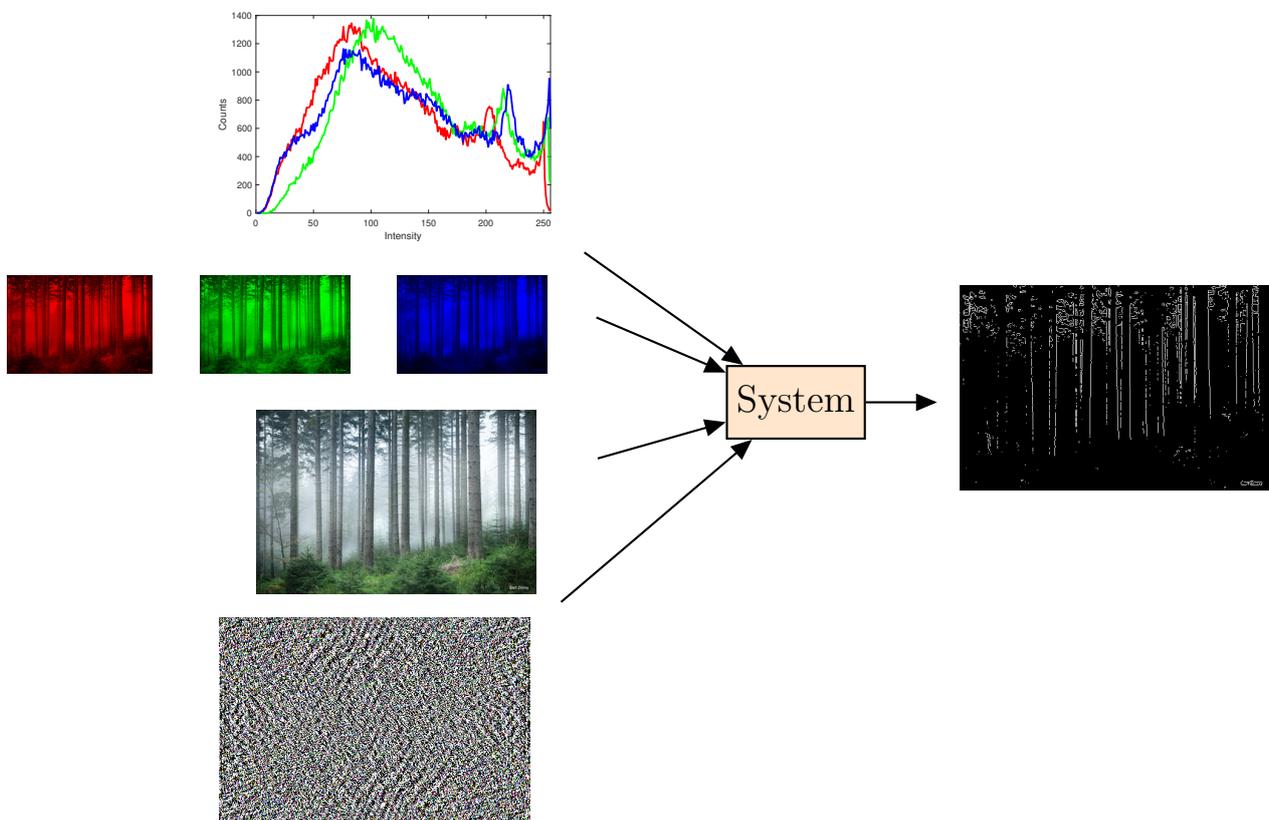


SYST0002 - Introduction aux signaux et systèmes

Fascicule d'exercices



Professeur	Guillaume Drion
Assistants	Caroline Dejace & Antoine Debor
Auteurs	Kathleen Jacquerie, Caroline Dejace & Antoine Debor

Avant-propos

Ce fascicule a été rédigé dans le cadre du cours de signaux et systèmes (SYST0002) pour les étudiant·es de l'Université de Liège. Il suit un format systématique afin de permettre une bonne compréhension des différents concepts du cours et de pouvoir les appliquer à des exercices.

Chaque TP est divisé en cinq parties :

- Concept : cette section résume les notions abordées durant les deux heures de cours théoriques.
- Exercices résolus au tableau : cette section reprend les énoncés et des schémas de résolution. Les réponses complètes sont expliquées en classe.
- Exercices à faire : les étudiant·es sont amené·es à pratiquer les notions théoriques avec les explications pratiques sur des nouveaux exercices. Ils/elles seront guidé·es par des schémas de résolution et encadré·es durant la séance de TP.
- Pour s'exercer : en dehors des deux heures de TP, nous proposons une série d'exercices supplémentaires pour s'entraîner d'avantage.
- Sources supplémentaires : nous proposons une série de vidéos, de références pour découvrir d'autres manières d'apprendre les concepts du cours.

Ce fascicule a été rédigé majoritairement par Kathleen Jacquerie. En septembre 2023, les nouveaux assistants pour le cours deviennent Caroline Dejace et Antoine Debor. Depuis lors, ceux-ci éditent et revoient le manuscrit de manière continue. N'hésitez pas à leur envoyer des remarques pour les typos ou autres coquilles à cdejace@uliege.be ou adebor@uliege.be. Ce manuscrit n'est pas peer-reviewed.

Légende



Schéma de résolution : piste pour guider dans la résolution d'un exercice



Section faite au tableau par l'étudiant·e-moniteur·rice

[XXX]

Source de l'exercice

Sources

La section "Algèbre linéaire : concepts à maîtriser" se base sur le cours "Introduction of Linear Models" de Mark Goldman dans le cadre de la summer school Methods in Computational Neuroscience.

[TXB] Livre d'exercices des années précédentes (disponible en ligne) (uniquement temps-continu) : http://www.montefiore.ulg.ac.be/systems/SYST002/exercices2014_2015.pdf

[STR] Nonlinear Dynamics and Chaos : With Applications to Physics, Biology, ... by Steven H. Strogatz.

[Online] Enoncé disponible sur la page du cours : <https://sites.google.com/site/gdrion25/teaching/syst0002> ou sur [ecampus](http://ecampus.ulb.ac.be).

Photo de couverture : ©Bart Zimny.

Table des matières

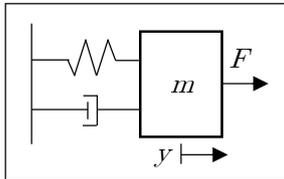
Signaux & Systèmes : résumé graphique du cours	4
Algèbre linéaire : concepts à maîtriser	7
1 Rappels sur les matrices	7
2 Vecteurs propres et valeurs propres	9
3 Résolution d'équations différentielles linéaires	10
4 Exercices à faire	14
TP1 : Notions signaux, systèmes et leurs propriétés	15
1 Concept	15
1.1 Distinction entre système et signal	15
1.2 Transformations de signaux	16
1.3 Propriétés des signaux	19
1.4 Propriétés des systèmes	19
2 Exercices résolus au tableau	22
3 Exercices à faire	23
4 Pour s'exercer	24
TP2 : Systèmes non-linéaires (1D)	26
1 Concept	26
1.1 Introduction aux systèmes non-linéaires	26
1.2 Linéarisation et étude de stabilité	27
2 Exercices résolus au tableau	29
3 Exercices à faire	29
4 Pour s'exercer	31
TP3 : Systèmes non-linéaires (2D)	32
1 Concept	32
1.1 Introduction aux systèmes non-linéaires à deux dimensions	32
1.2 Linéarisation d'un système à 2D autour des points fixes	34
1.3 ♡ Rappel Algèbre Linéaire : valeurs propres & vecteurs propres	36
1.4 Linéarisation et stabilité des points fixes	36
2 Exercices résolus au tableau	39
3 Exercices à faire	39
4 Pour s'exercer	40
5 Sources supplémentaires	42

TP4 : Modèles d'état	43
1 Concept	43
1.1 Introduction	43
1.2 Le modèle d'état en pratique	44
2 Exercices résolus au tableau	46
3 Exercices à faire	49
4 Pour s'exercer	50
TP5 : Modèles d'état et linéarisation	52
1 Concept	52
2 Exercices résolus au tableau	54
3 Exercices à faire	55
4 Pour s'exercer	56
Solutions des exercices	61

SIGNAUX & SYSTÈMES: RÉSUMÉ

Problème réel

= mise en situation d'un système



TP1

Propriétés des signaux et des systèmes: causalité, linéarité, temps-invariance, ...

BAC 1

Résolution ODE

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F$$

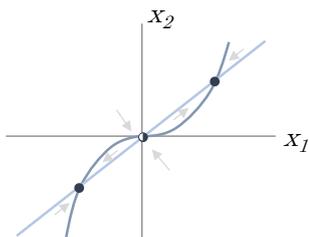
$$x(t) = \dots$$

DOMAINE TEMPOREL

Représentation 'Modèle d'état'

TP2,3

Comment étudier des systèmes non linéaires 1D ou 2D



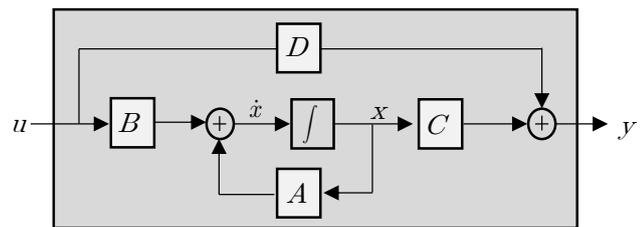
TP4

Comment trouver la représentation modèle d'état d'un problème réel ? Est-ce que la représentation ABCD est possible? Comment faire le bloc diagramme?

- u
- y
- x
- $\dot{x} = f(x, u)$
- $y = g(x, u)$

TP2,3,5

- Linéarisation d'un système
- Représentation matricielle du système linéarisé



Représentation entrée-sortie

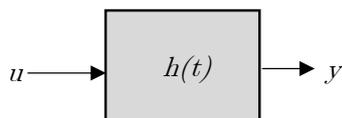
TP4-5 Équation entrée-sortie

$$\alpha\ddot{y} + \beta\dot{y} + \gamma y = \delta\dot{u} + \epsilon u$$

TP6

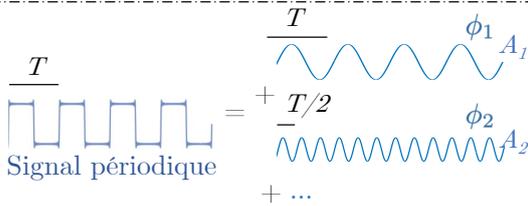
$$y(t) = u(t) * h(t)$$

La convolution permet d'obtenir la sortie sur base de l'entrée u et de la réponse impulsionnelle h



- identification des variables d'état
- ou méthode des variables axillaires
- ou mise en bloc diagramme puis extraire les variables d'état

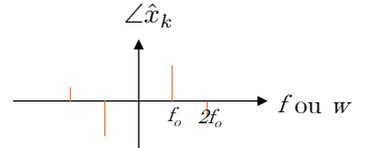
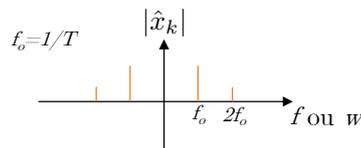
Série de Fourier



Les coefficients de Fourier sont complexes: $\hat{x}_k = |\hat{x}_k| e^{j\angle\hat{x}_k}$
On peut dessiner le spectre en amplitude et en phase des coefficients.

$$x(t) = \frac{1}{T} \sum_{k \in \mathbb{Z}} \hat{x}_k e^{jk \frac{2\pi}{T} t}$$

$$\hat{x}_k = \int_0^T x(t) e^{-jk \frac{2\pi}{T} t} dt, k \in \mathbb{Z}$$



TP7

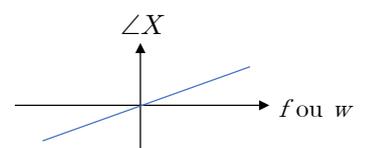
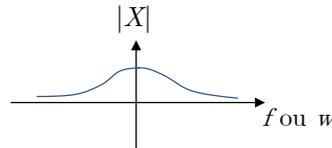
Transformée de Fourier

Signal non-périodique

$$x(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} X(j\omega) e^{j\omega t} d\omega$$

$$X(j\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) e^{-j\omega t} dt$$

La transformée de Fourier $X(j\omega)$ est une fonction complexe qui dépend de ω .
On peut dessiner l'amplitude et la phase de la transformée en fonction de ω .



Condition d'existence:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} |x(t)| dt < \infty$$

TP8

Transformée de Laplace

$$X(j\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} [x(t) e^{-\sigma t}] e^{-j\omega t} dt = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) e^{-(\sigma + j\omega)t} dt$$

$$X(s) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) e^{-st} dt$$

ROC: l'ensemble des valeurs complexes de la variable $s = \sigma + j\omega$ pour lesquelles l'intégrale existe.



Pour calculer $X(s)$, on essaye de repartir des transformées de Laplace usuelles et d'utiliser les propriétés.

TP9

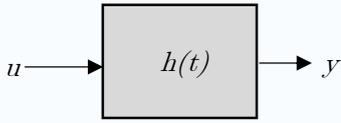
Fonction de transfert

= transformée de Laplace de la réponse impulsionnelle $h(t)$

DOMAINE FRÉQUENTIEL

TP10

Description d'un système



Modèle d'état

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx + Du \end{aligned}$$

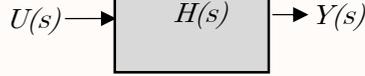
Équation entrée-sortie

$$\alpha \ddot{y} + \beta \dot{y} + \gamma y = \delta \dot{u} + \epsilon u$$

Convolution

$$y(t) = h(t) * u(t)$$

DOMAINE FRÉQUENTIEL



$$H = C(sI - A)^{-1}B + D$$

$$H(s) = \frac{\delta s + \epsilon}{\alpha s^2 + \beta s + \gamma}$$

$$Y(s) = H(s)U(s)$$

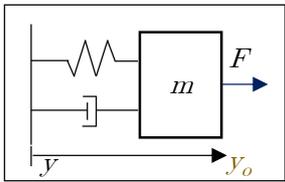
Obtenir $h(t)$ depuis $H(s)$

- en effectuant la décomposition en fractions simples
- puis, en appliquant les propriétés des transformées de Laplace

$$h(t) = e^{-at} I(t) \xrightarrow{\mathcal{L}} H(s) = \frac{1}{s+a} \xleftarrow{\mathcal{L}^{-1}}$$

! ROC

Calcul de la réponse d'un système TP10



Calcul de la réponse forcée (U)

- $u(t) \xrightarrow{\mathcal{L}} U(s)$
- $Y_f(s) = H(s) U(s)$
- $Y_f(s) \xrightarrow{\mathcal{L}^{-1}} y_f(t)$

Calcul de la réponse libre (CI)

- $Y_l(s) = C(sI - A)^{-1}x[0]$
- $Y_l(s) \xrightarrow{\mathcal{L}^{-1}} y_l(t)$

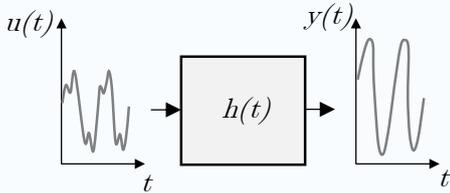
Transformée de Laplace unilatérale

Diagrammes de Bode TP11

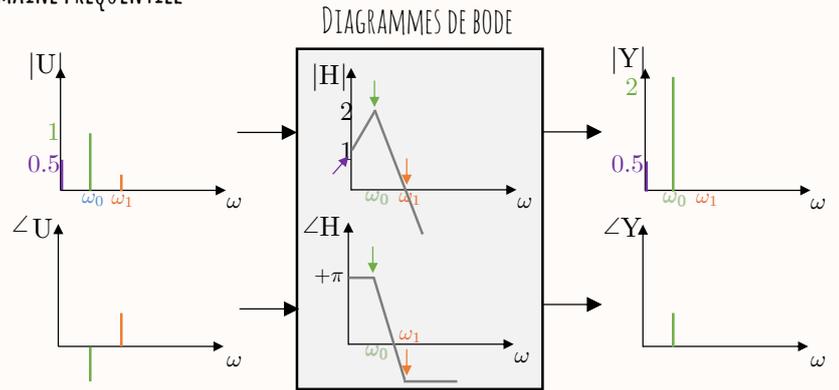
Décomposition en amplitude et en phase de la fonction de transfert (pour $\sigma = 0$)

$$H(j\omega) = \text{Re}(H(j\omega)) + j \text{Im}(H(j\omega)) = |H(j\omega)| e^{\angle H(j\omega)}$$

DOMAINE TEMPOREL



DOMAINE FRÉQUENTIEL



Utilisation des transformées

Algèbre linéaire : concepts à maîtriser

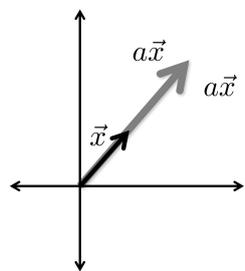
Ce chapitre est inspiré du cours théorique du Professeur Mark Goldman, de UC Davis, lors de la summer school "Methods in Computational Neuroscience". Le podcast est disponible via ce lien.

1 Rappels sur les matrices

- Addition de matrices :
On additionne les éléments un à un.

$$\begin{pmatrix} 1 & 2 \\ 3 & 4 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 5 & 6 \\ 7 & 8 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 6 & 8 \\ 10 & 12 \end{pmatrix}$$

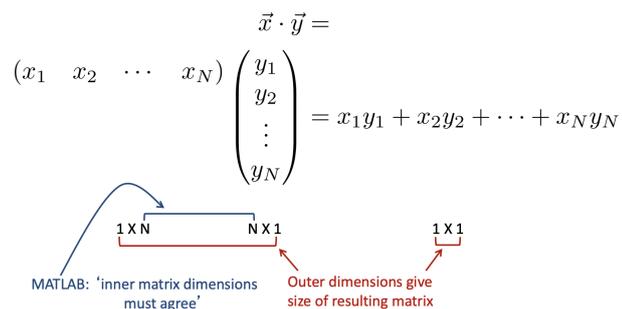
- Multiplication d'un vecteur par un scalaire $a\vec{x}$: chaque élément est multiplié par le scalaire. Sur le dessin, le vecteur reste dans la même direction mais change de longueur.


$$a\vec{x} = a \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_N \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} ax_1 \\ ax_2 \\ \vdots \\ ax_N \end{pmatrix}$$

- Produit de deux vecteurs :
(1) Produit élément par élément :

$$\begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \end{pmatrix} \cdot * \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_1 b_1 \\ a_2 b_2 \end{pmatrix}$$

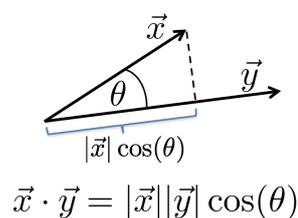
- (2) "Dot product" (aussi appelé "inner product") :

$$\begin{pmatrix} x_1 & x_2 & \dots & x_N \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_N \end{pmatrix} = x_1 y_1 + x_2 y_2 + \dots + x_N y_N$$


MATLAB: 'inner matrix dimensions must agree'

Outer dimensions give size of resulting matrix

Intuitivement, on peut aussi représenter ce calcul en dessinant les vecteurs.


$$\vec{x} \cdot \vec{y} = |\vec{x}| |\vec{y}| \cos(\theta)$$

Le cosinus de l'angle formé par les deux vecteurs donne une indication de la superposition des deux vecteurs. Le produit est maximum quand les deux vecteurs sont superposés.

