

# Polycopié de Calcul Différentiel et Équations Différentielles

## L3 MIDO

Cours de Borris Haspot

**Créé et Compilé** par Samuel Lelouch avec Gemini

**Notes Manuscrites** de Bastien Marbaud, Victor Barbera et Samuel Lelouch

**Sponsorisé** par Bastien Marbaud et Antoine Nicolas–Lutfalla

16 décembre 2025

## Table des matières

<b>1</b>	<b>Calcul Différentiel . . . . .</b>	<b>3</b>
I.	Théorème d'inversion locale . . . . .	3
II.	Théorème de Hadamard . . . . .	7
III.	Un peu de géométrie différentielle . . . . .	9
<b>2</b>	<b>Équations Différentielles . . . . .</b>	<b>12</b>
I.	Équations Différentielles . . . . .	12
II.	Équations autonomes . . . . .	32
III.	Équilibres et Stabilité des Équations Autonomes . . . . .	34
IV.	Solutions explicites en dimension 1 . . . . .	39
V.	Principe de Comparaison. . . . .	47
VI.	Systèmes différentiels linéaires . . . . .	57
VII.	Cas diagonalisable dans $\mathbb{C}$ : . . . . .	72
VIII.	Cas général lorsque $A$ est diagonalisable. . . . .	79
IX.	Solution de $X'(t) = AX(t)$ sous forme d'exponentiel de matrices . . . . .	80

# Calcul Différentiel

## I. Théorème d'inversion locale

### Définition 1: $\mathcal{C}^1$ -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,  $\forall y \in V', df^{-1}(y) = [df(f^{-1}(y))]^{-1}$ .

**Preuve :**

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 :

$$\forall y \in V', \exists ! x \in U' \text{ t.q. } \Phi(x, y) = 0, \text{ et cet } x \text{ est } x = \varphi(y)$$

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.

**Preuve :**

( $\Rightarrow$ ) 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.

**Preuve :**

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  $f(\Omega)$ .

**Preuve :**

$f : \Omega \rightarrow f(\Omega)$  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  $\mathcal{C}^1$ -**difféomorphisme local** (i.e.  $\det(Jf(x)) \neq 0$  pour tout

$x \in \Omega$ ,

Alors  $f$  est un  $\mathcal{C}^1$ -difféomorphisme global de  $\Omega$  sur l'ouvert  $f(\Omega)$ .

## II. 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  $\|x\| \rightarrow +\infty$ .

### Preuve :

( $\Leftarrow$ ) 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  $E$  est borné dans  $\mathbb{R}^n$ , alors  $f^{-1}(E)$  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  $Y$ ).

### Preuve :

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.

**Preuve :**

$f : \mathbb{R}^n \rightarrow f(\mathbb{R}^n)$  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,  $\implies f(\mathbb{R}^n) = \mathbb{R}^n$ .  $\square$



### III. 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.

**Preuve :**

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  $\text{Ker}(l) = H$ .

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

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

Donc  $H$  est une hypersurface. □

#### 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  $\mathbb{R}^{n-1}$ .

**Preuve :**

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  $\mathcal{C}^1$  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  $n-1$ .  
 $\implies \text{rg}(d\varphi(h')) = n-1 \quad \forall h' \in U$ . □

#### 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 (paramétré)**

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  $d\varphi(0)$ .

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

**Preuve :**

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  $\forall v \in \mathbb{R}^{n-1}$ ,  $df(a)(d\varphi(0)(v)) = 0$ .

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

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

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

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

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

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

(Transcription des images)

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

□

# Équations Différentielles

## I. Équations Différentielles

(Partie II du cours)

### 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.

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

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

- a) 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).
- b) (E) a une infinité de solutions maximales  $(\mathbb{R}, \lambda e^{at})$  paramétrées par  $\lambda \in \mathbb{R}$ .
- c) 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).

## 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 :

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

## 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  $X \in \mathcal{C}^{n+1}(J)$ .

**Preuve :**

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 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) :

$$\begin{cases} x'(t) = F(x(t)) \\ x(0) = 0 \end{cases} \quad . \text{ Montrons que (C) n'a pas de solutions.}$$

#### 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 :

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

**Preuve :**

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  $t \in J \cap J'$ .  $\square$

## 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 :  $\forall t \in J \cap J', x(t) < y(t)$ .

**Preuve :**

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  $C^\infty$  (donc  $C^1$  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  $J$ .

## 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  $\forall t \in V \cap J, \gamma(t) \notin K$ .

### Preuve :

(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 :

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

### 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.  $\square$

## 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  $C^1$  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  $C^1$  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  $C^1$  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.

#### Preuve :

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°)). □

## 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).

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

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 :

$$\begin{aligned} \frac{Y_1(\sup J) - Y_1(\sup J + h)}{-h} &= Y_1'(c_h) = x'(c_h) \\ \frac{x^* - x(\sup J + h)}{-h} &= \frac{x(\sup J + h) - x^*}{h} = F(c_h, x(c_h)) \end{aligned}$$

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  $\mathcal{C}^1$  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  $\lim_{t \rightarrow \sup} J(t, x(t)) = (\beta, x^*)$ . □

### Lemme 2: Lemme 2

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

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

### 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  $\|x(T_\epsilon) - x^*\| = \epsilon$ . □

## 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

$\iff$

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

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

**Preuve :**

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  $C$ . □

## 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  $\mathcal{C}^1$  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  $ds = h d\theta$ ).

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

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  $E_a$ ,  $X_2 = X_1$ .  $\square$

#### Suite de la preuve du Théorème de Cauchy-Lipschitz

### Remarque

D'après le lemme précédent, on déduit que pour  $a > 0$  suffisamment petit, il existe une unique solution du problème (E) sur  $]t_0 - a, t_0 + a[$ .

### Lemme 6: Unicité globale sur l'intersection

Soit  $(J_x, x)$  et  $(J_y, y)$  deux solutions du problème (E). Alors  $\forall t \in J_x \cap J_y, \quad x(t) = y(t)$ .

#### Preuve du lemme :

On pose  $J^* = J_x \cap J_y$ . C'est un intervalle ouvert (comme intersection de deux intervalles ouverts). On veut montrer que  $F = \{t \in J^* | x(t) = y(t)\}$  est égal à  $J^*$ .

$J^*$  est connexe car c'est un intervalle. Nous allons vérifier que  $F$  est un ouvert-fermé non vide de  $J^*$ .

**F est non vide :**  $t_0 \in J_x$  et  $t_0 \in J_y$ , donc  $t_0 \in J^*$ . On a  $x(t_0) = y(t_0) = x_0$ . Donc  $t_0 \in F$ .

**F est fermé dans  $J^*$  :** Soit  $(t_n)_{n \in \mathbb{N}}$  une suite de  $F$  telle que  $t_n \rightarrow t^*$  dans  $J^*$ .  $\forall n \in \mathbb{N}, t_n \in F \implies x(t_n) = y(t_n)$ . Par continuité de  $x$  et  $y$  en  $t^* \in J^*$ , on a :

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} x(t_n) = x(t^*) \quad \text{et} \quad \lim_{n \rightarrow +\infty} y(t_n) = y(t^*)$$

$\implies x(t^*) = y(t^*)$ . Donc  $t^* \in F$ .  $F$  est fermé.

**F est ouvert :** Soit  $t_* \in F \subset J^*$  (intervalle ouvert). Considérons le nouveau problème de Cauchy (E') centré en  $t_*$  :

$$(E') \quad \begin{cases} Z'(t) = F(t, Z(t)) \\ Z(t_*) = x(t_*) = y(t_*) \end{cases}$$

D'après le lemme d'existence locale (Lemme 3), on nous dit qu'il existe  $a > 0$  suffisamment petit tel que le problème (E') a une **unique solution** sur l'intervalle  $]t_* - a, t_* + a[$ .

Or,  $x$  et  $y$  sont bien solutions de (E') sur cet intervalle (puisque'ils sont solutions de (E) sur  $J^*$  qui contient  $]t_* - a, t_* + a[$ ). Par unicité de la solution sur  $]t_* - a, t_* + a[$ , on a :

$$\forall t \in ]t_* - a, t_* + a[, \quad x(t) = y(t)$$

Donc  $]t_* - a, t_* + a[ \subset F$ . Ceci prouve que  $F$  est un voisinage de chacun de ses points, et donc  $F$  est un ouvert de  $J^*$ .

**Conclusion :**  $F$  est un ouvert-fermé non vide de  $J^*$ . Comme  $J^*$  est connexe, on a  $F = J^*$ .  $\square$

#### Construction de la solution maximale

Posons  $J_{max} = \bigcup_{(J,Y)} J$ , où l'union est prise sur toutes les solutions  $(J, Y)$  du problème (E)  $\begin{cases} Z'(t) = F(t, Z(t)) \\ Z(t_0) = x_0 \end{cases}$ .  $J_{max}$  est une union d'intervalles ouverts contenant tous  $t_0$ . L'union n'est pas vide (car on sait qu'il existe au moins une solution locale sur  $]t_0 - a, t_0 + a[$ ).  $J_{max}$  est donc un intervalle ouvert (car c'est une union connexe, car tous les ensembles contiennent  $t_0$ ) et  $t_0 \in J_{max}$ .

Définissons  $Y_{max}$  sur  $J_{max}$  : Soit  $t \in J_{max}$ . Par définition de  $J_{max}$ ,  $\exists (J, Y)$  solution de (E) telle que  $t \in J$ . On pose  $Y_{max}(t) = Y(t)$ .

Vérifions que cette définition est bien correcte (ne dépend pas du choix de la solution  $(J, Y)$ ) : Soit

$t \in J_{max}$ . Soient  $(J_1, Y_1)$  et  $(J_2, Y_2)$  deux solutions de (E) telles que  $t \in J_1$  et  $t \in J_2$ . On a  $t \in J_1 \cap J_2$ . D'après le lemme d'unicité (Lemme 6), on a  $Y_1(t) = Y_2(t)$ . La valeur de  $Y_{max}(t)$  ne dépend pas du choix de la solution.

Vérifions que  $(J_{max}, Y_{max})$  est solution : Soit  $t \in J_{max}$ .  $\exists (J, Y)$  solution tq  $t \in J$ .  $J$  est ouvert, donc  $\exists \epsilon > 0$  tq  $]t - \epsilon, t + \epsilon[ \subset J \subset J_{max}$ . Par définition de  $Y_{max}$ ,  $\forall t' \in ]t - \epsilon, t + \epsilon[, Y_{max}(t') = Y(t')$ . Donc  $Y'_{max}(t) = Y'(t) = F(t, Y(t)) = F(t, Y_{max}(t))$ . Donc  $\forall t \in J_{max}, Y'_{max}(t) = F(t, Y_{max}(t))$ . Par définition de  $Y_{max}$ , on a  $Y_{max}(t_0) = Y(t_0) = x_0$  (en prenant une solution  $(J, Y)$  qui contient  $t_0$ ). Donc  $(J_{max}, Y_{max})$  est solution de (E). Par définition de  $J_{max}$  (comme union de tous les domaines),  $(J_{max}, Y_{max})$  est la solution maximale.

## II. Équations autonomes

### Définition 14: Équation autonome

Une équation autonome prend la forme :

$$x'(t) = G(x(t))$$

où  $G : \Omega \rightarrow \mathbb{R}^d$ , avec  $\Omega$  un ouvert de  $\mathbb{R}^d$ .  $x \mapsto G(x)$ .

### Remarque

Une équation autonome est une équation non-autonome particulière. On pose  $\Omega_F = \mathbb{R} \times \Omega$  (ouvert de  $\mathbb{R}^{d+1}$ ) et  $F : \Omega_F \rightarrow \mathbb{R}^d$

$$(t, x) \mapsto G(x)$$

### Remarque

On peut transformer une équation non-autonome  $x'(t) = F(t, x(t))$  en une équation autonome (en augmentant la dimension). Soit  $F : \Omega \rightarrow \mathbb{R}^d$  (où  $\Omega \subset \mathbb{R}^{d+1}$ ). Posons  $Y(t) = (t, x(t)) \in \mathbb{R}^{d+1}$ . Alors  $Y'(t) = (1, x'(t))$ .

$$Y'(t) = (1, F(t, x(t)))$$

On pose  $G : \Omega \rightarrow \mathbb{R}^{d+1}$

$$Y \mapsto G(Y) = (1, F(Y))$$

L'équation  $x'(t) = F(t, x(t))$  est équivalente à l'équation autonome  $Y'(t) = G(Y(t))$ .

### Proposition 12: Équivalence Non-Autonome / Autonome

$(J, x)$  est solution maximale du problème  $\begin{cases} x'(t) = F(t, x(t)) \\ x(t_0) = x_0 \end{cases}$  (avec  $F : \Omega \rightarrow \mathbb{R}^d$ ,  $\Omega$  ouvert de  $\mathbb{R}^{d+1}$ )  $\iff (J, Y)$  avec  $Y(t) = (t, x(t))$  est solution maximale de l'équation autonome  $Y'(t) = G(Y(t))$  avec  $G : \Omega \rightarrow \mathbb{R}^{d+1}$  et  $Y(t_0) = (t_0, x(t_0)) \in \Omega$ .

### Remarque

Tout résultat sur un système autonome peut se traduire sur un système non-autonome. L'idée de passer d'un système non-autonome à un système autonome n'est pas très pertinente car on augmente la dimension.

### Proposition 13: Invariance par translation (Syst. autonomes)

Soit (E)  $x'(t) = G(x(t))$  avec  $G : \Omega \rightarrow \mathbb{R}^d$  localement Lipschitzienne sur  $\Omega$  (ouvert de  $\mathbb{R}^d$ ). Soient  $(J_x, x)$  et  $(J_y, y)$  deux solutions maximales de (E). Soit  $x_0 \in \Omega$ ,  $t_0 \in \mathbb{R}$  et  $s \in \mathbb{R}$  tels que  $t_0 \in J_x$  et  $t_0 + s \in J_y$  et :

$$x(t_0) = x_0 = y(t_0 + s)$$

Alors  $J_x = \{t \in \mathbb{R} | t + s \in J_y\}$  et  $\forall t \in J_x, x(t) = y(t + s)$ .

**Preuve :**

Posons  $z(t) = y(t + s)$ . On a  $z'(t) = y'(t + s) = G(y(t + s)) = G(z(t))$ .



L'intervalle de définition de  $z$  est  $J_z = \{t | t + s \in J_y\}$ . On a  $z(t_0) = y(t_0 + s) = x(t_0)$ .  
Donc  $(J_z, z)$  est solution du problème de Cauchy (CC) :

$$(CC) \quad \begin{cases} w'(t) = G(w(t)) \\ w(t_0) = x_0 \end{cases}$$

Montrons que  $(J_z, z)$  est une solution maximale. Si elle ne l'est pas,  $\exists(\tilde{J}_z, \tilde{z})$  solution de (CC) tq  $J_z \subsetneq \tilde{J}_z$  et  $\tilde{z}|_{J_z} = z$ . Posons  $\tilde{y}(t) = \tilde{z}(t - s)$ . Le domaine de  $\tilde{y}$  est  $\tilde{J}_y = \{t \in \mathbb{R} | t - s \in \tilde{J}_z\}$ . On a  $\tilde{J}_y \supset \{t \in \mathbb{R} | t - s \in J_z\} = J_y$ , et l'inclusion est stricte. De plus,  $\forall t \in J_y, \tilde{y}(t) = \tilde{z}(t - s) = z(t - s) = y(t)$ .  $(\tilde{J}_y, \tilde{y})$  étend  $(J_y, y)$ , ce qui là est absurde car  $(J_y, y)$  est maximale.

Donc  $(J_z, z)$  est une solution maximale de (CC).

$(J_x, x)$  est aussi une solution maximale de (CC). Par unicité de la solution maximale (Théorème de Cauchy-Lipschitz, car  $G$  est loc. Lipschitz), on a :

$$J_x = J_z \quad \text{et} \quad \forall t \in J_x, x(t) = z(t)$$

Ce qui donne :  $J_x = \{t | t + s \in J_y\}$  et  $x(t) = y(t + s)$ . □

#### Remarque

Si le système est non-autonome :  $z(t) = y(t + s) \implies z'(t) = y'(t + s) = F(t + s, y(t + s)) = F(t + s, z(t))$ . Il n'y a pas de raison que  $F(t + s, z(t)) = F(t, z(t))$ .

#### Remarque

Dans le cadre d'un système autonome, la condition initiale peut être fixée en  $t_0 = 0$  sans perte de généralité. Si  $(J_2, x_2)$  est solution de (E) avec  $x_2(0) = x_0$ , alors  $(J_1, x_1)$  avec  $J_1 = \{t_0 + t | t \in J_2\}$  et  $x_1(t) = x_2(t - t_0)$  est solution de (E) avec  $x_1(t_0) = x_0$ .

### Définition 15: Trajectoire

La **trajectoire** d'une solution  $(J, x)$  d'une équation autonome est l'ensemble :

$$T_x = \{x(t) | t \in J\} \subset \Omega \subset \mathbb{R}^d$$

### Proposition 14: Propriétés des Trajectoires

Supposons  $G$  localement Lipschitzienne. Soit  $x_0 \in \mathbb{R}^d$ .

- Si deux solutions maximales du problème  $x'(t) = G(x(t))$  prennent la valeur  $x_0$  (à des temps  $t_0$  et  $t_1$ ), alors elles ont la même trajectoire.
- Les trajectoires associées à deux solutions maximales sont soit les mêmes, soit disjointes.

#### Preuve :

- Soient  $(J_1, x_1)$  et  $(J_2, x_2)$  deux solutions maximales tq  $\exists t_0 \in J_1, t_0 + s \in J_2$  (pour un  $s$ ) avec  $x_1(t_0) = x_2(t_0 + s) = x_0$ . D'après la proposition d'invariance par translation, on a :  $J_2 = \{t + s | t \in J_1\}$  et  $x_1(t) = x_2(t + s) \quad \forall t \in J_1$ .

$$T_{x_1} = \{x_1(t) | t \in J_1\} \quad T_{x_2} = \{x_2(t') | t' \in J_2\}$$

$$\text{En posant } t' = t + s : T_{x_1} = \{x_2(t + s) | t \in J_1\} = \{x_2(t') | t' \in J_2\} = T_{x_2}.$$

- Soient  $T_{x_1}$  et  $T_{x_2}$  deux trajectoires.

- Cas 1 :  $T_{x_1} \cap T_{x_2} \neq \emptyset$ . Alors  $\exists x_0 \in T_{x_1} \cap T_{x_2}$ . D'après a),  $T_{x_1} = T_{x_2}$ .
- Cas 2 :  $T_{x_1} \cap T_{x_2} = \emptyset$ . Les trajectoires sont disjointes.

□

### III. Équilibres et Stabilité des Équations Autonomes

#### 1 Notion d'équilibre

Considérons le problème  $(E)$  :

$$X'(t) = F(t, X(t))$$

avec  $F : \mathbb{R} \times \Omega \rightarrow \mathbb{R}^d$  continue et localement lipschitzienne en  $x$ , où  $\Omega$  est un ouvert de  $\mathbb{R}^d$ .

Dans la suite, nous nous intéressons particulièrement au cas autonome  $X'(t) = G(X(t))$  où  $G : \Omega \rightarrow \mathbb{R}^d$ .

##### Définition 16: Solution stationnaire

$X$  est une solution stationnaire de  $(E)$  sur  $J = \mathbb{R}$  si :

$$\forall t \in \mathbb{R}, \quad X(t) = C \in \mathbb{R}^d$$

où  $C$  est une constante.

##### Définition 17: Point d'équilibre

$X^* \in \Omega$  est un point d'équilibre si  $G(X^*) = 0$ .

##### Remarque

Si  $G$  est localement lipschitzienne, alors le problème de Cauchy :

$$\begin{cases} X'(t) = G(X(t)) \\ X(t_0) = X^* \end{cases}$$

admet une unique solution maximale définie sur  $J = \mathbb{R}$ , qui est la fonction constante  $X(t) = X^*$ . En effet,  $X'(t) = 0$  et  $G(X(t)) = G(X^*) = 0$ , donc l'équation est vérifiée. L'unicité est garantie par le théorème de Cauchy-Lipschitz.

##### Proposition 15: Comportement asymptotique et équilibre

Soit  $(J, X)$  une solution maximale du problème autonome  $X'(t) = G(X(t))$  avec  $G$  localement lipschitzienne.

Soit  $X^* \in \Omega$ . Si :

$$\lim_{t \rightarrow \sup J} X(t) = X^*$$

Alors :

1.  $\sup J = +\infty$ .
2.  $G(X^*) = 0$  (c'est-à-dire que  $X^*$  est un point d'équilibre).

**Preuve :**

**1. Montrons que  $\sup J = +\infty$ .**

Supposons que  $\lim_{t \rightarrow \sup J} X(t) = X^*$ .

