivalent à dire :  $\forall M > 0, \exists N_M > 0$  tq  $\forall \|x\| \geq N_M, \|f(x)\| \geq M$ . Ou, par contraposée : si  $f^{-1}(E)$  est borné dans  $\mathbb{R}^n$ , alors  $E$  est borné dans  $\mathbb{R}^n$ .

Soit  $K$  un compact de  $\mathbb{R}^n$ .  $K$  est fermé et borné.  $f^{-1}(K)$  est fermé (car  $f$  est continue et  $K$  est fermé).  $K$  est borné, donc  $f^{-1}(K)$  est borné (par l'hypothèse).

$f^{-1}(K)$  est fermé et borné dans  $\mathbb{R}^n$ , donc  $f^{-1}(K)$  est compact.  $f$  est donc propre.

( $\Rightarrow$ ) Si  $f$  est propre. Supposons par l'absurde que  $\|f(x)\|$  ne tend pas vers  $+\infty$  quand  $\|x\| \rightarrow +\infty$ . La négation est :  $\exists M > 0$  tq  $\forall N > 0, \exists x_N$  tq  $\|x_N\| \geq N$  et  $\|f(x_N)\| \leq M$ .

On peut alors construire une suite  $(x_n)_{n \in \mathbb{N}}$  tq  $\|x_n\| \rightarrow +\infty$  (donc  $(x_n)$  n'est pas bornée) et  $f(x_n) \leq M$ . Soit  $E = \{f(x_n), n \in \mathbb{N}\}$ .  $E$  est borné. Soit  $K = \bar{E}$  (la fermeture de  $E$ ).  $K$  est fermé et borné, donc  $K$  est compact.

Par hypothèse,  $f$  est propre, donc  $f^{-1}(K)$  est compact.

Or,  $\forall n \in \mathbb{N}, f(x_n) \in K$ , donc  $x_n \in f^{-1}(K)$ . La suite  $(x_n)$  est une suite d'un compact, elle doit donc être bornée.

Ceci est une CONTRADICTION avec  $\|x_n\| \rightarrow +\infty$ . □

### Proposition 4: Propre implique fermée

Une application propre  $f : X \rightarrow Y$  entre deux espaces métriques est **fermée** (i.e. si  $F$  est un fermé de  $X$ ,  $f(F)$  est un fermé de  $Y$ ).

*Démonstration.* Soit  $F$  un fermé de  $X$ . Soit  $(y_n)$  une suite de  $f(F)$  tq  $y_n \rightarrow y$  avec  $y \in Y$ . Il faut mq  $y \in f(F)$ .

$\forall n \in \mathbb{N}, y_n \in f(F)$ , donc  $\exists x_n \in F$  tq  $y_n = f(x_n)$ .

Soit  $K = \{y_n\}_{n \in \mathbb{N}} \cup \{y\}$ .  $K$  est un compact de  $Y$  (car la suite converge). Comme  $f$  est propre,  $f^{-1}(K)$

est un compact de  $X$ .

$$\forall n \in \mathbb{N}, y_n \in K \implies x_n \in f^{-1}(K).$$

$(x_n)$  est une suite dans un compact  $f^{-1}(K)$ . On peut donc en extraire une sous-suite  $(x_{\phi(n)})$  tq  $x_{\phi(n)} \rightarrow x^*$  avec  $x^* \in f^{-1}(K)$  (car  $f^{-1}(K)$  est compact, donc fermé).

$\forall n \in \mathbb{N}, x_{\phi(n)} \in F$ . Puisque  $F$  est fermé, la limite  $x^*$  est dans  $F$ . Donc  $x^* \in F$ .

Comme  $f$  est continue,  $f(x_{\phi(n)}) \rightarrow f(x^*)$ . Or,  $f(x_{\phi(n)}) = y_{\phi(n)}$  et  $(y_n)$  converge vers  $y$ , donc  $(y_{\phi(n)})$  converge aussi vers  $y$ .

Par unicité de la limite,  $f(x^*) = y$ .

Puisque  $x^* \in F$ , on a  $y = f(x^*) \in f(F)$ . Donc  $f(F)$  est fermé.  $\square$

### Théorème 3: Théorème de Hadamard

Soit  $f : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$  un  $\mathcal{C}^1$ -difféomorphisme local. Si  $f$  est propre, alors  $f$  est un  $\mathcal{C}^1$ -difféomorphisme de  $\mathbb{R}^n$  dans  $\mathbb{R}^n$ .

(Cela implique que  $f$  est bijective, donc  $f(\mathbb{R}^n) = \mathbb{R}^n$ ).

### Proposition 5: Hadamard (avec injectivité)

Soit  $f : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$  un  $\mathcal{C}^1$ -difféomorphisme local. Si  $f$  est injective et propre, alors  $f : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$  est un  $\mathcal{C}^1$ -difféomorphisme.

Démonstration.  $f : \mathbb{R}^n \rightarrow f(\mathbb{R}^n)$  est injective et un  $\mathcal{C}^1$ -diff. local, donc (par Prop. 2)  $f$  est un  $\mathcal{C}^1$ -difféomorphisme de  $\mathbb{R}^n$  dans  $f(\mathbb{R}^n)$ .

Il suffit donc de vérifier que  $f(\mathbb{R}^n) = \mathbb{R}^n$ .

- $f(\mathbb{R}^n)$  est non-vide.
- $\mathbb{R}^n$  est un ouvert.  $f$  est un  $\mathcal{C}^1$ -diff. local, donc  $f$  est ouverte. Donc  $f(\mathbb{R}^n)$  est un ouvert.
- $\mathbb{R}^n$  est un fermé.  $f$  est propre, donc  $f$  est fermée (par Prop. 4). Donc  $f(\mathbb{R}^n)$  est un fermé.

$f(\mathbb{R}^n)$  est un sous-ensemble non-vide, ouvert et fermé de  $\mathbb{R}^n$ . Puisque  $\mathbb{R}^n$  est connexe,  $\implies f(\mathbb{R}^n) = \mathbb{R}^n$ .  $\square$

## Deuxième partie

# Géométrie Différentielle

## 3 Un peu de géométrie différentielle

### Définition 5: Hypersurface régulière

Soient  $\Omega$  un ouvert de  $\mathbb{R}^n$ ,  $f : \Omega \rightarrow \mathbb{R}$  une application  $\mathcal{C}^1$ . On dit que  $\Sigma = f^{-1}(\{0\})$  est une **hypersurface régulière** de classe  $\mathcal{C}^1$  si :

1.  $\Sigma$  est non-vide.
2.  $\forall a \in \Sigma, df(a) \neq 0$  (i.e.  $f'(a) \neq 0$ ).

$f(x) = 0$  est alors une équation cartésienne de l'hypersurface  $\Sigma$ .

Si  $a \in \Sigma$ , l'hyperplan affine de vecteur normal  $\nabla f(a)$  et passant par  $a$  est appelé **hyperplan tangent** à  $\Sigma$  en  $a$ .

$$H = \{x \in \mathbb{R}^n, \langle x - a, \nabla f(a) \rangle = 0\}$$

(où  $\nabla f(a) = \left( \frac{\partial f}{\partial x_1}(a), \dots, \frac{\partial f}{\partial x_n}(a) \right)^T \in \mathbb{R}^n$ )

### Proposition 6: Hyperplan est hypersurface

Tout hyperplan de  $\mathbb{R}^n$  est une hypersurface.

*Démonstration.* Soit  $H$  un hyperplan de  $\mathbb{R}^n$ .  $H$  est un s.e.v. de  $\mathbb{R}^n$  de dimension  $n - 1$ .

Soit  $(a_1, \dots, a_{n-1})$  une base de  $H$ .  $\exists b \in \mathbb{R}^n$  tq  $(a_1, \dots, a_{n-1}, b)$  est une base de  $\mathbb{R}^n$ .

On pose  $l$  l'application linéaire (la forme linéaire) tq  $l(a_i) = 0$  (pour  $i = 1..n - 1$ ) et  $l(b) = 1$ .

Ainsi,  $\forall x \in \mathbb{R}^n$ ,  $x = \sum_{i=1}^{n-1} \lambda_i a_i + \lambda_n b$ .  $l(x) = \lambda_n l(b) = \lambda_n$ .

On a construit la forme linéaire  $l : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$  tq  $Ker(l) = H$ .

De plus,  $l$  est une application linéaire en dimension finie, elle est donc continue et  $\mathcal{C}^\infty$ .  $l$  est de classe  $\mathcal{C}^1$ .

$\forall x \in \mathbb{R}^n$ ,  $dl(x) = l$ .  $H = l^{-1}(\{0\}) = Ker(l)$ .  $\forall x \in H$ ,  $dl(x) = l \neq 0$  (car  $l$  est non nulle,  $l(b) = 1$ ).

Donc  $H$  est une hypersurface.  $\square$

### Définitions (Courbes et Surfaces)

Si  $n = 2$ , on dit que  $\Sigma$  est une **courbe régulière** de  $\mathbb{R}^2$ .

Si  $n = 3$ , on dit que  $\Sigma$  est une **surface régulière** de  $\mathbb{R}^3$ .

### Proposition 7: Paramétrage local (Chartes)

Soit  $\Sigma$  une hypersurface régulière de classe  $\mathcal{C}^1$  dans  $\mathbb{R}^n$ , soit  $a \in \Sigma$ .

Alors il existe  $V$  un voisinage de  $a$  ouvert dans  $\mathbb{R}^n$  et  $U$  un voisinage de 0 ouvert dans  $\mathbb{R}^{n-1}$  et une application  $\varphi : U \rightarrow \Sigma \cap V$  de classe  $\mathcal{C}^1$ , bijective, tq  $\varphi(0) = a$  et vérifiant  $rg(d\varphi(h')) = n - 1 \quad \forall h' \in U$ .

#### Remarque

Soit  $h \in \mathbb{R}^n$ ,  $h = (h', h_n)$  avec  $h' \in \mathbb{R}^{n-1}$  et  $h_n \in \mathbb{R}$ .  $\varphi : U \rightarrow \Sigma \cap V$  est bijective.  $\Sigma \cap V$  est alors, d'une certaine manière, un objet de dimension  $n - 1$  car  $U$  est un ouvert de  $\mathbb{R}^{n-1}$ .

*Démonstration.* Soit  $\Sigma$  une hypersurface régulière de classe  $\mathcal{C}^1$ .  $\exists f : \Omega \rightarrow \mathbb{R}$  ( $\Omega$  ouvert de  $\mathbb{R}^n$ ) de classe  $\mathcal{C}^1$  tq  $\Sigma = f^{-1}(\{0\})$ .