(3) "Outer product" :

$$\begin{matrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_N \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} y_1 & y_2 & \cdots & y_M \end{pmatrix} & = & \begin{pmatrix} x_1 y_1 & x_1 y_2 & \cdots & x_1 y_M \\ x_2 y_1 & x_2 y_2 & \cdots & x_2 y_M \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_N y_1 & x_N y_2 & \cdots & x_N y_M \end{pmatrix} \\ \text{N} \times \text{1} & \text{1} \times \text{M} & & \text{N} \times \text{M} \end{matrix}$$

• Multiplication d'une matrice et d'un vecteur :

(1) en utilisant le "inner product" : l'élément i du vecteur y est obtenu en calculant le dot product entre la i -ème rangée de W avec x .

$$\begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_i \\ \vdots \\ y_M \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} W_{11} & W_{12} & \cdots & W_{1N} \\ W_{21} & W_{22} & \cdots & W_{2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ W_{i1} & W_{i2} & \cdots & W_{iN} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ W_{M1} & W_{M2} & \cdots & W_{MN} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_N \end{pmatrix}$$

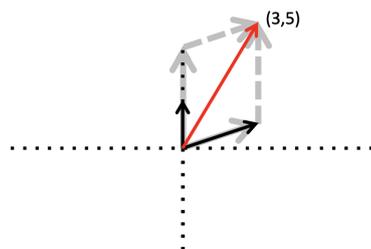
(2) en utilisant le "outer product" :

Le produit est la somme pondérée des colonnes de W avec les entrées de x .

$$\begin{matrix} \vec{w}^{(1)} \\ \downarrow \\ \begin{pmatrix} W_{11} & W_{12} & \cdots & W_{1N} \\ W_{21} & W_{22} & \cdots & W_{2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ W_{M1} & W_{M2} & \cdots & W_{MN} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_N \end{pmatrix} = x_1 \vec{w}^{(1)} + x_2 \vec{w}^{(2)} + \cdots + x_N \vec{w}^{(N)} \end{matrix}$$

On peut visualiser ce calcul graphiquement :

$$\begin{matrix} \overleftrightarrow{\mathbf{M}} \\ \swarrow \\ \begin{pmatrix} 0 & 3 \\ 2 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 2 \\ 1 \end{pmatrix} = 2 \begin{pmatrix} 0 \\ 2 \end{pmatrix} + 1 \begin{pmatrix} 3 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 4 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 3 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 3 \\ 5 \end{pmatrix} \end{matrix}$$



• **Note:** different combinations of the columns of \mathbf{M} can give you any vector in the plane
(we say the columns of \mathbf{M} "span" the plane)

• Produit de deux matrices :

(1) en utilisant le "inner product" :

L'élément ij s'obtient en calculant le "inner product" de la i -ème rangée de A avec la j -ième colonne de B : $C_{ij} = \sum_{k=1} A_{ik} B_{kj}$

$$\begin{pmatrix} A_{11} & A_{12} & \cdots & A_{1P} \\ A_{21} & A_{22} & \cdots & A_{2P} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ A_{i1} & A_{i2} & \cdots & A_{iP} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ A_{N1} & A_{N2} & \cdots & A_{NP} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} B_{11} & B_{12} & \cdots & B_{1M} \\ B_{21} & B_{22} & \cdots & B_{2M} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ B_{P1} & B_{P2} & \cdots & B_{PM} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} & \cdots & C_{1M} \\ C_{21} & C_{22} & \cdots & C_{2M} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ C_{N1} & C_{N2} & \cdots & C_{NM} \end{pmatrix}$$

(2) en utilisant le "outer product" :

La matrice C est le "outer product" entre les colonnes de A et les rangées de B .

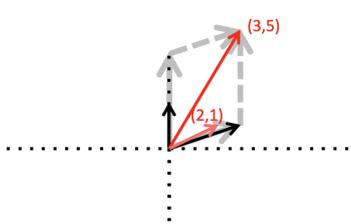
$$\begin{pmatrix} A_{11} & A_{12} & \cdots & A_{1P} \\ A_{21} & A_{22} & \cdots & A_{2P} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ A_{N1} & A_{N2} & \cdots & A_{NP} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} B_{11} & B_{12} & \cdots & B_{1M} \\ B_{21} & B_{22} & \cdots & B_{2M} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ B_{P1} & B_{P2} & \cdots & B_{PM} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} & \cdots & C_{1M} \\ C_{21} & C_{22} & \cdots & C_{2M} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ C_{N1} & C_{N2} & \cdots & C_{NM} \end{pmatrix}$$

$$\vec{C} = \begin{pmatrix} A^{c1} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} B^{r1} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} A^{c2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} B^{r2} \end{pmatrix} + \cdots + \begin{pmatrix} A^{cP} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} B^{rP} \end{pmatrix}$$

2 Vecteurs propres et valeurs propres

Introduction

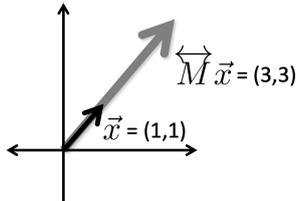
Que font les matrices aux vecteurs ?

$$\begin{pmatrix} 0 & 3 \\ 2 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 2 \\ 1 \end{pmatrix} = 2 \begin{pmatrix} 0 \\ 2 \end{pmatrix} + 1 \begin{pmatrix} 3 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 4 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 3 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 3 \\ 5 \end{pmatrix}$$


- The new vector is:
- 1) **rotated**
- 2) **scaled**

Existent-ils des vecteurs "spéciaux" qui ne subissent qu'une mise à l'échelle ?

Si on utilise par exemple le vecteur colonne écrit $(1, 1)^T$:

$$\begin{pmatrix} 0 & 3 \\ 2 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 3 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 3 \\ 3 \end{pmatrix} = 3 \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix}$$


Pour ce vecteur "particulier", multiplier \vec{M} par ce vecteur donne exactement la même chose que multiplier le vecteur par un scalaire. Ce vecteur est appelé *vecteur propre* de \vec{M} et le facteur de multiplication est la *valeur propre* associée à ce vecteur propre. Mathématiquement, on écrit : $\vec{M} \vec{e} = \lambda \vec{e}$, où \vec{e} désigne un vecteur propre de \vec{M} . Les vecteurs propres sont définis à un scalaire près. Par convention, on indique souvent le premier élément du vecteur égal à 1.

Comment calculer les valeurs propres et les vecteurs propres ?

Il suffit de résoudre l'équation : $(\overleftrightarrow{M} - \lambda \overleftrightarrow{1}) \vec{e} = 0$ pour $\vec{e} \neq 0$, avec $\overleftrightarrow{1}$ la matrice identité de même taille que \overleftrightarrow{M} . Cela revient à calculer cette expression : $\det(\overleftrightarrow{M} - \lambda \overleftrightarrow{1}) = 0$. On appelle cette expression le polynôme caractéristique pour λ . Une fois les valeurs propres identifiées, les vecteurs propres associés peuvent être déterminés en remplaçant λ dans $(\overleftrightarrow{M} - \lambda \overleftrightarrow{1}) \vec{e} = 0$.

Pour plus d'informations, consultez cette vidéo (de la chaîne YouTube 3blue1brown).

Applications

On utilise souvent le calcul des valeurs propres et des vecteurs propres dans le domaine de la réduction de dimensionnalité, par exemple dans la technique d' "Analyse en Composantes Principales" ("Principal Component Analysis" (PCA), en anglais). Les vecteurs propres permettent de calculer la direction de variance maximale dans les données.

Plus d'informations sur la PCA :

- lien 1
- lien 2

3 Résolution d'équations différentielles linéaires

Équation différentielle à 1D sans entrée

On démarre avec une équation différentielle à 1D (à coefficient constant) :

$$\dot{x} = -ax$$

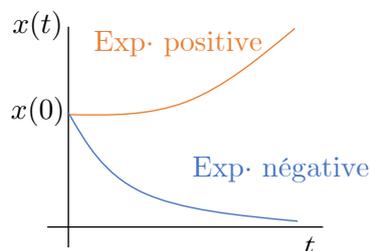
En bac 1, la résolution analytique pour cette équation a été détaillée :

$$x(t) = x(0)e^{-at}$$

Si a est positif, il s'agit d'une exponentielle décroissante car le coefficient sur l'exponentielle est négatif. La fonction démarre à la condition initiale $x(0)$ et converge vers 0 (courbe bleue sur la figure ci dessous). Dans le cas contraire, si le coefficient de l'exponentielle est positif, la fonction diverge (courbe orange). On peut également écrire cette expression à l'aide d'une constante de temps, τ_x :

$$\tau_x \dot{x} = -x$$

La constante de temps décrit la rapidité avec laquelle x tend vers 0 (quand l'exponentielle est décroissante). Plus la valeur est grande, plus la convergence est lente.



Équation différentielle à 1D avec entrée

On peut compliquer l'équation et faire intervenir une constante b (dans le reste du cours, on appellera cela une entrée au système) telle que :

$$\dot{x} = -ax + b$$

On peut réécrire : $\dot{x} = -a(x - b/a)$.

Pour résoudre facilement cette équation, on va revenir au cas précédent car on connaît la solution de cette équation. Pour cela, il suffit de poser $u = x - b/a$. L'équation devient :

$$\dot{u} = -au$$

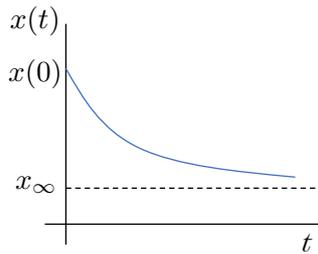
La solution est donnée par :

$$u(t) = u(0)e^{-at}$$

Il suffit de remplacer pour retrouver la solution en terme de x :

$$x(t) - b/a = (x(0) - b/a)e^{-at}$$

Graphiquement, x converge vers son état stationnaire ("steady-state" en anglais) à partir de sa condition initiale. On comprend que c'est la différence entre la condition initiale et la valeur à l'infini qui décroît au cours du temps.



On peut écrire une forme générale pour une équation différentielle de premier ordre :

$$\tau_x \dot{x} = x_\infty - x$$

♡ Cette équation se lit telle que x converge vers x_∞ avec une constante de temps τ_x .

Leurs valeurs sont données par $\tau_x = 1/a$ et $x_\infty = b/a$ (la valeur de l'entrée divisée par le facteur de l'exponentielle). La réponse du système écrit sous cette forme est donnée par :

$$x(t) = (x(0) - x_\infty)e^{-t/\tau_x} + x_\infty$$

Systemes d'équations différentielles

On passe maintenant à un système d'équations différentielles :

$$\dot{x}_1 = M_{11}x_1 + M_{12}x_2 + I_1$$

$$\dot{x}_2 = M_{21}x_1 + M_{22}x_2 + I_2$$

On peut écrire matriciellement cette expression :

$$\dot{\vec{x}} = \overleftrightarrow{M} \vec{x} + \vec{I}$$

Les deux variables x_1 et x_2 sont couplées. Pour obtenir la solution analytique de x_1 , on a besoin de celle de x_2 et vice-versa. Pour résoudre ce système, il faut suivre une procédure en 4 parties. Le but est d'exprimer les équations dans un nouveau système de coordonnées où les deux variables sont découplées. On revient ainsi au cas simple à 1D présenté ci-dessus.

étape 1 : On calcule les valeurs propres et les vecteurs propres.

En effet, \overleftrightarrow{M} est la matrice de couplage. On peut donc utiliser les vecteurs propres pour transformer cette matrice : $\overleftrightarrow{M} \vec{e} = \lambda \vec{e}$.

étape 2 : On décompose \vec{x} et \vec{I} selon les deux vecteurs propres associés à \overleftrightarrow{M} :

$$\begin{aligned} \vec{x} &= \sum_i c_i \vec{e}^{(i)} = c_1 \vec{e}^{(1)} + c_2 \vec{e}^{(2)} \\ \vec{I} &= \sum_i b_i \vec{e}^{(i)} = b_1 \vec{e}^{(1)} + b_2 \vec{e}^{(2)} \end{aligned}$$

On ne connaît pas les termes c_1 et c_2 car ils correspondent aux solutions analytiques de x_1 et x_2 dans le nouveau système de coordonnées (*i.e.* le système donné par les directions des vecteurs propres). Ce sont encore des inconnues à ce stade-ci. Les valeurs de b_1 et b_2 peuvent être estimées soit par identification des coefficients, soit en calculant analytiquement le produit $\vec{b} = \overleftrightarrow{E}^{-1} \vec{I}$, avec $\overleftrightarrow{E}^{-1}$ la matrice des vecteurs propres, *i.e.* chaque colonne est un vecteur propre.

étape 3 : On injecte b et c dans le système pour remplacer \vec{x}^1 .

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \left(\sum_i^N c_i \vec{e}^{(i)} \right) &= \overleftrightarrow{M} \left(\sum_i^N c_i \vec{e}^{(i)} \right) + \sum_i^N b_i \vec{e}^{(i)} \\ \sum_i^N \frac{dc_i}{dt} \vec{e}^{(i)} &= \sum_i^N c_i \overleftrightarrow{M} \vec{e}^{(i)} + \sum_i^N b_i \vec{e}^{(i)} \\ \sum_i^N \frac{dc_i}{dt} \vec{e}^{(i)} &= \sum_i^N c_i \lambda_i \vec{e}^{(i)} + \sum_i^N b_i \vec{e}^{(i)} \end{aligned}$$

C'est ici que la "magie" s'opère car on remplace un système d'équations différentielles couplées via la matrice \overleftrightarrow{M} par un système d'équation différentielle de premier ordre. Ce nouveau système découplé est facile à résoudre, en utilisant simplement les résultats obtenus aux sections précédentes. On peut faire cela car on passe du système de coordonnées (x_1, x_2) au système de coordonnées $(e^{(1)}, e^{(2)})$ dans lequel les variables ne sont plus couplées. On obtient donc deux équations différentielles simples d'ordre 1² :

$$\begin{aligned} \frac{dc_1}{dt} &= \lambda_1 c_1 + b_1 \\ \frac{dc_2}{dt} &= \lambda_2 c_2 + b_2 \end{aligned}$$

La solution s'obtient facilement :

$$\begin{aligned} c_1(t) &= (c_1(0) - c_{1,\infty}) e^{\lambda_1 t} + c_{1,\infty} \\ c_2(t) &= (c_2(0) - c_{2,\infty}) e^{\lambda_2 t} + c_{2,\infty} \end{aligned}$$

avec $c_{1,\infty} = -b_1/\lambda_1$, $c_{2,\infty} = -b_2/\lambda_2$. Pour le calcul des conditions initiales, on sait que $\vec{x} = \overleftrightarrow{E} \vec{c}$. On peut donc écrire

$$\begin{aligned} x_1(0) &= c_1(0) e_1^{(1)} + c_2(0) e_1^{(2)} \\ x_2(0) &= c_1(0) e_2^{(1)} + c_2(0) e_2^{(2)} \end{aligned}$$

Il suffit de résoudre ce système pour trouver $c_1(0)$ et $c_2(0)$ sur base des conditions initiales données en $x_1(0)$ et $x_2(0)$.

étape 4 : On écrit le système de solutions pour $x_1(t)$ et $x_2(t)$:

$$\begin{aligned} x_1(t) &= c_1(t) e_1^{(1)} + c_2(t) e_1^{(2)} \\ x_2(t) &= c_1(t) e_2^{(1)} + c_2(t) e_2^{(2)} \end{aligned}$$

Exemple

On considère le système d'équations différentielles suivant,

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= 0x_1 + 3x_2 - 2 \\ \dot{x}_2 &= 2x_1 + x_2 + 3, \end{aligned}$$

1. On laisse tomber les indices sur le symbole sommatoire pour alléger le calcul.
2. Prendre note du changement de convention pour les signes : au lieu d'avoir $-a$ devant la variable x comme dans les paragraphes précédents on a λ .

avec les conditions initiales $x_1(0) = 0$ et $x_2(0) = 0$. On peut déduire la matrice de couplage et la matrice d'entrée :

$$\overleftrightarrow{M} = \begin{pmatrix} 0 & 3 \\ 2 & 1 \end{pmatrix}, \overrightarrow{I} = \begin{pmatrix} -2 \\ 3 \end{pmatrix}$$

On peut résoudre ce système à l'aide des 4 étapes détaillées ci-dessus :

étape 1 : Calcul des valeurs propres et des vecteurs propres :

$$\det(\overleftrightarrow{M} - \lambda \overleftrightarrow{1}) = 0 \iff \lambda_1 = 3 \text{ et } \lambda_2 = -2.$$

Les vecteurs propres associés sont ceux donnés par :

$$\begin{cases} (\overleftrightarrow{M} - \lambda_1 \overleftrightarrow{1}) \overrightarrow{e^{(1)}} = 0 \\ (\overleftrightarrow{M} - \lambda_2 \overleftrightarrow{1}) \overrightarrow{e^{(2)}} = 0 \end{cases} \iff \begin{cases} \overrightarrow{e^{(1)}} = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix} \\ \overrightarrow{e^{(2)}} = \begin{pmatrix} -1.5 \\ 1 \end{pmatrix}. \end{cases}$$

étape 2 : On décompose l'entrée dans le nouveau système de coordonnées :

$$\overleftrightarrow{I} = \begin{pmatrix} -2 \\ 3 \end{pmatrix} = b_1 \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix} + b_2 \begin{pmatrix} -1.5 \\ 1 \end{pmatrix}$$

Pour calculer b_1 et b_2 , on peut soit faire par inspection et trouver les coefficients qui donnent le vecteur \overleftrightarrow{I} directement, soit utiliser la formule : $\overrightarrow{b} = E^{-1} \overleftrightarrow{I}$. Par inspection, on trouve ici que $b_1 = 1$ et $b_2 = 2$.