On a  $J \subset \mathbb{R}$ . Comme la limite existe et vaut  $X^* \in \Omega$ ,  $X$  est bornée sur  $[t_0, \sup J[$ . En effet, il existe  $\varepsilon > 0$  tel que pour  $t$  assez proche de  $\sup J$  (sur  $[\sup J - \varepsilon, \sup J[$ ), on a  $\|X(t) - X^*\| < 1$ , donc  $\|X(t)\| < 1 + \|X^*\|$ .

De plus,  $X$  est continue sur tout segment inclus dans  $J$  donc aussi bornée sur  $[t_0, \sup J - \varepsilon]$ . Ainsi, la fonction  $X$  est bornée sur  $J$ .

D'après le **critère d'explosion**, pour une solution maximale, nous avons l'alternative suivante :

$$\text{Soit } \sup J = +\infty, \quad \text{soit } \lim_{t \rightarrow \sup J} \|X(t)\| = +\infty \text{ (ou } X(t) \text{ s'approche du bord de } \Omega).$$

Or, nous venons de montrer que  $X(t)$  est bornée (et converge vers  $X^* \in \Omega$ , donc reste dans un compact de  $\Omega$ ). La deuxième option est donc impossible. On a forcément  $\sup J = +\infty$ .

**2. Montrons que  $G(X^*) = 0$ .**

Supposons par l'absurde que  $G(X^*) \neq 0$ .

Pour tout  $t \in J$ , on a  $X'(t) = G(X(t))$ . Puisque  $X(t) \rightarrow X^*$  quand  $t \rightarrow +\infty$  et que  $G$  est continue, on a :

$$\lim_{t \rightarrow +\infty} X'(t) = \lim_{t \rightarrow +\infty} G(X(t)) = G(X^*) \neq 0$$

Cela signifie qu'il existe une composante  $i \in \{1, \dots, d\}$  telle que  $G_i(X^*) \neq 0$ . Supposons par exemple  $G_i(X^*) > 0$ .

On peut écrire :

$$X(t) = X(t_0) + \int_{t_0}^t X'(s) ds \implies X_i(t) = X_i(t_0) + \int_{t_0}^t G_i(X(s)) ds$$

Puisque  $G_i(X(s)) \rightarrow G_i(X^*) > 0$ , par définition de la limite, il existe  $T > t_0$  tel que pour tout  $s \geq T$ ,  $G_i(X(s)) > \frac{G_i(X^*)}{2}$ .

Alors pour  $t \geq T$  :

$$X_i(t) = X_i(T) + \int_T^t G_i(X(s)) ds \geq X_i(T) + (t - T) \frac{G_i(X^*)}{2}$$

Quand  $t \rightarrow +\infty$ , le terme de droite tend vers  $+\infty$ . Donc  $X_i(t) \rightarrow +\infty$ .

Or, par hypothèse,  $X(t) \rightarrow X^*$ , donc  $X_i(t) \rightarrow X_i^* \in \mathbb{R}$ . C'est une contradiction.

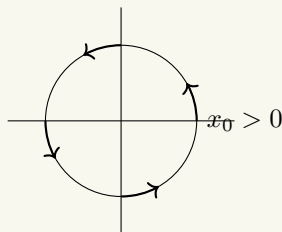
On en déduit que  $G(X^*) = 0$ . □

#### Remarque

La réciproque est fausse. Si  $\sup J = +\infty$ , la limite  $\lim_{t \rightarrow +\infty} X(t)$  n'existe pas forcément.

#### Exemple 8: Oscillateur harmonique

Considérons le système défini sur  $J = \mathbb{R}$ .



$$\begin{cases} x'(t) = -y(t) \\ y'(t) = x(t) \end{cases} \quad \text{avec } F \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -y \\ x \end{pmatrix}$$

La solution est :

$$\begin{cases} x(t) = \cos(t) \\ y(t) = \sin(t) \end{cases}$$

$X^* = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}$  est un équilibre.

Ici,  $\sup J = +\infty$ . Pourtant,  $\lim_{t \rightarrow +\infty} X(t)$  n'existe pas (le point tourne indéfiniment sur le cercle unité). L'origine  $(0, 0)$  est le seul point d'équilibre, mais la solution ne converge pas vers lui.

## 2 Stabilité des équilibres

### Définition 18: Équilibre attractif et répulsif

Soit  $X^*$  un point d'équilibre de  $X' = G(X)$ .

- **Attractif** : L'équilibre  $X^*$  est dit attractif s'il existe un voisinage ouvert  $V$  de  $X^*$  tel que pour toute solution maximale  $(J, X)$  avec  $X(t_0) \in V$ , on a :

$$\sup J = +\infty \quad \text{et} \quad \lim_{t \rightarrow +\infty} X(t) = X^*$$

- **Répulsif** : L'équilibre  $X^*$  est dit répulsif s'il existe un voisinage ouvert  $V$  de  $X^*$  tel que pour toute solution maximale  $(J, X)$  avec  $X(t_0) \in V \setminus \{X^*\}$ , la solution finit par sortir de  $V$ . C'est-à-dire :

$$\exists T \in J \quad \forall t \in [T, +\infty[, \quad X(t) \notin V$$

## 3 Équations autonomes en dimension 1

Nous considérons ici le cas  $d = 1$ . L'équation s'écrit :

$$x'(t) = f(x(t))$$

où  $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$  est localement lipschitzienne.

### Ligne de phase

On définit la notion de **ligne de phase** en représentant l'axe des réels et le sens de parcours des solutions :

- Si  $f(x) > 0$ , la dérivée  $x'(t)$  est positive, donc  $x(t)$  croît (flèche vers la droite  $\rightarrow$ ).

$$\xrightarrow[f(x(t)) > 0]{x(t)}$$

- Si  $f(x) < 0$ , la dérivée  $x'(t)$  est négative, donc  $x(t)$  décroît (flèche vers la gauche  $\leftarrow$ ).
- Si  $f(x) = 0$ , c'est un point d'équilibre.

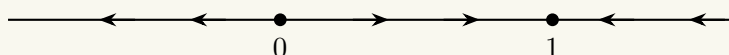
### Exemple 9: L'équation logistique

Soit l'équation  $x' = rx(1 - x)$  avec  $r > 0$ . Ici  $f(x) = rx(1 - x)$ .

- Équilibres :  $f(x) = 0 \iff x = 0$  ou  $x = 1$ .
- Signe de  $f$  :
  - Sur  $] -\infty, 0[, f(x) < 0$  (décroissant).
  - Sur  $]0, 1[, f(x) > 0$  (croissant).
  - Sur  $]1, +\infty[, f(x) < 0$  (décroissant).

Ainsi :

- 1 est un point d'équilibre **attractif**. Il existe un voisinage  $V = ]0, +\infty[$  tel que toute solution partant dans  $V$  tend vers 1.
- 0 est un point d'équilibre **répulsif**.



### Proposition 16: Dynamique en dimension 1

Considérons une équation autonome :

$$x'(t) = g(x(t))$$

avec  $g$  localement lipschitzienne.

Soit  $(t_0, x_0) \in \mathbb{R}^2$ . Soit  $(J, x)$  une solution maximale vérifiant  $x(t_0) = x_0$ .

Soit  $x_+$  le plus petit équilibre de  $g$  tel que  $x_0 \leq x_+$  (S'il n'existe pas, on note  $x_+ = +\infty$ ). Soit  $x_-$  le plus grand équilibre de  $g$  tel que  $x_- \leq x_0$  (S'il n'existe pas, on note  $x_- = -\infty$ ).

1. Si  $g(x_0) = 0$ , alors  $J = \mathbb{R}$  et  $x(t) = x_0 \quad \forall t \in \mathbb{R}$ .
2. Si  $g(x_0) > 0$ , alors  $x$  est une fonction **strictement croissante** vérifiant :

$$\lim_{t \rightarrow \inf J} x(t) = x_- \quad \text{et} \quad \lim_{t \rightarrow \sup J} x(t) = x_+$$

3. Si  $g(x_0) < 0$ , alors  $x$  est une fonction **strictement décroissante** vérifiant :

$$\lim_{t \rightarrow \sup J} x(t) = x_- \quad \text{et} \quad \lim_{t \rightarrow \inf J} x(t) = x_+$$

4. Si  $\lim_{t \rightarrow \sup J} x(t) = x^*$  avec  $x^* \in \mathbb{R}$ , alors  $\sup J = +\infty$ .  
Si  $\lim_{t \rightarrow \inf J} x(t) = x^*$  avec  $x^* \in \mathbb{R}$ , alors  $\inf J = -\infty$ .

#### Remarque

Soit il n'existe pas d'équilibre  $x^*$  tel que  $x^* > x_0$ , dans ce cas,  $x^+ = +\infty$ . Sinon, on pose :

$$x^+ = \inf \underbrace{\{y \in [x_0, +\infty[ \mid g(y) = 0\}}_E$$

$E \neq \emptyset$  (car  $\exists x^* > x_0$  tel que  $g(x^*) = 0$ )  $\implies \inf E$  existe.  $E$  est minoré par  $x_0$ .

Soit  $(x_n)_{n \geq 0}$  une suite d'éléments de  $E$  telle que  $x_n \xrightarrow{n \rightarrow \infty} x^+$ .

$$\forall n \in \mathbb{N} : g(x_n) = 0 \implies g(x^+) = 0 \quad \text{par continuité de } g \text{ en } x^+.$$

Donc  $x^+ \in E$ .

#### Preuve :

**Cas trivial :** Si  $g(x_0) = 0$ , alors  $x_0$  est un équilibre. Par unicité de la solution (Cauchy-Lipschitz),  $x(t) = x_0$  pour tout  $t$ .

**Cas  $g(x_0) > 0$  :**

**1. Signe de  $g$  sur l'intervalle :** D'après la définition de  $x_-$  et  $x_+$ , il n'y a pas d'équilibre dans l'intervalle  $]x_-, x_+[$ . La fonction  $g$  ne s'annule pas sur cet intervalle. Comme  $g$  est continue et  $g(x_0) > 0$ , par le Théorème des Valeurs Intermédiaires (TVI), on a :

$$\forall y \in ]x_-, x_+[ , \quad g(y) > 0$$

#### 2. Confinement de la solution :

Si  $x_+$  ou  $x_-$  ne sont pas finis, alors c'est trivial ( $-\infty < x(t) < +\infty, \forall t \in J$ )

Montrons que pour tout  $t \in J$ ,  $x(t) \in ]x_-, x_+[$ . Supposons par l'absurde qu'il existe  $t_1$  tel que  $x(t_1) \geq x_+$  (dans le cas  $x_+ < +\infty$ ). Puisque  $x$  est continue, par le TVI, il existe un temps  $\tau$  entre  $t_0$  et  $t_1$  tel que  $x(\tau) = x_+$ . Or, nous avons montré que  $g(x_+) = 0$ . Donc la fonction constante  $y(t) = x_+$  est une solution. Par unicité de Cauchy-Lipschitz, les trajectoires ne peuvent pas se croiser. Donc  $x(t)$  ne peut jamais atteindre  $x_+$ . De même,  $x(t)$  ne peut jamais atteindre  $x_-$ .

Ainsi  $\forall t \in J, x(t) \in ]x_-, x_+[$ . Comme  $x(t) \in ]x_-, x_+[$ , on a  $x'(t) = g(x(t)) > 0$ . Donc la solution  $x$  est **strictement croissante**.

**3. Étude des limites (Cas par Cas) :** Comme  $x$  est croissante, elle admet une limite en  $\sup J$ .

- **Cas  $x_+ < +\infty$  :** La solution est bornée par  $x_+$ . D'après le **critère d'explosion**, on a nécessairement  $\sup J = +\infty$ . Soit  $L = \lim_{t \rightarrow +\infty} x(t)$ . D'après la proposition précédente,  $L$  est un équilibre ( $g(L) = 0$ ). Comme  $x$  est croissante partant de  $x_0$ , on a  $x_0 < L \leq x_+$ . Or il n'y a aucun équilibre entre  $x_0$  et  $x_+$ . Donc nécessairement  $L = x_+$ .
- **Cas  $x_+ = +\infty$  :**
  - Si  $\sup J < +\infty$ , par le critère d'explosion,  $x(t)$  doit sortir de tout compact, donc  $\lim x(t) = +\infty$ .
  - Si  $\sup J = +\infty$ . Supposons que la limite soit finie  $L < \infty$ . Alors  $L$  serait un équilibre (car asymptote). Mais  $L > x_0$ , donc  $L \in E_+$ , ce qui contredit  $x_+ = +\infty$  (ensemble vide). Donc  $\lim x(t) = +\infty$ .

Le raisonnement est analogue pour  $t \rightarrow \inf J$  et pour le cas  $g(x_0) < 0$ . □

## IV. Solutions explicites en dimension 1

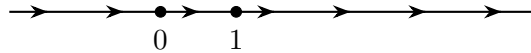
### 1 Exemple

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

**Heuristique :**

$$\frac{x'(t)}{x^2(t)} = 1 \quad \forall t \in J \text{ avec } (J, x) \text{ une solution maximale}$$

$f(x) = x^2$ ,  $f$  est  $\mathcal{C}^1$ .



D'après ce que l'on a vu, on sait que la solution  $(J, x)$  est strictement croissante et satisfait :

$$\lim_{t \rightarrow \sup J} x(t) = +\infty \quad \text{et} \quad \lim_{t \rightarrow \inf J} x(t) = 0$$

donc  $\inf J = -\infty$ .

$J = ]-\infty, \sup J[. \forall t \in J, x(t) > 0.$

$$\frac{x'(t)}{x^2(t)} = 1 \quad \forall t \in J \quad (\forall t \in J, x(t) \neq 0)$$

On intègre entre 0 et  $t$  et on obtient :

$$-\frac{1}{x} + \frac{1}{x(0)} = t \implies -\frac{1}{x(t)} + 1 = t \implies -\frac{1}{x(t)} = t - 1 \implies \frac{1}{x(t)} = 1 - t \implies x(t) = \frac{1}{1-t}$$

$$\sup J = 1.$$

De manière plus générale, on peut considérer des équations de la forme  $x'(t) = R(t)g(x(t))$ .  
 $x'(t) = x^2(t)$  est donnée dans ce cadre avec  $R(t) = 1$  et  $g(X) = X^2$ .

Afin d'être dans le cadre de Cauchy-Lipschitz, on suppose :

- $R : I \rightarrow \mathbb{R}$  continue ( $I$  ouvert de  $\mathbb{R}$ )
- $g : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$  localement lipschitzienne.

$f : I \times \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$  avec  $\Omega = I \times \mathbb{R}$  ouvert de  $\mathbb{R}^2$

$$(t, x) \rightarrow R(t)g(x)$$

$f$  est continue car produit de fonctions continues.  $f$  est localement lipschitzienne en  $x$  :

$$\begin{aligned} \forall (t_0, x_0) \in I \times \mathbb{R} \quad \exists \varepsilon > 0 \text{ t.q } f \text{ lipschitzienne sur } V = [t_0 - \varepsilon, t_0 + \varepsilon] \times [x_0 - \varepsilon, x_0 + \varepsilon] \\ ([t_0 - \varepsilon, t_0 + \varepsilon] \subset I) \\ \forall (t, x), (t, y) \in V \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} |f(t, x) - f(t, y)| &\leq |R(t)| |g(x) - g(y)| \\ &\leq R(t) \cdot C_\varepsilon |x - y| \\ &\leq C_\varepsilon \cdot \sup_{t \in [t_0 - \varepsilon, t_0 + \varepsilon]} |R(t)| |x - y| \end{aligned}$$

Solution maximale de :

$$\begin{cases} y'(t) = R(t)g(y(t)) \\ y(t_0) = x_0 \end{cases}$$

**Heuristique :**  $\forall t \in J, \frac{x'(t)}{x(t)} = R(t)$  pourvu que  $g(y(t)) \neq 0$ .

$$\int_{t_0}^t \frac{x'(s)}{g(x(s))} ds = \int_{t_0}^t R(s) ds$$

$G$  est une primitive de  $\frac{1}{g}$  (pourvu que l'on soit dans une zone où  $g$  ne s'annule pas).  $R$  continue donc admet une primitive  $H$ .

$$\begin{aligned} G(x(t)) - G(x(t_0)) &= H(t) - H(t_0) \\ &= G(x(t_0)) + H(t) - H(t_0) \end{aligned}$$

Si  $G$  inversible sur un ouvert dans lequel  $x(t)$  prend ses valeurs, on aura :

$$x(t) = G^{-1}(G(x_0) + (H(t) - H(t_0))) \quad \forall t \in J$$

### Proposition 17

Considérons le problème de Cauchy (1) :

$$\begin{cases} x'(t) = R(t)g(x(t)) \\ x(t_0) = x_0 \end{cases}$$

$R : I \rightarrow \mathbb{R}$  continue.  $g : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$  localement Lipschitz. Soit  $(J, x)$  la solution maximale de (1).

1. Si  $g(x_0) = 0$  alors  $x(t) = x_0 \quad \forall t \in J \quad J = I$ .
2. Si  $g(x_0) \neq 0$  alors  $\forall t \in J \quad g(x(t)) \neq 0$  et  $\int_{x_0}^{x(t)} \frac{1}{g(u)} du = \int_{t_0}^t R(s) ds$ .

**Preuve :**

- 1) Si  $g(x_0) = 0$ ,  $y : t \mapsto x_0$  est solution du pb car :

$$\begin{aligned} y'(t) &= 0 = g(y(t))R(t) \\ &= g(x_0)R(t) \\ &= 0 \quad \forall t \in J \end{aligned}$$

En appliquant le thm de Cauchy-Lipschitz avec  $f(t, x) = R(t)g(x)$  qui est continue sur  $I \times \mathbb{R}$  et localement Lipschitz en  $x$ . On a par unicité  $x(t) = x_0 \quad \forall t \in J$  avec  $J = I$ .

- 2) Supposons par l'absurde  $\exists t_1 \in J, g(x(t_1)) = 0$ . Soit  $(J, x)$  sol max du problème :

$$\begin{cases} y'(t) = R(t)g(y(t)) \\ y(t_1) = x(t_1) \end{cases}$$

En utilisant le thm de Cauchy-Lipschitz on a par unicité de la solut° maximale  $x(t) = x(t_1)$  avec  $J = I$ . ABSURDE car  $x(t_0) = x_0 \neq x(t_1)$  car  $g(x_0) \neq 0$  et  $g(x(t_1)) = 0$ .

$\forall t \in J, g(x(t)) \neq 0$

$$\begin{cases} g \text{ continue sur } \mathbb{R} \text{ donc} \\ x : J \rightarrow \mathbb{R} \text{ continue} \end{cases}$$

La fonction  $t \mapsto g(x(t))$  est continue  $J \rightarrow \mathbb{R}$  avec  $\forall t \in J, g(x(t)) \neq 0$ . Donc par le TVI,  $\forall t \in J$ , la fonction  $t \mapsto g(x(t))$  est de signe constant.

On a  $x'(t) = R(t)g(x(t))$ . Donc  $\forall t \in J, \frac{x'(t)}{g(x(t))} = R(t)$ .

On intègre entre  $t_0$  et  $t$  :

$$\int_{t_0}^t \frac{x'(s)}{g(x(s))} ds = \int_{t_0}^t R(s) ds$$



Posons le changement de variable :

$$\begin{cases} u = x(s) \\ du = x'(s) ds \end{cases} \implies \int_{x(t_0)}^{x(t)} \frac{du}{g(u)} = \int_{t_0}^t R(s) ds$$

□

#### Remarque

On observe que  $\forall s \in J$ ,  $x'(s) = g(x(s))R(s)$ . Supposons sans restriction que  $g(x(s)) > 0 \forall s \in J$ . Soit  $V = J \cap R^{-1}(\mathbb{R}^*)$ .  $V$  est un ouvert car intersection d'ouverts. En effet,  $R$  est continue et  $\mathbb{R}^*$  est un ouvert.

Pour rendre les choses rigoureuses, on a  $V = \bigcup_{i \in A} C_i$  avec  $C_i$  des intervalles ouverts qui sont les composantes connexes de  $V$ . On en déduit :

$$\int_{t_0}^t \frac{x'(s)}{g(x(s))} ds = \sum_{i \in A} \int_{C_i \cap [t_0, t]} \frac{x'(s)}{g(x(s))} ds$$

Le changement de variable  $u = x(s)$  est rigoureux car sur  $C_i$ , on a  $R(t) > 0$  (ou  $R(t) < 0$ ) pour tout  $t \in C_i$ . Donc  $x'(t) = g(x(t))R(t)$  garde un signe constant (strictement positif ou strictement négatif)  $\forall t \in C_i$ .

**Conclusion :**  $x$  est un  $\mathcal{C}^1$ -difféomorphisme de  $C_i$  sur  $x(C_i)$  par le théorème d'inversion locale (cadre global).