On pose  $g : \tilde{\Omega} \rightarrow \mathbb{R}$  (où  $\tilde{\Omega} = \{h \in \mathbb{R}^n | a + h \in \Omega\}$  est un ouvert) par :

$$g(h) \mapsto f(a + h)$$

$g$  est  $\mathcal{C}^1$  et  $\frac{\partial g}{\partial h_n}(0) = \frac{\partial f}{\partial x_n}(a)$ .

On sait que  $df(a) \neq 0$  (car  $a \in \Sigma$  et  $\Sigma$  est régulière).  $\implies \exists p \in \{1, \dots, n\}$  tq  $\frac{\partial f}{\partial x_p}(a) \neq 0$ .

Sans perte de généralité, supposons  $p = n$ . (Si  $p \neq n$ , on permute les coordonnées  $x_p$  et  $x_n$  avec un difféomorphisme  $\tilde{f}$ , et on a  $\frac{\partial \tilde{f}}{\partial x_n}(a) = \frac{\partial f}{\partial x_p}(a) \neq 0$ ).

On a  $\frac{\partial f}{\partial x_n}(a) \neq 0$ . On applique le Th. des Fonctions Implicites à  $g$  au point 0. On a  $g(0) = f(a) = 0$ . On regarde la différentielle partielle par rapport à la  $n$ -ième variable :  $dg_{h_n}(0) : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$   $v \mapsto \frac{\partial g}{\partial h_n}(0) \cdot v = \frac{\partial f}{\partial x_n}(a) \cdot v$ . Cette application est inversible car  $\frac{\partial f}{\partial x_n}(a) \neq 0$ .

Ainsi, il existe :

- $U$  un ouvert de  $\mathbb{R}^{n-1}$  (voisinage de  $0' \in \mathbb{R}^{n-1}$ )

- $V_n$  un ouvert de  $\mathbb{R}$  (voisinage de  $0 \in \mathbb{R}$ )
  - $\psi : U \rightarrow V_n$  (implicite) tq  $\forall h' \in U, \exists ! h_n \in V_n$
- $$g(h', h_n) = 0 \iff h_n = \psi(h')$$

$\forall (h', h_n) \in U \times V_n$ , on a  $f(a + (h', h_n)) = 0 \iff h_n = \psi(h')$ .

Posons  $\varphi : U \rightarrow \mathbb{R}^n$  par  $h' \mapsto a + (h', \psi(h'))$ . (On pose  $V = (a + U \times V_n)$  qui est un voisinage ouvert de  $a$ ).

$\varphi$  est  $C^1$  car  $\psi$  l'est.  $\varphi(0) = a + (0, \psi(0)) = a$  (car  $g(0, 0) = 0 \implies \psi(0) = 0$ ).

Pour  $y \in \Sigma \cap V$ ,  $y = a + (h', h_n)$  avec  $(h', h_n) \in U \times V_n$  et  $f(y) = 0$ .  $f(y) = 0 \implies g(h', h_n) = 0 \implies h_n = \psi(h')$ . D'où  $y = a + (h', \psi(h')) = \varphi(h')$ . Donc  $\varphi$  est surjective sur  $\Sigma \cap V$ .

De plus,  $\varphi(h'_1) = \varphi(h'_2) \implies a + (h'_1, \psi(h'_1)) = a + (h'_2, \psi(h'_2)) \implies h'_1 = h'_2$ . Donc  $\varphi$  est injective.

Donc  $\varphi : U \rightarrow \Sigma \cap V$  est bijective.

Considérons la Jacobienne de  $\varphi$  (pour déterminer le rang) :  $h' \in U, J\varphi(h') = d\varphi(h') \in \mathcal{M}_{n,n-1}(\mathbb{R})$ .

$$\varphi(h') = \begin{pmatrix} a_1 + h_1 \\ \vdots \\ a_{n-1} + h_{n-1} \\ a_n + \psi(h') \end{pmatrix}$$

La  $i$ -ème ligne de  $J\varphi(h')$  est  $\frac{\partial \varphi_i}{\partial h_j}(h')$ . Si  $i \in \{1, \dots, n-1\}$ ,  $\frac{\partial \varphi_i}{\partial h_j} = \delta_{ij}$  (Kronecker). La  $n$ -ième ligne est  $(\frac{\partial \psi}{\partial h_1}(h'), \dots, \frac{\partial \psi}{\partial h_{n-1}}(h'))$ .

$$J\varphi(h') = \begin{pmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 1 \\ \frac{\partial \psi}{\partial h_1} & \frac{\partial \psi}{\partial h_2} & \dots & \frac{\partial \psi}{\partial h_{n-1}} \end{pmatrix}$$

Cette matrice ( $n$  lignes,  $n-1$  colonnes) contient la matrice identité  $I_{n-1}$ . Elle est donc de rang  $n-1$ .  
 $\implies \text{rg}(d\varphi(h')) = n-1 \quad \forall h' \in U$ .  $\square$

### Remarque

On dit que  $(h_1, \dots, h_{n-1})$  constitue un système de coordonnées locales relatives au paramétrage de  $\varphi$ .

### Proposition 8: Hyperplan tangent (paramétrisé)

Soit  $\Sigma$  une hypersurface régulière,  $a \in \Sigma$  et  $\varphi$  un paramétrage de  $\Sigma$  au voisinage de  $a$  tq  $\varphi(0) = a$ . Alors l'hyperplan tangent à  $\Sigma$  en  $a$  (défini par  $f$ ) coïncide avec l'hyperplan  $H$  passant par  $a$  et dirigé par l'image de  $d\varphi(0)$ .

$$H = a + \text{Im}(d\varphi(0)) = a + \text{Vect} \left\{ \frac{\partial \varphi}{\partial h_1}(0), \dots, \frac{\partial \varphi}{\partial h_{n-1}}(0) \right\}$$

Démonstration. On a  $f(\varphi(h')) = 0 \quad \forall h' \in U$ .

En différentiant cette composition en  $h' = 0$  :

$$df(\varphi(0)) \circ d\varphi(0) = 0$$

Puisque  $\varphi(0) = a$ , on a  $df(a) \circ d\varphi(0) = 0$ .  
 Cela signifie que  $\forall v \in \mathbb{R}^{n-1}$ ,  $df(a)(d\varphi(0)(v)) = 0$ .

$$\implies Im(d\varphi(0)) \subset Ker(df(a))$$

On regarde les dimensions :  $d\varphi(0) : \mathbb{R}^{n-1} \rightarrow \mathbb{R}^n$ .  $rg(d\varphi(0)) = n - 1$  (vu dans la preuve précédente).  
 $\implies \dim(Im(d\varphi(0))) = n - 1$ .

$df(a) : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$  est une forme linéaire. Elle est non nulle (car  $a \in \Sigma$  hypersurface régulière,  $df(a) \neq 0$ ).  
 Par le théorème du rang,  $\dim(Ker(df(a))) = \dim(\mathbb{R}^n) - rg(df(a)) = n - 1$ .

Puisque  $\dim(Im(d\varphi(0))) = \dim(Ker(df(a)))$  et que l'un est inclus dans l'autre :

$$Im(d\varphi(0)) = Ker(df(a))$$

L'hyperplan tangent  $H$  (défini par  $f$ ) est l'hyperplan affine passant par  $a$  et de direction  $Ker(df(a))$ .  
 $H = a + Ker(df(a)) = a + Im(d\varphi(0))$ .

(Transcription des images)

$$\begin{aligned} Ker(df(0)) &= \{x \in \mathbb{R}^n, df(0)(x) = 0\} \\ &= \left\{x \in \mathbb{R}^n, \sum_{i=1}^n \frac{\partial f}{\partial x_i}(0) \cdot x_i = 0\right\} \\ &= \{x \in \mathbb{R}^n, \langle x, \nabla f(0) \rangle = 0\} \end{aligned}$$

□

## Troisième partie

# Équations Différentielles

## 4 Équations Différentielles

(Partie II du cours)

### 4.1 Introduction et Problème de Cauchy simple

#### Exemple 1

(E) :  $x'(t) = ax(t)$  est une équation différentielle. L'inconnue est un couple  $(J, x)$  où  $J$  est un intervalle ouvert de  $\mathbb{R}$  et  $x : J \rightarrow \mathbb{R}$  une fonction dérivable sur  $J$ . On a un ensemble de solutions de (E) de la forme  $x(t) = \lambda e^{at}$ ,  $\lambda \in \mathbb{R}$ . (C'est-à-dire de la forme  $(J = \mathbb{R}, x(t) = \lambda e^{at})$ ).

Comment trouver les solutions ? On cherche une fonction  $x$  telle que  $x'(t) - ax(t) = 0$ . On multiplie par  $e^{-at}$  :

$$(x(t)e^{-at})' = x'(t)e^{-at} - ae^{-at}x(t) = (x'(t) - ax(t))e^{-at} = 0$$

Sur un intervalle ouvert, on en déduit que :

$$\exists \lambda \in \mathbb{R}, \quad x(t)e^{-at} = \lambda \implies x(t) = \lambda e^{at}$$

On a donc :  $\forall J$  intervalle ouvert,  $\forall \lambda \in \mathbb{R}$ ,  $(J, x(t) = \lambda e^{at})$  est une solution.

#### 4.1.1 Problème de l'Unicité et Problème de Cauchy

Questions : Comment avoir une unique solution au problème (E) ?

- Il est pertinent de considérer une solution dite "**maximale**" sur un intervalle  $J$  (cela signifie qu'on ne peut pas étendre la solution sur un intervalle plus grand au sens de l'inclusion stricte).
- (E) a une infinité de solutions maximales  $(\mathbb{R}, \lambda e^{at})$  paramétrées par  $\lambda \in \mathbb{R}$ .
- Si on veut définir une unique solution de (E), on doit ajouter une **condition initiale** de type  $x(t_0) = x_0$ .

#### Définition 6: Problème de Cauchy (simple)

On appelle **Problème de Cauchy** le système (E') :

$$(E') \quad \begin{cases} x'(t) = ax(t) \\ x(t_0) = x_0 \end{cases}$$

avec  $(t_0, x_0) \in \mathbb{R}^2$ .

(E') admet une unique solution maximale :  $x(t) = \lambda e^{at}$  avec  $\lambda \in \mathbb{R}$ ,  $J = \mathbb{R}$ . On détermine  $\lambda$  avec la condition initiale :  $x(t_0) = \lambda e^{at_0} = x_0 \implies \lambda = x_0 e^{-at_0}$ . La solution unique est  $x(t) = (x_0 e^{-at_0}) e^{at} = x_0 e^{a(t-t_0)}$ .

#### Notations

$\dot{x}(t) = x'(t) = \frac{dx}{dt}$  (différentes manières d'écrire une dérivée).