étape 3 : On trouve la solution pour $c_1(t)$ et $c_2(t)$ en remplaçant dans la formule démontrée ci-dessus avec $c_{1,\infty} = -b_1/\lambda_1$, $c_{2,\infty} = -b_2/\lambda_2$ et les conditions initiales telles que $c_1(0) = 0$ et $c_2(0) = 0$:

$$\begin{aligned} c_1(t) &= (c_1(0) - c_{1,\infty})e^{\lambda_1 t} + c_{1,\infty} = -1/3 + 1/3e^{3t} \\ c_2(t) &= (c_2(0) - c_{2,\infty})e^{\lambda_2 t} + c_{2,\infty} = 1 - 1e^{-2t}. \end{aligned}$$

étape 4 : On utilise les solutions trouvées en $c(t)$ pour décrire la réponse en $x(t)$:

$$\begin{aligned} x_1(t) &= c_1(t)1 + c_2(t)(-1.5) = -1/3 + 1/3e^{3t} + (-3/2) + (3/2)e^{-2t} \\ x_2(t) &= c_1(t)1 + c_2(t)1 = -1/3 + 1/3e^{3t} + 1 - e^{-2t} \end{aligned}$$

♡ Il est intéressant de noter que la dynamique du système est gouvernée par les valeurs propres.

Notions clés

- Calculs élémentaires avec les vecteurs et les matrices
- Comprendre géométriquement les opérations dans le plan
- Être capable de calculer les vecteurs propres et valeurs propres d'une matrice
- Comprendre l'interprétation géométrique des vecteurs propres et des valeurs propres
- Avoir des notions du concept de "Principal Component Analysis" (PCA)
- Résoudre une équation différentielle simple avec et sans entrée
- Comprendre l'utilisation des vecteurs propres et valeurs propres dans le découplage d'un système d'équations différentielles
- Découpler un système d'équations différentielles et résoudre entièrement le système

4 Exercices à faire

Exercice 1 = Devoir 1 (2020)

Le système dynamique à deux dimensions est caractérisé par les équations différentielles suivantes :

$$\begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 16 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}$$

Calculer $x(t)$ et $y(t)$ à l'aide des valeurs propres et des vecteurs propres et discuter la stabilité du système.



Schéma de résolution : découplage d'équation différentielle

- 1- Rechercher les valeurs propres et les vecteurs propres
- 2- Décomposer les variables x et y selon les vecteurs propres (directions préférentielles pour découpler le système)
- 3- Remplacer le système \dot{x}, \dot{y} par sa décomposition en considérant des conditions initiales génériques
- 4- Résoudre le système et obtenir $x(t), y(t)$
- 5- Discuter la stabilité

Remarque : Essayer de bien comprendre les différents termes qui apparaissent dans la résolution de votre système d'équations différentielles linéaires couplées.

1 Concept

1.1 Distinction entre système et signal

Un système peut être vu comme une boîte noire qui transforme un certain nombre de signaux d'entrée en un certain nombre de signaux de sortie.

- But : modéliser un processus.
- Domaines d'application : biologie, chimie, électricité, mécanique, finance, ...

Le concept de système peut être schématisé comme ci-dessous : on s'intéresse à la transformation des entrées en sorties.



La Figure 1 illustre le principe de modélisation d'un neurone sous forme de système. L'expérimentateur-riche injecte du courant dans un neurone de rat et s'intéresse à la tension membranaire mesurée en sortie. La dynamique interne du neurone peut être modélisée par une "boîte noire".

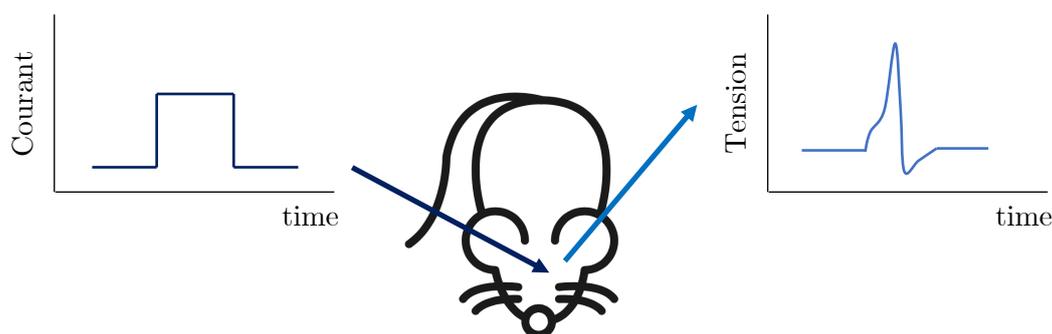


FIGURE 1 – Exemple de système : mesure de la tension au niveau d'un neurone

Un signal transporte l'information d'un point à un autre alors qu'un système agit sur le signal dit "d'entrée" pour en produire une version modifiée, dite "de sortie".

Un signal peut être continu, comme par exemple un courant électrique ou une onde acoustique, mais également discret, comme par exemple une représentation digitale d'un signal audio (MP3) ou d'une image (JPEG). On parle également de signaux analogiques et numériques. Lorsque ce signal évolue en fonction du temps, on parlera de signal temps-continu et temps-discret, respectivement.

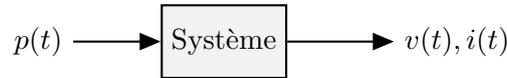
Mathématiquement, cette distinction vient de la variable indépendante, qui peut être :

- soit continue (généralement t), on écrira alors $u(\cdot)$ pour représenter le signal temps-continu u . Le domaine³ de la variable indépendante est un ensemble continu (ex : \mathbb{R}).
- soit discrète (généralement n), on écrira alors $u[\cdot]$ pour représenter le signal temps-discret u . Le domaine de la variable indépendante est un ensemble discret (ex : \mathbb{N}).

3. L'ensemble des valeurs de la variable indépendante pour lesquelles le signal est défini.

La variable indépendante continue est fréquemment le temps t mais il peut également s'agir d'une distance, de la pression, de la température, etc. Une variable indépendante discrète peut impliquer une discrétisation d'une variable continue, comme par exemple la discrétisation de l'espace en pixels discrets pour la représentation numérique d'une image.

Par exemple, considérons un microphone. Celui-ci peut être vu comme un système qui convertit une pression (due au mouvement de l'air) en un signal électrique.



Ces signaux sont continus dans le temps (la variable indépendante). On parlera d'un système continu, ou analogique. Si les signaux en sortie sont convertis en signaux discrets pour, par exemple, un traitement numérique par ordinateur du son enregistré, ce système de traitement sera alors considéré comme un système discret, ou numérique.

Un système est alors dit continu (resp. discret) s'il manipule des signaux continus (resp. discrets). Cette distinction vient du domaine des signaux.

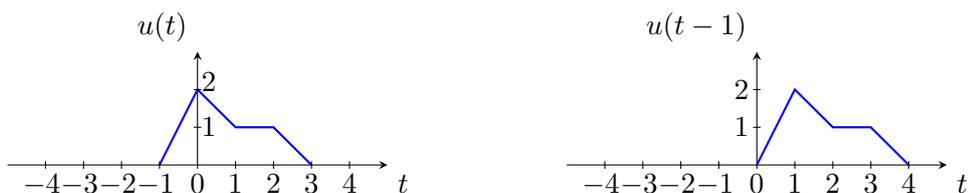
1.2 Transformations de signaux

Lorsqu'un signal traverse un système, ce signal est transformé. Voici un récapitulatif des transformations affines, *i.e.* les opérations de base que peut subir un signal.

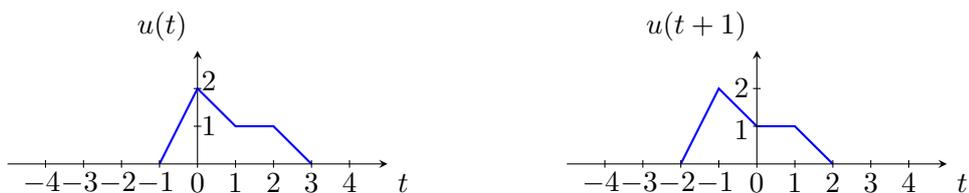
Décalage temporel



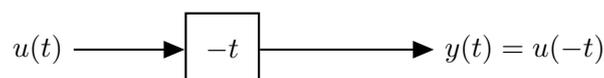
- $\sigma > 0$: décalage vers la droite. Intuitivement, $t - \sigma$ représente un *retard* de σ secondes. Cette transformation peut être illustrée par le schéma ci-dessous qui représente un courant qui varie au cours du temps. Au temps $t = 0$, l'expérimentateur-riche mesure initialement 2[A]. Si le signal est retardé d'une seconde par un système, l'expérimentateur-riche mesurera 0[A] au lieu de 2[A] en $t = 0$. En effet, la courbe s'est déplacée d'une unité vers la droite car elle a subi un retard.



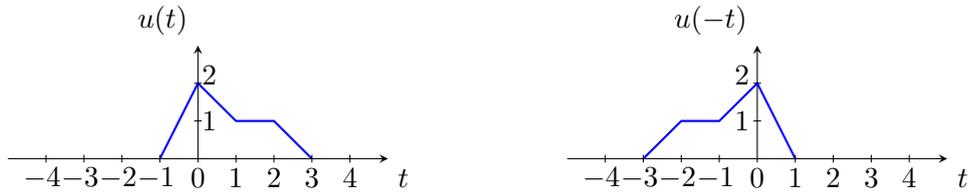
- $\sigma < 0$: décalage vers la gauche. Le signal est *avancé*.



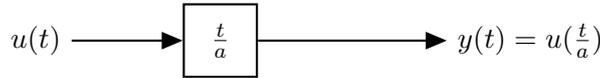
Inversion temporelle



Rotation de 180° selon l'axe des ordonnées = miroir selon l'axe des y .



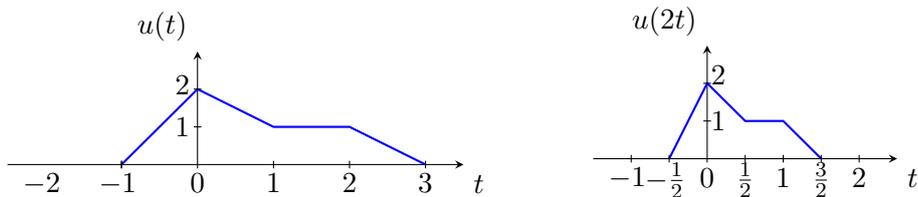
Dilatation ou contraction



- $a > 1 : t \rightarrow \frac{t}{a}$. Mathématiquement, la constante a affecte le signal selon l'axe des abscisses. Autrement dit, le signal est *dilaté*. Le temps est "divisé par a ", ce qui implique que le signal s'étale sur une durée a fois plus longue (dilatation). Cependant, l'amplitude du signal reste inchangée. Par exemple, lorsqu'une musique est jouée sur un MP3, si la vitesse d'écoute du MP3 est modifiée (vitesse $\times \frac{1}{2}$) : le signal sonore est étalé dans le temps. Les sons sont prononcés plus lentement mais l'amplitude reste la même.



- $a < 1 \implies \frac{1}{a} > 1$: (ex. $\frac{t}{0.5} = 2t$). A l'inverse du cas précédent, cette fois, le bouton $\times 2$ du MP3 est pressé, le signal sonore (ou la vidéo, dans un autre contexte) est accéléré. Les informations contenues dans le son défilent plus vite et donc ce dernier est *contracté*. Une nouvelle fois, seule la variable indépendante est modifiée par cette transformation et non l'amplitude du son (ou dans l'exemple de la vidéo, le contenu visuel est inchangé, seul le nombre d'images par seconde est affecté).



Transformation combinée :

$$y(t) = u\left(\frac{t}{a} - \sigma\right)$$

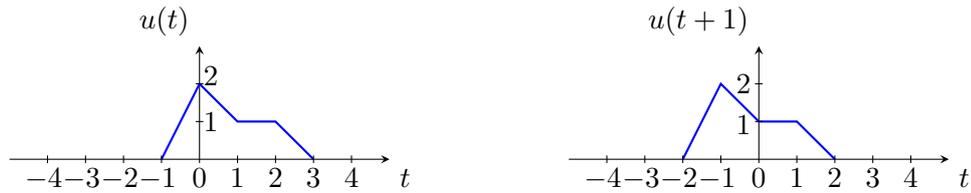
Que faire lorsque le signal subit plusieurs transformations ? Dans quel ordre faut-il appliquer les transformations ? En règle générale, il faut les appliquer dans l'*ordre inverse de la priorité des opérations*.

Une transformation combinée (par exemple avec $a = 2$ et $\sigma = -1$ tel que $y(t) = u\left(\frac{t}{2} + 1\right)$) peut être décomposée sous forme de deux sous-systèmes. La sortie du premier sous-système est notée $y_{temp}(t)$ et agit comme entrée du deuxième sous-système.

- Que se passe-t-il si le décalage (addition) a lieu avant la contraction/dilatation (multiplication) comme illustré ci-dessous par la combinaison des deux sous-systèmes ?

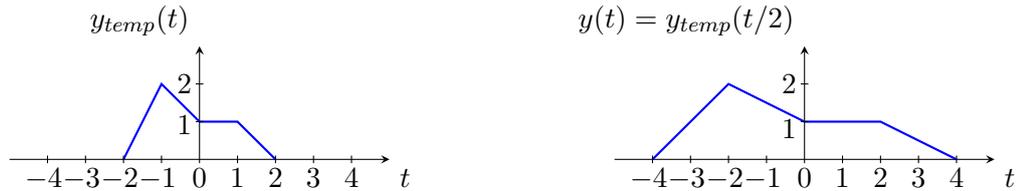


- 1er sous-système : Décalage $y_{temp}(t) = u(t - \sigma)$



Pour $\sigma = -1 < 0$ (décalage vers la gauche) ; cela correspond donc à un signal en avance de 1.

- 2ème sous-système : Contraction/Dilatation $y(t) = y_{temp}(\frac{t}{a}) = u(\frac{t}{a} - \sigma)$



Pour $a = 2 > 1$, le signal est dilaté selon l'axe des abscisses.

C'est bien dans cet ordre qu'il faut effectuer les opérations.

Si on inverse les deux étapes, on inverse les deux sous-systèmes et on obtient une autre sortie que celle attendue :

$$u(t) \longrightarrow y_{temp}(t) = u\left(\frac{t}{2}\right)$$

$$y_{temp}(t) \longrightarrow y(t) = y_{temp}(t+1) = u\left(\frac{t+1}{2}\right)$$

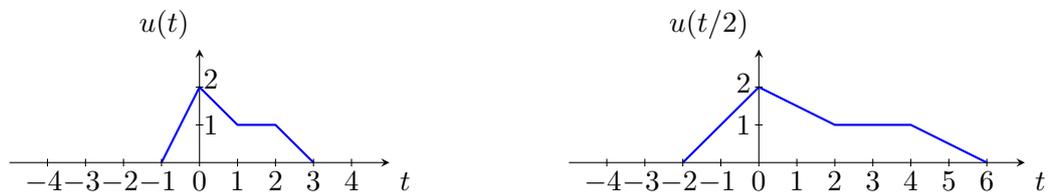
ce qui n'était pas le résultat attendu.

- Pour une autre transformation combinée :

$$y(t) = u\left(\frac{t - \sigma}{a}\right)$$

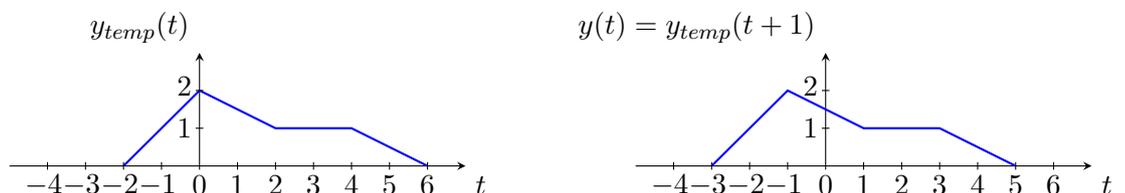
avec $u(\frac{t+1}{2})$. La transformation combinée est décomposée en deux sous-systèmes et fait appel à un signal intermédiaire $y_{temp}(t)$.

- 1er sous-système : Contraction/Dilatation $y_{temp}(t) = u(\frac{t}{a})$



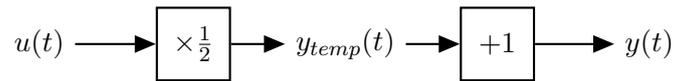
Pour $a = 2 > 1$, le signal est dilaté selon l'axe des abscisses.

- 2ème sous-système : Décalage $y(t) = y_{temp}(t - \sigma) = u(\frac{t - \sigma}{a})$



Pour $\sigma = -1 < 0$, cela correspond à un signal en avance de 1.

Au bilan, la division est effectuée AVANT l'addition car elle porte sur tout le numérateur. Cela peut être vu comme des parenthèses $(t - \sigma)/a$:



C'est bien dans cet ordre qu'il faut effectuer les opérations. Si l'addition est exécutée avant la multiplication, le signal serait modifié comme ceci :

$$u(t) \longrightarrow y_{temp}(t) = u(t + 1)$$

$$y_{temp}(t) \longrightarrow y(t) = y_{temp}\left(\frac{t}{2}\right) = u\left(\frac{t}{2} + 1\right)$$

ce qui n'est pas le résultat attendu.

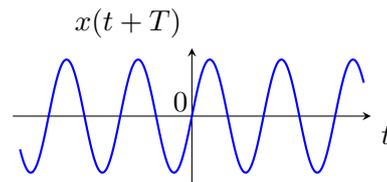
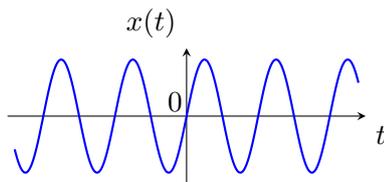
♡ Astuce mnémotechnique : l'opération qui est la plus "proche" de la variable indépendante est effectuée en dernier car cette opération correspond bien à l'action du dernier sous-système.

1.3 Propriétés des signaux

- **Périodique**

Mathématiquement, un signal $x(t)$ est périodique s'il $\exists T \in \mathbb{R}$ tel que $x(t) = x(t + T)$, $\forall t$.

Exemple : $x(t) = \sin(t)$



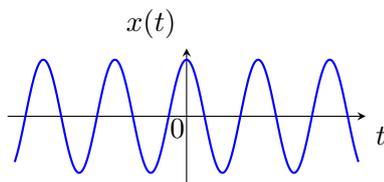
- **Pair ou impair**

Pair

$$x(t) = x(-t), \forall t$$

Symétrie orthogonale d'axe égal à l'axe des ordonnées.