#### Remarque

$$\int_{x_0}^{x(t)} \frac{1}{g(u)} du = \int_{t_0}^t R(s) ds$$

Pour  $t \in J$ , on sait que sur l'intervalle  $J_t = [\min(x_0, x(t)), \max(x_0, x(t))]$  :

$$\exists \alpha > 0 \text{ tel que } \forall u \in J_t, g(u) > \alpha > 0 \text{ ou } g(u) < -\alpha < 0.$$

Car  $g$  est continue sur le compact  $J_t$  et ne s'annule pas ( $\forall u \in J_t, g(u) \neq 0$ ).

Par le TVI, on sait que  $g(u) > 0$  ou  $g(u) < 0$  pour tout  $u \in J_t$  (et par extension sur l'image connexe).

$$(1) \forall u \in J_t \quad g(u) \geq \inf_{\alpha \in J_t} g(\alpha) = g(\beta_{t_1}) = \alpha_t \quad (\alpha_t \in \mathbb{R}_+^*)$$

Puisque  $u \rightarrow \frac{1}{u}$  est continue sur  $J_t$ , cette fonction admet une primitive que l'on note :

$$\varphi(x(t)) - \varphi(x_0) = \int_{t_0}^t R(s) ds$$

Puisque sur  $J_t$   $\varphi'(u) = \frac{1}{g(u)}$

- cas 1 :  $g(u) > 0 \forall u \in J_t$  alors  $\varphi$  str.  $\nearrow$  et donc inversible.
- cas 2 :  $g(u) < 0 \forall t \in J_t$  et la même chose.

$\varphi$  inversible sur  $J_t$  et  $x(t) = \varphi^{-1} \left( \varphi(x_0) + \int_{t_0}^t R(s) ds \right)$

#### Remarque

Si on regarde :

$$\begin{cases} x'(t) = K(x(t))^\alpha \\ x(t_0) = x_0 \end{cases}$$

$K > 0$  alors si  $\alpha > 1$  la solution maximale de (E) est définie sur :

- $] -\infty, T[$  si  $x_0 > 0$  avec  $T < +\infty$  ( $\rightarrow \lim_{t \rightarrow T} x(t) = +\infty$ )
- $]T, +\infty[$  si  $x_0 < 0$  avec  $T < +\infty$  ( $\rightarrow \lim_{t \rightarrow T} x(t) = -\infty$ )

(1)  $\begin{cases} x'(t) = f(x(t)) \\ x(t_0) = x_0 \end{cases}$  avec  $f(x) = |x|^\alpha$  (**Attention** : c'est bien  $\mathcal{C}^1$ ). On est bien dans le cas de Cauchy-Lipschitz.

$$\begin{array}{c} \longrightarrow \longrightarrow \longrightarrow \bullet \longrightarrow \longrightarrow \longrightarrow \longrightarrow \longrightarrow \\ x_0 \end{array} \quad \begin{array}{l} f(x) = |x|^\alpha \\ x^+ = +\infty \\ x^- = 0 \end{array}$$

$x_0 > 0$  on a vu que  $\forall t \in J$   $x(t) > 0$ .  $x$  est strictement croissante sur  $J$  avec  $\lim_{t \rightarrow \inf J} x(t) = 0$  et  $\lim_{t \rightarrow \sup J} x(t) = +\infty$ .  
 $x'(t) = |x|^\alpha(t) \quad \forall t \in J = x^\alpha(t)$  car  $\forall t \in J$   $x(t) > 0$

$$\frac{x'(t)}{x^\alpha(t)} = 1 \quad \forall t \in J$$

On intègre entre  $t_0$  et  $t$  on a :

$$\frac{x^{1-\alpha}(t)}{1-\alpha} - \frac{x_0^{1-\alpha}}{1-\alpha} = t - t_0$$

$$x^{1-\alpha}(t) - x_0^{1-\alpha} = (1-\alpha)(t-t_0) \iff \frac{1}{x^{\alpha-1}(t)} = \frac{1}{x_0^{\alpha-1}} + (1-\alpha)(t-t_0)$$

$$\iff x(t) = \left( \frac{1}{\frac{1}{x_0^{\alpha-1}} + (1-\alpha)(t-t_0)} \right)^{\frac{1}{1-\alpha}}$$

$$J = ]-\infty, T[ \text{ avec } \frac{1}{x_0^{\alpha-1}} + (1-\alpha)(T-t_0) = 0$$

$$\iff T = t_0 + \frac{1}{(\alpha-1)x_0^{\alpha-1}} < +\infty$$

On observe  $\lim_{t \rightarrow T} x(t) = +\infty$ .

## 2 Équations différentielles linéaires en dimension 1

$$\bullet \quad x'(t) = a(t)x(t) + b(t)$$

$a, b : I \rightarrow \mathbb{R}$  ( $I$  intervalle ouvert) et  $a, b$  continue.

$x'(t) = f(t, x(t))$  avec  $f : I \times \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$  continue et localement lipschitz en  $x$ .

$$(t, x) \longrightarrow a(t)x + b(t)$$

Soit  $A$  une primitive de  $a$  sur  $I$  ( $A$  existe car  $a$  est continue).

**Proposition 18: (H) :**  $x'(t) = a(t)x(t)$

1. Les solutions maximales de H s'écrivent sous la forme  $x(t) = \lambda e^{A(t)}$  avec  $\lambda \in \mathbb{R}$ .

2. Le problème (C)  $= \begin{cases} x'(t) = a(t)x(t) \\ x(t_0) = x_0 \end{cases}$  a une unique solution maximale  $x(t) = x_0 \exp\left(\int_{t_0}^t a(s)ds\right) \quad \forall t \in I$ .

**Preuve :**

On est dans le cadre de Cauchy-Lipschitz, soit  $(X, J)$  une solution maximale.

$$y(t) = x(t)e^{-A(t)}$$

$$y'(t) = x'(t)e^{-A(t)} - x(t)a(t)e^{-A(t)}$$

$$= \exp(-A(t))(x'(t) - a(t)x(t))$$

$\forall t \in J$   $y'(t) = 0$ .  $J$  est connexe,  $y$  dérivable i.e  $\exists \lambda \in \mathbb{R}$   $y(t) = \lambda$  i.e  $x(t) = \lambda e^{A(t)}$ . Puisque cette solution est maximale on doit avoir  $J = I$  car la fct°  $t \rightarrow \lambda e^{A(t)}$  est bien définie sur  $I$ .

2. D'après 1 on a  $x(t) = \lambda e^{A(t)} \forall t \in J$ . Choisissons  $A(t) = \int_{t_0}^t a(s)ds \forall t \in I$   $x(t) = \lambda \exp\left(\int_{t_0}^t a(s)ds\right)$ .

$$x(t_0) = \lambda = x_0$$

$$x(t) = x_0 \exp\left(\int_{t_0}^t a(s)ds\right) \forall t \in I$$

□

### Proposition 19: (NH) : $a(t)x(t) + b(t)$

1. Les solutions maximales de (NH) sont définies sur  $I$  et données par la formule de Duhamel :

$$\forall t \in J \quad x(t) = \lambda e^{A(t)} + \int_{t_0}^t b(s) e^{\int_s^t a(u)du} ds \quad \lambda \in \mathbb{R}$$

2. Le problème (NH) avec données initiale  $x(t_0) = x_0$  a une unique solution globale avec  $\lambda = x_0$ ,  $A(t) = \int_{t_0}^t a(s)ds$ .

3. Soit  $x_p$  une solution de (NH) alors les solution de (NH) s'écrivent  $x(t) = x_p(t) + \lambda e^{A(t)}$ . On dit que (NH) est somme d'une solution particulière de (NH) et d'une solution de (H).

$$S_{NH} = \{\text{ensemble des solutions de (NH)}\}$$

$$S_H = \{\text{ensemble des solutions de (H)}\}$$

$$\text{On a } S_{NH} = x_p(\cdot) + S_H.$$

4. Les solutions de (NH) forment un espace affine de dimension 1 dont l'espace vectoriel associé correspond aux solutions de (H).

### Preuve :

**Preuve des points 1 et 2 :** Soit  $(X, J)$  une solution maximale de  $(E)$  avec  $t_0 \in J$ .

(Méthode de la variation de la constante) On pose :  $x(t) = \lambda(t)e^{A(t)}$  où  $A$  est une primitive de  $a$  sur  $I$ .  $\lambda$  est  $\mathcal{C}^1$  comme produit de fonctions  $\mathcal{C}^1$ . On dérive :

$$x'(t) = \lambda'(t)e^{A(t)} + \lambda(t)a(t)e^{A(t)}$$

Or  $x'(t) = a(t)x(t) + b(t)$ . Donc :

$$\lambda'(t)e^{A(t)} + \lambda(t)a(t)e^{A(t)} = a(t)\lambda(t)e^{A(t)} + b(t)$$

$$\implies \lambda'(t)e^{A(t)} = b(t)$$

$$\implies \lambda'(t) = b(t)e^{-A(t)}$$

On intègre entre  $t_0$  et  $t$  :

$$\lambda(t) = \lambda(t_0) + \int_{t_0}^t b(s)e^{-A(s)} ds$$

On remplace dans l'expression de  $x(t)$  :

$$x(t) = \left( \lambda(t_0) + \int_{t_0}^t b(s)e^{-A(s)} ds \right) e^{A(t)}$$

$$\begin{aligned}
x(t) &= \lambda(t_0)e^{A(t)} + \int_{t_0}^t b(s)e^{A(t)}e^{-A(s)} ds \\
&= \lambda(t_0)e^{A(t)} + \int_{t_0}^t b(s)e^{A(t)-A(s)} ds
\end{aligned}$$

En posant  $A(t) = \int_{t_0}^t a(s)ds$ , en utilisant la formule de Chasles, on a  $A(t) - A(s) = \int_s^t a(u)du$ .  
D'où la formule :

$$x(t) = \lambda e^{\int_{t_0}^t a(s)ds} + \int_{t_0}^t b(s) \exp\left(\int_s^t a(u)du\right) ds$$

En particulier, puisque la formule  $\circledast$  est valide pour tout  $t \in I$  (car les fonctions  $a$  et  $b$  sont continues sur  $I$  tout entier), on en déduit que  $J = I$  et donc la solution est globale.

Considérons le problème de Cauchy  $(C)$  :

$$(C) \quad \begin{cases} x'(t) = a(t)x(t) + b(t) \\ x(t_0) = x_0 \end{cases} \quad \text{avec } t_0 \in I$$

D'après le Thm de Cauchy-Lipschitz,  $(C)$  a une unique solution maximale qui est globale (cf. 1°).  
On a pour tout  $t \in I$  :

$$x(t) = \lambda \exp\left(\int_{t_0}^t a(u)du\right) + \int_{t_0}^t b(s) \exp\left(\int_s^t a(u)du\right) ds$$

Avec la condition initiale, on trouve  $x(t_0) = \lambda = x_0$ .

On peut décomposer cette solution en deux parties :

$$\begin{aligned}
\forall t \in I, \quad x(t) &= \underbrace{x_0 \exp\left(\int_{t_0}^t a(s)ds\right)}_{\substack{\text{Solution du problème} \\ \begin{cases} y'(t) = a(t)y(t) \\ y(t_0) = x_0 \end{cases}}} + \underbrace{\int_{t_0}^t b(s) \exp\left(\int_s^t a(u)du\right) ds}_{\substack{\text{Solution du problème} \\ \begin{cases} y'(t) = a(t)y(t) + b(t) \\ y(t_0) = 0 \end{cases}}}
\end{aligned}$$

**Preuve du point 3 (Structure de l'espace) :** Soit  $x_p$  une solution globale du problème (NH) :  $y'(t) = a(t)y(t) + b(t)$ . Soit  $x$  une solution quelconque globale de (NH). Posons  $y(t) = x(t) - x_p(t)$  pour tout  $t \in I$ . Dérivons  $y$  :

$$\begin{aligned}
y'(t) &= x'(t) - x_p'(t) \\
&= (a(t)x(t) + b(t)) - (a(t)x_p(t) + b(t)) \\
&= a(t)(x(t) - x_p(t)) = a(t)y(t)
\end{aligned}$$

Donc  $\tilde{y}$  est solution de l'équation homogène  $(H) : \tilde{y}'(t) = a(t)\tilde{y}(t)$ .

On a donc  $S_{NH} = x_p(\cdot) + S_H$  avec :

$$S_H = \{f : I \rightarrow \mathbb{R}, t \mapsto x(t) \mid (I, x(\cdot)) \text{ solution de (H)}\}$$

$$S_H = \left\{ t \mapsto \lambda \exp\left(\int_{t_0}^t a(s)ds\right) \mid \lambda \in \mathbb{R} \right\}$$

On observe que  $\forall \lambda_1 \in \mathbb{R}, \forall x \in S_H \implies \exists \lambda \in \mathbb{R}, \forall t \in I, x(t) = \lambda \exp\left(\int_{t_0}^t a(s)ds\right)$ .

$$(\lambda_1 x)(t) = \lambda_1 x(t) = \lambda_1 \lambda \exp\left(\int_{t_0}^t a(s)ds\right)$$

Comme  $\lambda_1 \lambda \in \mathbb{R}$ , alors  $\lambda_1 x \in S_H$ .

De même, soient  $x_1, x_2 \in S_H$ , alors  $\exists \lambda_1, \lambda_2$  tels que :

$$x_1(t) = \lambda_1 \exp\left(\int_{t_0}^t a(s)ds\right)$$

$$x_2(t) = \lambda_2 \exp\left(\int_{t_0}^t a(s)ds\right) \quad \forall t \in I$$

$$x_1(t) + x_2(t) = (\lambda_1 + \lambda_2) \left(e^{\int_{t_0}^t a(s)ds}\right)$$

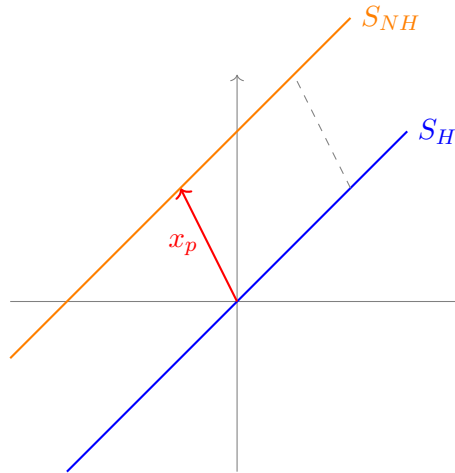
$$\implies x_1 + x_2 \in S_H$$

$S_H$  est un espace vectoriel :

$$S_H = \text{vect} \left\{ t \mapsto \exp\left(\int_{t_0}^t a(s)ds\right) \right\}$$

$$\dim S_H = 1$$

$S_H$  est une droite vectorielle puisque  $S_{NH} = x_p + S_H$ .



$S_{NH}$  est un espace affine de dimension 1. □

#### Remarque

Pour calculer les solutions explicites de  $(NH)$  :

1. On essaie de trouver une solution particulière  $x_p(t)$  (souvent évidente ou de même forme que  $b(t)$ ) et on écrit ensuite la solution générale sous la forme  $t \mapsto x_p(t) + \lambda e^{A(t)}$ .
2. Si on n'arrive pas à trouver une solution particulière intuitivement, on utilise la **formule de Duhamel** (variation de la constante).

### 3 Principe de superposition

#### Proposition 20: Critère de superposition

Soient  $a, b_1, b_2$  des fonctions continues sur  $I$ .

- Soit  $x_1$  une solution de  $x'(t) = a(t)x(t) + b_1(t)$ .
- Soit  $x_2$  une solution de  $x'(t) = a(t)x(t) + b_2(t)$ .

Alors  $x = x_1 + x_2$  est solution du problème :

$$y'(t) = a(t)y(t) + (b_1(t) + b_2(t))$$

**Preuve :**

Calcul direct :

$$\begin{aligned} x'(t) &= (x_1 + x_2)'(t) = x_1'(t) + x_2'(t) \\ &= (a(t)x_1(t) + b_1(t)) + (a(t)x_2(t) + b_2(t)) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= a(t)(x_1(t) + x_2(t)) + b_1(t) + b_2(t) \\
 &= a(t)x(t) + (b_1(t) + b_2(t))
 \end{aligned}$$

□

### Exemple 10: Application du principe de superposition

**Exercice :** Résoudre l'équation :

$$x'(t) = -x(t) + t + e^t$$

On identifie les seconds membres  $b_1(t) = t$  et  $b_2(t) = e^t$ .

On décompose le problème en cherchant des solutions particulières pour :

$$\begin{cases} x'_1(t) = -x_1(t) + t & \text{Forme candidate : } \alpha t + \beta \\ x'_2(t) = -x_2(t) + e^t & \text{Forme candidate : } \alpha e^t \end{cases}$$

## V. Principe de Comparaison

### 1 Sous-solutions et Sur-solutions

Soit  $\Omega$  un ouvert de  $\mathbb{R}^2$ . On considère l'équation différentielle :

$$(E) \quad x'(t) = f(t, x(t)) \quad (2)$$

où  $f : \Omega \rightarrow \mathbb{R}$  est continue sur  $\Omega$  et localement lipschitzienne en  $x$ . On suppose  $\Omega = I \times \mathbb{R}$  avec  $I$  un intervalle ouvert.

#### Définition 19: Sous-solutions et Sur-solutions

On définit la notion de sous-solution et sur-solution de  $(E)$ .

Soit  $J \subset I$  un intervalle ouvert.

- On dit que  $(J, x)$  est une **sur-solution** de  $(E)$  si :

$$\forall t \in J, \quad x'(t) \geq f(t, x(t))$$

- On dit que  $(J, y)$  est une **sous-solution** de  $(E)$  si :

$$\forall t \in J, \quad y'(t) \leq f(t, y(t))$$

### 2 Heuristique

On veut résoudre le problème  $(C) : x'(t) = f(t, x(t))$ . Soit  $g$  une fonction de  $I \times \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$  telle que  $\forall (t, x) \in I \times \mathbb{R}, f(t, x) \leq g(t, x)$ .

Si  $(J, x)$  est solution maximale de  $(E)$  avec  $x(t_0) = x_0$  ( $t_0 \in J$ ), alors  $\forall t \in J$  :

$$x'(t) = f(t, x(t)) \leq g(t, x(t))$$

Ainsi,  $(J, x)$  est une sous-solution du problème :

$$\begin{cases} y'(t) = g(t, y(t)) \\ y(t_0) = x_0 \end{cases}$$

Si  $g$  est continue et localement lipschitzienne en  $x$ , on va montrer que pour  $(x_1, J_1)$  une solution maximale de  $(C_1)$  (le problème associé à  $g$ ), on a :

$$\forall t \in [t_0, \sup J] \cap [t_0, \sup J_1[ : \quad x(t) \leq x_1(t)$$

Si  $\sup J < +\infty$ , alors  $\sup J \geq \sup J_1$  ou  $x(t) \rightarrow -\infty$  quand  $t \rightarrow \sup J$  (d'après le critère d'explosion).

### 3 Principe de comparaison

Lorsque l'on définit la notion de sous et sur-solutions, il est entendu que  $x$  et  $y$  sont dérivables.

#### Remarque

Si  $u$  est une sous-solution de  $(E)$  sur  $J$  et  $v$  est une sur-solution de  $(E)$  sur  $J$ , alors on a :

$$\forall t \in J, \quad u'(t) \leq f(t, u(t))$$

$$\forall t \in J, \quad v'(t) \geq f(t, v(t))$$

**Attention :** Cela n'implique pas que  $u'(t) \leq v'(t)$ .

### Exemple 11: Contre-exemple sur les dérivées

Considérons :

$$u(t) = e^t, \quad x(t) = 0, \quad v(t) = -e^{-t}$$

Equation (E) :  $x'(t) = 2x(t)$ .

$u$  est une sous-solution de (E) sur  $\mathbb{R}$  ?

$$u'(t) = e^t \leq 2e^t = 2u(t) \quad (\text{Vrai})$$

$v$  est une sur-solution de (E) sur  $\mathbb{R}^+$  ?

$$v'(t) = e^{-t} \geq 2(-e^{-t}) = 2v(t) \quad (\text{Vrai pour } t \geq 0)$$

Cependant, regardons l'ordre des dérivées :  $u'(t) = e^t$  et  $v'(t) = e^{-t}$ . On n'a pas nécessairement d'ordre simple entre elles (dépend du signe de  $t$  et de l'équation).

Ici, on a bien  $u$  sous-solution,  $v$  sur-solution, et  $x$  solution de (E). Pour tout  $t \in \mathbb{R}$ ,  $u'(t) = e^t \leq 2e^t = 2u(t)$  et  $v'(t) = e^{-t} \geq -2e^{-t} = 2v(t)$ .