#### 4.2 Équation différentielle du premier ordre

#### Définition 7: Équation différentielle du premier ordre

Soit  $\Omega$  un ouvert de  $\mathbb{R} \times \mathbb{R}^d$  et  $F : \Omega \rightarrow \mathbb{R}^d$ . On considère (1) :

$$(1) \quad \begin{cases} x'(t) = F(t, x(t)) \\ x(t) \in \mathbb{R}^d \end{cases}$$

- (1) est dite du **premier ordre** parce que seules des dérivées d'ordre 1 apparaissent.
- (1) est une équation du premier ordre **explicite**.
- Par ailleurs, les équations de la forme  $G(t, x'(t), x(t)) = 0$  sont dites du premier ordre **implicites**.
- (L'équation (1) est **autonome** si  $F$  ne dépend pas du temps  $t$  (i.e.  $F(t, x) = F(x)$ ). Dans le cas contraire, l'équation est **non-autonome**.

#### Définition 8: Solution d'une EDO

Une **solution** de (1) est décrite par un couple  $(J, X)$ , où  $J$  est un intervalle ouvert et  $X : J \rightarrow \mathbb{R}^d$  est une fonction dérivable sur  $J$ , telle que :

- $\forall t \in J, (t, X(t)) \in \Omega$
- $\forall t \in J, X'(t) = F(t, X(t))$

avec  $F : \Omega \rightarrow \mathbb{R}^d, (t, x) \mapsto F(t, x)$ . La solution est le couple  $(J, X)$ .

### Exemple 2

Pour  $x'(t) = ax(t)$ , on a  $\Omega = \mathbb{R} \times \mathbb{R}$  et  $F : \mathbb{R} \times \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$   $(t, x) \mapsto ax$ .

### Remarque

Si on étendait la définition à des intervalles non nécessairement ouverts (ex :  $J = [a, b]$ ), on pourrait définir  $X'(b)$  comme :

$$X'(b) = \lim_{t \rightarrow b^-} \frac{X(t) - X(b)}{t - b}$$

## 4.3 Régularité des Solutions

### Proposition 9: Régularité de la solution

Si  $F \in \mathcal{C}^n(\Omega)$ , alors si  $(J, X)$  est une solution de (1), on a  $X \in \mathcal{C}^{n+1}(J)$ .

*Démonstration.* Soit  $(J, X)$  une solution de (1). Puisque  $X$  est dérivable sur  $J$ ,  $X$  est continue sur  $J$ , donc  $X \in \mathcal{C}^0(J)$ .

Supposons par l'absurde que  $X \notin \mathcal{C}^{n+1}(J)$ . Soit  $k$  la régularité maximale de  $X$ , c'est-à-dire  $X \in \mathcal{C}^k(J)$  avec  $k < n + 1$ . (Puisque  $X \in \mathcal{C}^0(J)$ , ce  $k$  existe et  $k \geq 0$ ).

On a  $X'(t) = F(t, X(t))$ . L'application  $t \mapsto (t, X(t))$  est de classe  $\mathcal{C}^k$ . On sait que  $F \in \mathcal{C}^n(\Omega)$ . Puisque  $k < n + 1$  (et  $k, n$  sont des entiers), on a  $k \leq n$ . Donc  $F$  est a fortiori de classe  $\mathcal{C}^k(\Omega)$ .

Par composition d'applications de classe  $\mathcal{C}^k$ , l'application  $t \mapsto F(t, X(t))$  est  $\mathcal{C}^k(J)$ . On en déduit donc que  $X' \in \mathcal{C}^k(J)$ .

Mais si  $X' \in \mathcal{C}^k(J)$ , alors  $X \in \mathcal{C}^{k+1}(J)$ . Ceci contredit notre hypothèse que  $k$  était la régularité maximale de  $X$ . L'hypothèse de départ est donc fausse. On a  $X \in \mathcal{C}^{n+1}(J)$ .  $\square$

### Remarque

Si  $F \in \mathcal{C}^0(\Omega)$ , alors  $X \in \mathcal{C}^1(J)$ . ( $X$  est mieux que dérivable!).

## 4.4 Théorèmes d'Existence et d'Unicité

### Définition 9: Problème de Cauchy (Général)

Le système (2) :

$$(2) \quad \begin{cases} x'(t) = F(t, x(t)) \\ x(t_0) = x_0 \end{cases}$$

avec  $(t_0, x_0) \in \Omega$  est appelé **Problème de Cauchy**.

### Définition 10: Solution Maximale

Une solution  $(J, X)$  de (1) est dite **maximale** si elle ne peut pas être étendue sur un intervalle plus grand au sens de l'inclusion stricte. Autrement dit, il n'existe pas de couple  $(J', Y)$  solution de (1) tel que  $J \subsetneq J'$  et  $Y|_J = X$ .

On se pose deux questions fondamentales :

- **Question 1 :** Pour quelle régularité de  $F$  le problème de Cauchy (2) a-t-il **au moins une** solution maximale ?
- **Question 2 :** Pour quelle régularité de  $F$  le problème de Cauchy (2) a-t-il une **unique** solution maximale ?

### Exemple 3: Non-existence (si $F$ n'est pas continue)

Soit  $F : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$  définie par  $F(x) = \begin{cases} 1 & \text{si } x \leq 0 \\ -1 & \text{si } x > 0 \end{cases}$ . Considérons le problème de Cauchy (C) :  
 $\begin{cases} x'(t) = F(x(t)) \\ x(0) = 0 \end{cases}$ . Montrons que (C) n'a pas de solutions.

*Démonstration par l'absurde.* Supposons par l'absurde que (C) a une solution  $(J, X)$  avec  $0 \in J$ .

1.  $X$  doit être dérivable en 0. On a  $X'(0) = F(X(0)) = F(0) = 1$ .
2. Par définition de la dérivée,  $X(t) = X(0) + X'(0) \cdot t + o(t) = t + o(t)$ .
3. Cela implique que dans un voisinage  $V$  de 0, pour  $t \in V \cap J \cap ]0, +\infty[$  (c-à-d,  $t > 0$  et proche de 0), on a  $X(t) > 0$ .
4. Pour ces mêmes  $t$ , puisque  $X(t) > 0$ , l'équation différentielle donne  $X'(t) = F(X(t)) = -1$ .
5. Par le Théorème des Accroissements Finis sur  $[0, t]$  (car  $X$  est continue sur  $[0, t]$  et dérivable sur  $]0, t[$ ), il existe  $c \in ]0, t[$  tel que :

$$\frac{X(t) - X(0)}{t - 0} = X'(c)$$

6. Puisque  $c \in ]0, t[$ , on a  $c > 0$  et  $X(c) > 0$  (si  $t$  est assez petit). Donc  $X'(c) = -1$ . On a  $\frac{X(t)-0}{t} = -1$ , ce qui donne  $X(t) = -t$ .

7. **Contradiction.** On a  $X(t) = -t < 0$  (car  $t > 0$ ), mais l'étape 3 nous donnait  $X(t) > 0$ .

L'hypothèse qu'une solution existe est donc fausse.  $\square$

### Théorème 4: Peano-Arzelà (Admis)

(Réponse à la Question 1) Supposons que  $F$  est **continue** sur  $\Omega$ . Alors le problème de Cauchy (2) a **au moins une** solution maximale  $(J, X)$ . *Théorème admis.*

### Exemple 4: Non-unicité (si $F$ est continue mais non-Lipschitzienne)

Considérons le problème :  $\begin{cases} x'(t) = 3(x(t))^{2/3} \\ x(0) = 0 \end{cases}$ . Ici,  $F(x) = 3x^{2/3}$ .  $F$  est continue sur  $\mathbb{R}$  (par composition de fonctions continues).

$F$  n'est pas localement Lipschitzienne en 0.

*Démonstration.* Supposons par l'absurde que  $F$  est localement Lipschitzienne. Alors il existerait  $C > 0$  et un voisinage de 0 tels que  $\forall x$  dans ce voisinage :

$$|F(x) - F(0)| \leq C|x - 0|$$

$$|3x^{2/3} - 0| \leq C|x| \implies 3|x|^{2/3} \leq C|x|$$

Pour  $x \neq 0$ ,  $3 \leq C|x|^{1/3}$ . En faisant tendre  $x \rightarrow 0$ , on obtient  $3 \leq 0$ , ce qui est absurde. (La note du cours utilise  $\frac{|F(x)-F(0)|}{|x-0|} = \frac{3x^{2/3}}{x} = \frac{3}{x^{1/3}}$  qui tend vers l'infini en 0, donc n'est pas bornée).  $\square$

**Ce problème admet (au moins) deux solutions maximales :**

- **Solution 1 :**  $X_1(t) = 0$  pour tout  $t \in \mathbb{R}$ . Vérification :  $X'_1(t) = 0$ .  $3(X_1(t))^{2/3} = 3(0)^{2/3} = 0$ .  $X_1(0) = 0$ . C'est une solution.
- **Solution 2 :**  $X_2(t) = t^3$  pour tout  $t \in \mathbb{R}$ . Vérification :  $X'_2(t) = 3t^2$ .  $3(X_2(t))^{2/3} = 3((t^3))^{2/3} = 3(t^2) = 3t^2$ .  $X_2(0) = 0^3 = 0$ . C'est une solution.

On a  $(\mathbb{R}, X_1)$  et  $(\mathbb{R}, X_2)$  qui sont deux solutions maximales distinctes pour le même problème de Cauchy.

### Théorème 5: Cauchy-Lipschitz (Version simple)

(Réponse à la Question 2)

1. Si  $F$  est **Lipschitzienne** sur  $\Omega$ , alors le problème de Cauchy (2) admet une **unique solution maximale**  $(J, X)$ .
2. De plus, toutes les solutions de (1) (non-maximales) sont des restrictions de l'unique solution maximale.

### Corollaire 3: Unicité locale

Supposons  $F$  Lipschitzienne sur  $\Omega$ . Soient  $(J, X)$  et  $(J', Y)$  deux solutions de (1). S'il existe  $t_0 \in J \cap J'$  tel que  $X(t_0) = Y(t_0)$ , alors :

$$\forall t \in J \cap J', \quad X(t) = Y(t)$$

*Démonstration.* Considérons l'intervalle  $I = J \cap J'$ , qui est un intervalle ouvert contenant  $t_0$ . Les deux couples  $(I, X|_I)$  et  $(I, Y|_I)$  sont solutions du même problème de Cauchy (2) :

$$\begin{cases} z'(t) = F(t, z(t)) \\ z(t_0) = X(t_0) (= Y(t_0)) \end{cases} \quad \text{sur } I$$

D'après le théorème de Cauchy-Lipschitz, ce problème admet une unique solution maximale  $(J_m, Z)$ . Par définition de la solution maximale, les solutions  $(I, X|_I)$  et  $(I, Y|_I)$  doivent être des restrictions de  $(J_m, Z)$ . Cela signifie que  $\forall t \in I$ ,  $X(t) = Z(t)$  et  $Y(t) = Z(t)$ . Par conséquent,  $X(t) = Y(t)$  pour tout  $t \in J \cap J'$ .  $\square$

### 4.5 Corollaire de Cauchy-Lipschitz (Non-croisement)

#### Corollaire 4: Non-croisement des solutions

Soit  $\Omega$  un ouvert de  $\mathbb{R} \times \mathbb{R}$ , et  $f : \Omega \rightarrow \mathbb{R}$  une fonction de classe  $\mathcal{C}^1$  ou Lipschitzienne. Soient  $(J, x)$  et  $(J', y)$  deux solutions maximales du problème (E)  $y'(t) = f(t, y(t))$ .