Exemple : $x(t) = \cos(t)$

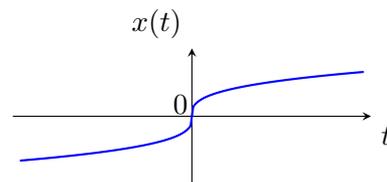


Impair

$$x(t) = -x(-t), \forall t$$

Symétrie centrale par l'origine des axes.

Exemple : $x(t) = \sqrt[3]{t}$



Utilité ? Un signal peut toujours être décomposé en une somme de signaux pairs et impairs :

$$x(t) = \frac{1}{2} \underbrace{(x(t) - x(-t))}_{\text{Signal impair}} + \frac{1}{2} \underbrace{(x(t) + x(-t))}_{\text{Signal pair}}$$

1.4 Propriétés des systèmes

Continu

Un signal continu en entrée donne un signal continu en sortie.



Discret

Un signal discret en entrée donne un signal discret en sortie.



Hybride (1)

Un signal discret en entrée donne un signal continu en sortie.



Hybride (2)

Un signal continu en entrée donne un signal discret en sortie.



- **Univoque**

Un système est dit univoque si à une entrée $u(t)$ n'est associée qu'une et une seule sortie $y(t)$.

- **Statique**

Un système statique est un système dont la sortie à un instant t^* ne dépend que de l'entrée à cet instant t^* : $y(t^*) = S\{u(t^*)\}$, où on note $y(t) = S\{u(t)\}$ le fait que $y(t)$ soit la sortie du système S associée à l'entrée $u(t)$. On dira que le système ne possède pas de mémoire, qu'il n'est fonction que de l'entrée présente.

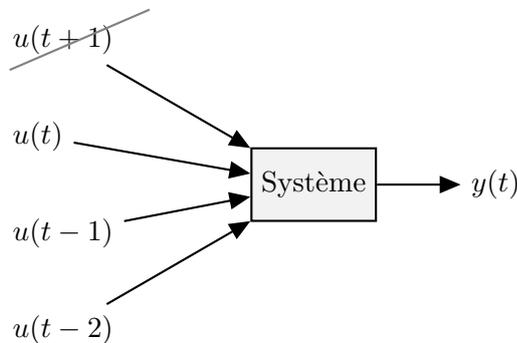
- **Dynamique**

Un système dynamique est un système dont la sortie dépend du présent, mais aussi de valeurs de l'entrée à d'autres instants.

- **Causal**

Un système est dit causal si la sortie à un instant t^* ne dépend que de l'entrée en t^* et des entrées précédentes, *i.e.* aux instants $t \leq t^*$: $y(t^*) = S\{u(t^*), u(t^* - dt), u(t^* - 2dt), \dots\} = S\{u(\tilde{t})\}$, $\tilde{t} \leq t^*$. Par convention, un système statique est causal. À noter que tout système physique est causal.

Exemple : On considère le mouvement d'un chariot, sa position est la sortie du système et l'entrée est la force exercée sur le chariot. À un instant donné, la position du chariot dépendra de la force appliquée, mais aussi des forces précédemment appliquées, déterminant sa position actuelle.

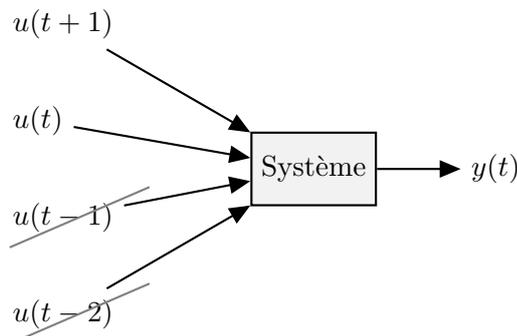


Remarque : À ce stade, la dérivée est considérée comme une opération causale : $\dot{u}(t) = \lim_{z \rightarrow 0^+} \frac{u(t) - u(t-z)}{z}$.

Pour le moment, on dira donc qu'un système décrit par une équation différentielle est causal, sans plus de détail.

- **Anticausal**

Un système est dit anticausal si la sortie à un instant t^* ne dépend que de l'entrée en t^* et des entrées futures $t \geq t^*$: $y(t^*) = S\{u(t^*), u(t^* + dt), u(t^* + 2dt), \dots\} = S\{u(\tilde{t})\}$, $\tilde{t} \geq t^*$.



- **Non causal**

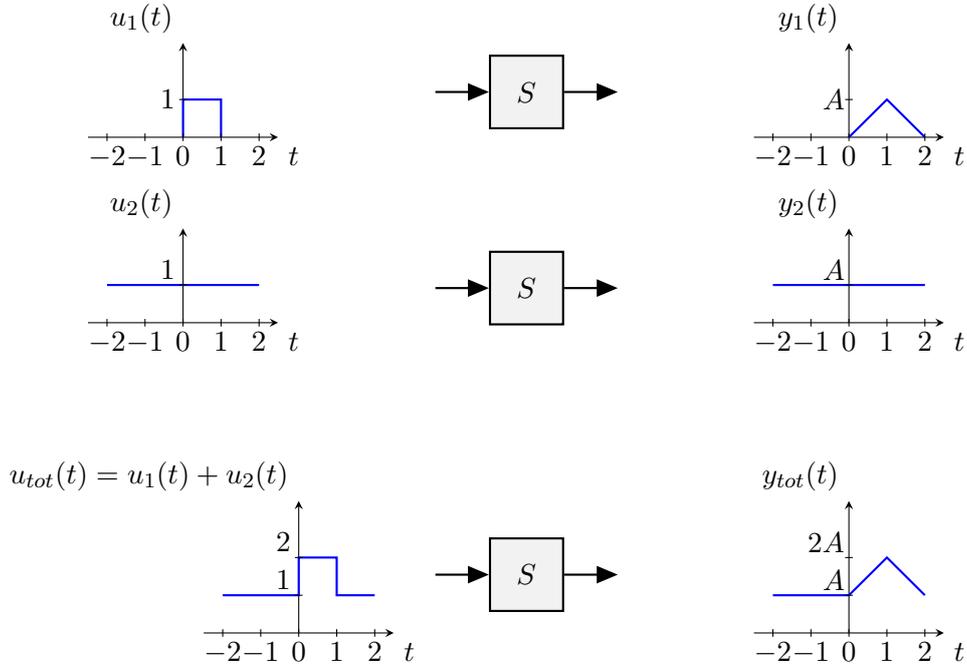
Un système est dit non causal s'il n'est ni causal, ni anti-causal.

- **Additif**

Un système est dit additif s'il vérifie la propriété suivante :

$$\begin{cases} y_1(t) = S\{u_1(t)\} \\ y_2(t) = S\{u_2(t)\} \end{cases} \Rightarrow y_{tot} = S\{u_{tot}(t)\} = S\{u_1(t)+u_2(t)\} = S\{u_1(t)\}+S\{u_2(t)\} = y_1(t)+y_2(t).$$

Cette propriété peut être facilement illustrée graphiquement :

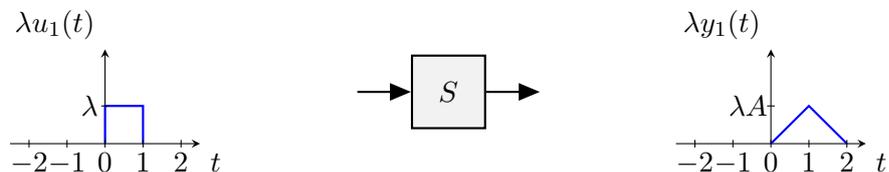


- **Homogène**

Un système est dit homogène s'il vérifie la propriété suivante :

$$y(t) = S\{u(t)\} \Rightarrow \lambda y(t) = S\{\lambda u(t)\}.$$

Cette propriété peut être facilement illustrée graphiquement :



- **Linéaire**

Un système est dit linéaire s'il est additif et homogène. Mathématiquement, il vérifie donc la propriété suivante

$$\begin{cases} y_1(t) = S\{u_1(t)\} \\ y_2(t) = S\{u_2(t)\} \end{cases} \Rightarrow \alpha y_1(t) + \beta y_2(t) = S\{\alpha u_1(t) + \beta u_2(t)\}, \quad \forall \alpha, \beta \in \mathbb{R}$$

- **Temps-invariant**

Un système est dit invariant dans le temps lorsque la loi qu'il établit entre entrées et sorties ne change pas au cours du temps. Autrement dit, si un décalage temporel est appliqué à l'entrée, ce décalage se retrouve également à la sortie. Ainsi, on a la propriété

$$y(t) = S\{u(t)\} \Rightarrow y(t - \tau) = S\{u(t - \tau)\}$$

Remarque : Le cours portera principalement sur les systèmes linéaires temps-invariant (LTI). Nous étudierons les outils spécifiques à cette catégorie de système. Il est donc important de comprendre les différentes notions expliquées ci-dessus.

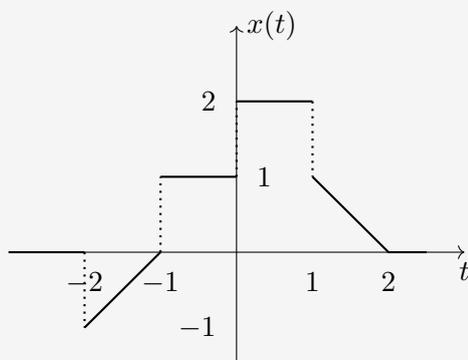
Notions clés

- Distinguer signaux et systèmes
- Maîtriser les transformations de signaux
- Identifier les propriétés des systèmes (linéarité, causalité, invariance)

2 Exercices résolus au tableau

Exercice 1 = Exercice 1.2 (a)-(c) [TXB]

Soit le signal continu $x(t)$ représenté ci-dessous.



Tracer les signaux suivants.

- (a) $x(t - 1)$
- (c) $x(2t + 1)$



Schéma de résolution : transformation affine

- Identifier la transformation : décalage temporel vers la droite/gauche ? inversion temporelle ? contraction/dilatation ? transformation affine ?
- S'il y a plusieurs transformations, identifier l'ordre des opérations INVERSESES (ou utiliser l'astuce mnémotechnique)
- Dessiner les transformations

Exercice 2 = Exercice 3.1 (a)-(b) [TXB]

Déterminer si le système continu correspondant à la relation entrée-sortie donnée ci-après est

- dynamique ou statique ;
- causal, anticausal ou non causal ;
- linéaire ou non ;
- variant ou invariant.

(a) $y(t) = u(t - 2) + u(2 - t)$

(b) $y(t) = \cos(3t)u(t)$

Schéma de résolution : identifier les propriétés des systèmes

- Statique-dynamique ? Pour rappel, un système est statique si $y(t^*)$ ne dépend que de la valeur de l'entrée en $t = t^*$.
- Causalité ? Pour rappel, un système est causal si $y(t^*)$ ne dépend que de la valeur de l'entrée en $t \leq t^*$.

- Linéarité ? Pour déterminer si le système est linéaire, il suffit de démontrer que toute combinaison $\alpha u_1 + \beta u_2$ donne une sortie $\alpha y_1 + \beta y_2$.

En pratique, une autre façon de voir si un système est linéaire est de regarder si les entrées u / sorties y / signaux x (plus généralement, les variables dépendantes) sont exprimées/modifiées par une fonction non linéaire. Cela n'a donc pas de rapport avec "t" (c-à-d la variable indépendante), mais bien uniquement avec les fonctions qui sont appliquées sur les entrées/sorties/signaux.

- Temps-variant ou temps-invariant ? Pour rappel, un système est dit invariant dans le temps lorsque la loi qu'il établit entre entrées et sorties ne change pas au cours du temps, c'est-à-dire si l'équation ne dépend pas explicitement de la valeur de la variable indépendante.

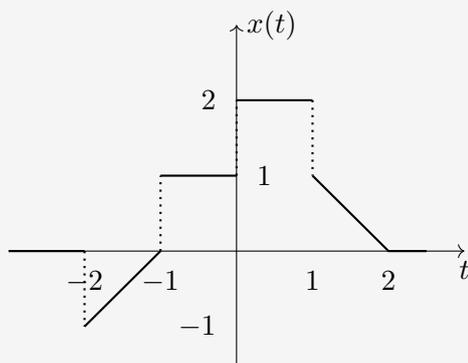
En pratique, on peut d'abord regarder si le système dépend de la variable indépendante t , *i.e.* regarder si les coefficients de l'équation sont dépendants du temps (autrement dit, si à des instants différents, les coefficients prennent des valeurs différentes). De manière générale, il faut tester si un décalage temporel à l'entrée se retrouve également en sortie, *i.e.* tester si $(u(t - \tau), y(t - \tau))$ est un couple entrée-sortie valable pour le système étant donné que $(u(t), y(t))$ est valable.



3 Exercices à faire

Exercice 3 = Exercice 1.2 (d) [TXB]

Soit le signal continu $x(t)$ représenté ci-dessous.



Tracer le signal suivant :
 $x(4 - \frac{t}{2})$.

Schéma de résolution : transformation affine

- Identifier la transformation : décalage temporel vers la droite/gauche ? inversion temporelle ? contraction/dilatation ? transformation affine ?
- S'il y a plusieurs transformations, identifier l'ordre des opérations INVERSESES (ou utiliser l'astuce mnémotechnique)
- Dessiner les transformations



Exercice 4 = Exercice 3.1 (f) [TXB]

Déterminer si le système continu correspondant à la relation entrée-sortie donnée ci-après est

- dynamique ou statique ;
- causal, anti-causal ou non causal ;
- linéaire ou non ;
- variant ou invariant.

(f) $y(t) = u(\frac{t}{3})$

Exercice 5 = Exercices 3.15 (a) - (c) [TXB]

Étudier la linéarité et l'invariance des systèmes suivants.

(a) $\dot{y}(t) + 2y(t) = u(t^2)$

(c) $\dot{y}(t) + a y(t) = u(t)$ avec $a \in \mathbb{R}$ constant



Schéma de résolution : identifier les propriétés d'une équation différentielle

- Linéarité : pour cet exercice, pas besoin de refaire la démonstration. Regarder si les signaux d'entrée et/ou de sortie sont exprimés au travers de fonctions non linéaires (ex : $\sqrt{y(t)}$, $\dot{y}y$, $\cos(u(t))$, ...)
- Invariance : regarder si les coefficients dépendent ou non du temps ou faire la démo.

Rappelez-vous de vos cours d'Analyse sur l'étude d'équations différentielles, des notions similaires avaient été abordées telles que les équations différentielles linéaires à coefficients constants par exemple.

Exercice 6 = Interro 2013 - Q3 [cliquer ici](#) ou sur le [site](#) ex 2 ou ex 3.7 [TXB]

Étudier la linéarité et l'invariance des deux systèmes ci-dessous. Justifier la réponse en détail : donner une démonstration explicite, e.g., par contre-exemple pour les propriétés non satisfaites.

(i) $y(t) = \sin(u(t)) = (\sin \circ u)(t) = \sin(u(t))$

(ii) $y(t) = u(\sin(t)) = (u \circ \sin)(t) = u(\sin(t))$

4 Pour s'exercer

Exercice 7 = Exercice 3.9 [TXB]

Caractérissez

- un phénomène physique susceptible de mettre en défaut l'hypothèse de linéarité d'un modèle de circuit électrique.
- un phénomène physique susceptible de mettre en défaut l'hypothèse d'invariance d'un modèle de circuit électrique.

Exercice 8 = Exercice 3.12 (a) [TXB]

Pour chacune des questions suivantes, sélectionner la bonne réponse sur base d'une courte justification. Un seul des trois systèmes suivants est linéaire et statique, lequel ?

(i) $y_1(t) = t^2 u(t)$

(ii) $y_2(t) = u(t + 1)$

(iii) $y_3(t) = \dot{u}(t)$

1 Concept

1.1 Introduction aux systèmes non-linéaires

Les équations différentielles permettent de décrire la dynamique des systèmes⁴. Par exemple, un système masse-ressort amorti peut être décrit selon l'équation :

$$m \frac{d^2x}{dt^2} + b \frac{dx}{dt} + kx = 0.$$

En première année, le cours d'analyse a fourni des outils pour résoudre ce type d'équations, afin d'aboutir à une expression de $x(t)$.

Lorsque l'équation fait intervenir des non-linéarités, il devient cependant de plus en plus compliqué de résoudre analytiquement.

Par exemple, $\dot{x} = \sin(x)$ a pour solution (en notant x_0 la valeur de x en $t = 0$) :

$$t = \ln \left| \frac{\csc(x_0) + \cot(x_0)}{\csc(x) + \cot(x)} \right|.$$

Comment interpréter ce résultat ? Si $x_0 = \pi/4$, que vaut $x(t)$ pour $t \rightarrow \infty$?

L'expression analytique de la solution ne permet pas de répondre directement à ces questions. On souhaiterait donc avoir un outil plus *qualitatif* afin de comprendre la dynamique du système sans résoudre l'équation différentielle entièrement. Dit autrement, on souhaiterait pouvoir *décrire* le système par son *fonctionnement global*, ses propriétés et les sorties qu'il produit à certaines entrées, et ce en s'affranchissant le plus possible de la complexité analytique du problème.

On va donc représenter l'équation $\dot{x} = \sin(x)$ graphiquement. Il s'agit du *champ de vecteurs* qui associe un vecteur vitesse \dot{x} à chaque point x . Pour ce faire, on dessine une flèche qui pointe vers la droite (resp. gauche) si le vecteur vitesse est positif (resp. négatif), *i.e.* si $\dot{x} > 0$ (resp. $\dot{x} < 0$) comme illustré à la Figure 2.

Les vecteurs vitesses indiquent la direction selon laquelle un fluide imaginaire s'écoulerait selon l'axe x , avec une vitesse variant en fonction de la position. Lorsque $\dot{x} = 0$, la vitesse est nulle, autrement dit le fluide est statique et ne bouge plus. Il s'agit donc d'un *point fixe*. Pour déterminer la *nature du point fixe*, il suffit de regarder vers où le flux/courant "converge" ou, au contraire, comment le flux/courant éloigne la particule de fluide d'un point fixe. Un point fixe vers lequel le flux/courant converge sera considéré comme stable, alors qu'un point fixe duquel le flux/courant s'éloigne sera considéré comme instable. Dans l'exemple, il y a donc deux types de points fixes ; un point noir représente un point fixe *stable* et un point ouvert représente un point fixe *instable*.