### 3.1 Cas Linéaire

#### Proposition 21: Principe de comparaison (Cas linéaire)

Soient  $a$  et  $b$  des fonctions continues sur  $I$ . Soit  $u$  une sous-solution et  $v$  une sur-solution de :

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

Alors :

$$\text{Si } u(t_0) \leq v(t_0), \quad \text{alors } u(t) \leq v(t) \quad \forall t \geq t_0 \text{ (dans l'intervalle de définition)}$$

#### Remarque

Si  $u$  est définie sur  $t \in ]T_0, \tilde{T}_0[$  et  $v$  est définie sur  $t \in ]T_1, \tilde{T}_1[$ . On considère  $t \in [t_0, +\infty[ \cap ]T_0, \tilde{T}_0[ \cap ]T_1, \tilde{T}_1[$ .

#### Preuve :

Considérons  $w(t) = v(t) - u(t)$  pour  $t$  dans l'intersection des domaines.  $w$  est dérivable car somme de fonctions dérivables.

$$w'(t) = v'(t) - u'(t)$$

Or  $v'(t) \geq a(t)v(t) + b(t)$  (sur-solution) et  $u'(t) \leq a(t)u(t) + b(t)$  (sous-solution). Donc :

$$w'(t) \geq (a(t)v(t) + b(t)) - (a(t)u(t) + b(t))$$

$$w'(t) \geq a(t)(v(t) - u(t)) = a(t)w(t)$$

On a donc l'inégalité différentielle  $w'(t) - a(t)w(t) \geq 0$ .

Soit  $A(t)$  une primitive de  $a(t)$ . Posons  $z(t) = e^{-A(t)}w(t)$ . Dérivons  $z(t)$  :

$$z'(t) = -a(t)e^{-A(t)}w(t) + e^{-A(t)}w'(t)$$

$$z'(t) = e^{-A(t)}(w'(t) - a(t)w(t))$$

Comme  $e^{-A(t)} > 0$  et  $w'(t) - a(t)w(t) \geq 0$ , on a :

$$z'(t) \geq 0 \quad \forall t \in ]T_0, \tilde{T}_0[ \cap ]T_1, \tilde{T}_1[$$



Donc  $z$  est croissante sur cet intervalle (Théorème des accroissements finis).

On a supposé  $u(t_0) \leq v(t_0)$ , donc  $w(t_0) = v(t_0) - u(t_0) \geq 0$ . Ainsi  $z(t_0) = w(t_0)e^{-A(t_0)} \geq 0$ .

Comme  $z$  est croissante, pour tout  $t \geq t_0$ ,  $z(t) \geq z(t_0) \geq 0$ . Or  $z(t) = e^{-A(t)}w(t)$  et  $e^{-A(t)} > 0$ , donc  $w(t) \geq 0$ . C'est-à-dire  $v(t) \geq u(t)$  pour tout  $t \geq t_0$ .  $\square$

### Remarque

Si  $u'(t) \leq a(t)u(t)$  pour tout  $t \geq t_0$ , alors  $u$  est une sous-solution du problème homogène  $(H)$  :  $y'(t) = a(t)y(t)$ . Soit  $v$  la solution du problème :

$$\begin{cases} y'(t) = a(t)y(t) \\ y(0) = u(0) \end{cases}$$

$u$  est sous-solution de  $(H)$ ,  $v$  est solution (donc sur-solution) de  $(H)$ . En appliquant le résultat précédent en  $t_0 = 0$  (car  $v(0) = u(0)$ ), on peut écrire :

$$\forall t \geq 0, \quad u(t) \leq u(0)e^{\int_0^t a(s)ds} = v(t)$$

C'est l'**Inégalité de Gronwall**.

## 3.2 Cas Non-Linéaire

### Proposition 22: Principe de comparaison (Cas général)

Soit  $f \in C^1$  (ou  $f : I \times \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$  continue et localement lipschitzienne en  $x$ ). Soit  $u$  une sous-solution et  $v$  une sur-solution du problème :

$$y'(t) = f(t, y(t))$$

Si  $u(t_0) \leq v(t_0)$ , alors :

$$\forall t \geq t_0, \quad u(t) \leq v(t)$$

**Preuve :**

Posons  $w(t) = v(t) - u(t)$ . On a  $w'(t) = v'(t) - u'(t)$ . D'après les définitions :

$$\forall t, \quad v'(t) \geq f(t, v(t))$$

$$\forall t, \quad u'(t) \leq f(t, u(t))$$

Donc :

$$w'(t) \geq f(t, v(t)) - f(t, u(t))$$

On veut factoriser cette différence.

$$f(t, v(t)) - f(t, u(t)) = a(t)(v(t) - u(t))$$

où l'on définit la fonction  $a(t)$  par :

$$a(t) = \begin{cases} \frac{f(t, v(t)) - f(t, u(t))}{v(t) - u(t)} & \text{si } v(t) \neq u(t) \\ \frac{\partial f}{\partial x}(t, u(t)) & \text{si } v(t) = u(t) \end{cases}$$

Si  $u(t) \neq v(t)$  :

$$f(t, v(t)) - f(t, u(t)) = a(t)(v(t) - u(t))$$

Si  $u(t) = v(t)$  :

$$f(t, v(t)) - f(t, u(t)) = 0$$

Supposons que  $a$  est continue. Alors on peut appliquer la proposition précédente (cas linéaire). Pour tout  $t \geq t_0$ , on compare  $w(t)$  avec la solution  $w_1$  du problème :

$$\begin{cases} z'(t) = a(t)z(t) \\ z(t_0) = w(t_0) \end{cases}$$

$w$  est une sur-solution de  $z' = a(t)z$  (car  $w' \geq aw$ ) et  $w_1$  est une solution (donc sous-solution). Or  $w(t_0) = v(t_0) - u(t_0) \geq 0$ . Et la solution explicite est  $w_1(t) = w(t_0)e^{\int_{t_0}^t a(s)ds}$ . Comme  $w(t_0) \geq 0$  et l'exponentielle est positive,  $w_1(t) \geq 0$ .

Le principe de comparaison linéaire implique  $w(t) \geq w_1(t) \geq 0$ . Donc  $v(t) \geq u(t)$  pour tout  $t \geq t_0$ .

**Montrons que  $a$  est une fonction continue.**

- Si  $u(t^*) \neq v(t^*)$ , alors  $a$  est continue en  $t^*$  car, dans un voisinage de  $t^*$ ,  $a$  est le quotient de fonctions continues et  $v(t) - u(t) \neq 0$ . On a utilisé le fait que  $f, u, v$  sont continues.
- Que se passe-t-il si  $u(t^*) = v(t^*)$ ? Montrons que  $a$  est continue en  $t^*$ .  
Soit  $(t_n)_{n \in \mathbb{N}}$  une suite telle que  $t_n \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} t^*$ .

$$a(t_n) = \frac{f(t_n, v(t_n)) - f(t_n, u(t_n))}{v(t_n) - u(t_n)} \quad \text{si } v(t_n) \neq u(t_n).$$

On applique le théorème des accroissements finis à la fonction  $g : x \mapsto f(t_n, x)$ . Sa dérivée est  $g'(x) = \partial_x f(t_n, x)$ .

On obtient :

$$f(t_n, v(t_n)) - f(t_n, u(t_n)) = \partial_x f(t_n, c_n)(v(t_n) - u(t_n))$$

où  $c_n \in ]\min(u(t_n), v(t_n)), \max(u(t_n), v(t_n))]$ . Soit  $O = ]\min(u(t_n), v(t_n)), \max(u(t_n), v(t_n))]$ ,  $c_n \in O$

Ainsi, on a :

$$a(t_n) = \partial_x f(t_n, c_n).$$

De plus, si  $u(t_n) = v(t_n)$ , alors par définition  $a(t_n) = \partial_x f(t_n, u(t_n))$ .

Puisque  $\partial_x f$  est continue et que :

$$\left. \begin{array}{l} t_n \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} t^* \\ v(t_n) \rightarrow v(t^*) \\ u(t_n) \rightarrow u(t^*) \end{array} \right\} \begin{array}{l} \text{avec } u(t_n) \rightarrow u(t^*) \\ \text{et } v(t_n) \rightarrow v(t^*) \\ \text{par continuité de } u \text{ et } v \text{ en } t^*. \end{array}$$

On en déduit que  $c_n \rightarrow v(t^*)$  (ou  $u(t^*)$  car ils sont égaux).

Par conséquent,  $a(t_n) \rightarrow \partial_x f(t^*, v(t^*)) = a(t^*)$ .

La fonction  $a$  est donc continue, ce qui valide l'étape précédente de la preuve. □

#### Remarque

On a simplement utilisé le fait que  $f$  est continue et que la seconde dérivée  $\partial_x f$  existe et est continue. On a besoin de moins que  $f \in \mathcal{C}^1$ .

#### Proposition 23

Soit  $f : I \times \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$  de classe  $\mathcal{C}^1$  et croissante en la seconde variable  $(t, x) \mapsto f(t, x)$ .

Soit  $u : J \rightarrow \mathbb{R}$  ( $J$  intervalle ouvert avec  $J \subset I$ ,  $I$  intervalle ouvert) continue telle que :

$$\forall t \geq t_0, \quad u(t) \leq k + \int_{t_0}^t f(s, u(s)) \, ds$$

Alors  $\forall t \geq t_0, u(t) \leq v(t)$  avec  $v$  solution du problème (C) :

$$(C) \begin{cases} v'(t) = f(t, v(t)) \\ v(t_0) = k \end{cases}$$

**Preuve :**

Posons  $U(t) = k + \int_{t_0}^t f(s, u(s)) \, ds$ . On a alors :

$$(1) \begin{cases} U'(t) = f(t, u(t)) \\ U(t_0) = k \end{cases} \quad (3)$$

On sait que  $u(t) \leq U(t)$  pour tout  $t \geq t_0$ . Par croissance de  $f$  sur la seconde variable, on a :

$$(2) f(t, u(t)) \leq f(t, U(t)) \quad (4)$$

Ainsi, (1) + (2) impliquent :

$$\begin{cases} U'(t) \leq f(t, U(t)) \\ U(t_0) = k \end{cases}$$

D'autre part,  $v$  est solution de (C), donc aussi une sur-solution (une solution exacte est à la fois sous et sur-solution), avec  $v(t_0) = k \geq k = U(t_0)$ .

En appliquant le résultat précédent (on peut car  $f \in \mathcal{C}^1$ ), on a :

$$\forall t \geq t_0, \quad U(t) \leq v(t) \implies \forall t \geq t_0, \quad u(t) \leq v(t)$$

car  $u(t) \leq U(t)$  (par définition de l'inégalité intégrale initiale). □

#### Remarque

Cette proposition demande plus d'hypothèses sur la fonction  $f$  car on suppose en plus que  $f$  est croissante en la seconde variable.

Par contre, on ne demande aucune hypothèse de régularité sur  $u$  si ce n'est que  $u$  est continue.

#### Proposition 24: Principe de comparaison sous forme intégrale (Cas linéaire)

Soient  $a, b : I \rightarrow \mathbb{R}$  continues,  $a$  positive.

Soit  $u : J \rightarrow \mathbb{R}$  telle qu'on a  $\forall t \geq t_0$  :

$$u(t) \leq k + \int_{t_0}^t (a(s)u(s) + b(s)) \, ds$$

Alors  $\forall t \geq t_0, u(t) \leq v(t)$  avec  $v$  solution du problème :

$$\begin{cases} v'(t) = a(t)v(t) + b(t) \\ v(t_0) = k \end{cases}$$

#### Remarque

Ici on considère  $f(t, x) = a(t)x + b(t)$  qui n'est pas  $\mathcal{C}^1$ , on ne peut pas facilement appliquer la proposition précédente.

**Preuve :**

Même raisonnement.

Posons  $U(t) = k + \int_{t_0}^t (a(s)u(s) + b(s)) \, ds$ .

En dérivant, on obtient :

$$U'(t) = a(t)u(t) + b(t).$$

Or, on sait que  $\forall t \geq t_0, U(t) \geq u(t)$ . Puisque  $a(t) \geq 0$ , cela implique :

$$a(t)U(t) \geq a(t)u(t).$$

Par conséquent, en remplaçant dans l'expression de la dérivée :

$$U'(t) \leq a(t)U(t) + b(t).$$

$U$  est donc une sous-solution de  $(E)$  :

$$(E) \quad z'(t) = a(t)z(t) + b(t).$$

L'équation  $(E)$  admet une unique solution globale (cas linéaire) car on est bien dans le cadre de Cauchy-Lipschitz ( $f$  est continue et localement lipschitzienne en  $x$ ).

En appliquant la proposition (cas linéaire) du principe de comparaison, on a :

- $U$  est une sous-solution.
- $v$  est solution, donc sur-solution.
- $U(t_0) = k \leq k = v(t_0)$ .

On en déduit que  $\forall t \geq t_0, U(t) \leq v(t)$ .

Et finalement, comme  $u(t) \leq U(t)$ , on a bien :

$$\forall t \geq t_0, \quad u(t) \leq v(t).$$

□

## 4 Application du problème de l'existence globale

### Corollaire 6

**a.** Soient  $a, b : I \rightarrow \mathbb{R}$  continues avec  $a(t) \geq 0, \forall t \in I$ .

Soit  $X : J \rightarrow \mathbb{R}^d$  de classe  $\mathcal{C}^1$ .

Si  $\forall t \geq t_0, \|X'(t)\| \leq a(t)\|X(t)\| + b(t)$ , alors  $\|X(t)\| \leq v(t)$  où  $v$  est solution de :

$$\begin{cases} v'(t) = a(t)v(t) + b(t) \\ v(t_0) = \|X(t_0)\| \end{cases}$$

**b.** Soit  $F : I \times \mathbb{R}^d \rightarrow \mathbb{R}^d$  continue et localement Lipschitz en  $x$ , définie par  $(t, x) \mapsto F(t, x)$ .

Si :

$$\forall (t, x) \in J \times \mathbb{R}^d, \quad \|F(t, x)\| \leq a(t)\|x\| + b(t)$$

alors les solutions satisfaisant  $X'(t) = F(t, X(t))$  sont globales.

**Preuve :**

**a.** On a l'expression intégrale suivante :

$$X(t) = X(t_0) + \int_{t_0}^t X'(s) \, ds$$

Et pour  $t \geq t_0$ , par l'inégalité triangulaire :

$$\|X(t)\| \leq \|X(t_0)\| + \int_{t_0}^t \|X'(s)\| \, ds$$

En utilisant l'hypothèse sur la dérivée, on obtient :

$$\forall t \geq t_0, \quad \|X(t)\| \leq \underbrace{\|X(t_0)\|}_k + \int_{t_0}^t (a(s)\|X(s)\| + b(s)) \, ds$$

Comme  $a(t) \geq 0 \quad \forall t \in I$ , on peut appliquer le principe de comparaison sous forme intégrale dans le cas linéaire. On en déduit que :

$$\forall t \geq t_0, \quad \|X(t)\| \leq v(t)$$

**b.** Soit  $(J, X)$  solution maximale du problème  $Y'(t) = F(t, Y(t))$ . On a :

$$X'(t) = F(t, X(t))$$

$$\|X'(t)\| = \|F(t, X(t))\| \leq a(t)\|X(t)\| + b(t)$$

D'après le point **a**), on en déduit que :

$$\forall t \geq t_0, \quad \|X(t)\| \leq v(t) \quad \text{avec } v \text{ solution de } \begin{cases} v'(t) = a(t)v(t) + b(t) \\ v(t_0) = \|X(t_0)\| \end{cases}$$

Supposons par l'absurde que  $\sup J < \sup I$ .

Alors, d'après le critère d'explosion,  $\|X(t)\| \xrightarrow[t \rightarrow \sup J]{} +\infty$ .

Ce qui est absurde car  $\forall t \geq t_0, \|X(t)\| \leq v(t)$ , donc  $\|X(\cdot)\|$  ne peut pas exploser en  $\sup J$  (car  $v$  est définie et continue sur  $I$ , donc bornée sur le segment  $[t_0, \sup J]$ ).

Même raisonnement pour montrer que  $\inf J = \inf I$ . □

### Exercice

Penser à inverser le sens du temps.

## Applications

Nous distinguons ici les cas selon la puissance  $\alpha$  intervenant dans la majoration de la fonction  $F$ .

- **Croissance linéaire** ( $\alpha = 1$ ) :  
 $\|F(t, x)\| \leq a(t)\|x\| + b(t).$
- **Croissance sous-linéaire** ( $0 < \alpha < 1$ ) :  
 $\|F(t, x)\| \leq a(t)\|x\|^\alpha + b(t)$  ou  $\|F(t, x)\| \leq s + \|x\|.$
- **Croissance sur-linéaire** ( $\alpha > 1$ ) :  
 $\|F(t, x)\| \leq a(t)\|x\|^\alpha + b(t).$

### Corollaire 7: Corollaire (Explosion en temps fini)

Soit  $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$  localement Lipschitz.

Soit  $x$  la solution maximale de  $x'(t) = f(x(t))$  telle que  $x(t) \xrightarrow[t \rightarrow \sup J]{} +\infty$ .

Si  $\exists \alpha > 1$  et  $\bar{x} > 0$  tels que  $f(x) \geq x^\alpha$  pour tout  $x \geq \bar{x}$ , alors  $\sup J < +\infty$ .

**Preuve :**

La solution maximale que l'on considère satisfait  $x(t) \xrightarrow[t \rightarrow \sup J]{} +\infty$ . Cela implique qu'il existe  $\bar{t} \in J$  tel que :

$$\forall t \geq \bar{t}, \quad \begin{cases} x(t) \geq \bar{x} > 0 \\ x'(t) = f(x(t)) \geq |x(t)|^\alpha \end{cases}$$

Puisque  $x$  est sur-solution sur  $[\bar{t}, \sup J[$  du problème  $y'(t) = |y(t)|^\alpha$  (notons que  $\rho(x) = |x|^\alpha$  est  $\mathcal{C}^1$  car  $\alpha > 1$ ).

D'après le principe de comparaison, on en déduit que  $\forall t \geq \bar{t}$ ,  $x(t) \geq v(t)$  sur l'intervalle  $t \in [\bar{t}, \sup J[ \cap [\bar{t}, \sup \tilde{J}[$ , avec  $v$  solution de :

$$\begin{cases} v'(t) = (v(t))^\alpha \\ v(\bar{t}) = \bar{x} \end{cases}$$

En effet, on peut appliquer le théorème car  $v$  est bien solution (donc sous-solution) et on a :  $x(\bar{t}) \geq \bar{x} = v(\bar{t})$ .

On sait, puisque  $\alpha > 1$  et  $v(\bar{t}) = \bar{x} > 0$ , que la solution maximale  $v$  est définie sur un intervalle  $] -\infty, \sup \tilde{J}[$  avec  $\sup \tilde{J} < +\infty$  (phénomène d'explosion en temps fini pour les équations sur-linéaires).

Puisque  $\forall t \in [\bar{t}, \sup J[ \cap [\bar{t}, \sup \tilde{J}[$ , on a  $x(t) \geq v(t)$ . Par continuité (et par le fait que  $v$  explose vers  $+\infty$  en  $\sup \tilde{J}$ ), on en déduit que :

$$\sup J \leq \sup \tilde{J} < +\infty.$$

□

### Exemple 12: Explosion en temps fini (cas polynômial)

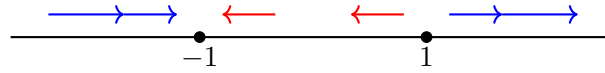
Soit  $x_0 > 1$  et  $(J, x)$  la solution maximale du problème :

$$\begin{cases} x'(t) = x^2(t) - 1 \\ x(0) = x_0 \quad (x_0 > 1) \end{cases}$$

Ici  $f(x) = x^2 - 1$ . Alors  $\sup J < +\infty$ .

**Preuve :**

Étudions la ligne de phase. Le signe de  $x^2 - 1$  est positif à l'extérieur des racines  $\{-1, 1\}$  et négatif à l'intérieur.



Note : Le schéma ci-dessus représente le signe de la dérivée. Flèche vers la droite = fonction croissante, flèche vers la gauche = fonction décroissante.

Pour  $x_0 > 1$ , l'étude de la ligne de phase nous indique que :

$$\begin{cases} x(t) \xrightarrow[t \rightarrow \sup J]{} +\infty \\ x(t) \xrightarrow[t \rightarrow \inf J]{} 1 \end{cases} \quad \text{et} \quad \inf J = -\infty.$$

Regardons le comportement en  $+\infty$  :

$$f(x) = x^2 - 1 \underset{x \rightarrow +\infty}{\sim} x^2.$$

Il existe  $\bar{x} > 0$  tel que  $\forall x \geq \bar{x}, f(x) \geq x^{4/3}$  (on choisit cet exposant car  $1 < \frac{4}{3} < 2$ ).