Si il existe  $t_0 \in J \cap J'$  tel que  $x(t_0) < y(t_0)$ ,  
Alors :  $\forall t \in J \cap J'$ ,  $x(t) < y(t)$ .

*Démonstration.* Supposons par l'absurde qu'il existe  $t_1 \in J \cap J'$  tel que  $x(t_1) > y(t_1)$ . (Nous avons  $x(t_0) < y(t_0)$  et  $x(t_1) > y(t_1)$ ).

Considérons la fonction  $z(t) = x(t) - y(t)$ .  $z$  est continue sur l'intervalle  $I = [\min(t_0, t_1), \max(t_0, t_1)] \subset J \cap J'$ . On a  $z(t_0) = x(t_0) - y(t_0) < 0$  et  $z(t_1) = x(t_1) - y(t_1) > 0$ .

Par le Théorème des Valeurs Intermédiaires (TVI) appliqué à  $z$ , il existe  $t_2 \in I$  tel que  $z(t_2) = 0$ , c'est-à-dire  $x(t_2) = y(t_2)$ .

Maintenant,  $(J, x)$  et  $(J', y)$  sont toutes deux des solutions maximales du **même** problème de Cauchy :

$$(E') \quad \begin{cases} z'(t) = f(t, z(t)) \\ z(t_2) = x(t_2) \end{cases}$$

(puisque  $y(t_2) = x(t_2)$ ).

Par le théorème de Cauchy-Lipschitz (unicité de la solution maximale), on en déduit que  $J = J'$  et  $x(t) = y(t)$  pour tout  $t \in J$ . Ceci est absurde, car on a supposé  $x(t_0) < y(t_0)$ .  $\square$

**Question : Dans quel cadre les solutions peuvent-elles cesser d'exister ?**

### Exemple 5

Considérons le problème de Cauchy :

$$\begin{cases} m'(t) = m(t)^2 \\ m(0) = 0 \end{cases}$$

Ici,  $f(t, m) = m^2$ .  $f$  est  $\mathcal{C}^\infty$  (donc  $\mathcal{C}^1$  et Lipschitzienne sur tout compact). Par Cauchy-Lipschitz, il existe une unique solution maximale. La fonction  $m(t) = 0$  pour  $t \in \mathbb{R}$  est une solution évidente. Par unicité, c'est l'unique solution maximale. L'intervalle de définition est  $J = \mathbb{R}$ .

### Exemple 6: Phénomène d'explosion

Considérons le problème de Cauchy :

$$\begin{cases} x'(t) = x(t)^2 \\ x(0) = 1 \end{cases}$$

En séparant les variables (quand  $x \neq 0$ ) :  $\frac{x'(t)}{x(t)^2} = 1 \implies \left(-\frac{1}{x(t)}\right)' = 1$

En intégrant :  $-\frac{1}{x(t)} = t + C$ .

Avec  $x(0) = 1$ , on a  $-\frac{1}{1} = 0 + C \implies C = -1$ .

Donc  $-\frac{1}{x(t)} = t - 1$ , ce qui donne  $x(t) = \frac{1}{1-t}$ .

On vérifie :  $x'(t) = \frac{1}{(1-t)^2}$  et  $x(t)^2 = \left(\frac{1}{1-t}\right)^2$ . La solution est le couple  $(J, x)$  avec  $J = ]-\infty, 1[$  et  $x(t) = \frac{1}{1-t}$ .

On observe que  $(J, x)$  est une solution maximale. En effet, supposons par l'absurde qu'on puisse l'étendre en une solution  $(\tilde{J}, \tilde{x})$  avec  $J \subsetneq \tilde{J}$  (donc  $1 \in \tilde{J}$ ). Alors  $\tilde{x}$  devrait être dérivable sur  $\tilde{J}$ , et donc continue en  $t = 1$ . Cela impliquerait que  $\lim_{t \rightarrow 1^-} \tilde{x}(t)$  existe et est finie. Or,  $\lim_{t \rightarrow 1^-} x(t) = \lim_{t \rightarrow 1^-} \frac{1}{1-t} = +\infty$ . Ceci est une contradiction.

**Conclusion :** Si la solution n'est pas "globale" (définie sur  $I$  en entier), on observe un phénomène d'explosion :  $|x(t)| \rightarrow +\infty$  lorsque  $t$  tend vers la borne de  $J$ .

## 4.6 Convergence vers la frontière et sortie des compacts

### Définition 11: Valeur d'adhérence

Soit  $\gamma : J \rightarrow \mathbb{R}^d$  une fonction, et  $t^* = \sup J \in \bar{\mathbb{R}}$ .

On dit que  $y^* \in \mathbb{R}^d$  est une **valeur d'adhérence** de  $\gamma$  lorsque  $t \rightarrow t^*$  s'il existe une suite  $(t_n)_{n \in \mathbb{N}}$  d'éléments de  $J$  telle que  $t_n \rightarrow t^*$  et  $\gamma(t_n) \rightarrow y^*$ .

(Formellement :  $\forall V$  voisinage ouvert de  $y^*$ ,  $\forall W$  voisinage de  $t^*$ ,  $W \cap \gamma^{-1}(V) \neq \emptyset$ ).

#### Remarque

La fermeture de  $J$  est considérée dans  $\bar{\mathbb{R}} = \mathbb{R} \cup \{-\infty, +\infty\}$ .

### Définition 12: Convergence vers la frontière

Soit  $\Omega$  un ouvert de  $\mathbb{R}^n$  ( $n = 1 + d$ ),  $J$  un intervalle de  $\mathbb{R}$ , et  $\gamma : J \rightarrow \Omega$ . Soit  $t^* = \sup J$  (ou  $\inf J$ ).

On dit que  $\gamma(t)$  **converge vers la frontière de  $\Omega$**  (notée  $Fr(\Omega)$  ou  $Bd(\Omega)$ ) lorsque  $t \rightarrow t^*$ , si  $\gamma$  n'admet aucune valeur d'adhérence dans  $\Omega$ .

On note :  $\gamma(t) \xrightarrow[t \rightarrow t^*]{} Bd(\Omega)$ .

#### Remarque

$\gamma(t) \rightarrow Bd(\Omega)$  est équivalent à dire que  $\gamma$  n'a pas de valeur d'adhérence (lorsque  $t \rightarrow t^*$ ) ou que ses valeurs d'adhérence sont dans  $Bd(\Omega)$ .

### Proposition 10: Théorème de sortie des compacts

Soit  $\gamma : J \rightarrow \Omega$ . Les deux assertions suivantes sont équivalentes :

1.  $\gamma(t) \xrightarrow[t \rightarrow t^*]{} Fr(\Omega)$ .

2. Pour tout compact  $K \subset \Omega$ , il existe un voisinage  $V$  de  $t^*$  tel que  $\forall t \in V \cap J, \gamma(t) \notin K$ .

*Démonstration.* (1  $\implies$  2) : Supposons  $\gamma(t) \rightarrow Fr(\Omega)$ . Supposons par l'absurde qu'il existe un compact  $K \subset \Omega$  tel que :  $\forall V$  voisinage de  $t^*$ ,  $\exists t \in V \cap J$  tel que  $\gamma(t) \in K$ . On peut alors construire une suite  $(t_n)$  dans  $J$  telle que  $t_n \rightarrow t^*$  et  $\gamma(t_n) \in K$ .  $K$  est compact, donc on peut extraire une sous-suite  $(\gamma(t_{k(n)}))$  qui converge vers  $y^* \in K$ . Puisque  $t_{k(n)} \rightarrow t^*$  et  $\gamma(t_{k(n)}) \rightarrow y^*$ ,  $y^*$  est une valeur d'adhérence de  $\gamma$ . Comme  $K \subset \Omega$ ,  $y^* \in \Omega$ . Ceci contredit l'hypothèse (1) que  $\gamma$  n'a pas de valeur d'adhérence dans  $\Omega$ . Absurde.

(2  $\implies$  1) : Supposons que  $\gamma$  "sort de tout compact". Supposons par l'absurde que  $\gamma$  ne converge pas vers  $Fr(\Omega)$ . Cela signifie (par définition) que  $\gamma$  admet (au moins) une valeur d'adhérence  $y^* \in \Omega$ . Par définition d'une valeur d'adhérence, il existe une suite  $(t_n) \rightarrow t^*$  telle que  $\gamma(t_n) \rightarrow y^*$ . Puisque  $\Omega$  est un ouvert et  $y^* \in \Omega$ , on peut choisir un  $\epsilon > 0$  tel que le compact  $K = \bar{B}(y^*, \epsilon)$  soit inclus dans  $\Omega$ . Puisque  $\gamma(t_n) \rightarrow y^*$ , pour  $n$  assez grand,  $\gamma(t_n) \in K$ . Cela signifie que pour tout voisinage  $V$  de  $t^*$

(contenant les  $t_n$  pour  $n$  grand), il existe des  $t_n \in V \cap J$  tels que  $\gamma(t_n) \in K$ . Ceci contredit l'hypothèse (2). Absurde.  $\square$

### Remarque

Cas d'un domaine "tube"  $\Omega = I \times \mathbb{R}^d$  (où  $I \subset \mathbb{R}$  est un intervalle ouvert). Soit  $\gamma(t) = (t, x(t))$  une solution.

Alors  $\gamma(t) \xrightarrow[t \rightarrow t^*]{} Fr(\Omega)$  est équivalent à :

$$t^* \in \{\inf I, \sup I\} \text{ OU } \|x(t)\| \xrightarrow[t \rightarrow t^*]{} +\infty$$

*Preuve de la remarque.* Nous devons prouver l'équivalence.

#### Sens 1 : ( $\Leftarrow$ )

Supposons que  $t^* \in \{\inf I, \sup I\}$  OU  $\|x(t)\| \rightarrow +\infty$ . Nous voulons montrer que  $\gamma(t) \rightarrow Fr(\Omega)$ , c'est-à-dire que  $\gamma(t)$  n'a pas de valeur d'adhérence dans  $\Omega = I \times \mathbb{R}^d$ .