La Figure 2 permet d'étudier la dynamique du système et les différentes solutions de l'équation $\dot{x} = \sin(x)$. Par exemple pour $x_0 = \pi/4$, il suffit d'imaginer une particule de fluide en cette abscisse et de regarder comment cette particule est transportée par le flux/courant indiqué par les flèches du champ de vecteurs. Pour $t \rightarrow \infty$, la particule approche le point fixe π par la gauche.

4. Ce TP est basé sur les chapitres 1,2,5,6 de [STR].

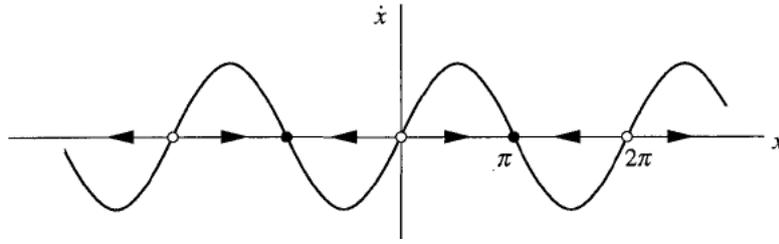


FIGURE 2 – Champ de vecteurs de $\dot{x} = \sin(x)$ [Figure 2.1.1-STR]

1.2 Linéarisation et étude de stabilité

La section précédente permet sur base d'une étude graphique de déterminer les points fixes et leur stabilité. Il est intéressant de développer une mesure plus *quantitative*. La stabilité d'un point fixe peut s'étudier en *linéarisant* le problème non-linéaire en ce point. Au lieu d'étudier le problème de manière globale à l'aide du champ de vecteurs, on étudie localement chaque point fixe à l'aide du système linéarisé autour de chacun de ces points.

Un exemple bien connu est celui du pendule : à l'aide de l'approximation des petits angles, on peut écrire $\sin(\theta) \sim \theta$, permettant de trouver une solution analytique du problème. Cependant, en appliquant cette méthode, on viole certaines lois de la physique et le domaine d'application de la solution est restreint et local. Il faut ainsi garder à l'esprit que la linéarisation ne permet pas d'étudier le problème non-linéaire dans son ensemble mais est un outil permettant d'étudier la stabilité du problème en ses points fixes avec certaines limitations.

La stabilité de la fonction $\dot{x} = f(x)$ en un point fixe x^* peut se calculer en faisant intervenir η , une petite perturbation depuis le point fixe telle que $x = x^* + \eta$. On souhaite déterminer si le système retourne à son point fixe lorsqu'il subit cette petite perturbation, autrement dit si elle grandit (le système est déstabilisé et s'éloigne de son point d'équilibre) ou diminue (malgré la perturbation, le système revient à son point d'équilibre). On applique donc le développement de Taylor à la fonction $f(x)$ en remplaçant x par la variable $x^* + \eta$, dans laquelle uniquement η varie. Le premier membre de l'équation différentielle devient :

$$\dot{x} = \frac{dx}{dt} = \frac{d(x^* + \eta)}{dt} = \dot{\eta},$$

et le deuxième membre devient :

$$f(x) = f(x^* + \eta) = f(x^*) + \eta f'(x^*) + \mathcal{O}(\eta^2).$$

Par définition, un point fixe x^* annule la fonction $f(x)$, *i.e.* $f(x^*) = 0$. Le développement de Taylor devient :

$$f(x^* + \eta) = \eta f'(x^*) + \mathcal{O}(\eta^2).$$

♡ L'équation différentielle $\dot{x} = f(x)$ décrivant la dynamique *globale* du système peut donc être étudiée *localement* autour du point fixe x^* sous la forme :

$$\dot{\eta} = \eta f'(x^*) + \mathcal{O}(\eta^2).$$

Il faut donc résoudre cette équation différentielle qui caractérise le système non-linéaire initial mais étudié localement autour du point fixe considéré x^* .

- Si $f'(x^*) = 0$, les termes d'ordre 2 ne sont pas négligeables et il faut continuer l'étude avec ces termes :

$$\dot{\eta} = \mathcal{O}(\eta^2).$$

- Si $f'(x^*) \neq 0$, on peut négliger les termes d'ordre supérieur :

$$\dot{\eta} = \eta f'(x^*)$$

Cette équation différentielle LINÉAIRE est facile à résoudre. On obtient :

$$\eta(t) = \eta(0)e^{f'(x^*)t}$$

avec $\eta(0)$ une constante et $f'(x^*)$ la dérivée première de $f(x)$ évaluée en x^* . Il s'agit donc de la *pente* de la fonction en x^* .

Ainsi, pour savoir si le point x^* est stable ou non, il suffit de regarder si la perturbation (η) diminue ou grandit. L'analyse de l'équation $\eta(t)$ donnée par une exponentielle indique directement la réponse :

- ◇ Si $f'(x^*) < 0$, $\eta(t)$ est caractérisée par une exponentielle décroissante. Dès lors, le point fixe est stable. La perturbation va bien diminuer au cours du temps.
- ◇ Si $f'(x^*) > 0$, $\eta(t)$ est caractérisée par une exponentielle croissante. Dès lors, le point fixe est instable. Inversement, la perturbation entraîne le système loin du point fixe.

Pour conclure, l'étude de la pente de la fonction évaluée au point fixe permet immédiatement de déduire la nature du point fixe.

Pour illustrer ce concept, on repart de l'exemple utilisé à la section précédente, $\dot{x} = \sin(x)$, où on extrait la fonction $f(x) = \sin(x)$. Les points fixes sont définis par :

$$f(x) = 0 \Leftrightarrow \sin(x) = 0.$$

On obtient : $x^* = k\pi$ ou k est un entier. Pour déterminer la stabilité des points fixes, il suffit d'étudier le signe de la dérivée première $f'(x)$ évaluée aux points fixes x^* . Mathématiquement, cela donne :

$$f'(x^*) = \cos(k\pi) = \begin{cases} 1, & k \text{ pair} \\ -1, & k \text{ impair.} \end{cases}$$

Les points fixes associés à k pair (resp. impair) sont instables (resp. stables) car la dérivée première évaluée en ces points est positive (resp. négative).

Cela peut facilement se visualiser en dessinant la pente du graphe (dérivée première) aux points fixes (intersections avec l'axe des x). Si la pente est positive, le point fixe est instable et inversement si la pente est négative, le point fixe est stable. Sur la Figure 2, n'hésitez pas à dessiner la droite tangente au graphe au niveau des points fixes. Si la droite décroît (resp. croît), représentant une pente négative (resp. positive), le point fixe est stable (resp. instable).

Notions clés

Approche	Globale Graphique	Locale Mathématique
Points fixes	tracer $\dot{x} = f(x)$	équation $\dot{x} = f(x)$
Stabilité	intersection(s) avec l'axe x	résoudre équation : $f(x) = 0 \rightarrow x^* = \dots$
	tracer le champ de vecteurs	étudier le signe de la dérivée première
	$\dot{x} > 0 : \rightarrow$	(i) calcul de $f'(x)$
	$\dot{x} < 0 : \leftarrow$	(ii) remplacer x par $x^* : f'(x^*)$
<i>stable</i>	$\rightarrow \bullet \leftarrow$	$f'(x^*) < 0$ (pente négative)
<i>instable</i>	$\leftarrow \circ \rightarrow$	$f'(x^*) > 0$ (pente positive)

2 Exercices résolus au tableau

Exercice 1 = Exemple 2.2.3 [STR]

Pour l'équation suivante : $\dot{x} = x - \cos(x)$

Dessiner le champ de vecteurs et indiquer la stabilité de chaque point fixe.



Schéma de résolution : analyse de système 1D non-linéaire décomposé en deux sous-fonctions | Stabilité 1D approche graphique

Lorsque l'expression est un peu plus compliquée à dessiner, on peut écrire l'équation $\dot{x} = f_1(x) - f_2(x)$. Les points fixes s'obtiennent alors en calculant $f_1(x) - f_2(x) = 0$, autrement dit en déterminant les intersections des deux fonctions. La dérivée/ La vitesse \dot{x} sera positive si $f_1(x)$ est supérieure à $f_2(x)$. Graphiquement, cela signifie que $f_1(x)$ est "au-dessus" de $f_2(x)$.

3 Exercices à faire

Exercice 2 = Exemple 2.2.1 [STR]

Le système est décrit par l'équation suivante :

$$\dot{x} = x^2 - 1$$

- 1- Dessiner \dot{x} en fonction de x .
- 2- Calculer les points fixes.
- 3- Dessiner le champ de vecteurs.
- 4- Identifier la stabilité des différents points fixes graphiquement.



Schéma de résolution : analyse de système non linéaire 1D

1- Ne pas hésiter à réaliser une étude de fonction de $x^2 - 1$. Calcul des zéros, croissance, courbure pour facilement dessiner la fonction.

2- Points fixes

- définition : $\dot{x} = 0$
- résoudre : ...

3- Stabilité graphique (étude globale) :

- définition :

$\dot{x} > 0$: champ de vecteur \rightarrow

$\dot{x} < 0$: champ de vecteur \leftarrow

4- Stabilité mathématique (étude locale) :

- calcul de la dérivée : $f'(x)$
- remplacer x dans $f'(x)$ par l'expression des différents points fixes x_i^* : $f'(x_i^*)$
- donner la stabilité en fonction du signe de la dérivée $f'(x_i^*)$:

$$\begin{aligned} f'(x_i^*) > 0 & \text{ point fixe instable} \\ f'(x_i^*) < 0 & \text{ point fixe stable} \end{aligned}$$

Exercice 3 = Paragraphe 2.3 Croissance de la population [p.21-STR]

La croissance de la population d'organismes peut être simplement modélisée par l'équation suivante :

$$\dot{N} = rN\left(1 - \frac{N}{K}\right),$$

où $N(t)$ est la population au temps t et r est le taux de croissance de la population. Le modèle tient compte d'un certain facteur K appelé "carrying capacity" qui correspond à une croissance négative (*i.e.* lorsque le taux de décès est supérieur au taux de natalité). ($K > 0$ et $r > 0$)

Énoncé :

- 1- Dessiner approximativement \dot{N} en fonction de N (et/ou utiliser Matlab/Python/etc.) - Remarque : la population ne peut pas être négative.
- 2- Calculer mathématiquement les points fixes.
- 3- Déterminer graphiquement la stabilité du(des) point(s) fixe(s).
- 4- Déterminer mathématiquement la stabilité de chacun.

Schéma de résolution : analyse de système non-linéaire 1D avec des paramètres fixes

N'hésitez pas à noter l'équation gouvernant la dynamique du système et différencier les signaux et les constantes.

1- ...

2- Points fixes

- déf : $\dot{N} = 0$
- résoudre : ...

3- Stabilité graphique (étude globale) :

- déf :

$$\dot{N} > 0 \rightarrow$$

$$\dot{N} < 0 \leftarrow$$

4- Stabilité mathématique (étude locale) :

- calcul de la dérivée : $f'(N)$
- remplacer N dans $f'(N)$ par l'expression des différents points fixes $f'(N_i^*)$
- donner la stabilité en fonction du signe de $f'(N_i^*)$:

$$f'(N_i^*) > 0 \quad \text{point fixe instable}$$

$$f'(N_i^*) < 0 \quad \text{point fixe stable}$$



Exercice 4 = Exemple 3.1.2 [STR]

Le système est décrit par l'équation suivante :

$$\dot{x} = r - x - e^{-x}.$$

Étudier la dynamique du système pour les différents valeurs possibles de l'entrée r (*i.e.* dessiner \dot{x} en fonction de x dans les différentes configurations possibles gouvernées par r et donner la stabilité des points fixes s'ils existent).



Schéma de résolution : analyse de système non-linéaire 1D et paramétrique

- 1- Déterminer les points fixes graphiquement pour différentes configurations dictées par r . Indice : s'inspirer de l'Exercice TP1 | n*1 [STR]
- 2- Dessiner le champ de vecteurs
- 3- Étude de stabilité (graphique uniquement)

4 Pour s'exercer

Exercice 5 = Exercice 2.3.2 [p.39-STR] "Autocatalysis"

La dynamique du système est gouvernée par l'équation suivante :

$$\dot{x} = k_1 ax - k_{-1} x^2$$

k_1 et k_{-1} sont des constantes positives. Énoncé :

- 1- Déterminer les points fixes graphiquement et analytiquement
- 2- Dessiner le champ de vecteurs
- 3- Déterminer la stabilité des points fixes

en discutant les différentes valeurs possibles de l'entrée a (avec $a \geq 0$).

1 Concept

1.1 Introduction aux systèmes non-linéaires à deux dimensions

On peut également étudier des systèmes dynamiques décrits par plusieurs variables. La forme générale pour un système (fermé) à deux dimensions est donnée par :

$$\begin{cases} \dot{x}_1 &= f_1(x_1, x_2) \\ \dot{x}_2 &= f_2(x_1, x_2). \end{cases}$$

Exemple 1

Pour aborder ce genre de systèmes d'équations différentielles, on démarre de l'exemple classique d'un système masse-ressort (voir Figure 3) défini par l'équation différentielle :

$$m\ddot{x} + kx = 0$$

où m est la masse, k est la constante de raideur et x est le déplacement de cette masse. Même si cette équation est facile à résoudre analytiquement, elle va servir d'illustration pour comprendre l'étude de systèmes plus complexes et non-linéaires par la suite.

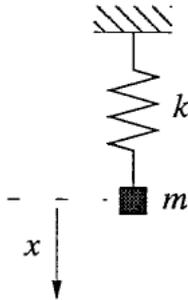


FIGURE 3 – Système masse-ressort [Figure 5.1.1-STR]

On peut décomposer cette équation différentielle d'ordre deux en deux équations différentielles d'ordre 1 en faisant intervenir la vitesse v :

$$\begin{cases} \dot{x} &= v \\ \dot{v} &= \frac{-k}{m}x. \end{cases}$$

Pour alléger les notations, le ratio k/m sera noté ω^2 .

Ce système de deux équations assigne un vecteur $(\dot{x}, \dot{v}) = (v, -\omega^2 x)$ à chaque point (x, v) et, par conséquent, représente un *champ de vecteurs* dans le plan (x, v) . Ce plan s'appelle le *plan de phase*.

On va donc essayer de reproduire le même type d'étude graphique que celle faite pour un système à 1D mais avec deux variables. Les points fixes (x^*, v^*) s'obtiennent lorsque simultanément

$$\begin{cases} \dot{x} &= 0 \\ \dot{v} &= 0. \end{cases}$$

Intuitivement, la masse ayant une vitesse et une accélération nulle, elle est donc au repos.

Pour dessiner le champ de vecteurs, par analogie au système à 1D, il faudrait dessiner une flèche représentant \dot{x} qui pointe vers la droite (resp. gauche) lorsque que cette dérivée est positive (resp. négative),

mais également une flèche représentant \dot{v} qui pointe vers le haut (resp. le bas) lorsque cette dérivée est positive (resp. négative). Il faudrait ainsi évaluer les paires (\dot{x}, \dot{v}) en chaque point du plan (x, v) , et dessiner un vecteur horizontal (resp. vertical) représentant \dot{x} (resp. \dot{v}) dont la longueur est obtenue par la résolution numérique des équations donnant (\dot{x}, \dot{v}) en fonction de (x, v) (et ce en chaque point (x, v)).

Cependant, remplir le plan de phase de tous ces vecteurs est très chronophage et rendrait la lecture du graphique illisible. On dessinera donc uniquement la résultante des deux vecteurs pour certains points du plan.

Dans l'exemple du système masse-ressort, lorsque $v = 0$ (càd, dans le plan de phase, sur l'axe- x), $(\dot{x}, \dot{v}) = (0, -\omega^2 x)$, le vecteur est donc uniquement vertical et de longueur $-\omega^2 x$. Plus x augmente, plus la longueur augmente. Le signe "-" signifie que le vecteur pointera vers le bas pour des x positifs et vers le haut pour des x négatifs. De même, lorsque $x = 0$ (càd sur l'axe- v), $(\dot{x}, \dot{v}) = (v, 0)$. Pour le reste du plan de phase, les composantes des vecteurs sont données par $(v, -\omega^2 x)$ spécifié au point considéré. Le champ de vecteurs est illustré Figure 4. On peut déduire l'entièreté du champ de vecteurs comme illustré Figure 5.

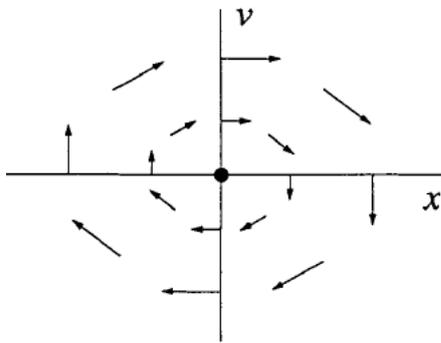


FIGURE 4 – Champ de vecteurs dessiné en quelques points [Figure 5.1.2-STR]

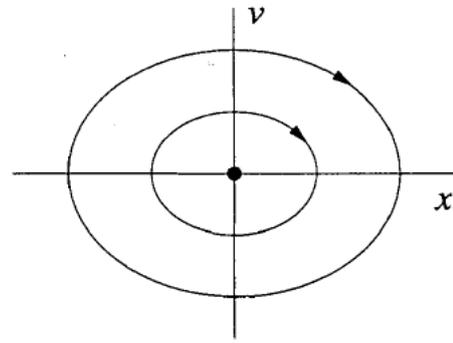


FIGURE 5 – Plan de phase [Figure 5.1.3-STR]

Le système masse-ressort est composé d'équations différentielles linéaires. Cependant, la même méthode peut être utilisée pour étudier un système d'équations différentielles non-linéaires.

Exemple 2

Considérons le système décrit par les équations suivantes [Exemple 6.1.1,p.147-STR] :

$$\begin{cases} \dot{x} &= x + e^{-y} \\ \dot{y} &= -y. \end{cases}$$

On peut dessiner les courbes $\dot{x} = 0$ et $\dot{y} = 0$. Il s'agit donc de tracer $f_1(x, y) = x + e^{-y} = 0$ et $f_2(x, y) = -y = 0$ dans le plan (x, y) . Ces courbes s'appellent *nullclines* ♡. Lorsque les nullclines se croisent, on a simultanément $\dot{x} = 0$ et $\dot{y} = 0$, ce qui, *graphiquement*, donne la position des points fixes. *Mathématiquement*, les points fixes s'obtiennent en résolvant simultanément $\dot{x} = 0$ et $\dot{y} = 0$. Dans l'exemple considéré, le seul point fixe (x^*, y^*) est égal à $(-1, 0)$.