On peut appliquer le résultat précédent (Corollaire sur l'explosion en temps fini avec  $\alpha > 1$ ) et donc  $\sup J < +\infty$ .  $\square$

### Exemple 13: Explosion en temps inverse (Logistique inversée)

Soit  $x_0 > 1$  et  $(J, x)$  la solution maximale du problème :

$$\begin{cases} x'(t) = x(t)(1 - x(t)) \\ x(0) = x_0 \end{cases}$$

Alors  $\inf J > -\infty$ .

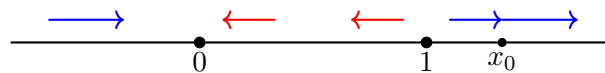
**Preuve :**

Soit  $(J, x)$  avec  $J = ]a, b[$  et  $0 \in J$ . Posons  $v(t) = x(-t)$ . Alors :

$$\begin{aligned} v'(t) &= -x'(-t) \\ &= -[x(-t)(1 - x(-t))] \\ &= -v(t)(1 - v(t)) \\ &= v(t)(v(t) - 1) \end{aligned}$$

Donc  $v'(t) = f(v(t))$  où  $f(x) = x(x - 1)$ .

Étudions la ligne de phase pour  $v$ . Les racines sont 0 et 1. Le signe de  $x(x - 1)$  est positif si  $x > 1$  ou  $x < 0$ , négatif si  $0 < x < 1$ .



L'étude de la ligne de phase nous dit que  $v(t) \xrightarrow[t \rightarrow \sup \bar{J}]{} +\infty$  car  $v(0) = x_0 > 1$ .

On a le comportement asymptotique :

$$f(x) \underset{x \rightarrow +\infty}{\sim} x^2.$$

Donc  $\exists \bar{x} > 0$  tel que  $\forall x \geq \bar{x}, f(x) \geq x^{3/2}$  (avec  $\alpha = 3/2 > 1$ ).

En appliquant le résultat précédent, on en déduit que  $\sup \bar{J} = -a < +\infty$ . Ceci implique que  $a > -\infty$ , et donc  $\inf J > -\infty$ .  $\square$

#### Exemple 14: Stabilité asymptotique avec perturbation

Soit  $(J, x)$  la solution maximale du problème :

$$x'(t) = -x(t) + \varepsilon(t)$$

avec  $\varepsilon : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$  et  $\varepsilon(t) \xrightarrow{t \rightarrow +\infty} 0$ .

Alors  $x(t) \xrightarrow{t \rightarrow +\infty} 0$ .

**Preuve :**

On a  $J = \mathbb{R}$  car  $x$  est solution maximale d'un problème linéaire (existence globale). Puisque  $\lim_{t \rightarrow +\infty} \varepsilon(t) = 0$ , pour tout  $\eta > 0$ , il existe  $\bar{t} \in I$  tel que :

$$\forall t \geq \bar{t}, \quad -\eta \leq \varepsilon(t) \leq \eta$$

D'où :

$$\forall t \geq \bar{t}, \quad -x(t) - \eta \leq x'(t) \leq -x(t) + \eta$$

Pour  $t \geq \bar{t}$ , on introduit  $y_1$  solution du problème (1) et  $y_2$  solution du problème (2) :

$$(1) \begin{cases} y_1'(t) = -y_1(t) + \eta \\ y_1(\bar{t}) = x(\bar{t}) \end{cases} \quad \text{et} \quad (2) \begin{cases} y_2'(t) = -y_2(t) - \eta \\ y_2(\bar{t}) = x(\bar{t}) \end{cases}$$

D'après le principe de comparaison (en étudiant la fonction différence), on en déduit que pour tout  $t \geq \bar{t}$  :

$$y_2(t) \leq x(t) \leq y_1(t)$$

En étudiant l'équation différentielle linéaire  $y' = ay + b$  (ici  $a = -1$ ), on sait que les solutions sont de la forme  $y(t) = \lambda e^{-t} - \frac{b}{a}$ .

- Pour  $y_1 : y_1(t) \rightarrow \eta$  quand  $t \rightarrow +\infty$ .
- Pour  $y_2 : y_2(t) \rightarrow -\eta$  quand  $t \rightarrow +\infty$ .

Plus précisément, la solution de  $y'(t) = -y(t) + \eta$  est  $y(t) = (y(\bar{t}) - \eta)e^{-(t-\bar{t})} + \eta$ . Donc  $\lim_{t \rightarrow +\infty} y_1(t) = \eta$  et  $\lim_{t \rightarrow +\infty} y_2(t) = -\eta$ .

De l'encadrement  $y_2(t) \leq x(t) \leq y_1(t)$ , on déduit :

$$\liminf_{t \rightarrow +\infty} y_2(t) \leq \liminf_{t \rightarrow +\infty} x(t) \leq \limsup_{t \rightarrow +\infty} x(t) \leq \limsup_{t \rightarrow +\infty} y_1(t)$$

C'est-à-dire :

$$-\eta \leq \liminf_{t \rightarrow +\infty} x(t) \leq \limsup_{t \rightarrow +\infty} x(t) \leq \eta$$

Ceci étant vrai pour tout  $\eta > 0$ , en faisant tendre  $\eta$  vers 0, on obtient :

$$0 \leq \liminf_{t \rightarrow +\infty} x(t) \leq \limsup_{t \rightarrow +\infty} x(t) \leq 0$$

Donc  $\lim_{t \rightarrow +\infty} x(t) = 0$ . □



## VI. Systèmes différentiels linéaires

On va considérer les problèmes de type :

$$(H) \quad x'(t) = A(t)x(t) + B(t)$$

avec :

- $I \subset \mathbb{R}$  un intervalle.
- $A : I \rightarrow \mathcal{M}_n(\mathbb{R})$  continue ( $t \mapsto A(t)$ ).
- $B : I \rightarrow \mathbb{R}^n$  continue ( $t \mapsto B(t)$ ).

### Proposition 25

Soit  $A \in \mathcal{C}(I, \mathcal{M}_n(\mathbb{R}))$  et  $B \in \mathcal{C}(I, \mathbb{R}^n)$ . Soit  $\mathcal{S}_{NH}$  l'ensemble des solutions globales du problème  $(NH)$  (Non Homogène) :

$$x'(t) = A(t)x(t) + B(t)$$

et  $\mathcal{S}_H$  l'ensemble des solutions globales du problème homogène associé  $(H)$  :

$$x'(t) = A(t)x(t)$$

Alors :

1.  $(H)$  et  $(NH)$  ont une unique solution globale pour tout problème de Cauchy  $(t_0, x_0) \in I \times \mathbb{R}^n$ .
2.  $\mathcal{S}_H$  est un espace vectoriel de dimension  $n$  et l'application  $\Phi_{t_0} : \mathcal{S}_H \rightarrow \mathbb{R}^n$  définie par  $x \mapsto x(t_0)$  est un isomorphisme.
3. Si  $(x_1, \dots, x_n)$  est une famille de  $\mathcal{S}_H$ , alors les propriétés suivantes sont équivalentes :
  - $(x_1, \dots, x_n)$  est une base de  $\mathcal{S}_H$ .
  - Pour tout  $t \in I$ ,  $(x_1(t), \dots, x_n(t))$  est une base de  $\mathbb{R}^n$ .
  - Il existe  $t_0 \in I$  tel que  $(x_1(t_0), \dots, x_n(t_0))$  est une base de  $\mathbb{R}^n$ .
4. Si  $x_p$  est une solution particulière de  $(NH)$ , alors  $\mathcal{S}_{NH}$  est un espace affine de direction  $\mathcal{S}_H$ , c'est-à-dire :

$$\mathcal{S}_{NH} = x_p + \mathcal{S}_H = \{t \mapsto x_p(t) + x(t) \mid x \in \mathcal{S}_H\}$$

**Preuve :**

On pose  $F(t, x) = A(t)x + B(t)$  avec  $F : I \times \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$ .

**Point 1 : Existence et Unicité Globale.** On a  $\|F(t, x)\| \leq \|A(t)\|\|x\| + \|B(t)\|$ . On pose  $a(t) = \|A(t)\|$  et  $b(t) = \|B(t)\|$ . Par continuité de  $A, B$  et de la norme, les fonctions  $a$  et  $b$  sont continues sur  $I$ . De plus, d'après le corollaire du cours (théorème de "Wintner" ou sortie de tout compact), on en déduit que  $\sup J = \sup I$  et  $\inf J = \inf I$  (pas d'explosion en temps fini car croissance au plus linéaire). Donc les solutions maximales sont globales.

D'autre part,  $F(t, x) = A(t)x + B(t)$  est continue et localement lipschitzienne par rapport à  $x$ . En effet :

$$F(t, x) - F(t, y) = A(t)(x - y)$$

Donc  $\|F(t, x) - F(t, y)\| \leq \|A(t)\|\|x - y\|$ . Pour  $t$  dans un compact (ou localement),  $\|A(t)\|$  est bornée. D'après le théorème de Cauchy-Lipschitz, il existe une unique solution globale pour le problème de Cauchy  $x(t_0) = X_0$ .

**Point 2 : Structure de  $\mathcal{S}_H$ .** Soient  $X, Y \in \mathcal{S}_H$  et  $\lambda \in \mathbb{R}$ . Montrons que  $X + \lambda Y \in \mathcal{S}_H$ . Pour tout  $t \in I$  :

$$(X + \lambda Y)'(t) = X'(t) + \lambda Y'(t) = A(t)X(t) + \lambda A(t)Y(t) = A(t)(X(t) + \lambda Y(t))$$

Donc  $\mathcal{S}_H$  est un espace vectoriel.

Considérons l'application  $\Phi_{t_0} : \mathcal{S}_H \rightarrow \mathbb{R}^n$  définie par  $\Phi_{t_0}(x) = x(t_0)$ . C'est une application linéaire. Soit  $Y \in \mathbb{R}^n$ . D'après le théorème de Cauchy-Lipschitz linéaire global, le problème 
$$\begin{cases} x'(t) = A(t)x(t) \\ x(t_0) = Y \end{cases}$$
 admet une unique solution globale  $x_Y$ . Cela implique que pour tout  $Y \in \mathbb{R}^n$ ,

il existe un unique  $x_Y \in \mathcal{S}_H$  tel que  $\Phi_{t_0}(x_Y) = Y$ . L'application est donc bijective, c'est un isomorphisme. Ainsi,  $\dim \mathcal{S}_H = \dim \mathbb{R}^n = n$ .

**Point 3 : Équivalence des bases.** Soit  $(x_1, \dots, x_n)$  une famille de  $\mathcal{S}_H$ . Puisque  $\Phi_{t_0}$  est un isomorphisme :  $(x_1, \dots, x_n)$  base de  $\mathcal{S}_H \iff (\Phi_{t_0}(x_1), \dots, \Phi_{t_0}(x_n))$  base de  $\mathbb{R}^n$ . Or  $\Phi_{t_0}(x_i) = x_i(t_0)$ . Montrons que si c'est vrai pour un  $t_0$ , c'est vrai pour tout  $t$ . Supposons que  $(x_1(t_0), \dots, x_n(t_0))$  soit une base de  $\mathbb{R}^n$ . Alors  $(x_1, \dots, x_n)$  est une base de  $\mathcal{S}_H$  (par isomorphisme). Donc pour tout  $t \in I$ , par l'isomorphisme  $\Phi_t$ ,  $(x_1(t), \dots, x_n(t))$  est une base de  $\mathbb{R}^n$ .

Détail sur l'indépendance linéaire :  $\sum_{i=1}^n \lambda_i x_i = 0_{\mathcal{S}_H} \iff \forall t \in I, \sum_{i=1}^n \lambda_i x_i(t) = 0$ . En particulier en  $t_0$  :  $\sum \lambda_i x_i(t_0) = 0 \implies \lambda_i = 0$  car la famille est libre dans  $\mathbb{R}^n$ .

**Point 4 : Structure affine de  $\mathcal{S}_{NH}$ .** Soit  $x_p$  une solution particulière de  $(NH)$ . Soit  $x$  une solution globale quelconque de  $(NH)$ . Posons  $y(t) = x(t) - x_p(t)$ . Alors :

$$y'(t) = x'(t) - x_p'(t) = (A(t)x(t) + B(t)) - (A(t)x_p(t) + B(t))$$

$$y'(t) = A(t)(x(t) - x_p(t)) = A(t)y(t)$$

Donc  $y \in \mathcal{S}_H$ . Ainsi  $x = x_p + y$  avec  $y \in \mathcal{S}_H$ . D'où  $\mathcal{S}_{NH} = x_p + \mathcal{S}_H$ . □

#### Remarque

Si  $(x_1, \dots, x_n)$  est une famille libre de  $\mathcal{S}_H$ , alors toutes les solutions de  $\mathcal{S}_H$  s'écrivent sous la forme :

$$\forall t \in I, \quad x(t) = \sum_{i=1}^n \mu_i x_i(t)$$

## 1 Systèmes à coefficients constants

On considère l'équation  $x'(t) = Ax(t)$  où  $A \in \mathcal{M}_n(\mathbb{R})$  est une matrice constante (indépendante du temps).

### Exemple 15: Cas diagonal

Si  $A = \begin{pmatrix} \lambda_1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & \lambda_n \end{pmatrix}$ . Le système s'écrit :

$$X'(t) = \begin{pmatrix} x_1'(t) \\ \vdots \\ x_n'(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \lambda_1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & \lambda_n \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1(t) \\ \vdots \\ x_n(t) \end{pmatrix}$$

$$\text{Soit } \begin{cases} x_1'(t) = \lambda_1 x_1(t) \\ \vdots \\ x_n'(t) = \lambda_n x_n(t) \end{cases}.$$

$$\text{Les solutions sont de la forme } \begin{cases} x_1(t) = x_{1,0} e^{\lambda_1 t} \\ \vdots \\ x_n(t) = x_{n,0} e^{\lambda_n t} \end{cases}.$$

On peut écrire la solution vectorielle :  $X(t) = \sum_{i=1}^n x_{i,0} e^{\lambda_i t} e_i$  (où  $(e_i)$  est la base canonique).

### Proposition 26

Soit  $(w_1, \dots, w_n)$  une base de vecteurs propres de  $A$  (si  $A$  est diagonalisable), associés aux valeurs propres  $(\lambda_1, \dots, \lambda_n)$ . Alors la famille de fonctions définie par  $x_i(t) = e^{\lambda_i t} w_i$  forme une base de  $\mathcal{S}_H$ .

### Lemme 7

Soit  $V$  un vecteur propre de  $A$  pour la valeur propre  $\lambda$ . Alors la fonction  $x(t) = e^{\lambda t} V$  est solution de  $(H)$ .

#### Preuve du Lemme :

En effet :  $x'(t) = \lambda e^{\lambda t} V$ .

Et  $Ax(t) = A(e^{\lambda t} V) = e^{\lambda t} AV = e^{\lambda t} (\lambda V) = \lambda e^{\lambda t} V$ . Donc  $x'(t) = Ax(t)$  et  $x(0) = V$ .  $\square$

#### Preuve de la proposition :

Pour chaque  $i \in \{1, \dots, n\}$ , la fonction  $x_i$  définie par  $x_i(t) = e^{\lambda_i t} w_i$  est solution (d'après le lemme). Regardons la valeur en  $t = 0$  :  $x_i(0) = w_i$ . Comme  $(w_1, \dots, w_n)$  est une base de vecteurs propres de  $\mathbb{R}^n$ , la famille  $(x_1(0), \dots, x_n(0))$  est une base de  $\mathbb{R}^n$ . D'après la proposition précédente (sur l'équivalence des bases via l'évaluation en  $t_0$ ), on en déduit que  $(x_1, \dots, x_n)$  est une base de  $\mathcal{S}_H$ .

**Autre méthode (changement de base) :** Puisque  $A$  est diagonalisable, il existe  $P$  inversible telle que  $P^{-1}AP = D$  (diagonale). On pose  $x(t) = Py(t)$ . Alors  $x'(t) = Py'(t)$ . L'équation  $x'(t) = Ax(t)$  devient  $Py'(t) = APy(t)$ , soit  $y'(t) = P^{-1}APy(t) = Dy(t)$ . Le système en  $y$  est découplé :  $y'_i(t) = \lambda_i y_i(t)$ , donc  $y_i(t) = c_i e^{\lambda_i t}$ . On revient à  $x$  :

$$x(t) = Py(t) = P \begin{pmatrix} c_1 e^{\lambda_1 t} \\ \vdots \\ c_n e^{\lambda_n t} \end{pmatrix} = \sum_{i=1}^n c_i e^{\lambda_i t} P e_i$$

Or les colonnes de  $P$ , notées  $w_i = P e_i$ , sont les vecteurs propres. Donc  $x(t) = \sum_{i=1}^n c_i e^{\lambda_i t} w_i$ .  $\square$

## 2 Portrait de phase pour une matrice diagonalisable

### Exemple 16: Système triangulaire

Considérons un système de la forme  $X'(t) = AX(t)$  avec une matrice triangulaire supérieure :

$$X'(t) = \begin{pmatrix} \alpha_1 & \alpha_2 & \alpha_3 \\ 0 & \alpha_4 & \alpha_5 \\ 0 & 0 & \alpha_6 \end{pmatrix} X(t)$$

Ce qui donne le système d'équations scalaires suivant (en commençant par le bas) :

$$\begin{aligned} x'_3(t) &= \alpha_6 x_3(t) \\ x'_2(t) &= \alpha_4 x_2(t) + \alpha_5 x_3(t) \\ &\vdots \end{aligned}$$

## 3 Définition et contexte

Soit  $(E)$   $X'(t) = AX(t)$ .

Le système est autonome. Considérons  $A \in \mathcal{M}_{2 \times 2}(\mathbb{R})$ . On souhaite dessiner le portrait de phase associé au système  $(E)$ .

### Définition 20: Portrait de phase

Cela consiste à dessiner les trajectoires associées au problème  $(E)$  en indiquant par une flèche le sens du temps.

#### Remarque

Dessiner un portrait de phase est adapté au cas des systèmes (en particulier en dimension  $n = 2$ ) mais ne l'est pas pour les systèmes non autonomes.

En effet, dans le cas des systèmes autonomes, les trajectoires sont disjointes et pavent tout le plan  $\mathbb{R}^2$  lorsque  $n = 2$ .

Dans le cas de système non-autonome, si les trajectoires peuvent se croiser, il devient délicat de faire des dessins.

Soit  $(J, \lambda)$  solution maximale de  $X'(t) = f(X(t))$  localement lipschitzienne. On définit la trajectoire de  $X$  par :

$$T_x = \{x(t) \mid t \in J\} = \text{trajectoire de } X.$$

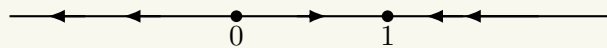
## 4 Exemple en dimension $n = 1$

### Exemple 17: Loi logistique

Soit  $n = 1$ . Considérons l'équation :

$$x'(t) = x(t)(1 - x(t)) = f(x(t))$$

avec  $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$  définie par  $x \mapsto x(1 - x)$ .



Discussion selon la condition initiale  $x_0$  :

- Si  $x_0 > 1$  :

$$\begin{cases} x(t) \xrightarrow[t \rightarrow \sup J]{} 1 \\ x(t) \xrightarrow[t \rightarrow \inf J]{} +\infty \end{cases} \quad \text{et} \quad T_x = ]1, +\infty[$$

- Si  $x_0 < 0$  :

$$\begin{cases} x(t) \xrightarrow[t \rightarrow \inf J]{} -\infty \\ x(t) \xrightarrow[t \rightarrow \sup J]{} 0 \end{cases} \quad \text{et} \quad T_x = ]-\infty, 0[$$

- Si  $x_0 \in ]0, 1[$  :

$$T_x = ]0, 1[$$

- Si  $x_0 = 0$  :  $T_x = \{0\}$  (Solution stationnaire).

- Si  $x_0 = 1$  :  $T_x = \{1\}$  (Solution stationnaire).

## 5 Portrait de phase en dimension 2

**Exemple 18: Portrait de phase pour  $A = \begin{pmatrix} \lambda_1 & 0 \\ 0 & \lambda_2 \end{pmatrix}$**

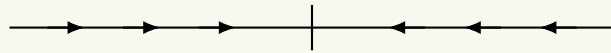
0 est un équilibre. On suppose  $\lambda_1 < 0 < \lambda_2$ .