Supposons par l'absurde qu'il existe une valeur d'adhérence  $y^* \in \Omega$ . Par définition,  $y^* = (t_{adh}, x^*)$  avec  $t_{adh} \in I$  et  $x^* \in \mathbb{R}^d$ . Il existerait alors une suite  $(t_n)$  dans  $J$  telle que  $t_n \rightarrow t^*$  et  $\gamma(t_n) = (t_n, x(t_n)) \rightarrow y^*$ .

Ceci implique  $t_n \rightarrow t_{adh}$  et  $x(t_n) \rightarrow x^*$ . Par unicité de la limite,  $t^* = t_{adh}$ .

On a donc  $t^* \in I$ . Cela contredit l'hypothèse  $t^* \in \{\inf I, \sup I\}$  (car  $I$  est ouvert).

De plus,  $x(t_n) \rightarrow x^*$  implique  $\|x(t_n)\| \rightarrow \|x^*\|$ , qui est une valeur finie. Cela contredit l'hypothèse  $\|x(t)\| \rightarrow +\infty$ .

Puisque les deux cas de l'hypothèse mènent à une contradiction, notre supposition (l'existence d'une valeur d'adhérence  $y^* \in \Omega$ ) est fausse. Donc  $\gamma(t) \rightarrow Fr(\Omega)$ .

#### Sens 2 : ( $\Rightarrow$ )

Supposons que  $\gamma(t) \rightarrow Fr(\Omega)$ . Nous voulons montrer que  $t^* \in \{\inf I, \sup I\}$  OU  $\|x(t)\| \rightarrow +\infty$ .

Supposons par l'absurde que la conclusion est fausse. La négation est :  $t^* \notin \{\inf I, \sup I\}$  ET  $\|x(t)\|$  ne tend pas vers  $+\infty$ .

$t^* \notin \{\inf I, \sup I\}$  signifie  $t^* \in I$  (car  $I$  est ouvert).

$\|x(t)\|$  ne tend pas vers  $+\infty$  (quand  $t \rightarrow t^*$ ) signifie qu'il existe une suite  $(t_n)$  dans  $J$  telle que  $t_n \rightarrow t^*$  et la suite  $(\|x(t_n)\|)$  est bornée.

Puisque la suite  $(x(t_n))$  est bornée dans  $\mathbb{R}^d$ , par le théorème de Bolzano-Weierstrass, on peut en extraire une sous-suite  $(x(t_{k(n)}))$  qui converge vers un  $x^* \in \mathbb{R}^d$ .

La suite  $(t_{k(n)})$  converge toujours vers  $t^* \in I$ .

Par conséquent, la sous-suite  $\gamma(t_{k(n)}) = (t_{k(n)}, x(t_{k(n)}))$  converge vers  $y^* = (t^*, x^*)$ .

Puisque  $t^* \in I$  et  $x^* \in \mathbb{R}^d$ , on a  $y^* \in I \times \mathbb{R}^d = \Omega$ .

Cela signifie que  $\gamma(t)$  admet une valeur d'adhérence  $y^*$  dans  $\Omega$ . Ceci contredit notre hypothèse de départ ( $\gamma(t) \rightarrow Fr(\Omega)$ ). L'hypothèse par l'absurde est donc fausse, et la conclusion est vraie.  $\square$

## 4.7 Caractérisation des solutions maximales

### Théorème 6: Caractérisation des solutions maximales

Soit  $\Omega$  un ouvert de  $\mathbb{R}^{1+d}$ ,  $F : \Omega \rightarrow \mathbb{R}^d$  de classe  $\mathcal{C}^1$  ou Lipschitzienne. Soit  $(J, x)$  une solution de  $x'(t) = F(t, x(t))$ .

Alors  $(J, x)$  est une solution maximale si et seulement si :

- $(t, x(t)) \xrightarrow{t \rightarrow \sup J} Fr(\Omega)$

**ET**

- $(t, x(t)) \xrightarrow{t \rightarrow \inf J} Fr(\Omega)$

#### Remarque

On a choisi  $F$  de classe  $\mathcal{C}^1$  ou Lipschitzienne pour assurer l'existence et l'unicité (via Cauchy-Lipschitz).

On pourrait simplement supposer  $F$  continue et appliquer le théorème de Peano-Arzelà (pour l'existence).

#### Théorème 7: Critère d'explosion (Domaine "Tube")

Soit  $I \subset \mathbb{R}$  un intervalle,  $\Omega = I \times \mathbb{R}^d$ . Soit  $F : \Omega \rightarrow \mathbb{R}^d$  de classe  $\mathcal{C}^1$  ou Lipschitzienne. Soit  $(J, x)$  une solution maximale de  $x'(t) = F(t, x(t))$ .

Alors on a :

- $\sup J = \sup I$  OU  $\lim_{t \rightarrow \sup J} \|x(t)\| = +\infty$ .

**ET**

- $\inf J = \inf I$  OU  $\lim_{t \rightarrow \inf J} \|x(t)\| = +\infty$ .

(C'est le critère d'explosion en temps fini).

#### Remarque

Pour  $x'(t) = x(t)$ , on a  $\Omega = \mathbb{R} \times \mathbb{R}$ , donc  $I = \mathbb{R}$ . Les solutions sont  $x_\lambda(t) = \lambda e^t$ . L'intervalle maximal est  $J = \mathbb{R}$ .

On a  $\sup J = \sup I = +\infty$  et  $\inf J = \inf I = -\infty$ .

On vérifie :  $\lim_{t \rightarrow \inf J} x_\lambda(t) = 0$  (pas d'explosion).

$\lim_{t \rightarrow \sup J} x_\lambda(t) = \pm\infty$  (explosion, si  $\lambda \neq 0$ ).

#### Remarque

Pour  $d = 1$ .

$\lim_{t \rightarrow +\infty} \|x(t)\| = +\infty \implies \lim_{t \rightarrow +\infty} |x(t)| = +\infty$

Si  $x$  est solution du problème,  $x'(t) = f(t, x(t))$

Alors  $x$  est continue et donc si  $\lim_{t \rightarrow +\infty} |x(t)| = +\infty$

Alors :

- $\lim_{t \rightarrow \sup J} x(t) = +\infty$ .

**OU**

- $\lim_{t \rightarrow \sup J} x(t) = -\infty$ .

(Par continuité de  $x$ )

#### Remarque

Pour  $d \geq 2$ . Soit  $x(t) = \begin{pmatrix} e^t \cos(t) \\ -e^t \sin(t) \end{pmatrix} \forall t \in \mathbb{R}$ .

On a  $\|x(t)\|^2 = (e^t \cos(t))^2 + (-e^t \sin(t))^2 = e^{2t}(\cos^2(t) + \sin^2(t)) = e^{2t}$ .

Donc  $\|x(t)\| = e^t$ .

On a bien  $\lim_{t \rightarrow +\infty} \|x(t)\| = +\infty$ .

Cependant,  $x(t)$  (le vecteur) n'admet pas de limite en  $+\infty$  (il spirale vers l'infini).

## Théorème d'existence globale

### Corollaire 5: Théorème d'existence globale

Soit  $\Omega = I \times \mathbb{R}^d$ . Soit  $F : \Omega \rightarrow \mathbb{R}^d$  de classe  $\mathcal{C}^1$  ou Lipschitzienne. Soit  $(J, x)$  une solution maximale du problème  $x'(t) = F(t, x(t))$  avec  $t_0 \in J$ . Soit  $g : I \rightarrow \mathbb{R}$  une fonction continue.

Supposons que :

1.  $\|x(t)\| \leq g(t) \quad \forall t \in [t_0, \sup J]$   
Alors  $\sup J = \sup I$ .
2.  $\|x(t)\| \leq g(t) \quad \forall t \in [\inf J, t_0]$   
Alors  $\inf J = \inf I$ .
3.  $\|x(t)\| \leq g(t) \quad \forall t \in J$   
Alors  $J = I$  et donc  $(J, x)$  est une solution globale.

*Démonstration.* 1°) Supposons par l'absurde que  $\sup J < \sup I$ .

Alors, par le critère d'explosion (Théorème 7), la solution maximale  $(J, x)$  vérifie :

$$\|x(t)\| \xrightarrow[t \rightarrow \sup J]{} +\infty$$

Or,  $\forall t \in [t_0, \sup J]$ , on a  $\|x(t)\| \leq g(t)$ .

$g$  est continue sur le compact  $[t_0, \sup J] \subset I$ .

$g$  est donc bornée sur ce compact. Il existe  $M > 0$  tel que  $\forall t \in [t_0, \sup J], g(t) \leq M$ .

On en déduit que  $\forall t \in [t_0, \sup J], \|x(t)\| \leq M$ .

Ceci est absurde car  $\|x(t)\| \rightarrow +\infty$  quand  $t \rightarrow \sup J$ .

Donc,  $\sup J = \sup I$ .

2°) (La preuve pour  $\inf J$  est identique).

3°) (Le point 3 est une conséquence directe de 1°) et 2°)). □

## 4.8 Caractérisation des solutions maximales (Suite)

*Preuve du Théorème 6.* Nous devons prouver une équivalence.

**Sens 1 : ( $\Rightarrow$ )**

Supposons que  $(t, x(t)) \rightarrow Fr(\Omega)$  (lorsque  $t \rightarrow \sup J$  et  $t \rightarrow \inf J$ ). Supposons par l'absurde que  $(J, x)$  n'est pas une solution maximale.

Cela implique qu'il existe une solution  $(J', \tilde{x})$  de (E) telle que  $J \subsetneq J'$  et  $\forall t \in J, \tilde{x}(t) = x(t)$ .

Supposons par exemple que  $\sup J < \sup J'$ . Puisque  $\tilde{x}$  est solution sur  $J'$ ,  $\tilde{x}$  est continue sur  $J'$ . Donc  $\tilde{x}(t) \xrightarrow[t \rightarrow \sup J^-]{} \tilde{x}(\sup J)$  (une valeur finie, car  $\sup J \in J'$ ).

Comme  $\tilde{x}(t) = x(t)$  sur  $J$ , on a  $x(t) \xrightarrow[t \rightarrow \sup J^-]{} \tilde{x}(\sup J)$ .

Donc  $\gamma(t) = (t, x(t)) \xrightarrow[t \rightarrow \sup J^-]{} (\sup J, \tilde{x}(\sup J))$ .

Le point  $(\sup J, \tilde{x}(\sup J))$  est une valeur d'adhérence de  $\gamma(t)$ . Puisque  $(J', \tilde{x})$  est une solution, on a  $(\sup J, \tilde{x}(\sup J)) \in \Omega$ .

Ceci est ABSURDE, car on a supposé que  $\gamma(t) = (t, x(t))$  tendait vers la frontière de  $\Omega$  (et ne devait donc avoir aucune valeur d'adhérence *dans*  $\Omega$ ).