Sur la nullcline- x , définie par $\dot{x} = 0$, on peut facilement tracer le champ de vecteurs. En effet, la flèche sera uniquement verticale (le flux horizontal est bien nul par définition de la nullcline- x). Son orientation et sa longueur seront déterminées pour différentes valeurs de x et y . De manière analogue, sur la nullcline- y , définie par $\dot{y} = 0$, on peut facilement tracer le champ de vecteurs car la flèche sera uniquement horizontale (le flux vertical est bien nul). La construction du champ de vecteurs est illustrée Figure 6.

Ensuite, on dessine le champ de vecteurs pour différents points du plan en résolvant numériquement les équations différentielles en ces points. Grâce à cette représentation graphique, on comprend la dynamique du système dans son ensemble (voir le plan de phase Figure 7).

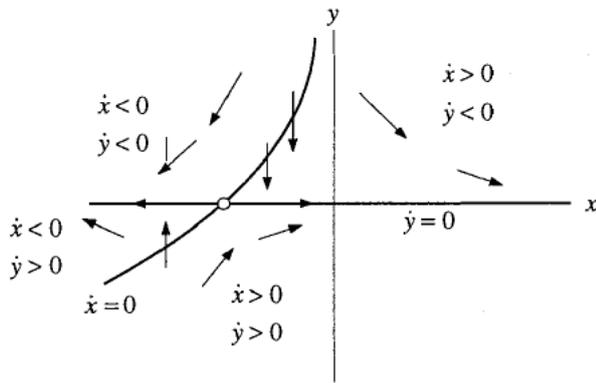


FIGURE 6 – Construction du champ de vecteurs [Figure 6.1.3-STR]

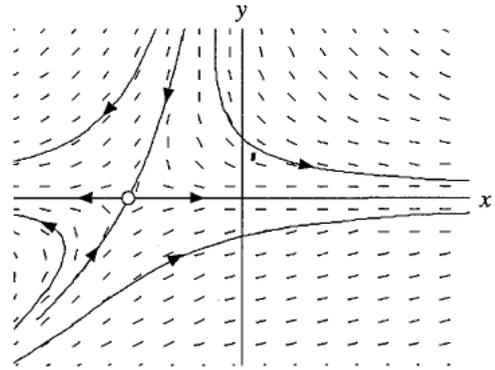


FIGURE 7 – Plan de phase complet [Figure 6.1.4-STR]

♡ *Comment calculer les flèches ?*

Les flèches indiquent la vitesse d'une "particule" en un point du plan. Plus la flèche est grande, plus la vitesse est grande. Ensuite, sa direction permet de savoir vers où la particule va bouger au temps suivant. Pour calculer la flèche pour le point de coordonnées (x_1, y_1) , il faut remplacer dans les équations du système les valeurs numériques connues (*i.e.* les coordonnées) :

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_1 + e^{-y_1} \\ \dot{y}_1 = -y_1. \end{cases}$$

On obtient ainsi une valeur pour \dot{x}_1 qui indique la vitesse horizontale en ce point. Si la valeur est positive, la particule se déplace vers la droite. Si la valeur est négative, la particule se déplace vers la gauche. La valeur de \dot{y}_1 indique la vitesse verticale en ce point. Si la valeur est positive, la particule se déplace vers la haut. Si la valeur est négative, la particule se déplace vers le bas. Pour avoir la flèche résultante qui définit le vecteur vitesse, il suffit de calculer la résultante *i.e.* la somme des deux vecteurs. L'amplitude donne bien la vitesse de la particule et la direction indique bien vers où la particule se déplace.

1.2 Linéarisation d'un système à 2D autour des points fixes

La section précédente permet sur base d'une étude graphique de déterminer les points fixes et leur stabilité. On souhaiterait développer une mesure plus *quantitative* de la stabilité sans devoir passer à chaque fois par le dessin du champ de vecteurs.

♡ Par analogie au système à 1D, on va étendre la technique de **linéarisation** afin d'*approximer* le plan de phase et le champ de vecteurs *aux alentours des points fixes*.

Considérons le système à 2D⁵ :

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x, y) \\ \dot{y} = g(x, y). \end{cases} \quad (1)$$

Les points fixes (x^*, y^*) sont définis en résolvant $\dot{x} = \dot{y} = 0$ simultanément. Dès lors

$$\begin{cases} f(x^*, y^*) = 0 \\ g(x^*, y^*) = 0. \end{cases}$$

On note u et v les petites perturbations selon les deux directions (horizontale et verticale), depuis le point fixe, telles que $x = x^* + u$ et $y = y^* + v$. Pour étudier la stabilité en ce point, on veut déterminer

5. On utilise (x_1, x_2) ou (x, y) pour insister sur le fait que le nom des variables n'est pas important.

ce qu'il se passe lorsque le système, se trouvant initialement au point fixe, est faiblement perturbé : va-t-il retourner en ce point ou va-t-il s'en éloigner ? Autrement dit, est-ce que la perturbation diminue (tend vers 0) ou grandit (explose) ?

On peut reproduire le développement appliqué au système à 1D mais cette fois-ci pour les deux variables u et v et les deux fonctions f et g .

La première équation différentielle du système (1) devient :

$$\dot{x} = \frac{d(x^* + u)}{dt} = \frac{dx^*}{dt} + \frac{du}{dt} = \dot{u} = f(x, y).$$

On développe le dernier terme :

$$\begin{aligned} f(x, y) &= f(x^* + u, y^* + v) && \text{substitution} \\ &= f(x^*, y^*) + u \frac{\partial f(x^*, y^*)}{\partial x} + v \frac{\partial f(x^*, y^*)}{\partial y} + \mathcal{O}(u^2, v^2, uv) && \text{Taylor} \\ &= u \frac{\partial f(x^*, y^*)}{\partial x} + v \frac{\partial f(x^*, y^*)}{\partial y} + \text{termes quadratiques.} && \text{définition du point fixe} \end{aligned}$$

De même pour la deuxième équation du système :

$$\dot{y} = \dot{y}^* + \dot{v} = \dot{v} = g(x, y),$$

et

$$g(x, y) = u \frac{\partial g(x^*, y^*)}{\partial x} + v \frac{\partial g(x^*, y^*)}{\partial y} + \text{termes quadratiques.}$$

Remarque : pour un système à 1D, la petite perturbation était notée η et pour un système à 2D elle est notée u (resp. v) pour la première (resp. deuxième) variable.

Le système de deux équations différentielles non-linéaires défini par (1) devient :

$$\begin{cases} \dot{u} = u \frac{\partial f(x^*, y^*)}{\partial x} + v \frac{\partial f(x^*, y^*)}{\partial y} + \text{termes quadratiques} \\ \dot{v} = u \frac{\partial g(x^*, y^*)}{\partial x} + v \frac{\partial g(x^*, y^*)}{\partial y} + \text{termes quadratiques.} \end{cases} \quad (2)$$

Et matriciellement, cela peut s'écrire :

$$\begin{pmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\partial f(x^*, y^*)}{\partial x} & \frac{\partial f(x^*, y^*)}{\partial y} \\ \frac{\partial g(x^*, y^*)}{\partial x} & \frac{\partial g(x^*, y^*)}{\partial y} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} + \text{termes quadratiques.}$$

On définit

$$A = \begin{pmatrix} \frac{\partial f}{\partial x} & \frac{\partial f}{\partial y} \\ \frac{\partial g}{\partial x} & \frac{\partial g}{\partial y} \end{pmatrix} \Big|_{(x^*, y^*)}$$

comme étant la *matrice jacobienne* \heartsuit évaluée au point fixe. Il s'agit de l'analogie pour le système 1D de la dérivée de $f(x)$ évaluée au point fixe $f'(x^*)$. L'expression plus compliquée vient de l'apparition de la deuxième variable et de la deuxième fonction g . Le déterminant de cette matrice est appelé le *jacobien*.

En supposant que les termes quadratiques sont négligeables, le système de deux équations différentielles en x et y est linéarisé en u et v aux alentours de (x^*, y^*) et on se retrouve avec l'étude d'un système linéaire à 2D noté :

$$\begin{pmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \end{pmatrix} = A \begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} \quad (3)$$

où u et v représentent les deux variables *locales* \heartsuit (du système linéarisé) associées à x et y .

1.3 ♡ Rappel Algèbre Linéaire : valeurs propres & vecteurs propres

Relire le chapitre "Algèbre linéaire : concepts à maîtriser".



- Révision des vecteurs propres, valeurs propres
- Résolution d'équations différentielles linéaires
 - premier ordre
 - deuxième ordre couplées/non couplées

1.4 Linéarisation et stabilité des points fixes

Pour un système à 1D, on a développé un outil plus quantitatif afin d'étudier facilement la stabilité du point fixe. Il suffit, en effet, d'analyser le signe de la dérivée première évaluée au point fixe.

Pour un système à 2D, la section 1.2 développe par analogie un outil similaire pour linéariser le système autour de son point fixe. On se retrouve ainsi avec l'étude de 4 dérivées premières, celles des fonctions f et g par rapport aux deux variables x et y , reprises sous la forme de la matrice jacobienne A .

Comment déterminer la stabilité des points fixes à l'aide de la matrice jacobienne ?

Reprenons l'équation (3), elle peut s'écrire sous la forme condensée :

$$\begin{pmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \end{pmatrix} = A \begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} \rightarrow \dot{\eta} = A\eta. \quad (4)$$

Cela ressemble à l'équation $\dot{\eta} = f'(x^*)\eta$ pour les systèmes à 1D qui nous donnait $\eta(t) = \eta(0)e^{f'(x^*)t}$ comme solution. La différence pour les systèmes à 2D, c'est que la matrice A couple les deux variables u et v ce qui rend l'étude de la stabilité légèrement moins immédiate que d'étudier le signe de la dérivée première ($f'(x^*)$).

Pour résoudre cette équation différentielle linéaire couplée (4) et connaître $u(t)$ et $v(t)$, on utilise les outils de découplage abordés dans le rappel (section 3) en faisant intervenir

$$A\nu = \lambda\nu$$

où ν correspond aux vecteurs propres et λ correspond aux valeurs propres.

Dès lors, on obtient comme solution :

$$\begin{pmatrix} u(t) \\ v(t) \end{pmatrix} = c_1 \begin{pmatrix} \nu_1^{(1)} \\ \nu_2^{(1)} \end{pmatrix} e^{\lambda_1 t} + c_2 \begin{pmatrix} \nu_1^{(2)} \\ \nu_2^{(2)} \end{pmatrix} e^{\lambda_2 t} \quad (5)$$

avec c_1, c_2 déterminés par les conditions initiales, les vecteurs propres

$$\nu^{(1)} = \begin{pmatrix} \nu_1^{(1)} \\ \nu_2^{(1)} \end{pmatrix}, \nu^{(2)} = \begin{pmatrix} \nu_1^{(2)} \\ \nu_2^{(2)} \end{pmatrix}$$

et leurs valeurs propres associées λ_1 et λ_2 .

Par analogie au système 1D ($\eta(t) = \eta(0)e^{f'(x^*)t}$), on peut voir que les valeurs propres vont dicter la stabilité du système. En effet, comme pour les systèmes 1D, pour un facteur positif de l'exponentielle, le système va s'éloigner du point fixe s'il subit une petite perturbation et inversement pour un facteur négatif. Dans un système 1D, ce facteur était donné par la dérivée première de f évaluée au point fixe. Dans le cas des systèmes à 2D, on va se référer également aux facteurs des exponentielles pour déterminer la stabilité. Cependant, il ne s'agit plus de la dérivée première mais bien des valeurs propres de la matrice jacobienne (évaluée au point fixe).

Il y a différents cas possibles de stabilité :

- Les deux valeurs propres ont leur partie réelle positive : $\mathcal{R}\{\lambda_1\} > 0, \mathcal{R}\{\lambda_2\} > 0$; le point fixe est instable.
- Les deux valeurs propres ont des parties réelles négatives : $\mathcal{R}\{\lambda_1\} < 0, \mathcal{R}\{\lambda_2\} < 0$; le point fixe est stable.
- Une des deux valeurs propres a une partie réelle positive et l'autre a une partie réelle négative; le point fixe est un "saddle node" (point de selle). Dans la direction associée à la valeur propre négative, il est attractif (la trajectoire converge vers le point, ce point paraît donc stable) et dans la direction associée à la valeur propre positive, il est répulsif (la trajectoire diverge du point, ce point paraît donc instable). Si l'on prend une perturbation de composantes quelconques, c'est-à-dire pas uniquement dirigée dans la direction stable (*stable manifold of the saddle*), elle ne tendra pas vers 0, ce qui rend le système instable en général.
- Les deux valeurs propres sont nulles; le point fixe est dit marginalement stable.

♡ Que se passe-t-il si les valeurs propres sont complexes? La stabilité ne s'étudie que par la partie réelle des valeurs propres. En effet, si on décompose l'exponentielle $e^{\lambda_1 t} = e^{(\mathcal{R}\{\lambda_1\} + j\mathcal{I}\{\lambda_1\})t} = e^{\mathcal{R}\{\lambda_1\}t} + e^{j\mathcal{I}\{\lambda_1\}t}$, la partie réelle indique la croissance/décroissance et son signe permet de directement conclure sur la stabilité. De son côté, la partie imaginaire peut s'écrire $e^{j\mathcal{I}\{\lambda_1\}t} = \cos(\lambda_1 t) + j \sin(\lambda_1 t)$ ce qui dévoile la présence d'oscillations. Ces notions seront approfondies dans les prochains TPs. A ce stade, la partie réelle des valeurs propres indique la convergence/stabilité des points fixes et la présence d'une partie imaginaire des valeurs propres indique que la trajectoire/solution va converger vers le point en tournant dans le plan de phase. On appelle cela une *spirale*.

Notions clés

Algèbre Linéaire

- Résoudre une équation différentielle simple avec et sans entrée
 - Comprendre l'utilisation des vecteurs propres et valeurs propres dans le découplage d'un système d'équations différentielles
 - Découpler un système d'équations différentielles et résoudre entièrement le système
- ♡♡♡ Comprendre le lien entre valeurs propres et stabilité du système

Notions à maîtriser et à savoir dessiner/obtenir

champ de vecteurs, plan de phase, points fixes, nullclines.

Étude de système 2D

Approche	Globale Graphique	Locale Mathématique
	Plan de phase	$\begin{cases} \dot{x} = f(x, y) \\ \dot{y} = g(x, y) \end{cases}$
	nullcline-x : $\dot{x} = 0 \rightarrow f(x, y) = 0$ nullcline-y : $\dot{y} = 0 \rightarrow g(x, y) = 0$	
Points fixes (PF)	intersection(s) des nullclines	résoudre : $\dot{x} = \dot{y} = 0 : (x^*, y^*) = \dots$
Stabilité	(i) calculer $\dot{x} = f(x, y)$ et $\dot{y} = g(x, y)$ $\dot{x} > 0 : \rightarrow$ $\dot{x} < 0 : \leftarrow$ $\dot{y} > 0 : \uparrow$ $\dot{y} < 0 : \downarrow$ (ii) tracer les résultantes	(i) calculer la matrice jacobienne J (ii) évaluer J en (x^*, y^*) (iii) calculer les VaP (iv) étudier le signe des VaP

Interprétation des signes des VaP

- Valeurs propres purement réelles
 - $\lambda_1 > 0, \lambda_2 > 0$: point instable
 - $\lambda_1 < 0, \lambda_2 < 0$: point stable

- $\lambda_1 > 0, \lambda_2 < 0$: point de selle
- $\lambda_1 < 0, \lambda_2 > 0$: point de selle
- Valeurs propres complexes
Il faut étudier le signe de la partie réelle des deux valeurs propres ($\mathcal{R}\{\lambda_1\}$? et $\mathcal{R}\{\lambda_2\}$?). La partie complexe indique la présence de spirale (spirale stable/spirale instable).
- Deux valeurs propres sont nulles et réelles, il s'agit d'un point marginalement stable.
- Deux valeurs propres purement complexes, il s'agit d'un centre (la trajectoire est alors une ellipse).

Pour mieux visualiser les différents cas de figure, vous pouvez visiter cette page (en anglais, crédits : UBC) qui reprend les "portraits de phase" des systèmes linéaires. Vous y verrez comment, graphiquement et de manière animée, les valeurs propres influent sur la dynamique d'un système 2D.

2 Exercices résolus au tableau

Exercice 1 = Lapin versus Mouton [Section 6.4, p.155-STR]

Les populations des lapins et des moutons sont respectivement notées $x(t)$ et $y(t)$ (avec $x, y \geq 0$). Leur dynamique est gouvernée par le système d'équations différentielles :

$$\begin{cases} \dot{x} = x(3 - x - 2y) \\ \dot{y} = y(2 - x - y). \end{cases}$$

Étudier l'évolution des deux populations sachant qu'elles sont liées et interpréter le résultat. Tracer la trajectoire en partant du point $(x, y) = (1, 0.5)$.

Schéma de résolution : analyse d'un système non-linéaire 2D

- 1- Calculer les points fixes (x^*, y^*) :
 $\dot{x} = 0$ et simultanément $\dot{y} = 0$:
- 2- Déterminer la matrice jacobienne
- 3- Évaluer la matrice jacobienne pour les différents points fixes et déterminer les valeurs propres
- 4- Déterminer la stabilité des différents points sur base des valeurs propres
- 5- Dessiner le champ de vecteurs. Pour cela, faites un tableau :



Point	x_i	y_i	\dot{x}_i	\dot{y}_i	vitesse
A	coord. en x	coord. en y	vitesse horizontale	vitesse verticale	résultante

Vous remplissez ce tableau des points que vous choisissez dans les différentes zones délimitées par les nullclines. Vous calculez numériquement les vitesses horizontale et verticale. Les signes de ces vitesses vous permettent de déterminer la direction de la vitesse résultante.

- 6- Pour tracer une trajectoire, il suffit de "relier" les flèches du champ de vecteurs entre elles. Cela permet de représenter le déplacement de la particule en commençant en un point du plan.!!! La trajectoire est toujours parallèle aux champs de vecteurs!!!

3 Exercices à faire

Exercice 2

Un système à deux variables est gouverné par l'équation suivante :

$$\begin{cases} \dot{x} = 10x - 5xy \\ \dot{y} = 3y + xy - 3y^2 \end{cases}$$

- 1- Calculer les points fixes.
- 2- Calculer la stabilité des points fixes.
- 3- Dessiner le plan de phase, les nullclines et le champ de vecteurs.