Le système  $X'(t) = AX(t)$  admet pour solution :

$$X(t) = \begin{pmatrix} x_{10}e^{\lambda_1 t} \\ x_{20}e^{\lambda_2 t} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{pmatrix}$$

### 1. Analyse sur l'axe des abscisses ( $x_{20} = 0$ )

Si  $x_{20} = 0$ , alors  $X(t) = \begin{pmatrix} x_{10}e^{\lambda_1 t} \\ 0 \end{pmatrix}$ . Si on suppose  $x_{10} > 0$  :



On a les limites suivantes (car  $\lambda_1 < 0$ ) :

$$x_{10}e^{\lambda_1 t} \xrightarrow[t \rightarrow +\infty]{} 0 \quad \text{et} \quad x_{10}e^{\lambda_1 t} \xrightarrow[t \rightarrow -\infty]{} +\infty$$

Si  $x_{10} < 0$  :

$$\begin{cases} x_{10}e^{\lambda_1 t} \xrightarrow[t \rightarrow +\infty]{} 0 \\ x_{10}e^{\lambda_1 t} \xrightarrow[t \rightarrow -\infty]{} -\infty \end{cases}$$

**Conclusion :** L'axe des abscisses est attractif.

### 2. Analyse sur l'axe des ordonnées ( $x_{10} = 0$ )

Si  $x_{10} = 0$ , alors  $X(t) = \begin{pmatrix} 0 \\ x_{20}e^{\lambda_2 t} \end{pmatrix}$ .

• Si  $x_{20} > 0$  :

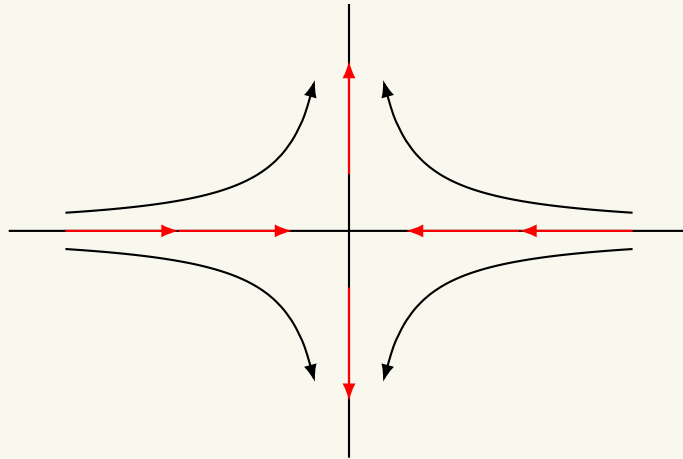
$$\begin{cases} x_{20}e^{\lambda_2 t} \xrightarrow[t \rightarrow -\infty]{} 0 \\ x_{20}e^{\lambda_2 t} \xrightarrow[t \rightarrow +\infty]{} +\infty \end{cases}$$

• Si  $x_{20} < 0$  :

$$\begin{cases} x_{20}e^{\lambda_2 t} \xrightarrow[t \rightarrow +\infty]{} -\infty \\ x_{20}e^{\lambda_2 t} \xrightarrow[t \rightarrow -\infty]{} 0 \end{cases}$$

### 3. Portrait de phase global

L'équation des trajectoires est donnée par  $x_2(t) = \lambda x_1^\alpha(t)$ .



L'ensemble des trajectoires est :

$$T = \{(x_1, \lambda x_1^\alpha(t)) \mid x_1(t) \in ]0, +\infty[ \} \cup \{(x, x^\alpha \lambda) \mid x \in ]0, +\infty[ \}$$

## 6 Étude du cas $\lambda_1 < 0 < \lambda_2$

Considérons le système :

$$X'(t) = AX(t)$$

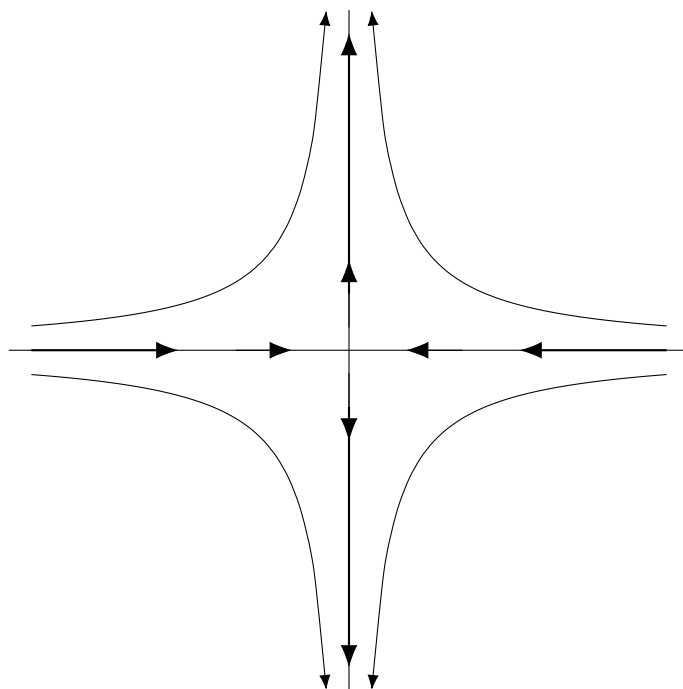
Avec la matrice  $A$  définie par :

$$A = \begin{pmatrix} \lambda_1 & 0 \\ 0 & \lambda_2 \end{pmatrix}, \quad \text{avec } \lambda_1 < 0 < \lambda_2$$

La solution générale est donnée par :

$$X(t) = \begin{pmatrix} x_0 e^{\lambda_1 t} \\ y_0 e^{\lambda_2 t} \end{pmatrix}$$

### Portrait de phase



## Analyse des cas selon les conditions initiales

**Premier cas :**  $x_0 > 0$  et  $y_0 = 0$ .

Pour tout  $t \in \mathbb{R}$  :

$$\begin{cases} y(t) = 0 \\ x(t) = x_0 e^{\lambda_1 t} \end{cases}$$

Comportement asymptotique :

$$x(t) \xrightarrow[t \rightarrow +\infty]{} 0 \quad \text{car } \lambda_1 < 0$$

$$x(t) \xrightarrow[t \rightarrow -\infty]{} +\infty$$

L'ensemble de la trajectoire est :

$$T_{(x_0, 0)} = ]0, +\infty[ \times \{0\}$$

**Considérons maintenant :**  $x_0 > 0$  et  $y_0 > 0$ .

### Justification analytique de la trajectoire :

Nous avons  $x(t) = x_0 e^{\lambda_1 t}$  pour tout  $t \in \mathbb{R}$ . Comme  $x_0 > 0$ , on a  $x(t) > 0$ . Exprimons  $t$  en fonction de  $x(t)$  :

$$\begin{aligned} e^{\lambda_1 t} = \frac{x(t)}{x_0} &\iff \lambda_1 t = \ln \left( \frac{x(t)}{x_0} \right) \\ &\iff t = \frac{1}{\lambda_1} \ln \left( \frac{x(t)}{x_0} \right) \end{aligned}$$

Injectons cette expression dans l'équation de  $y(t) = y_0 e^{\lambda_2 t}$  :

$$\begin{aligned} y(t) &= y_0 e^{\lambda_2 \left( \frac{1}{\lambda_1} \ln \left( \frac{x(t)}{x_0} \right) \right)} \\ &= y_0 e^{\ln \left( \left( \frac{x(t)}{x_0} \right)^{\frac{\lambda_2}{\lambda_1}} \right)} \\ &= y_0 \left( \frac{x(t)}{x_0} \right)^{\frac{\lambda_2}{\lambda_1}} \\ &= \frac{y_0}{x_0^{\frac{\lambda_2}{\lambda_1}}} x(t)^{\frac{\lambda_2}{\lambda_1}} \end{aligned}$$

On obtient ainsi une équation de la forme :

$$y(t) = C x(t)^\alpha$$

Avec les constantes suivantes :

$$C = \frac{y_0}{x_0^{\frac{\lambda_2}{\lambda_1}}} > 0 \quad \text{et} \quad \alpha = \frac{\lambda_2}{\lambda_1} < 0 \quad (\text{car } \lambda_1 < 0 < \lambda_2)$$

### Remarque

L'ensemble de la trajectoire  $T_{(x_0, y_0)}$  est défini par :

$$\begin{aligned} T_{(x_0, y_0)} &= \{(x(t), y(t)) \mid t \in \mathbb{R}\} \\ &= \{(x(t), C x(t)^\alpha) \mid t \in \mathbb{R}\} \end{aligned}$$

En posant le changement de variable  $z = x(t)$ , et sachant que lorsque  $t$  parcourt  $\mathbb{R}$ ,  $x(t)$  parcourt

$]0, +\infty[$ , on obtient une représentation cartésienne de la courbe :

$$T_{(x_0, y_0)} = \{(z, Cz^\alpha) \mid z \in ]0, +\infty[ \}$$

L'application  $t \mapsto x(t) = x_0 e^{\lambda_1 t}$  est une bijection de  $\mathbb{R}$  dans  $\mathbb{R}_+^*$  (puisque  $x_0 > 0$ ).

Étudions le comportement aux bornes :

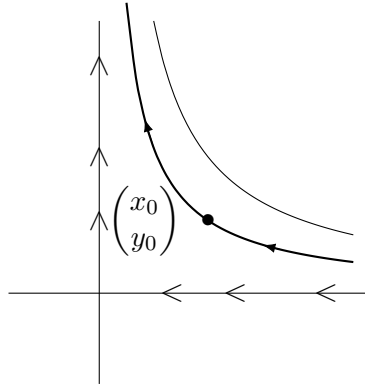
- Lorsque  $t \rightarrow +\infty$  :

$$\begin{cases} x(t) \xrightarrow{t \rightarrow +\infty} 0 & (\text{car } \lambda_1 < 0) \\ y(t) \xrightarrow{t \rightarrow +\infty} +\infty & (\text{car } \lambda_2 > 0 \text{ et } y_0 > 0) \end{cases}$$

- Lorsque  $t \rightarrow -\infty$  :

$$\begin{cases} x(t) \xrightarrow{t \rightarrow -\infty} +\infty & (\text{car } \lambda_1 < 0) \\ y(t) \xrightarrow{t \rightarrow -\infty} 0 & (\text{car } \lambda_2 > 0) \end{cases}$$

Ce comportement confirme l'allure hyperbolique de la trajectoire s'éloignant de l'axe des  $x$  pour se rapprocher de l'axe des  $y$ .



### 3. Troisième cas : $x_0 < 0$ et $y_0 > 0$ .

Dans ce cas, pour tout  $t \in \mathbb{R}$ , nous avons  $x(t) < 0$ .

$$\begin{cases} x(t) = x_0 e^{\lambda_1 t} \\ y(t) = y_0 e^{\lambda_2 t} \end{cases}$$

Cherchons à exprimer  $y(t)$  en fonction de  $x(t)$  pour obtenir l'équation de la trajectoire. Comme  $x(t)$  et  $x_0$  sont négatifs, leur quotient  $\frac{x(t)}{x_0}$  est positif.

$$e^{\lambda_1 t} = \frac{x(t)}{x_0} \iff \lambda_1 t = \ln \left( \frac{x(t)}{x_0} \right) = \ln \left( \left| \frac{x(t)}{x_0} \right| \right)$$

D'où :

$$t = \frac{1}{\lambda_1} \ln \left( \frac{x(t)}{x_0} \right)$$

En remplaçant dans l'expression de  $y(t)$  :

$$\begin{aligned} y(t) &= y_0 e^{\lambda_2 \left( \frac{1}{\lambda_1} \ln \left( \frac{x(t)}{x_0} \right) \right)} \\ &= y_0 e^{\frac{\lambda_2}{\lambda_1} \ln \left( \left| \frac{x(t)}{x_0} \right| \right)} \\ &= y_0 \left| \frac{x(t)}{x_0} \right|^{\frac{\lambda_2}{\lambda_1}} \\ &= \frac{y_0}{|x_0|^{\frac{\lambda_2}{\lambda_1}}} |x(t)|^{\frac{\lambda_2}{\lambda_1}} \end{aligned}$$



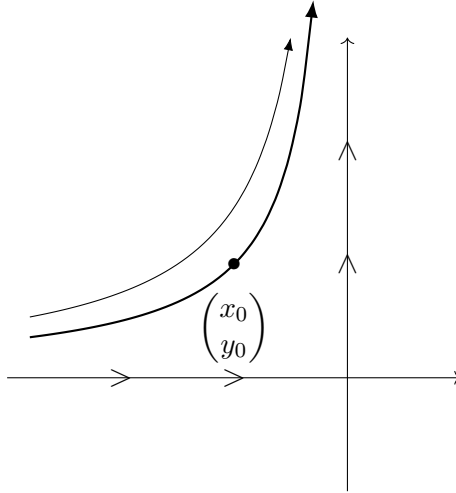
On retrouve une équation de la forme :

$$y(t) = C|x(t)|^\alpha$$

Avec :

$$C = \frac{y_0}{|x_0|^{\frac{\lambda_2}{\lambda_1}}} > 0 \quad \text{et} \quad \alpha = \frac{\lambda_2}{\lambda_1}$$

(Note :  $\alpha < 0$  car  $\lambda_1 < 0 < \lambda_2$ ).



L'ensemble de la trajectoire est donc :

$$\begin{aligned} T_{(x_0, y_0)} &= \left\{ \begin{pmatrix} x(t) \\ y(t) \end{pmatrix} \mid t \in \mathbb{R} \right\} \\ &= \left\{ \begin{pmatrix} x(t) \\ C|x(t)|^\alpha \end{pmatrix} \mid t \in \mathbb{R} \right\} \end{aligned}$$

En posant le changement de variable  $z = x(t)$ . L'application  $t \mapsto x_0 e^{\lambda_1 t}$  est une bijection de  $\mathbb{R}$  dans  $\mathbb{R}_+$  (car  $x_0 < 0$ ). Ainsi  $z$  parcourt  $] -\infty, 0[$ . On obtient :

$$T_{(x_0, y_0)} = \left\{ \begin{pmatrix} z \\ C|z|^\alpha \end{pmatrix} \mid z \in ] -\infty, 0[ \right\}$$

#### 4. Quatrième cas : $x_0 > 0$ et $y_0 < 0$ .

Dans ce cas, nous avons :

$$x(t) = x_0 e^{\lambda_1 t} \quad \text{et} \quad y(t) = y_0 e^{\lambda_2 t}$$

Pour tout  $t \in \mathbb{R}$ , on a  $x(t) > 0$  (car  $x_0 > 0$ ). Exprimons  $t$  en fonction de  $x(t)$  :

$$e^{\lambda_1 t} = \frac{x(t)}{x_0} \iff \lambda_1 t = \ln \left( \frac{x(t)}{x_0} \right) \iff t = \frac{1}{\lambda_1} \ln \left( \frac{x(t)}{x_0} \right)$$

Injectons ce résultat dans l'expression de  $y(t)$  :

$$\begin{aligned} y(t) &= y_0 e^{\lambda_2 \left( \frac{1}{\lambda_1} \ln \left( \frac{x(t)}{x_0} \right) \right)} \\ &= y_0 \left( \frac{x(t)}{x_0} \right)^{\frac{\lambda_2}{\lambda_1}} \\ &= \frac{y_0}{x_0^{\frac{\lambda_2}{\lambda_1}}} x(t)^{\frac{\lambda_2}{\lambda_1}} \end{aligned}$$

On obtient de nouveau la forme :

$$y(t) = Cx(t)^\alpha$$

Avec les constantes :

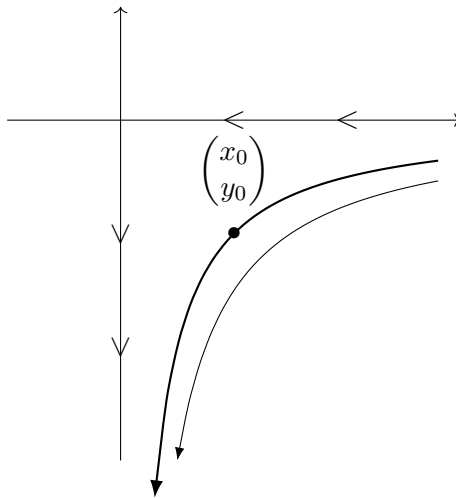
$$C = \frac{y_0}{x_0^\alpha} < 0 \quad (\text{car } y_0 < 0 \text{ et } x_0 > 0)$$

$$\alpha = \frac{\lambda_2}{\lambda_1} < 0$$

L'ensemble de la trajectoire est donné par :

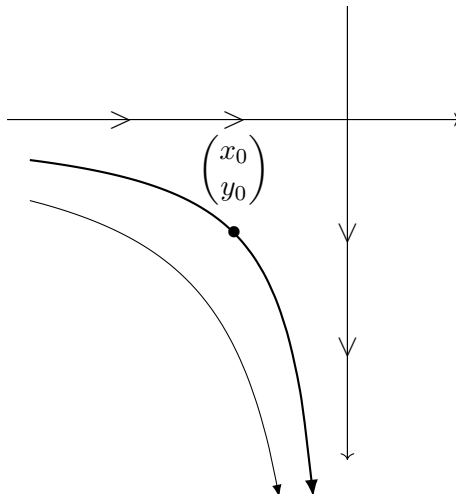
$$T_{(x_0, y_0)} = \{(z, Cz^\alpha) \mid z \in ]0, +\infty[ \}$$

Si on pose  $z = x(t)$ .

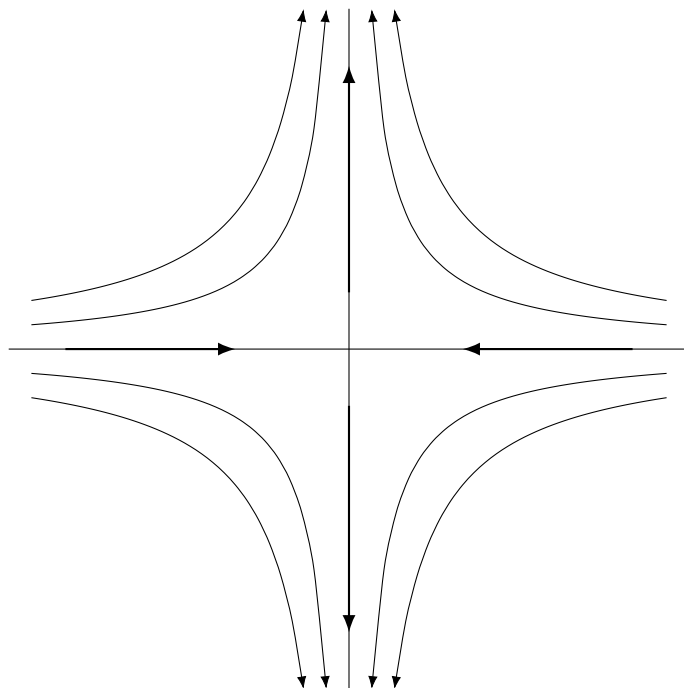


**5. Cas  $x_0 < 0$  et  $y_0 < 0$  :** Laissé en exercice.

Ce cas correspond au troisième quadrant. Les trajectoires sont symétriques aux précédentes par rapport à l'origine.