### Sens 2 : ( $\Leftarrow$ )

Supposons maintenant que  $(J, x)$  est une solution maximale de (E). Nous devons montrer que  $(t, x(t)) \rightarrow Fr(\Omega)$  lorsque  $t \rightarrow \sup J$  (la preuve est identique pour  $\inf J$ ).

Supposons par l'absurde que  $(t, x(t))$  ne tend pas vers  $Fr(\Omega)$  lorsque  $t \rightarrow \sup J$ . Par définition (en prenant la négation), cela signifie qu'il existe (au moins) **une** valeur d'adhérence  $(\beta, x^*)$  *dans*  $\Omega$ , où  $\beta = \sup J$ . (Note : si  $\sup J = +\infty$ , on ne peut pas avoir de valeur d'adhérence  $(t, x(t)) \rightarrow (\beta, x^*) \in \Omega$  car  $\beta$  serait infini). Donc, on a nécessairement  $\sup J = \beta < +\infty$ .

Il existe une suite  $(t_n) \in J^{\mathbb{N}}$  telle que  $t_n \rightarrow \sup J$  et  $x(t_n) \rightarrow x^*$ , avec  $(\sup J, x^*) \in \Omega$ .

D'après le théorème de Peano-Arzelà, le problème de Cauchy (C) suivant :

$$(C) \quad \begin{cases} z'(t) = F(t, z(t)) \\ z(\sup J) = x^* \end{cases}$$

(qui a un sens car  $(\sup J, x^*) \in \Omega$ ), a au moins une solution  $\tilde{x}$  définie sur un intervalle ouvert  $I_\epsilon = [\sup J - \epsilon, \sup J + \epsilon]$  (avec  $\epsilon > 0$  petit).

Posons  $X_1(t) = \begin{cases} x(t) & \text{si } t \in J \\ \tilde{x}(t) & \text{si } t \in [\sup J, \sup J + \epsilon] \end{cases}$

Vérifions que  $X_1(t)$  est une solution de (E) sur  $J_1 = [\inf J, \sup J + \epsilon]$ .

Puisque  $X$  est dérivable sur  $J$  et  $\tilde{x}$  est dérivable sur  $[\sup J, \sup J + \epsilon]$ , il suffit de vérifier la continuité et la dérivabilité en  $\sup J$ .

### Continuité en $\sup J$ :

On a  $\lim_{t \rightarrow \sup J^+} X_1(t) = \lim_{t \rightarrow \sup J^+} \tilde{x}(t) = \tilde{x}(\sup J) = x^*$  (car  $\tilde{x}$  est solution de (C)).

Le \*\*Lemme 1\*\* (prouvé ci-dessous) nous assure que  $x(t) \rightarrow x^*$  lorsque  $t \rightarrow \sup J^-$ . Donc  $\lim_{t \rightarrow \sup J^-} X_1(t) = \lim_{t \rightarrow \sup J^-} x(t) = x^*$ .

Les limites à gauche et à droite coïncident,  $X_1$  est continue en  $\sup J$ .

### Dérivabilité en $\sup J$ :

$X_1$  est continue sur  $J_1$  et dérivable sur  $J_1 \setminus \{\sup J\}$ .

Pour  $h > 0$  (dérivée à droite) :

$$\begin{aligned} \lim_{h \rightarrow 0^+} \frac{X_1(\sup J + h) - X_1(\sup J)}{h} &= \lim_{h \rightarrow 0^+} \frac{\tilde{x}(\sup J + h) - x^*}{h} \\ &= \tilde{x}'(\sup J) = F(\sup J, \tilde{x}(\sup J)) = F(\sup J, x^*) \end{aligned}$$

Pour  $h < 0$  (dérivée à gauche) :

$$\lim_{h \rightarrow 0^-} \frac{X_1(\sup J + h) - X_1(\sup J)}{h} = \lim_{h \rightarrow 0^-} \frac{x(\sup J + h) - x^*}{h}$$

On considère  $Y_1(t)$  le prolongement par continuité de  $x$  sur  $J \cup \{\sup J\}$ , avec  $Y_1(\sup J) = x^*$ . On applique le Théorème des Accroissements Finis à  $Y_1$  sur  $[\sup J + h, \sup J]$ . Il existe  $c_h \in ]\sup J + h, \sup J[$  tel que :

$$\frac{Y_1(\sup J) - Y_1(\sup J + h)}{-h} = Y'_1(c_h) = x'(c_h)$$

$$\frac{x^* - x(\sup J + h)}{-h} = \frac{x(\sup J + h) - x^*}{h} = F(c_h, x(c_h))$$

Quand  $h \rightarrow 0^-$ , on a  $c_h \rightarrow \sup J^-$ . Par continuité de  $F$  et de  $x$  (prouvée par le Lemme 1), on a :

$$\lim_{h \rightarrow 0^-} F(c_h, x(c_h)) = F(\sup J, x^*)$$

Les dérivées à gauche et à droite sont égales à  $F(\sup J, x^*)$ . Donc  $X_1$  est dérivable en  $\sup J$  et  $X'_1(\sup J) = F(\sup J, X_1(\sup J))$ .

**Conclusion :**  $(J_1, X_1)$  (avec  $J_1 = ]\inf J, \sup J + \epsilon[$ ) est une solution de (E) avec  $X_1(t) = x(t)$  sur  $J$ .

Puisque  $J \subsetneq J_1$ , cela contredit le fait que  $(J, x)$  est maximale. L'hypothèse de départ (le fait que  $\gamma(t)$  admette une valeur d'adhérence dans  $\Omega$ ) est donc fausse.  $\square$

### Lemme 1: Lemme 1 (Convergence au bord)

Si  $F$  est  $C^1$  ou Lipschitzienne,  $\sup J = \beta < +\infty$ , et  $(t, x(t))$  admet **une** valeur d'adhérence  $(\beta, x^*) \in \Omega$  quand  $t \rightarrow \sup J$ , alors  $\lim_{t \rightarrow \sup J} (t, x(t)) = (\beta, x^*)$ .

*Preuve du Lemme 1.* On sait que  $(\beta, x^*) \in \Omega$ , qui est un ouvert. Il existe  $\epsilon > 0$  suffisamment petit tel que  $\bar{B}((\beta, x^*), \epsilon) \subset \Omega$ . Puisque  $F$  est continue sur l'ouvert  $\Omega$ ,  $F$  est bornée sur le compact  $\bar{B}((\beta, x^*), \epsilon)$ .  $\exists M > 0$  t.q.  $\forall (t, x) \in \bar{B}((\beta, x^*), \epsilon)$ ,  $\|F(t, x)\| < M$ .

Par définition de la valeur d'adhérence  $(\beta, x^*)$ ,  $\exists (t_n)$  t.q.  $t_n \rightarrow \beta$  et  $x(t_n) \rightarrow x^*$ . Choisissons  $N$  assez grand tel que les conditions (H) soient vérifiées :

$$(H) \quad \begin{cases} t_N > \beta - \frac{\epsilon}{2M} \\ \|x(t_N) - x^*\| \leq \frac{\epsilon}{2} \\ |t_N - \beta| < \frac{\epsilon}{2} \end{cases}$$

On applique le Lemme 2 (prouvé ci-dessous). D'après le Lemme 2, on a  $\forall t \in [t_N, \beta[, \|x(t) - x^*\| < \epsilon$ .

Ceci est vrai  $\forall \epsilon > 0$  (en choisissant  $N$  suffisamment grand pour chaque  $\epsilon$ ). L'intervalle  $[t_N, \beta[$  est un voisinage à gauche de  $\beta$ . On a donc montré que  $\forall \epsilon > 0$ ,  $\exists \delta > 0$  (ici  $\delta = \beta - t_N$ ) tel que  $t \in ]\beta - \delta, \beta[ \implies \|x(t) - x^*\| < \epsilon$ .

C'est la définition de  $\lim_{t \rightarrow \beta^-} x(t) = x^*$ .

Puisque  $\lim_{t \rightarrow \beta^-} t = \beta$ , on a bien  $\lim_{t \rightarrow \sup J} (t, x(t)) = (\beta, x^*)$ .  $\square$

### Lemme 2: Lemme 2

(Avec les conditions (H) de la preuve ci-dessus), on a :

$$\forall t \in [t_N, \beta[, \|x(t) - x^*\| < \epsilon$$

*Preuve du Lemme 2.* **Observation :** Avec les conditions (H), on a  $(t_N, x(t_N)) \in B((\beta, x^*), \epsilon)$  car :

$$\|(t_N, x(t_N)) - (\beta, x^*)\| = \max(|t_N - \beta|, \|x(t_N) - x^*\|) < \epsilon \quad (\text{d'après H.})$$

Supposons par l'absurde que la proposition n'est pas vraie.

$$\exists t \in [t_N, \beta[ \text{ tel que } \|x(t) - x^*\| \geq \epsilon.$$

Posons  $T_\epsilon = \inf\{t \in [t_N, \beta[ \mid \|x(t) - x^*\| \geq \epsilon\}$ .

$T_\epsilon$  existe car l'ensemble est non vide et minoré par  $t_N$ . Par continuité de  $x$ , on a  $\|x(T_\epsilon) - x^*\| = \epsilon$ . (Et  $T_\epsilon > t_N$  car  $\|x(t_N) - x^*\| \leq \epsilon/2 < \epsilon$ ).

Par définition de  $T_\epsilon$ ,  $\forall s \in [t_N, T_\epsilon]$ , on a  $\|x(s) - x^*\| \leq \epsilon$ . On a aussi  $\forall s \in [t_N, T_\epsilon]$ ,  $|s - \beta| \leq |t_N - \beta| < \epsilon$  (car  $s < \beta$ ).

Donc  $\forall s \in [t_N, T_\epsilon]$ ,  $(s, x(s)) \in \bar{B}((\beta, x^*), \epsilon)$ .

Sur ce compact, la fonction  $F$  est bornée :  $\|F(s, x(s))\| < M$ .

On intègre l'EDO :  $x(T_\epsilon) - x(t_N) = \int_{t_N}^{T_\epsilon} F(s, x(s))ds$ .

$$\|x(T_\epsilon) - x(t_N)\| \leq \int_{t_N}^{T_\epsilon} \|F(s, x(s))\| ds \leq \int_{t_N}^{T_\epsilon} M ds = M(T_\epsilon - t_N)$$

On sait  $t_N < T_\epsilon < \beta$ , donc  $T_\epsilon - t_N < \beta - t_N < \frac{\epsilon}{2M}$  (par (H)).