Exercice 3 = Exercice 6.3.6-STR

Un système à deux variables est gouverné par l'équation suivante :

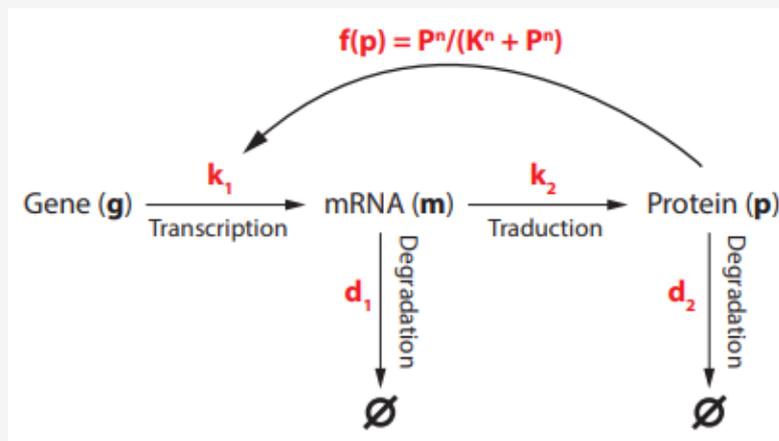
$$\begin{cases} \dot{x} = xy - 1 \\ \dot{y} = x - y^3. \end{cases}$$

- 1- Calculer les points fixes (valeurs réelles uniquement).
- 2- Calculer la stabilité des points fixes.
- 3- Dessiner le plan de phase, les nullclines et le champ de vecteurs.

4 Pour s'exercer

Exercice 4 = Janvier 2020 - Q1 (ii) → (vii)

La dynamique de la synthèse d'une protéine à partir de son gène peut être étudiée par modélisation mathématique d'un système entrée-sortie où l'entrée est la concentration en gène actif g et la sortie la concentration en protéine p (voir figure ci-dessous). Ce processus se déroule en 2 étapes. Le gène est d'abord transcrit en ARN messager (mRNA, de concentration m) selon un taux de transcription k_1 . Le mRNA est alors soit dégradé avec un taux de dégradation d_1 , soit traduit en protéine avec un taux de traduction k_2 . La protéine peut ensuite elle-même être dégradée/utilisée avec un taux de dégradation d_2 .



Nous considérons par ailleurs le cas où la synthèse des protéines est régulée par un mécanisme appelé autoactivation : la protéine synthétisée stimule la transcription de son gène spécifique. Cela peut être modélisé par un taux de transcription qui dépend de la concentration en protéine p via une fonction $f(p) = p^n / (K^n + p^n)$, où K et n sont des paramètres régulant la dynamique de l'autoactivation. En utilisant la loi d'action des masses, le schéma proposé dans la figure ci-dessus peut être transcrit en un système d'équations différentielles ordinaires :

$$\begin{aligned} \dot{m} &= gk_1 \frac{p^n}{K^n + p^n} - d_1 m \\ \dot{p} &= k_2 m - d_2 p \end{aligned}$$

où $gk_1 \frac{p^n}{K^n + p^n}$ modélise la dynamique de la transcription avec autoactivation, $d_1 m$ modélise la dégradation du mRNA, $k_2 m$ modélise la dynamique de la traduction, et $d_2 p$ modélise la dégradation de la protéine. Dans cet exercice, nous considérerons les valeurs suivantes pour les différents paramètres : $k_1 = k_2 = d_1 = d_2 = n = 1, K = 0.5$.

(ii) Le système est-il linéaire ? Temps-invariant ?

- (iii) Tracez un plan de phase qualitatif du système comprenant les isoclines et identifiez le(s) point(s) d'équilibre du système graphiquement. Placez un vecteur associé au champ de vecteurs et de longueur qualitative dans les différents quadrants délimités par les isoclines. Pour faciliter la construction du plan de phase, utilisez $g = 1$ et travaillez uniquement dans la région physiologique.
- (iv) Calculez analytiquement le(s) point(s) d'équilibre du système en fonction de g .
- (v) Déterminez analytiquement des critères de stabilité pour chaque point fixe en fonction de g .
- (vi) Identifiez le comportement du système global en fonction de ces critères (en terme d'évolution temporelle et de convergence de la quantité de protéines synthétisées pour différentes valeurs de g).
- (vii) Prouvez analytiquement que la convergence vers le(s) point(s) d'équilibre stable(s) sera toujours monotone.

Exercice 5 = Janvier 2021 - Q1

On considère le modèle dynamique suivant où μ est un paramètre réel.

$$\begin{aligned}\dot{x} &= x + y \\ \dot{y} &= 1 - x^2.\end{aligned}$$

- (i) Le système d'équations est-il linéaire ? Si non, identifiez toutes les non-linéarités.
- (ii) Calculez le(s) point(s) fixe(s) ainsi que leur type (noeuds stable/instable, spirale stable/instable, point de selle, etc.)
- (iii) Esquissez le plan de phase dans la zone $x \in [-3, 3], y \in [-3, 3]$ en traçant qualitativement les champs de vecteurs autour de chaque point fixe. Reliez-les champs de vecteurs ensemble par continuité.
- (iv) Comment le système évolue-t-il si on démarre au point $(x_0, y_0) = (0, 3)$? Tracez qualitativement la trajectoire correspondante dans le plan de phase.
- (v) Quel est l'effet de la modification $\dot{y} = 2(1 - x^2)$ sur la dynamique du système ? Justifiez graphiquement dans le plan de phase.

Exercice 6 = Janvier 2022 - Q1

On considère le modèle dynamique suivant avec μ comme paramètre réel :

$$\begin{aligned}\dot{x} &= \mu x - x^3 \\ \dot{y} &= -y.\end{aligned}$$

- (i) Le système d'équations est-il linéaire ? Si non, identifiez toutes les non-linéarités.
- (ii) Calculez le(s) point(s) fixe(s). Discutez en fonction du paramètre μ si nécessaire.
- (iii) Calculez la nature du(des) point(s) fixe(s) (noeud stable/instable, spirale stable/instable, point de selle, etc.). Discutez en fonction du paramètre μ si nécessaire.
- (iv) Donnez l'équation des nullclines.
- (v) Dessinez le(s) plan(s) de phase complet de votre système. Tracez autant de plans de phase que de situations possibles lors de votre discussion paramétrique. Indiquez le(s) point(s) fixe(s), leur stabilité, tracez les nullclines, dessinez le champ de vecteurs. Tracez suffisamment de vecteurs pour avoir une bonne idée de la dynamique de votre système ; au minimum un vecteur dans les différents quadrants délimités par les nullclines. Expliquez comment vous trouvez ces vecteurs et montrez vos calculs pour les obtenir.
- (vi) Comment le système évolue-t-il si on démarre au point $(x_0, y_0) = (0.5, 2)$ dans le plan de phase (ou les différents plans de phase en fonction du paramètre μ) ? Pour cela, tracez qualitativement la trajectoire correspondante dans le plan de phase.
- (vii) Quel est l'effet de la modification $\dot{y} = 2 - y$ sur la dynamique du système ? Expliquez en quelques phrases sans refaire l'étude complète du plan de phase.
- (viii) Dessinez un graphique x^* (l'abscisse de votre(vos) point(s) fixe(s)) en fonction de μ . Indiquez la nature du(des) point(s) fixe(s) d'abscisse x^* dans les différentes régions obtenues lors de votre discussion paramétrique. Vous pouvez utiliser une légende claire et expliquez brièvement la construction de

ce graphique.

(ix) En fonction du résultat de (iii) :

- Si vous avez obtenu un point fixe du type "noeud", comment faut-il modifier le système pour avoir un point fixe du type "spirale" ?
- Si vous avez obtenu un point fixe du type "spirale", comment faut-il modifier le système pour avoir un point fixe du type "noeud" ?

Exercice 7 = Aout 2021 - Q1

On considère le modèle dynamique suivant où les deux variables x et y sont définies entre -6 et 6 .

$$\dot{x} = \cos y$$

$$\dot{y} = x.$$

- Le système d'équations est-il linéaire ? Si non, identifiez toutes les non-linéarités.
- Calculez le(s) point(s) fixe(s) ainsi que leur type (noeuds stable/instable, spirale stable/instable, point de selle, etc.).
- Esquissez le plan de phase en traçant qualitativement les champs de vecteurs autour de chaque point fixe.
- Comment le système évolue-t-il si on démarre au point A $(x_0, y_0) = (-1, 4)$? Tracez qualitativement la trajectoire correspondante dans le plan de phase. Tracez l'évolution temporelle de la variable $x(t)$ et $y(t)$ sur un même graphique. Il faut donc tracer deux trajectoires dans le plan de phase et dessiner deux graphiques temporels, un associé au point A et un associé au point B avec les tracés de x et y dans les deux graphiques.
- Esquissez le bassin d'attraction d'un seul point fixe de votre choix. Pour cela, discutez des directions préférentielles et les vitesses associées à ces directions.
- Quel est l'effet de la modification $\dot{y} = -x$ sur la dynamique du système ? Justifiez graphiquement dans le plan de phase.

5 Sources supplémentaires

- Phase portrait of a system of ODEs (Matlab) :
<http://matlab.cheme.cmu.edu/2011/08/09/phase-portraits-of-a-system-of-odes/>
- Phase portrait of a system of ODEs (Python) :
<https://kitchingroup.cheme.cmu.edu/blog/2013/02/21/Phase-portraits-of-a-system-of-ODEs/>
- Exemple supplémentaire (Matlab) :
http://educ.jmu.edu/~strawbem/Phase_how_to.pdf
- The phaseportrait package (Python) :
<https://pypi.org/project/phaseportrait/>

1 Concept

1.1 Introduction

Le but du cours est d'utiliser des outils d'analyse des systèmes linéaires sans passer par la résolution complète des équations différentielles comme au cours d'analyse. Un système mécanique, électrique, biologique, chimique,... peut être vu comme une boîte noire :



Ainsi, on s'intéresse à la sortie du système, $y(t)$, lorsqu'une certaine entrée $u(t)$ est appliquée. Dès lors, on peut modéliser le système pour pouvoir uniquement agir sur l'entrée et en extraire la sortie.

Exemple mécanique : Considérons le chariot illustré à la Figure 8 avec $x(t)$ la position, k le coefficient

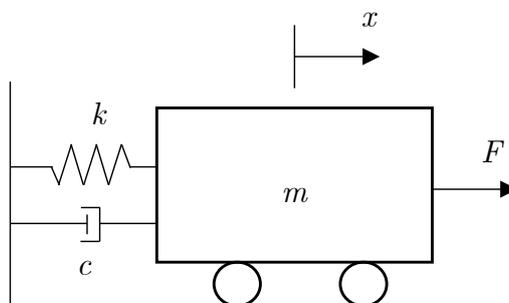


FIGURE 8 – Exemple de système mécanique

d'élasticité du ressort, c le coefficient d'amortissement visqueux et $F(t)$ la force appliquée.

La méthode vue au cours d'analyse consiste à résoudre l'équation différentielle obtenue en appliquant les lois de Newton. L'objet de ce cours est de se détacher de cette résolution analytique en utilisant de nouveaux outils.

Le chariot peut être considéré comme un système pour lequel on s'intéresse à la position du chariot lorsque l'on applique une certaine force. On peut modéliser le chariot comme une boîte noire :



La première étape de ce cours va donc être la construction de cette boîte noire ou, autrement dit, le *modèle d'état* du système. Un modèle d'état est une modélisation mathématique d'un système sur base des lois de la physique. Celui-ci se base sur la connaissance de l'*état* du système. "L'état d'un système peut être défini comme la plus petite quantité d'information caractérisée par un ensemble de variables qu'il faut connaître à tout instant t_0 pour pouvoir prédire de façon univoque le comportement de ce système à tout instant $t > t_0$, et pour toute entrée entre t_0 et t ."⁶ L'idée de la modélisation est de choisir un certain nombre de variables, qui sont les *variables d'état*, pour décrire le système. Ces variables sont ainsi regroupées dans un vecteur d'état : "un vecteur d'état est un ensemble minimal de variables d'état, c'est-à-dire de grandeurs temporelles, nécessaires et suffisantes pour déterminer l'évolution future d'un système quand on connaît les équations qui décrivent le fonctionnement du

⁶. On peut aussi visualiser l'état d'un système comme une quantité qui peut évoluer alors que l'entrée est fixe. Dans l'exemple mécanique, on peut par exemple dire que la position est un état car à force constante, elle peut évoluer.

système et les entrées de ce système".

Le modèle d'état permet alors de décrire totalement le système par deux équations (matricielles) :

1. La *loi de mise à jour* décrit la dynamique du système $\rightarrow \dot{x}(t) = f(x(t), u(t))$. Elle permet de déterminer l'état suivant d'un système, sur base de son état actuel et de l'entrée appliquée.
2. La *loi de sortie* décrit la sortie du système $\rightarrow y(t) = g(x(t), u(t))$. Elle permet d'étudier la sortie d'un système sur base de son état actuel et de l'entrée appliquée.

Ces deux fonctions permettent donc de représenter totalement un système dynamique :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) &= f(x(t), u(t)) \\ y(t) &= g(x(t), u(t)). \end{cases}$$

De plus, si le système est linéaire, les fonctions f et g sont linéaires et on peut réécrire les deux lois sous la forme suivante :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) &= Cx(t) + Du(t), \end{cases}$$

qui fait apparaître 4 matrices (A , B , C et D) qui seront utilisées dans la suite du cours.

Vocabulaire :

- x est appelé vecteur d'état du système, de dimension $n \rightarrow$ il y a donc n variables d'état.
- u est appelé vecteur d'entrée du système, de dimension $m \rightarrow$ il y a donc m entrées.
- y est appelé vecteur de sortie du système, de dimension $p \rightarrow$ il y a donc p sorties.

Le modèle d'état décrit bien le fonctionnement interne de la boîte noire. Les variables d'état (x) permettent de caractériser la dynamique du système et de comprendre plus facilement l'impact de l'entrée (u) sur la sortie (y).

Remarque :

Une représentation d'état n'est pas unique. En effet, en fonction du choix des variables d'état, les matrices A , B , C , D peuvent être différentes. On peut trouver une matrice T qui permet de passer d'un modèle d'état à un autre.

1.2 Le modèle d'état en pratique

Pour construire un modèle d'état en pratique, il est conseillé d'être méthodique en appliquant cette marche à suivre :

- 1- Signaux d'entrée : u . Identifier quels sont les signaux d'entrée et préciser leur domaine (\heartsuit ensemble de valeurs de la variable indépendante sur lequel ils sont définis) et leur image (\heartsuit ensemble des valeurs que le signal peut prendre sur l'ensemble du domaine de la variable indépendante).
- 2- Signaux de sortie : y . Identifier quels sont les signaux de sortie et préciser leurs domaines et leurs images.
- 3- Variables d'état : x . Identifier quelles sont les variables d'état choisies et préciser leurs domaines et leurs images.
- 4- Loi de sortie : $y = g(x, u)$. Loi qui donne l'évolution de(s) sortie(s) *uniquement* en fonction de $x(t)$ et de $u(t)$.
- 5- Loi de mise à jour : $\dot{x} = f(x, u)$. Loi qui donne l'évolution de l'état *uniquement* en fonction de $x(t)$ et de $u(t)$.

Pour résoudre les exercices, il faut tout d'abord identifier le modèle d'état en spécifiant les signaux d'entrée, de sortie, et les variables d'état.

Comment choisir les variables d'état ? Avec un peu d'intuition, il est possible de définir les variables d'état en repérant les "enregistreurs" d'information qui permettront de remplir notre "boîte noire", en mémorisant les contributions des signaux précédents, pour au final ne s'intéresser qu'à l'entrée et la sortie. Ils sont dans le cas de systèmes physiques les accumulateurs d'énergie :

- variables de vitesses pour l'énergie cinétique.
- variables de positions intervenant dans une énergie potentielle (gravité, longueur du ressort, ...).
- tensions des capacités et courants des inductances pour les circuits électriques.

D'un point de vue mathématique, on peut choisir les variables pour éviter d'avoir une dérivée de l'entrée ou de la sortie dans le modèle final.

Par ailleurs, on choisit (généralement) n variables d'état, où n est l'ordre de dérivation le plus élevé dans l'équation différentielle modélisant le système.

Ensuite, il suffit d'établir les lois de sortie et de mise à jour, en effectuant une *mise en équation* du système.

Notions clés

- Maitriser les notions de modèle d'état, signaux d'entrée, sortie, variable d'état
- Domaine : regarder la variable indépendante
- Image : regarder toutes les valeurs que peut prendre le signal
- Loi de mise à jour, loi de sortie
- Tracer un bloc diagramme (voir session d'exercices)
- Utiliser une variable auxiliaire pour transformer une équation entrée-sortie en une représentation d'état

2 Exercices résolus au tableau

Exercice 1 = Exercice 2.1 [TXB] (adapté)

Un pendule inversé est maintenu par un ressort horizontal de raideur k . La longueur de la barre inextensible du pendule est L . Le point de fixation ressort-barre est libre de se déplacer, sans frottements, le long de celle-ci afin de maintenir, en permanence, le ressort en position horizontale. La longueur naturelle du ressort, l_0 , est atteinte lorsque le pendule est en position verticale inverse ($\theta = 0$). La hauteur de fixation du ressort est a . Une masse ponctuelle m est fixée en bout de barre et est soumise à l'effet de la gravité g . De plus, l'articulation du pendule est soumise à un couple de frottement visqueux $b\dot{\theta}$ où b représente la constante de frottement, et à un couple externe u . On considère comme sortie la position angulaire du pendule θ et comme entrée le couple externe u . Décrivez le système par un modèle d'état basé sur la variable d'état $x = (\theta, \dot{\theta})$. Le schéma est donné ci-dessous.