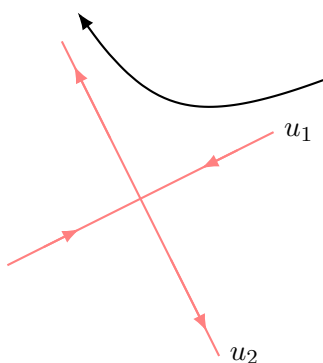
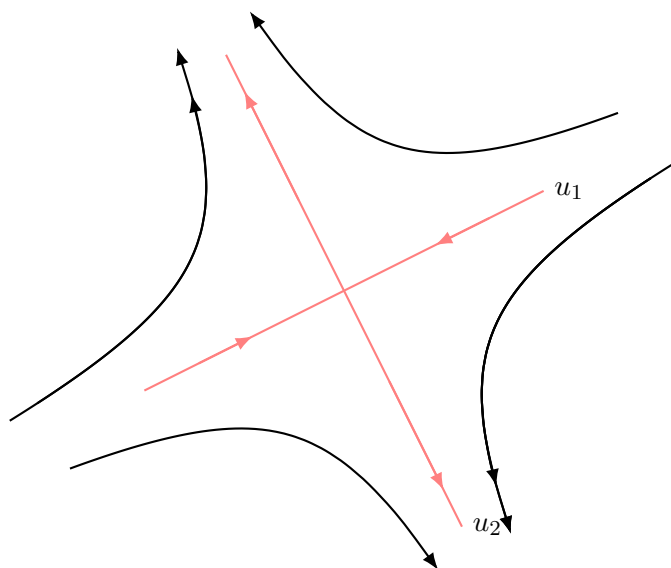


Voici le portrait de phase complet résumant tous les cas traités :



**6. Généralisation : Cas où  $A$  est diagonalisable** Supposons maintenant que  $A$  est diagonalisable avec une base de vecteurs propres  $(u_1, u_2)$ . On a vu que la solution s'écrit sous la forme :

$$X(t) = x_0 e^{\lambda_1 t} u_1 + y_0 e^{\lambda_2 t} u_2$$



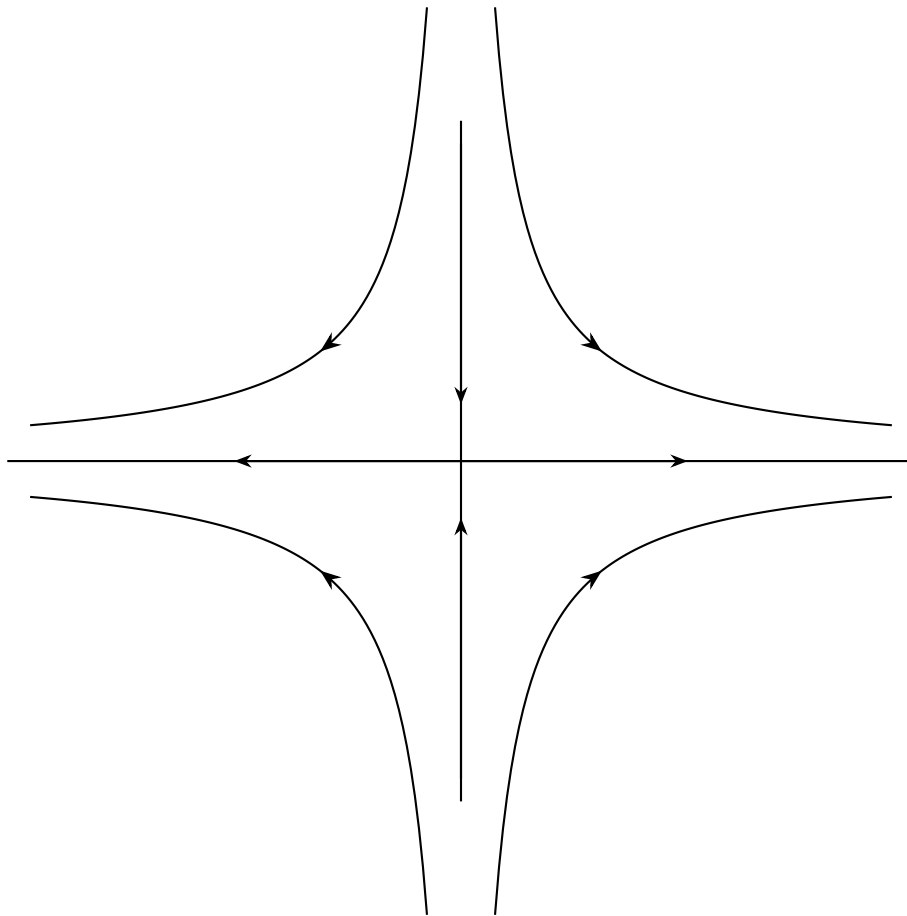
$$\begin{aligned} x_0 &> 0 \\ y_0 &> 0 \\ C &> 0 \\ \alpha &< 0 \end{aligned}$$

$$X(t) = \begin{pmatrix} x_0 e^{\lambda_1 t} u_1 \\ \vdots \end{pmatrix}$$

$$T_{(x_0, y_0)} = \{x u_1 + C x^\alpha u_2 \mid x \in ]0, +\infty[ \}$$

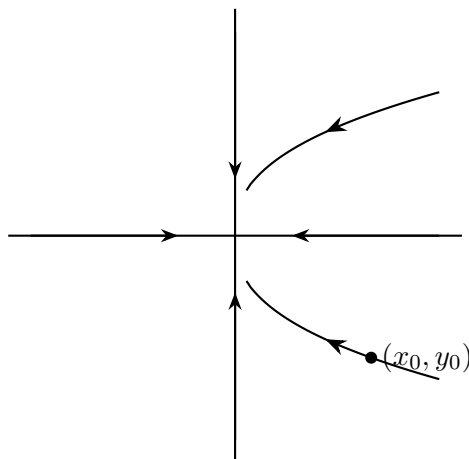
**7 Cas  $\lambda_2 < 0 < \lambda_1$**

Si maintenant :  $\lambda_2 < 0 < \lambda_1$  :



**8 Cas :  $\lambda_1 < \lambda_2 < 0$**

**Cas  $x_0 > 0, y_0 < 0$**



Nous partons du point initial  $(x_0, y_0)$ . On résout en exprimant  $t$  en fonction de  $x$  :

$$\begin{aligned} x(t) = x_0 e^{\lambda_1 t} &\implies \lambda_1 t = \ln \left( \frac{x(t)}{x_0} \right) \\ &\implies t = \frac{1}{\lambda_1} \ln \left( \frac{x(t)}{x_0} \right) \end{aligned}$$

On substitue ce temps  $t$  dans l'expression de  $y(t)$  :

$$y(t) = y_0 e^{\lambda_2 t}$$

$$y(t) = y_0 e^{\lambda_2 \frac{1}{\lambda_1} \ln\left(\frac{x(t)}{x_0}\right)}$$

$$y(t) = y_0 \left(\frac{x(t)}{x_0}\right)^{\frac{\lambda_2}{\lambda_1}}$$

On pose  $\alpha = \frac{\lambda_2}{\lambda_1}$ . Comme  $\lambda_1 < \lambda_2 < 0$ , nous avons  $0 < \alpha < 1$ .

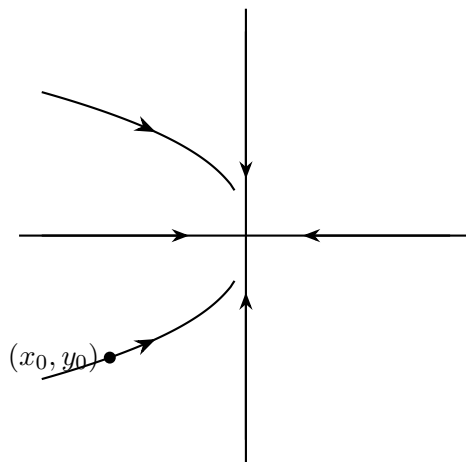
On pose également  $C = \frac{y_0}{x_0^\alpha}$ . Comme  $y_0 < 0$  et  $x_0 > 0$ , alors  $C < 0$ .

L'orbite  $\Gamma_{(x_0, y_0)}$  est définie par :

$$\Gamma_{(x_0, y_0)} = \{(z, Cz^\alpha) \mid z \in ]0, +\infty[ \}$$

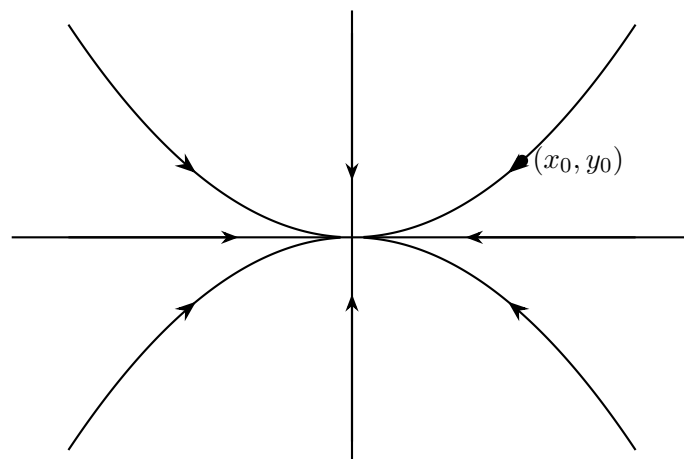
avec les conditions  $0 < \alpha < 1$  et  $C < 0$ .

**Cas**  $x_0 < 0, y_0 < 0$



**9 Cas :**  $\lambda_2 < \lambda_1 < 0$

**Cas**  $x_0 > 0, y_0 > 0$



L'orbite est définie par :

$$\Gamma_{(x_0, y_0)} = \{(z, Cz^\alpha) \mid z \in ]0, +\infty[ \}$$

Avec les constantes définies par :

$$C = \frac{y_0}{x_0^\alpha} > 0 \quad \text{et} \quad \alpha = \frac{\lambda_2}{\lambda_1} > 1$$

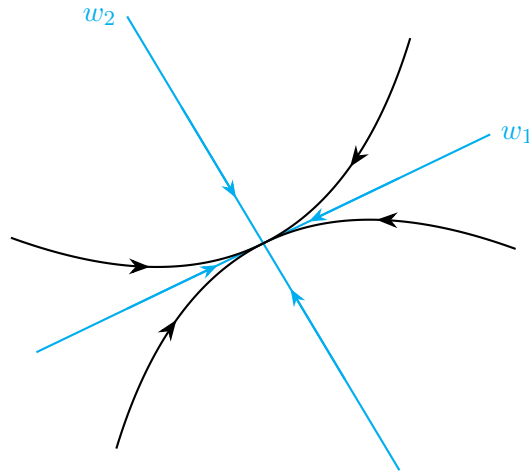
### 9.1 Généralisation : Base de vecteurs propres

Supposons que  $A$  est diagonalisable avec  $(w_1, w_2)$  base de vecteurs propres. La solution s'écrit :

$$X(t) = x_0 e^{\lambda_1 t} w_1 + y_0 e^{\lambda_2 t} w_2$$

Pour  $(x_0, y_0) > 0$ ,  $C > 0$  et  $\alpha > 1$  (cas précédent dans la base propre), l'orbite est donnée par :

$$\Gamma_{(x_0, y_0)} = \{z w_1 + C z^\alpha w_2 \mid z \in ]0, +\infty[ \}$$



**10 Si  $\lambda_2 = \lambda_1$  :**

$$\implies A = \lambda_1 \text{Id}$$

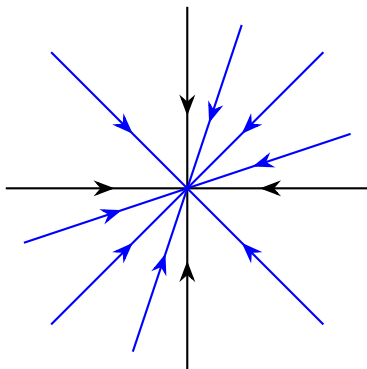
Si  $A$  est diagonalisable,  $P^{-1}AP = \begin{pmatrix} \lambda_1 & 0 \\ 0 & \lambda_2 \end{pmatrix}$

On a alors :

$$P^{-1}AP = \begin{pmatrix} \lambda_1 & 0 \\ 0 & \lambda_2 \end{pmatrix} \implies P^{-1}AP = \lambda_1 \text{Id}$$

$$\begin{aligned} A &= \lambda_1 P \text{Id} P^{-1} \\ &= \lambda_1 \text{Id} \end{aligned}$$

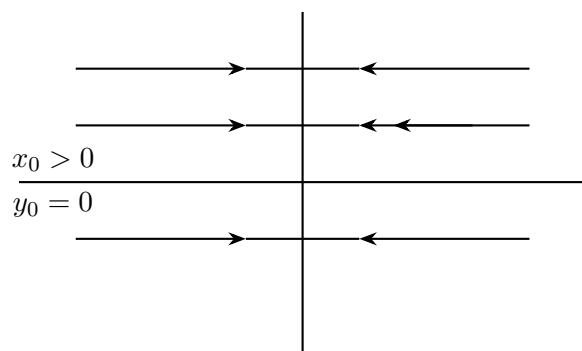
**Cas :**  $\lambda_1 = \lambda_2 < 0 \implies \alpha = \frac{\lambda_2}{\lambda_1} = 1$



$$\Gamma_{(x_0, y_0)} = \left\{ \begin{pmatrix} z \\ Cz \end{pmatrix}, z \in ]0, +\infty[ \right\}$$

**11 Si  $\lambda_1 < 0$  et  $\lambda_2 = 0$**

$$\begin{aligned} x(t) &= x_0 e^{\lambda_1 t} \\ y(t) &= y_0 e^{\lambda_2 t} \\ &= y_0 \end{aligned}$$



$$x(t) = x_0 e^{\lambda_1 t} \xrightarrow{t \rightarrow +\infty} 0$$

$$x(t) \xrightarrow{t \rightarrow -\infty} +\infty \quad (\text{car } \lambda_1 < 0)$$

**Cas :**

- $x_0 = 0, \quad y_0 > 0$  : Point fixe sur l'axe des ordonnées.
- $x_0 > 0, \quad y_0 > 0$  :

$$\forall t \in \mathbb{R}, \quad y(t) = y_0 \quad \text{et} \quad x(t) = x_0 e^{\lambda_1 t}$$

On a les limites :

$$x(t) \xrightarrow{t \rightarrow +\infty} 0 \quad \text{et} \quad x(t) \xrightarrow{t \rightarrow -\infty} +\infty$$

## VII. Cas diagonalisable dans $\mathbb{C}$ :

### 1 Cas $d = 2$

#### Proposition 27

$A \in \mathcal{M}_2(\mathbb{R})$  diagonalisable dans  $\mathbb{C}$ ,  $w$  un vecteur propre complexe associé à la valeur propre complexe  $\lambda$ .  $Z(t) = e^{\lambda t} w$ .

Alors  $(\operatorname{Re} Z, \operatorname{Im} Z)$  est une base de  $S_H$ .

$$\forall z \in S_H \quad z(t) = \mu_1 \operatorname{Re} Z(t) + \mu_2 \operatorname{Im} Z(t) \quad (\mu_1, \mu_2) \in \mathbb{R}^2$$

**Preuve :**

$$Z'(t) = AZ(t)$$

$$Z(t) = \operatorname{Re} Z(t) + i \operatorname{Im} Z(t)$$

$$Z'(t) = (\operatorname{Re} Z(t))' + i(\operatorname{Im} Z(t))' = A(\operatorname{Re} Z(t) + i \operatorname{Im} Z(t))$$

$$\forall t \in \mathbb{R}$$

$$\begin{cases} (\operatorname{Re} Z(t))' = A \operatorname{Re} Z(t) \\ (\operatorname{Im} Z(t))' = A \operatorname{Im} Z(t) \end{cases}$$

$(\operatorname{Re} Z, \operatorname{Im} Z)$  est une base de  $S_H$

$$\iff (\operatorname{Re} Z(0), \operatorname{Im} Z(0)) \text{ est une base de } \mathbb{R}^2$$

$$Z(t) = e^{\lambda t} w \quad Z(0) = w$$

$$(\operatorname{Re} Z(0), \operatorname{Im} Z(0)) = (\operatorname{Re} w, \operatorname{Im} w)$$

$\lambda$  est v.p de  $A$  ( $\lambda$  complexe), donc  $\bar{\lambda}$  est aussi v.p de  $A$ .

$$Aw = \lambda w$$

$$\overline{Aw} = \overline{\lambda w}$$

$$\overline{A} \overline{w} = \bar{\lambda} \overline{w}$$

$$A \overline{w} = \bar{\lambda} \overline{w} \text{ (car } A \text{ est réelle)}$$

$(w, \overline{w})$  est une base de  $\mathbb{C}^2$ , en effet c'est une base de vecteurs propres dans  $\mathbb{C}$ .

$(w, \overline{w})$  est une famille génératrice de  $\mathbb{C}^2$ .

$$w = \operatorname{Re} w + i \operatorname{Im} w$$

$$\overline{w} = \operatorname{Re} w - i \operatorname{Im} w$$

$\implies (\operatorname{Re} w, \operatorname{Im} w)$  est aussi génératrice de  $\mathbb{C}^2$  (car  $\dim \mathbb{C}^2 = 2$ ).

$(\operatorname{Re} w, \operatorname{Im} w)$  est libre avec  $\mathbb{K} = \mathbb{C}$ .

$$\implies \mu_1 \operatorname{Re} w + \mu_2 \operatorname{Im} w = 0 \quad (\mu_1, \mu_2) \in \mathbb{R}^2$$

$$\implies \mu_1 = \mu_2 = 0$$

$$\forall (\mu_1, \mu_2) \in \mathbb{R}^2$$

$$\mu_1 \operatorname{Re} w + \mu_2 \operatorname{Im} w = 0$$

$$\implies \mu_1 = \mu_2 = 0$$

$(\operatorname{Re} w, \operatorname{Im} w)$  est libre dans  $\mathbb{R}^2$ .

$(\operatorname{Re} w, \operatorname{Im} w)$  est une base de  $\mathbb{R}^2$ .

$\implies (\operatorname{Re} Z, \operatorname{Im} Z)$  est une base de  $S_H$ . □



$A$  diagonalisable dans  $\mathbb{C}$  avec  $\lambda = a + ib$  une valeur propre complexe  $b \neq 0$ .

$$X'(t) = AX(t)$$

$W = X_W + iY_W$  un vecteur propre associé à  $\lambda$ . Une solution s'écrit sous la forme :

$$X(t) = \mu_1 \operatorname{Re} Z(t) + \mu_2 \operatorname{Im} Z(t)$$

$$\begin{aligned} Z(t) &= e^{\lambda t} w = e^{at+ibt} (X_w + iY_w) \\ &= e^{at} (\cos(bt) + i \sin(bt)) (X_w + iY_w) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \operatorname{Re} Z(t) &= e^{at} \cos(bt) X_w - e^{at} \sin(bt) Y_w \\ \operatorname{Im} Z(t) &= e^{at} \cos(bt) Y_w + e^{at} \sin(bt) X_w \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} X(t) &= \mu_1 (e^{at} \cos(bt) X_w - e^{at} \sin(bt) Y_w) \\ &\quad + \mu_2 (e^{at} \cos(bt) Y_w + e^{at} \sin(bt) X_w) \\ &= X_w (\mu_1 e^{at} \cos(bt) + \mu_2 e^{at} \sin(bt)) \\ &\quad + Y_w (-\mu_1 e^{at} \sin(bt) + \mu_2 e^{at} \cos(bt)) \end{aligned}$$

Écrivons  $X(t)$  dans la base  $(X_w, Y_w)$  :

$$\begin{aligned} X(t) &= e^{at} \begin{pmatrix} \mu_1 \cos(bt) + \mu_2 \sin(bt) \\ -\mu_1 \sin(bt) + \mu_2 \cos(bt) \end{pmatrix} \\ &= e^{at} \begin{pmatrix} \cos(bt) & \sin(bt) \\ -\sin(bt) & \cos(bt) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mu_1 \\ \mu_2 \end{pmatrix} \end{aligned}$$

$$M(t) = \begin{pmatrix} \cos t & -\sin t \\ \sin t & \cos t \end{pmatrix}$$

$$X(t) = e^{at} M(-bt) \begin{pmatrix} \mu_1 \\ \mu_2 \end{pmatrix}$$

$M$  est la matrice de rotation d'angle  $t$ .

$(X_w, Y_w) = (e_1, e_2)$   $A$  diagonalisable dans  $\mathbb{C}$ .

- $\lambda = a + ib$  valeur propre de  $A$ .
- $w = X_w + iY_w$  un vecteur propre associé à  $\lambda$ .

$$X(t) = \mu_1 e^{at} (\cos(bt) X_w - \sin(bt) Y_w) + \mu_2 e^{at} (\cos(bt) Y_w + \sin(bt) X_w)$$

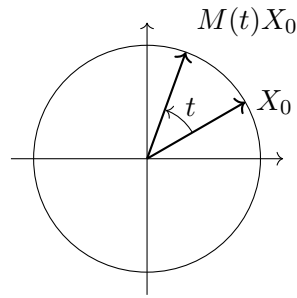
Si l'on écrit  $X$  en coordonnées dans la base  $\mathcal{B} = (X_w, Y_w)$ , alors :

$$X^{\mathcal{B}}(t) = e^{at} \begin{pmatrix} \cos(bt) & \sin(bt) \\ -\sin(bt) & \cos(bt) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mu_1 \\ \mu_2 \end{pmatrix} = e^{at} M(-bt) \begin{pmatrix} \mu_1 \\ \mu_2 \end{pmatrix}$$

Avec :

$$M(t) = \begin{pmatrix} \cos(t) & -\sin(t) \\ \sin(t) & \cos(t) \end{pmatrix}$$

$M$  est une matrice de rotation d'angle  $t$ .



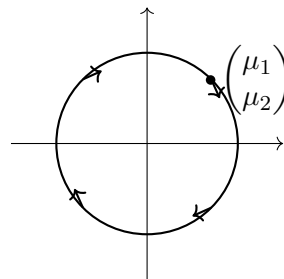
On suppose que  $X_w = e_1$  et  $Y_w = e_2$ .

**Cas 1 :**  $a = 0$  et  $b > 0$

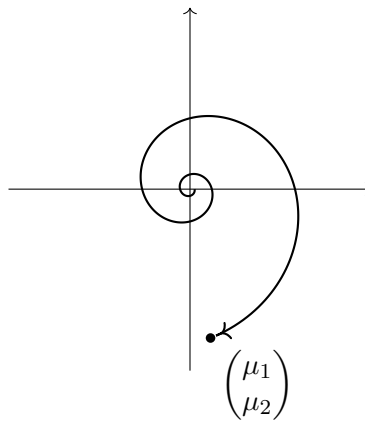
On a la relation :

$$X^B(t) = M(-bt) \begin{pmatrix} \mu_1 \\ \mu_2 \end{pmatrix}$$

Puisque  $b > 0$ , l'angle  $-bt$  est négatif, la rotation se fait donc dans le sens horaire.