En substituant, l'inégalité devient **stricte** :

$$\|x(T_\epsilon) - x(t_N)\| < M \cdot \left(\frac{\epsilon}{2M}\right) = \frac{\epsilon}{2}$$

Par l'inégalité triangulaire :

$$\|x(T_\epsilon) - x^*\| \leq \|x(T_\epsilon) - x(t_N)\| + \|x(t_N) - x^*\|$$

$$\|x(T_\epsilon) - x^*\| < \frac{\epsilon}{2} + \frac{\epsilon}{2} = \epsilon$$

(Note : L'inégalité devient stricte car le premier terme est  $< \frac{\epsilon}{2}$  et le second est  $\leq \frac{\epsilon}{2}$ )

Ceci est une **CONTRADICTION**, car  $T_\epsilon$  est défini tel que  $\|x(T_\epsilon) - x^*\| = \epsilon$ . □

## 4.9 Cauchy-Lipschitz (Cadre général)

### Définition 13: Localement Lipschitzienne

Soit  $\Omega \subset \mathbb{R}^{1+d}$  un ouvert et  $F : \Omega \rightarrow \mathbb{R}^d$ . On dit que  $F$  est **localement Lipschitzienne** (par rapport à  $x$ ) si :

$\forall (t_0, x_0) \in \Omega$ ,  $\exists V$  un voisinage de  $(t_0, x_0)$  dans  $\Omega$  tel que  $F$  est Lipschitzienne sur  $V \cap \Omega$ .

### Proposition 11: Caractérisation (Localement Lipschitzienne)

$F : \Omega \rightarrow \mathbb{R}^d$  est localement Lipschitzienne



$\forall K$  compact de  $\Omega$ ,  $F$  est Lipschitzienne sur  $K$ .

$$(\forall K \text{ compact} \subset \Omega, \exists L_K > 0 \text{ t.q. } \forall (t, x), (t, y) \in K, \|F(t, x) - F(t, y)\| \leq L_K \|x - y\|)$$

*Démonstration.* Soit  $C$  un compact de  $\Omega$ .  $\forall x \in C \subset \Omega, \exists r_x > 0$  (rayon) t.q.  $F$  est Lipschitzienne sur  $B(x, r_x)$ . La famille  $(B(x, r_x))_{x \in C}$  est un recouvrement ouvert de  $C$ .

Par la propriété de Borel-Lebesgue (Heine-Borel),  $C$  est compact, donc on peut extraire un sous-recouvrement fini :  $C \subset \bigcup_{i=1}^N B(x_i, r_i)$ .

(Preuve par l'absurde de l'existence d'un nombre de Lebesgue  $\rho$ ) : Supposons que (la propriété) n'est pas vraie.  $\forall n \in \mathbb{N}^*, \rho_n = \frac{1}{n}, \exists y_n \in C$  t.q.  $\forall i \in \{1, \dots, N\}, B(y_n, \frac{1}{n}) \not\subset B(x_i, r_i)$ .

$(y_n)$  est une suite de  $C$  compact. Il existe une sous-suite  $(y_{\phi(n)})$  t.q.  $y_{\phi(n)} \rightarrow y^* \in C$ .

Puisque  $y^* \in C, \exists i \in \{1, \dots, N\}$  t.q.  $y^* \in B(x_i, r_i)$ . Puisque  $B(x_i, r_i)$  est ouvert, pour  $n$  assez grand,  $B(y_{\phi(n)}, \frac{1}{\phi(n)}) \subset B(x_i, r_i)$ . Ceci contredit la construction de la suite  $(y_n)$ .

(Soit  $\rho$  ce nombre de Lebesgue.)

Soient  $x, y \in C$ .

Cas 1 :  $\|x - y\| < \rho$ . Alors  $\exists i$  t.q.  $\{x, y\} \subset B(x_i, r_i)$ .  $F$  est Lipschitzienne sur ce voisinage avec la constante  $C_i$ .

$$\|F(x) - F(y)\| \leq C_i \|x - y\| \leq \left( \max_{i=1..N} C_i \right) \|x - y\|$$

Cas 2 :  $\|x - y\| \geq \rho$ .

$$\|F(x) - F(y)\| \leq \|F(x)\| + \|F(y)\| \leq 2 \sup_{z \in C} \|F(z)\|$$

(Soit  $M = \sup_{z \in C} \|F(z)\|$ , qui existe car  $F$  est continue sur le compact  $C$ ).

Puisque  $\|x - y\| \geq \rho \implies 1 \leq \frac{\|x - y\|}{\rho}$ , on a :

$$\|F(x) - F(y)\| \leq 2M = 2M \cdot 1 \leq 2M \frac{\|x - y\|}{\rho} = \left( \frac{2M}{\rho} \right) \|x - y\|$$

i.e.  $\forall x, y \in C$  :

$$\|F(x) - F(y)\| \leq \max \left( \max_{i=1..N} C_i, \frac{2 \sup_{z \in C} \|F(z)\|}{\rho} \right) \|x - y\|$$

Ce qui prouve que  $F$  est Lipschitzienne sur  $C$ . □

## 4.10 Preuve du Théorème de Cauchy-Lipschitz (Existence locale)

### Remarque

Si  $F$  est localement Lipschitzienne  $\implies F$  est continue.

Si  $F$  est  $\mathcal{C}^1$  ou Lipschitzienne  $\implies F$  est localement Lipschitzienne. (L'inverse n'est pas forcément vrai).

### Exemple 7: Fonction non Lipschitzienne

Soit  $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$  définie par :

$$f(x) = \begin{cases} x \ln x & \text{si } x > 0 \\ 0 & \text{si } x \leq 0 \end{cases}$$

Regardons le taux d'accroissement en 0 :  $\frac{f(h)-f(0)}{h} = \frac{h \ln h}{h} = \ln h \xrightarrow[h \rightarrow 0^+]{} -\infty$ .

$f$  n'est pas dérivable en 0.

De plus, pour  $m \in \mathbb{N}$ , prenons  $x_m = e^{-m}$  et  $y_m = 0$ .  $\frac{|f(x_m)-f(0)|}{|x_m-0|} = |\ln(e^{-m})| = |-m| = m \rightarrow +\infty$ .

Le rapport n'est pas borné, donc  $f$  n'est pas Lipschitzienne au voisinage de 0. Cependant,  $f$  est localement Lipschitzienne sur  $\mathbb{R} \setminus \{0\}$  (car elle est  $\mathcal{C}^1$  sur cet ouvert).

### Remarque

Hypothèse du théorème de Cauchy-Lipschitz :  $F : \Omega \rightarrow \mathbb{R}^d$  (où  $\Omega$  est un ouvert de  $\mathbb{R}^{d+1}$ ).  $(t, x) \mapsto F(t, x)$ .

1.  $F$  est continue sur  $\Omega$ .
2.  $F$  est localement Lipschitzienne en la seconde variable  $x$ .

C'est-à-dire :  $\exists V$  voisinage de  $(t_0, x_0)$  dans  $\Omega$ ,  $\exists k > 0$  tels que :

$$\forall (t, X), (t, Y) \in V, \quad \|F(t, X) - F(t, Y)\| \leq k \|X - Y\|$$

### Remarque

$F$  localement Lipschitzienne en  $x$  est équivalent à : Pour tout compact  $K \subset \Omega$ ,  $\exists k_K > 0$  tel que  $\forall (t, X), (t, Y) \in K$ , on a :

$$\|F(t, X) - F(t, Y)\| \leq k_K \|X - Y\|$$

### Théorème 8: Cauchy-Lipschitz (Cadre Général)

Soit  $\Omega$  un ouvert de  $\mathbb{R} \times \mathbb{R}^d$  et  $F : \Omega \rightarrow \mathbb{R}^d$ . Supposons que :

- $F$  est continue sur  $\Omega$ .
- $F$  est localement Lipschitzienne par rapport à  $x$ .

Alors, pour tout  $(t_0, x_0) \in \Omega$ , le problème de Cauchy :

$$(E) \quad \begin{cases} Z'(t) = F(t, Z(t)) \\ Z(t_0) = x_0 \end{cases}$$

admet une **unique solution maximale**  $(J, x)$ .

### Preuve du Théorème (via un Lemme d'existence locale)

#### Lemme 3: Existence et Unicité Locale

Sous les conditions du Théorème, pour tout  $(t_0, x_0) \in \Omega$ , il existe un  $a > 0$  suffisamment petit tel que le problème (E) a une **unique solution** sur l'intervalle  $[t_0 - a, t_0 + a]$ .

#### Remarque

$[t_0 - a, t_0 + a]$  n'est pas un intervalle ouvert. On définit la dérivée aux bornes par la limite à droite ou à gauche :

$$x'(t_0 - a) = \lim_{h \rightarrow 0^+} \frac{x(t_0 - a + h) - x(t_0 - a)}{h}$$

$$x'(t_0 + a) = \lim_{h \rightarrow 0^-} \frac{x(t_0 + a + h) - x(t_0 + a)}{h}$$

Et pour  $t \in ]t_0 - a, t_0 + a[$ ,  $x'(t) = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{x(t+h) - x(t)}{h}$ .

*Preuve du Lemme.* Sans restriction, on va supposer que  $t_0 = 0$ . Nous allons démontrer l'existence et l'unicité en utilisant les deux lemmes suivants.  $\square$

#### Lemme 4: Équivalence Différentielle / Intégrale

Soit  $X$  une fonction continue sur  $[-a, a]$ .  $X$  est solution de (E) sur  $[-a, a]$  (c'est-à-dire  $C^1$  et vérifie l'équation)

$\iff$

$X$  satisfait l'équation intégrale suivante pour tout  $t \in [-a, a]$  :

$$X(t) = x_0 + \int_0^t F(s, X(s))ds$$

*Preuve du Lemme 4.* ( $\Rightarrow$ ) Si  $X$  est une solution de (E) sur  $[-a, a]$ . On a  $\forall s \in [-a, a], X'(s) = F(s, X(s))$ . En intégrant cette équation sur  $[0, t]$  :

$$X(t) = X(0) + \int_0^t X'(s)ds = x_0 + \int_0^t F(s, X(s))ds$$

De plus  $X$  est continue sur  $[-a, a]$  car dérivable.

( $\Leftarrow$ ) Réciproque. Supposons que  $X$  est continue et vérifie l'équation intégrale.  $s \mapsto F(s, X(s))$  est continue sur  $[-a, a]$  par composition de fonctions continues (car  $F$  est continue et  $X$  est continue).  $\Rightarrow g : t \mapsto \int_0^t F(s, X(s))ds$  est dérivable sur  $[-a, a]$ .

Démontrons cela : Pour tout  $t \in [0, a]$ , formons le taux d'accroissement :

$$\begin{aligned} \frac{g(t+h) - g(t)}{h} &= \frac{1}{h} \left( \int_0^{t+h} F(s, X(s))ds - \int_0^t F(s, X(s))ds \right) \\ &= \frac{1}{h} \int_t^{t+h} F(s, X(s))ds \end{aligned}$$

(avec  $h$  suffisamment petit pour que  $t + h \in [-a, a]$ ).