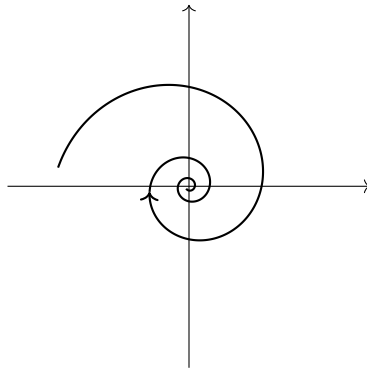


**Cas 2 :**  $a > 0$  et  $b > 0$



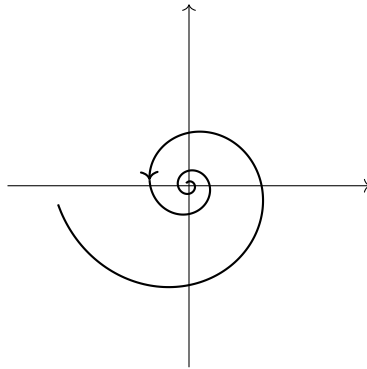
**Cas 3 :**  $a < 0$  et  $b > 0$

Ici  $a < 0$ , donc le terme  $e^{at}$  tend vers 0 (la trajectoire converge vers l'origine). Comme  $b > 0$ , la rotation associée à  $M(-bt)$  se fait dans le sens horaire.



**Cas 4 :  $a < 0$  et  $b < 0$**

Ici  $a < 0$  (convergence vers l'origine) et  $b < 0$  (rotation sens trigonométrique / anti-horaire).



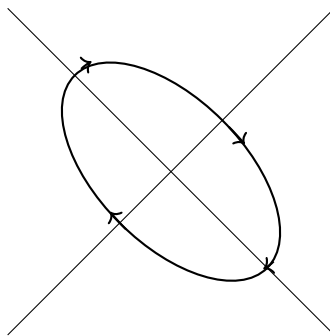
Ici on a fait les dessins lorsque  $X_w = e_1$  et  $Y_w = e_2$ .

Que se passe-t-il dans une base quelconque ?

Si  $a = 0$ , comment dessiner la courbe  $x^2(t) + y^2(t) = r^2$  avec  $X(t) = x(t)X_w + y(t)Y_w$  ?

Supposons que  $X_w = e_1$ .

- $a = 0$
- $b > 0$



La trajectoire va prendre la forme d'une ellipse et les axes de l'ellipse sont déterminés par  $X_W$  et  $Y_W$ .

$w = X_W + iY_W$  est un vecteur propre associé à la valeur propre  $\lambda = a + ib$ .

On a  $Aw = (a + ib)w$ .

En développant :

$$A(X_W + iY_W) = (a + ib)(X_W + iY_W)$$

En identifiant parties réelles et imaginaires, on obtient le système :

$$\begin{cases} AX_W = aX_W - bY_W \\ AY_W = bX_W + aY_W \end{cases}$$

Écrivons la matrice dans la base  $(X_W, Y_W)$  :

$$A_{ref} = \begin{matrix} & \begin{matrix} AX_W & AY_W \end{matrix} \\ \begin{matrix} X_W \\ Y_W \end{matrix} & \begin{pmatrix} a & b \\ -b & a \end{pmatrix} \end{matrix}$$

D'où la relation de changement de base :

$$P^{-1}AP = A_{ref} \quad \text{avec} \quad P = (X_W, Y_W)$$

**Remarque**

Dans le cas où  $X_W = e_1$  et  $Y_W = e_2$ , on a :

$$A = A_{ref} = \begin{pmatrix} a & b \\ -b & a \end{pmatrix}$$

## Généralisation : Cas d'une matrice $A$ diagonalisable dans $\mathbb{C}$

$A$  a  $2q$  valeurs propres complexes et  $d - 2q$  valeurs propres réelles.

On a automatiquement un nombre pair de valeurs propres complexes. En effet, puisque  $A$  est réelle, si  $\lambda \in \mathbb{C}$  est valeur propre, alors automatiquement  $\bar{\lambda}$  est aussi valeur propre.

### Proposition 28: Diagonalisation dans $\mathbb{C}$

$A$  est diagonalisable dans  $\mathbb{C}$  si et seulement si pour toute valeur propre  $\lambda$  :

$$\dim(\ker(A - \lambda Id)) = \text{multiplicité de } \lambda \text{ dans le polynôme caractéristique.}$$

Les valeurs propres s'écrivent sous la forme  $(\lambda_1, \bar{\lambda}_1, \lambda_2, \bar{\lambda}_2, \dots, \lambda_q, \bar{\lambda}_q, \lambda_{2q+1}, \dots, \lambda_d)$ .

On va alors obtenir une base de solutions qui va s'écrire sous la forme :

$$(\text{Re } Z_1, \text{Im } Z_1, \dots, \text{Re } Z_q, \text{Im } Z_q, Z_{2q+1}, \dots, Z_d)$$

avec  $1 \leq i \leq q$  et  $Z_i(t) = e^{\lambda_i t} w_i$ .

Les solutions de SH (Système Homogène) s'écrivent sous la forme :

$$X(t) = \mu_1 \text{Re } Z_1(t) + \mu_2 \text{Im } Z_1(t) + \mu_3 \text{Re } Z_2(t) + \mu_4 \text{Im } Z_2(t) + \dots + \mu_{2q} Z_{2q+1}(t) + \dots + \mu_d Z_d(t)$$

**Démonstration et calculs :**

$$X'(t) = AX(t)$$

On pose  $P^{-1}AP = D$  avec  $P \in \mathcal{M}_d(\mathbb{C})$  et  $D \in \mathcal{M}_d(\mathbb{C})$ .

$$P^{-1}X'(t) = P^{-1}AX(t)$$

On effectue le changement de variable  $X(t) = PY(t)$ , ce qui implique  $X'(t) = PY'(t)$ .

L'équation devient :

$$P^{-1}PY'(t) = P^{-1}APY(t)$$

Ce qui donne :

$$Y'(t) = DY(t)$$

Avec la matrice diagonale  $D$  structurée comme suit :

$$D = \begin{pmatrix} \lambda_1 & & & & & \\ & \bar{\lambda}_1 & & & & \\ & & \ddots & & & \\ & & & \lambda_q & & \\ & 0 & & & \bar{\lambda}_q & \\ & & & & & \lambda_{2q+1} \\ & & & & & & \ddots \\ & & & & & & & \lambda_d \end{pmatrix}$$

On obtient alors le vecteur solution  $Y(t)$  :

$$Y(t) = \begin{pmatrix} y_{01} e^{\lambda_1 t} \\ y_{02} e^{\bar{\lambda}_1 t} \\ \vdots \\ \vdots \\ y_{0d} e^{\lambda_d t} \end{pmatrix}$$

Et on revient à la solution  $X(t)$  par la relation :

$$X(t) = PY(t)$$

□

### Exemple 19: Exemple avec $d = 3$

Supposons que  $A$  est diagonalisable avec  $d = 3$  avec  $q = 1$  paire de valeurs propres complexes  $(\lambda_1, \overline{\lambda_1}, \lambda_2)$ ,  $\lambda_1 \in \mathbb{C}$ ,  $\lambda_2 \in \mathbb{R}$ .

Quelle est la forme de la matrice  $A$  dans la base  $(X_W, Y_W, X_2)$ ?

Où  $w = X_W + iY_W$  est vecteur propre de  $\lambda_1$ .

$X_2$  est vecteur propre de  $\lambda_2$ .

$(w, \overline{w}, X_2)$  est une base de  $\mathbb{C}^3$ .

$$A_{ref} = \begin{pmatrix} a & b & 0 \\ -b & a & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_2 \end{pmatrix}$$

D'où :

$$P^{-1}AP = A_{ref} \quad \text{avec} \quad P = (X_W, Y_W, X_2)$$

$$A = PA_{ref}P^{-1}$$

Les solutions de SH s'écrivent sous la forme :

$$Z_1(t) = e^{\lambda_1 t} w, \quad Z_2(t) = e^{\lambda_2 t} X_2$$

$$X_{CH} = \mu_1 \operatorname{Re} Z_1(t) + \mu_2 \operatorname{Im} Z_1(t) + \mu_3 Z_2(t)$$

## VIII. Cas général lorsque $A$ est diagonalisable

### Cas 1 : $A$ est triangulaire

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1d} \\ & \ddots & \vdots \\ \mathbf{0} & & a_{dd} \end{pmatrix}$$

On commence par résoudre la dernière équation :

$$X'_d(t) = a_{dd}X_d(t)$$

$$X_d(t) = x_{0d}e^{a_{dd}t}$$

Par remontée, on résout :

$$\begin{aligned} X'_{d-1}(t) &= a_{d-1,d-1}X_{d-1}(t) + a_{d-1,d}X_d(t) \\ &= a_{d-1,d-1}X_{d-1}(t) + a_{d-1,d}x_{0d}e^{a_{dd}t} \end{aligned}$$

On a un problème (NH) pour  $X_{d-1}$ , on le résout et on résout ensuite l'équation sur  $X_{d-2}$  (Et ainsi de suite).

Si  $A$  est Trigonalisable ( $A$  est toujours trigonalisable dans  $\mathbb{C}$  car les polynômes sont scindés).  
 $P^{-1}AP = T$ .

$$\begin{aligned} X'(t) &= AX(t) \\ P^{-1}X'(t) &= P^{-1}AX(t) \\ X(t) &= PY(t) \\ Y'(t) &= TY(t) \end{aligned}$$

On peut résoudre  $Y$  car  $T$  est triangulaire et on retrouve  $X$  car  $X(t) = PY(t)$ .

## IX. Solution de $X'(t) = AX(t)$ sous forme d'exponentiel de matrices

### Définition 21

Soit  $A \in \mathcal{M}_d(\mathbb{K})$  avec  $\mathbb{K} = \mathbb{R}$  ou  $\mathbb{C}$ .

$$e^A = \sum_{k=0}^{+\infty} \frac{A^k}{k!} \quad ; \quad A^0 = Id \quad ; \quad \exp(0) = Id.$$

### Remarque

La série est convergente car normalement convergente dans  $\mathcal{M}_d(\mathbb{K})$  qui est complet (car  $\mathcal{M}_d(\mathbb{K})$  est de dimension finie).

En effet :

$$\|A^k\| \leq \|A\|^k$$

$$\sum_{k \geq 0} \sup \frac{\|A^k\|}{k!} \leq \sum_{k \geq 0} \frac{R^k}{k!} \leq e^R$$

avec  $\|A\| \leq R$ .

### Proposition 29: Propriétés de l'exponentielle de matrice

Soient  $A, B \in \mathcal{M}_d(\mathbb{K})$ .

1.  $e^0 = Id$
2. Si  $P \in GL_d(\mathbb{K})$ , alors  $e^{P^{-1}AP} = P^{-1}e^AP$
3.  $e^A$  est un polynôme en  $A$
4. Si  $AB = BA$  :
  - (a)  $\forall (P, Q)$  polynômes,  $P(A)Q(B) = Q(B)P(A)$
  - (b)  $P(A)e^B = e^BP(A)$
  - (c)  $\exp(A+B) = \exp(A)\exp(B) = \exp(B)\exp(A)$
5.  $e^A$  est inversible avec pour inverse  $e^{-A}$
6.  $e^{(s+t)A} = e^{sA}e^{tA}$

**Preuve :**

2)

$$e^{P^{-1}AP} = \sum_{k \geq 0} \frac{(P^{-1}AP)^k}{k!}$$

Or, par récurrence, on a  $(P^{-1}AP)^k = P^{-1}A^kP$ .

$$\forall n \in \mathbb{N}, \quad \sum_{k=0}^n \frac{(P^{-1}AP)^k}{k!} = P^{-1} \left( \sum_{k=0}^n \frac{A^k}{k!} \right) P$$

En faisant tendre  $n \rightarrow +\infty$  :

$$\Rightarrow e^{P^{-1}AP} = P^{-1}e^AP$$

L'opération  $\mathcal{M}_d(\mathbb{K}) \rightarrow \mathcal{M}_d(\mathbb{K}), M \mapsto P^{-1}MP$  est une application continue.

3) Soit  $F = \{P(A) \in \mathcal{M}_d(\mathbb{K}) \mid P \text{ polynôme}, P \in \mathbb{K}[X]\}$ .

$F$  est un sous-espace vectoriel (SEV) de  $\mathcal{M}_d(\mathbb{K})$ . Puisque  $\mathcal{M}_d(\mathbb{K})$  est de dimension finie,  $F$  est un



SEV de dimension finie, donc un fermé.

On a :

$$e^A = \lim_{n \rightarrow +\infty} P_n(A)$$

avec  $P_n(X) = \sum_{k=0}^n \frac{X^k}{k!}$ .

$\forall n \in \mathbb{N}$ ,  $P_n(A) \in F$ . Comme  $F$  est fermé, la limite appartient à  $F$ , donc  $e^A \in F$ .

4) a. Laissé en exercice

b. Si  $AB = BA$

Montrons que :  $P(A)e^B = e^B P(A)$

Puisque  $\exists Q$  polynôme tel que  $e^B = Q(B)$

On a  $P(A)e^B = e^B P(A)$ . □

#### Remarque

$$Ae^{At} = e^{At}A$$

$$e^{A-A} = e^0 = Id$$

$A$  et  $-A$  commutent :

$$e^A e^{-A} = e^{-A} e^A = Id$$

#### Proposition 30

Soit  $A \in \mathcal{M}_d(\mathbb{R})$ . L'application  $g : \mathbb{R} \rightarrow \mathcal{M}_d(\mathbb{R})$  définie par  $t \mapsto e^{tA}$  est de classe  $C^\infty$ .

Et :

$$g'(t) = Ag(t) = Ae^{tA} = e^{tA}A$$

**Preuve :**

$g$  est dérivable en 0. En effet :

$$\begin{aligned} \frac{g(h) - g(0)}{h} - A &= \frac{e^{Ah} - Id}{h} - A \\ &= \frac{e^{Ah} - Id - Ah}{h} \end{aligned}$$

Or :

$$e^{Ah} = \sum_{k \geq 0} \frac{(Ah)^k}{k!}$$

Donc :

$$\begin{aligned} \frac{g(h) - g(0)}{h} - A &= \frac{\sum_{k \geq 2} \frac{(Ah)^k}{k!}}{h} = \sum_{k \geq 2} \frac{A^k h^{k-1}}{k!} \\ &= h \sum_{k \geq 2} \frac{A^k h^{k-2}}{k!} \\ \left\| \frac{g(h) - g(0)}{h} - A \right\| &\leq |h| \sum_{k \geq 2} \frac{\|A\|^k |h|^{k-2}}{k!} \end{aligned}$$

Si  $|h| \leq 1$ , on a :

$$\begin{aligned} \left\| \frac{g(h) - g(0)}{h} - A \right\| &\leq |h| \sum_{k \geq 2} \frac{\|A\|^k}{k!} \\ &\leq |h| e^{\|A\|} \xrightarrow{h \rightarrow 0} 0 \end{aligned}$$

On a alors  $g'(0) = A$ .

Montrons que  $g$  est dérivable en  $t_0$ .

$$\frac{g(t_0 + h) - g(t_0)}{h} - Ae^{t_0 A}$$

On sait que  $g(t_0 + h) = e^{(t_0+h)A} = e^{hA}e^{t_0A}$  (car  $hA$  et  $t_0A$  commutent).

$$\begin{aligned} & \frac{e^{(t_0+h)A} - e^{t_0A}}{h} - Ae^{t_0A} \\ &= \left( \frac{e^{hA} - Id}{h} \right) e^{t_0A} - Ae^{t_0A} \\ &= \left( \frac{e^{hA} - Id}{h} - A \right) e^{t_0A} \end{aligned}$$

Puisque  $g$  est dérivable en 0, on a :

$$e^{hA} - Id - hA = o(|h|)$$

D'où :

$$\begin{aligned} & \frac{g(t_0 + h) - g(t_0)}{h} - Ae^{t_0A} \\ &= \left( \frac{e^{hA} - Id - hA}{h} \right) e^{t_0A} \\ &= o(1)e^{t_0A} \xrightarrow{h \rightarrow 0} 0 \end{aligned}$$

Donc  $g$  est dérivable en  $t_0$  et  $g'(t_0) = Ae^{t_0A}$ .

Avec  $g'(t) = Ae^{tA}$ .

Par récurrence on montre que  $g$  est  $C^\infty$ . En effet, supposons  $g \in C^k$ .

$$g'(t) = Ae^{tA} = Ag(t)$$

Puisque  $g$  est  $C^k$ , on en déduit que  $g'$  est  $C^k$ . On en déduit que  $g \in C^{k+1}$ . □

### Corollaire 8

Soient  $A \in \mathcal{M}_d(\mathbb{R})$  et  $X_0 \in \mathbb{R}^d$ .

L'application définie par  $X(t) = e^{tA}X_0$  est solution du problème :

$$\begin{cases} X'(t) = AX(t) \\ X(0) = X_0 \end{cases}$$

**Preuve :**

$$\begin{aligned} X(t) &= g(t)X_0 \\ X'(t) &= g'(t)X_0 \\ &= Ae^{tA}X_0 \\ &= AX(t) \\ X(0) &= IdX_0 = X_0 \end{aligned}$$

□

### Théorème 9

Soient  $A \in \mathcal{M}_d(\mathbb{R})$  et  $X_0 \in \mathbb{R}^d$ .

Le problème de Cauchy :

$$(C) \quad \begin{cases} Y'(t) = AY(t) \\ Y(0) = X_0 \end{cases}$$

admet une unique solution globale  $X(t) = e^{tA} X_0$ .

**Preuve :**

On a vu que  $X(t) = e^{At} X_0$  est solution de (C). D'autre part, (C) s'écrit sous la forme :

$$\begin{cases} Y'(t) = F(Y(t)) \\ Y(0) = X_0 \end{cases}$$

avec  $F(Y) = AY$ ,  $F$  est  $C^1$ .

D'après le théorème de Cauchy-Lipschitz (C) admet une unique solution globale qui ne peut donc être que  $X(t) = e^{At} X_0$ .  $\square$

## 1 Calculer une exponentielle de matrice

**Cas 1 :  $A$  diagonalisable dans  $\mathbb{C}$**

$$\exists P \in GL_d(\mathbb{C})$$

$$\begin{aligned} P^{-1}AP &= D \\ e^{P^{-1}AP} &= P^{-1}e^AP \\ &= e^D \end{aligned}$$

$$D = \begin{pmatrix} \lambda_1 & & 0 \\ & \ddots & \\ 0 & & \lambda_n \end{pmatrix}$$

$$e^D = \begin{pmatrix} e^{\lambda_1} & & 0 \\ & \ddots & \\ 0 & & e^{\lambda_n} \end{pmatrix}$$

$$Pe^DP^{-1} = e^A$$

**Cas 2 : Décomposition de Dunford**

$$A = D + N \quad \text{avec } D \text{ diagonalisable et } N \text{ nilpotente.}$$

$$\exists n \in \mathbb{N} : N^n = 0$$

$$ND = DN$$

$$e^A = e^D e^N$$

$$e^N = \sum_{k=0}^{n-1} \frac{N^k}{k!} \quad \text{car } N^n = 0$$

## 2 L'équation $X'(t) = AX(t) + B(t)$

### Proposition 31

Soit  $A \in \mathcal{M}_d(\mathbb{K})$ .

Soit  $B : \mathbb{R} \rightarrow \mathcal{M}_{d,1}(\mathbb{K})$  continue.

Les solutions de :

$$(E) \quad X'(t) = AX(t) + B(t)$$

sont données par :

$$Y(t) = e^{tA} \left( X_0 + \int_0^t e^{-sA} B(s) ds \right)$$

### Preuve :

Soit  $Y$  une solution maximale de  $(E)$ . On rappelle que  $(E)$  intègre le cadre du théorème de Cauchy-Lipschitz car  $F(t, X)$  est continue et localement lipschitzienne en  $X$ .

Posons  $Y(t) = e^{tA} X(t)$ .

En dérivant :

$$\begin{aligned} Y'(t) &= A e^{tA} X(t) + e^{tA} X'(t) \\ &= AY(t) + e^{tA} X'(t) \end{aligned}$$

Or,  $Y$  vérifie l'équation différentielle, donc  $Y'(t) = AY(t) + B(t)$ .

Par identification :

$$e^{tA} X'(t) = B(t) \quad \forall t \in \mathbb{R}$$

D'où :

$$X'(t) = e^{-tA} B(t)$$

Car  $e^{-tA} e^{tA} = Id$ .

En intégrant :

$$X(t) = X_0 + \int_0^t e^{-sA} B(s) ds$$

Finalement :

$$Y(t) = e^{tA} \left( X_0 + \int_0^t e^{-sA} B(s) ds \right)$$

□