On effectue le changement de variable  $s = t + \theta h$  (donc  $ds = hd\theta$ ).

$$= \frac{1}{h} \int_0^1 F(t + \theta h, X(t + \theta h)) \cdot hd\theta = \int_0^1 F(t + \theta h, X(t + \theta h))d\theta$$

Par continuité de  $F$  et  $X$ , on a :

$$F(t + \theta h, X(t + \theta h)) \xrightarrow[h \rightarrow 0]{} F(t, X(t))$$

De plus, la fonction  $s \mapsto F(s, X(s))$  est continue sur le compact  $[-a, a]$ , donc elle est bornée.  $\exists M > 0$  tel que  $\|F(s, X(s))\| \leq M$ . Donc  $\|F(t + \theta h, X(t + \theta h))\| \leq M$ .

On peut appliquer le **Théorème de Convergence Dominée** (avec la fonction constante  $M$  intégrable sur  $[0, 1]$  car  $\int_0^1 M d\theta = M < +\infty$ ).

$$\begin{aligned} \lim_{h \rightarrow 0} \int_0^1 F(t + \theta h, X(t + \theta h)) d\theta &= \int_0^1 \lim_{h \rightarrow 0} F(t + \theta h, X(t + \theta h)) d\theta \\ &= \int_0^1 F(t, X(t)) d\theta = F(t, X(t)) \end{aligned}$$

Donc  $g$  est dérivable et  $g'(t) = F(t, X(t))$ . Ainsi,  $X(t) = x_0 + g(t)$  est dérivable et  $X'(t) = F(t, X(t))$ . Enfin,  $X(0) = x_0 + 0 = x_0$ . Donc  $X$  est solution.  $\square$

### Lemme 5: Existence et Unicité dans $E_a$

Il existe  $a > 0$  suffisamment petit tel que l'équation intégrale :

$$X(t) = x_0 + \int_0^t F(s, X(s)) ds$$

admet une **unique solution** dans l'espace  $E_a$ .

*Preuve du Lemme 5.* On veut prouver que le problème admet une unique solution. Soit  $r > 0$  tel que la boule fermée  $B((0, x_0), r) \subset \Omega$  (possible car  $\Omega$  est ouvert).

Sur ce compact  $\overline{B}((0, x_0), r)$  :

1.  $F$  est continue, donc  $F$  est bornée sur ce compact.  $\exists M_r > 0$  tel que  $\forall (t, X) \in \overline{B}((0, x_0), r), \|F(t, X)\| \leq M_r$ .
2.  $F$  est localement Lipschitzienne en  $x$ , donc  $F$  est Lipschitzienne sur ce compact.  $\exists k_r > 0$  tel que  $\forall (t, X), (t, Y) \in \overline{B}((0, x_0), r), \|F(t, X) - F(t, Y)\| \leq k_r \|X - Y\|$ .

Nous allons travailler dans l'espace fonctionnel  $E_a$  défini par :

$$E_a = \{X \in \mathcal{C}^0([-a, a], \mathbb{R}^d) \mid X(0) = x_0 \text{ et } \|X - x_0\|_\infty \leq r\}$$

avec  $a \leq r$ .

**Justification de la condition (Condition 1)  $a \leq r$ :** On impose la condition  $a \leq r$ . En effet, pour que  $F(t, X(t))$  soit défini, il faut que  $(t, X(t)) \in \Omega$ . On veut donc s'assurer que  $\forall t \in [-a, a], (t, X(t)) \in \overline{B}((0, x_0), r) \subset \Omega$ . En munissant  $\mathbb{R} \times \mathbb{R}^d$  de la norme infinie  $\|(t, x)\|_\infty = \max(|t|, \|x\|)$ , la condition d'appartenance à la boule s'écrit :

$$\|(t, X(t)) - (0, x_0)\|_\infty \leq r \iff \max(|t - 0|, \|X(t) - x_0\|) \leq r$$

Ceci équivaut à :

$$|t| \leq r \quad \text{et} \quad \|X(t) - x_0\| \leq r$$

Pour que la première partie ( $|t| \leq r$ ) soit vraie pour tout  $t \in [-a, a]$ , il faut et il suffit que  $a \leq r$ . La seconde partie est assurée par la définition même de l'espace  $E_a$ .

**Preuve que  $E_a$  est complet :**  $\mathcal{C}^0([-a, a])$  muni de la norme infini est un espace de Banach. Montrons que  $E_a$  est un fermé de cet espace. Soit  $(X_n)_{n \in \mathbb{N}}$  une suite d'éléments de  $E_a$  telle que  $X_n \rightarrow X$  uniformément sur  $[-a, a]$ .

1. Pour tout  $n$ ,  $X_n(0) = x_0$ . Par convergence simple en 0,  $X(0) = \lim X_n(0) = x_0$ .
2. Pour tout  $n$ ,  $\|X_n - x_0\|_\infty \leq r$ . Par passage à la limite dans l'inégalité large,  $\|X - x_0\|_\infty \leq r$ .

Donc  $X \in E_a$ .  $E_a$  est un fermé d'un espace complet, donc  $E_a$  est complet.

Définissons l'application  $\Phi : E_a \rightarrow E_a$ .

$$\Phi(X) : t \mapsto x_0 + \int_0^t F(s, X(s))ds$$

**Vérifions que  $\Phi$  est bien définie :** Pour  $X \in E_a$ ,  $s \mapsto X(s)$  est continue.  $F$  est continue. Donc  $s \mapsto F(s, X(s))$  est continue. Donc  $\Phi(X)$  est de classe  $\mathcal{C}^1$  (primitive d'une continue), donc  $\Phi(X) \in \mathcal{C}^0([-a, a])$ .

**Condition 2 : Stabilité ( $\Phi$  envoie  $E_a$  dans  $E_a$ )** Soit  $X \in E_a$ . On a  $\|\Phi(X)(0) - x_0\| = 0$ . Il faut montrer que  $\|\Phi(X)(t) - x_0\| \leq r$  pour tout  $t \in [-a, a]$ .

$$\|\Phi(X)(t) - x_0\| = \left\| \int_0^t F(s, X(s))ds \right\| \leq \left| \int_0^t \|F(s, X(s))\| ds \right|$$

Comme  $X \in E_a$ , pour tout  $s \in [-a, a]$ ,  $(s, X(s)) \in \overline{B}((0, x_0), r)$ . Donc  $\|F(s, X(s))\| \leq M_r$ .

$$\|\Phi(X)(t) - x_0\| \leq M_r |t| \leq M_r a$$

Pour que  $\Phi(X) \in E_a$ , il suffit d'imposer :

$$M_r a \leq r$$

**Condition 3 : Contraction** Soient  $Y_1, Y_2 \in E_a$ .

$$\begin{aligned} \|\Phi(Y_1)(t) - \Phi(Y_2)(t)\| &= \left\| \int_0^t (F(s, Y_1(s)) - F(s, Y_2(s)))ds \right\| \\ &\leq \left| \int_0^t \|F(s, Y_1(s)) - F(s, Y_2(s))\| ds \right| \end{aligned}$$

Comme  $Y_1, Y_2 \in E_a$ , les points sont dans le compact où  $F$  est Lipschitzienne de constante  $k_r$ .

$$\begin{aligned} &\leq \left| \int_0^t k_r \|Y_1(s) - Y_2(s)\| ds \right| \\ &\leq k_r |t| \sup_{s \in [-a, a]} \|Y_1(s) - Y_2(s)\| \\ &\leq k_r a \|Y_1 - Y_2\|_\infty \end{aligned}$$

En passant au sup sur  $t$  :

$$\|\Phi(Y_1) - \Phi(Y_2)\|_\infty \leq (k_r a) \|Y_1 - Y_2\|_\infty$$

Pour que  $\Phi$  soit une contraction stricte, il faut imposer :

$$k_r a < 1$$

**Conclusion :** Si  $a$  satisfait les conditions :

$$\begin{cases} a \leq r \\ M_r a \leq r \\ k_r a < 1 \end{cases}$$

Alors  $\Phi$  est une contraction de l'espace complet  $E_a$  dans lui-même. D'après le Théorème du Point Fixe de Banach,  $\Phi$  admet un unique point fixe  $z \in E_a$ . Donc l'équation intégrale admet une unique solution dans  $E_a$ .  $\square$

*Suite de la preuve du Lemme principal (Unicité globale).* Le Lemme 5 nous donne une unique solution  $X_1$  appartenant à  $E_a$ . Supposons par l'absurde qu'il existe une autre solution  $X_2$  définie sur  $[-a, a]$  (qui ne serait pas dans  $E_a$ ).

Puisque  $X_2$  est solution,  $X_2$  est continue (car dérivable) sur  $[-a, a]$ . On suppose sans restriction que  $T \geq 0$ . Soit  $T_1 = \inf\{t \in [0, a] : \|X_2(t) - x_0\| > r\}$ . Cet ensemble est non vide (sinon  $X_2 \in E_a$ ). Comme  $X_2(0) = x_0$ , par continuité, l'ensemble est minoré par 0, donc  $T_1$  existe.

On a  $\|X_2(T_1) - x_0\| = r$  (par continuité). Et pour tout  $t < T_1$ ,  $\|X_2(t) - x_0\| \leq r$ .

Sur l'intervalle  $[0, T_1]$ ,  $X_2$  vérifie l'équation intégrale :

$$X_2(T_1) - x_0 = \int_0^{T_1} F(s, X_2(s))ds$$

$$\|X_2(T_1) - x_0\| \leq \int_0^{T_1} \|F(s, X_2(s))\|ds$$

Comme pour  $s \in [0, T_1]$ ,  $(s, X_2(s))$  est dans la boule  $B((0, x_0), r)$  (car la norme est  $\leq r$ ), on peut majorer par  $M_r$ .

$$\|X_2(T_1) - x_0\| \leq \int_0^{T_1} M_r ds = M_r T_1$$

Or  $T_1 \leq a$ . Et on a choisi  $a$  tel que  $M_r a < r$  (on peut choisir l'inégalité stricte dans la condition 1,  $M_r a \leq r/2$  par exemple).

Si on prend  $M_r a < r$ , alors :

$$\|X_2(T_1) - x_0\| \leq M_r a < r$$

Ceci contredit le fait que  $\|X_2(T_1) - x_0\| = r$ .

L'hypothèse d'existence d'un point de sortie est donc fausse.  $X_2$  reste dans  $E_a$  sur tout l'intervalle. Par unicité dans  $E_a$ ,  $X_2 = X_1$ .  $\square$