Grâce aux lois de Newton pour les rotations, la dynamique du système est donnée par l'équation différentielle suivante :

$$mL^2\ddot{\theta} = u - b\dot{\theta} - ka^2 \tan(\theta) + mgL \sin(\theta).$$

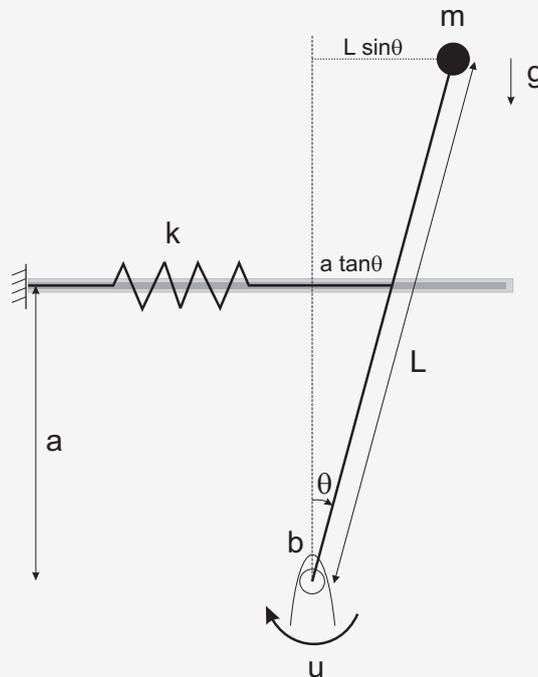


Schéma de résolution : établir un modèle d'état

1- Signal d'entrée :

- o signification : couple externe (information explicite de l'énoncé)
- o notation : $u(t)$
- o domaine : \mathbb{R}^+
- o image : \mathbb{R}

2- Signaux de sortie :

- o signification : position angulaire du pendule (information explicite de l'énoncé)
- o notation : $y(t) = \theta(t)$
- o domaine : \mathbb{R}^+
- o image : $[-\theta_{max}, \theta_{max}]$, $\theta_{max} = \arccos(\frac{a}{L})$
(en général : $[0, 2\pi]$ mais restriction physique à cause de la configuration du pendule et du ressort).

3- Variables d'état : $x(t) = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \theta \\ \dot{\theta} \end{pmatrix}$ (données explicitement dans l'énoncé) :

$$\mathbb{R}^+ \longrightarrow [-\theta_{max}, \theta_{max}] \times \mathbb{R}.$$

4- Loi de sortie : $y(t) = x_1(t)$.

5- Loi de mise à jour : On transforme l'équation différentielle gouvernant le système à l'aide des signaux d'entrée, de sortie et les variables d'état :

$$\begin{cases} \dot{x}_1(t) &= x_2(t) \\ \dot{x}_2(t) &= \frac{u(t)}{mL^2} - \frac{bx_2(t)}{mL^2} + \frac{g}{L} \sin(x_1(t)) - \frac{a^2k}{mL^2} \tan(x_1(t)) \end{cases}$$

Question supplémentaire : Est-ce que le système est linéaire ? temps-invariant ?

Exercice 2 = Exercice 4.1 [TXB] (adapté)

Soit un circuit électrique RLC série, dans lequel $u(t)$ (entrée) est la tension au générateur et $y(t)$ (sortie) est la tension aux bornes de la capacité.

La loi des mailles s'écrit ici

$$u(t) = v_L(t) + v_R(t) + v_C(t).$$

Les relations tension-courant aux bornes des composants électriques sont telles que :

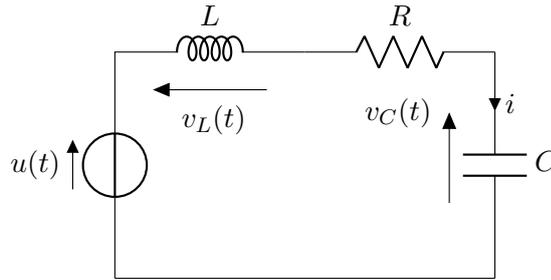
$$\begin{cases} v_R &= Ri \\ v_L &= L \frac{di}{dt} \\ i &= C \frac{dv_C}{dt}. \end{cases}$$

- Écrire l'équation entrée-sortie du système.
- Tracer un bloc-diagramme du système.
- Donner la représentation d'état correspondante (= matrices ABCD associées au système).



a) Schéma de résolution : équation entrée-sortie

- Dessin



- Données

- entrée :
- sortie :

- Équation entrée-sortie

$$\ddot{y} + \frac{R}{L}\dot{y} + \frac{1}{LC}y = \frac{u}{LC}$$

Au cours d'analyse, des outils ont été développés pour résoudre cette équation différentielle linéaire à coefficients constants. Dans le cadre du cours de système, nous allons développer d'autres outils sans devoir passer par la résolution analytique de l'équation.

b) Schéma de résolution : dessiner un bloc-diagramme à partir de l'équation entrée-sortie

- 1- Réécrire l'équation pour isoler la dérivée de plus haut ordre :

$$\ddot{y} = \frac{u}{LC} - \frac{R}{L}\dot{y} - \frac{1}{LC}y.$$



- 2- Dessiner les signaux d'entrée et de sortie (flèche qui rentre pour u et flèche qui sort pour y).
- 3- Ajouter autant de blocs intégrateurs qu'il y a de dérivées. Il n'y aura jamais de bloc de dérivation par définition des bloc-diagrammes.
- 4- Ajouter les coefficients et relier au signe somme avec le signe adéquat. Ainsi, au niveau du symbole sommatoire, tous les termes du membre de gauche de l'équation entrée-sortie s'additionnent.

c) Schéma de résolution : donner la représentation d'état à partir du bloc diagramme (Méthode 1)



- 1- On sait que le vecteur d'état est de dimension égale à la plus haute dérivée. De plus, les variables d'état peuvent être choisies comme étant les *sorties des blocs intégrateurs*.
- 2- loi de sortie
- 3- loi de mise à jour
- 4- Écrire le système sous forme de matrices ABCD.

Schéma de résolution : trouver la représentation d'état avec la méthode des variables auxiliaires (Méthode 2)

Cette méthode est utilisée préférentiellement quand l'entrée est également dérivée dans l'équation entrée-sortie donnée.

- But de la méthode :

Trouver des variables d'état lorsque l'on a uniquement une équation entrée-sortie, afin de construire un modèle d'état. Exemple :

$$a\ddot{y} + b\dot{y} + cy = \alpha\dot{u} + \beta u.$$

- Démarche : on définit v une variable auxiliaire.

A partir de l'équation entrée-sortie, on écrit deux équations :

$$\begin{cases} (\text{membre de gauche original où } y \text{ est remplacé par } v) = u \\ y = (\text{membre de droite original où } u \text{ est remplacé par } v). \end{cases}$$

Dans l'exemple algébrique ci-dessus :

$$\begin{cases} a\ddot{v} + b\dot{v} + cv = u \\ y = \alpha\dot{v} + \beta v. \end{cases}$$

On choisit alors le vecteur d'état (ou en inversant les composantes)

$$\begin{pmatrix} \dot{v} \\ v \end{pmatrix}.$$

Puis on exprime les lois de sortie et de mise à jour à l'aide des variables d'état, pour finalement obtenir la représentation en matrices ABCD.

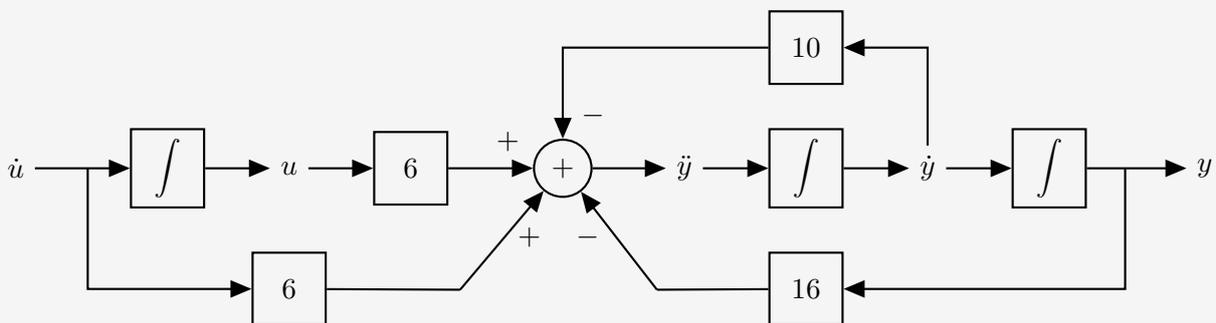


3 Exercices à faire

Exercice 3 = Aout 2019-Q2 [Online]

Adaptation de l'énoncé :

- Donner une équation entrée-sortie
- Donner un modèle d'état correspondant au bloc-diagramme suivant.



Exercice 4 = Exercice 2.7 [TXB] (adapté)

- Remarque : Exercice **fortement suggéré** car on repartira des réponses obtenues au prochain TP. -

Soit le système à deux réservoirs illustré par le schéma ci-dessous.

- Débit d'entrée extérieur (le même pour les deux réservoirs) : u

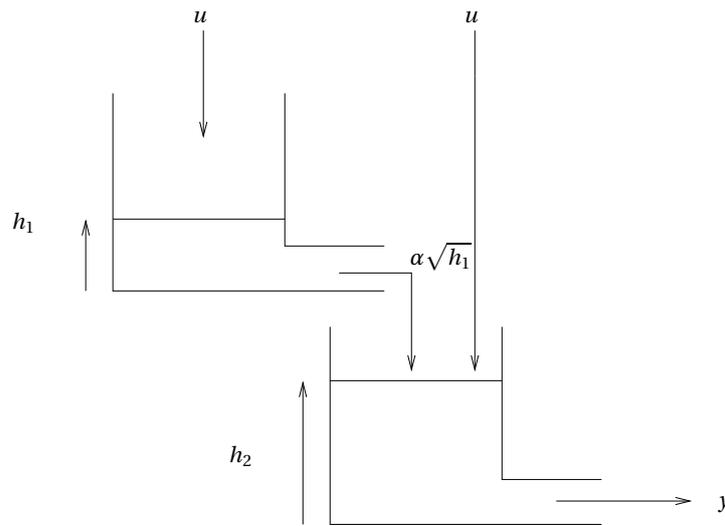
- Débit de sortie (du second réservoir) : y
- Bilan de masse dans un réservoir : $\gamma \dot{h} = q_{in} - q_{out}$ avec q_{in} le débit total d'entrée et q_{out} le débit total de sortie
- Débit de sortie d'un réservoir rempli à hauteur h : $\alpha\sqrt{h}$

On suppose que les deux réservoirs sont identiques ; α et γ sont deux paramètres qui déterminent les caractéristiques physiques des réservoirs.

On donne les équations régissant le comportement de chaque réservoir :

- réservoir 1 : $\gamma \dot{h}_1 = u - \alpha\sqrt{h_1}$
- réservoir 2 : $\gamma \dot{h}_2 = u + \alpha\sqrt{h_1} - \alpha\sqrt{h_2}$

Déduire un modèle d'état pour le système.



Questions supplémentaires :

- Est-ce que le système est LTI ?
- Que signifie LTI ? Pourquoi sommes-nous intéressé-es par les systèmes LTI ? Pourrions-nous dans ce cas écrire les matrices A , B , C et D sans développements supplémentaires ?

4 Pour s'exercer

Exercice 5 = Janvier 2020 - Q1 (i) (ii) → (vii)

Voir TP précédent

Exercice 6 = Janvier 2023 - Q2 (ii) et adapté

Le système causal est gouverné par l'équation suivante :

$$\tau \dot{y} + y = Ku(t)$$

où u est l'entrée, K est un gain positif, y est la sortie et τ est une constante de temps.

- Donner un modèle d'état du système.
- Tracer le bloc-diagramme associé à ce système.

Exercice 7 = Exercice 2 modifié de <https://jalelghabi.weebly.com>

Soit le système dynamique défini par son équation entrée-sortie suivante :

$$\ddot{y} - \dot{y} = 2\ddot{u} + \dot{u}$$

- (a) Donner un modèle d'état du système en utilisant 3 variables d'état.
- (b) Ce vecteur d'état à 3 variables est-il minimal ? Justifier/Expliquer. Si non, adapter le modèle d'état trouvé en (a) pour le rendre minimal.
- (c) Quid si on a $\dot{u} + 2u$ au lieu de $\ddot{u} + 2\dot{u}$ en utilisant toujours ce vecteur d'état à 3 variables ? Justifier/Expliquer.
- (d) Tracer le(s) bloc-diagramme(s) associé(s) à ce(s) système(s) minimal (minimaux) et préciser leur équation entrée-sortie.

1 Concept

Le TP précédent permet de décrire un problème réel sous forme d'un modèle d'état, exprimé à l'aide de ses signaux d'entrées, de sorties et ses variables d'état. La dynamique du système est donc décrite à l'aide de ses lois de sorties et de mise à jour.

Lors du TP1, les propriétés des systèmes ont été abordées et particulièrement la linéarité et l'invariance. Lorsqu'un système est linéaire, temps-invariant (LTI), il peut s'étudier à l'aide de différents outils qui vont être abordés tout au long du cours, tels que les matrices ABCD.

Après avoir établi le modèle d'état, il faut donc vérifier si le système est LTI :

- si oui, alors il peut être décrit à l'aide de ses matrices ABCD.
- si non, il faut le linéariser :
 - soit autour d'une solution quelconque ; vous obtiendrez bien un système linéaire mais ce n'est pas garanti qu'il sera temps-invariant.
 - soit autour d'un point stationnaire (= point fixe ou d'équilibre, *cfr.* TP2-TP3) ; vous obtiendrez bien un système LTI.

Étudier un système *autour* de ses points d'équilibre

La dynamique du système *global* est décrite par les signaux x, u, y telle que :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) &= f(x(t), u(t)) \\ y(t) &= g(x(t), u(t)). \end{cases}$$

Si le système est non-linéaire, on doit linéariser *autour des points fixes* afin de rendre les lois de mise à jour et de sortie linéaires. On n'étudie pas non plus le système dans son intégralité mais uniquement la dynamique autour de ses points d'équilibre, *i.e.* la dynamique du système *local* (linéarisé autour des points d'équilibre). Au début, on va donc écrire les lois linéarisées associées au système local à l'aide de signaux "locaux" $\delta x(t), \delta y(t), \delta u(t)$ (présentés précédemment comme des petites perturbations)⁷. Pour rappel ♡ : un *point fixe* = *point stationnaire* = *point d'équilibre* \mathbf{x}^* est tel que $\dot{\mathbf{x}}|_{\mathbf{x}^*} = \mathbf{0}$.

Comment linéariser ?

Il existe deux méthodes :

- Méthode 1 = méthode des petites perturbations
- Méthode 2 = méthode des dérivées (matrice jacobienne).

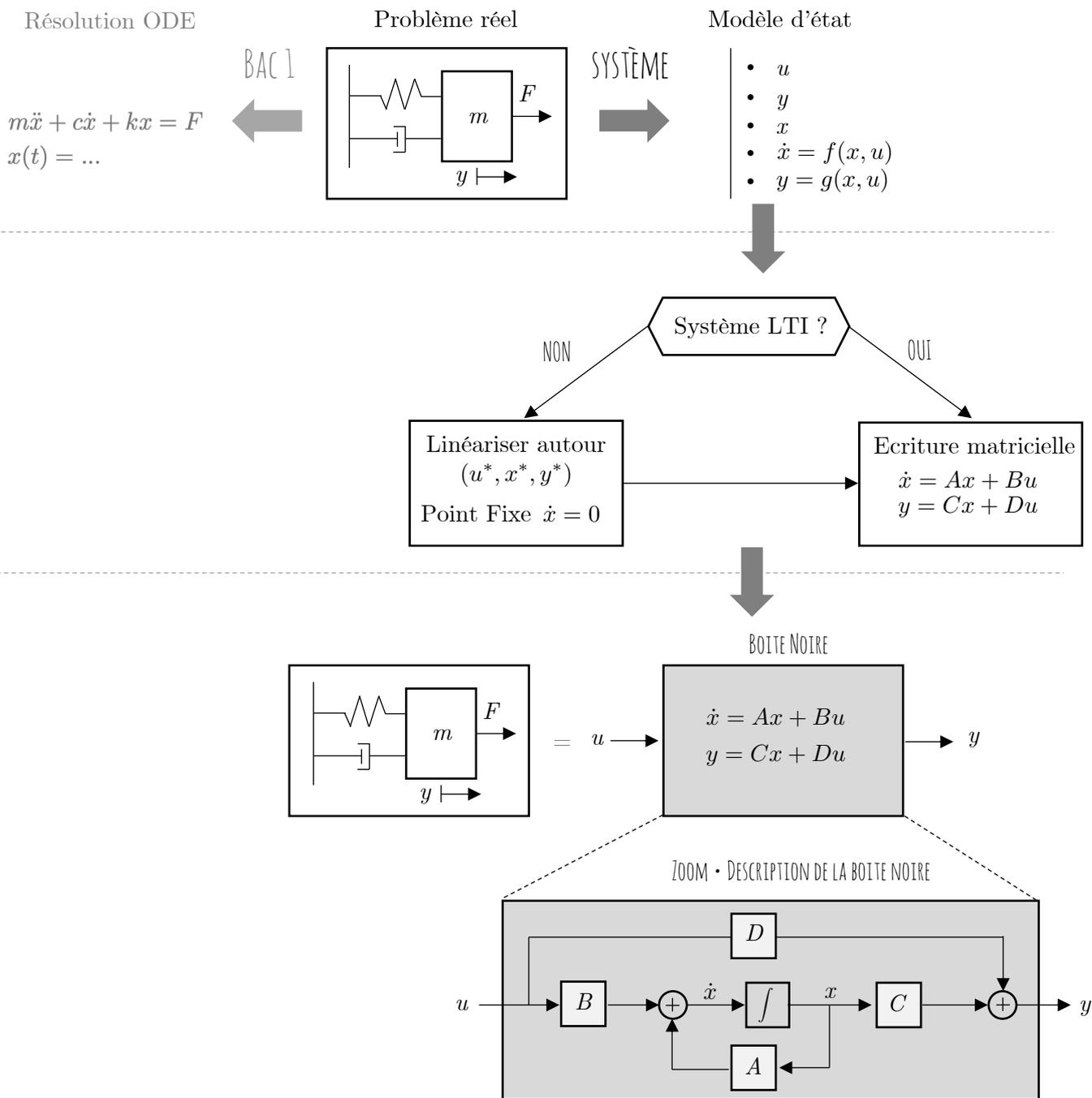
Les deux méthodes seront approfondies lors des exercices.

Notions clés

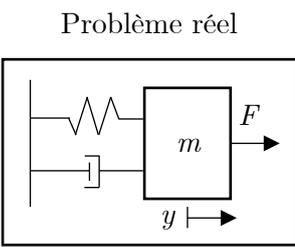
- Comprendre l'utilité de la représentation d'état
- Savoir linéariser
- La méthode des petites perturbations sera utilisée plutôt quand le système est décrit par son équation entrée-sortie. La méthode de la matrice jacobienne est plus facile lorsque l'on dispose des équations de mise à jour et de sortie.
- Construire un bloc diagramme

7. Ces notions avaient également été abordées lors du TP2 et du TP3.

Résumé graphique



Résolution ODE
 $m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F$
 $x(t) = \dots$



Modèle d'état

- u
- y
- x
- $\dot{x} = f(x, u)$
- $y = g(x, u)$

Système LTI ?

NON

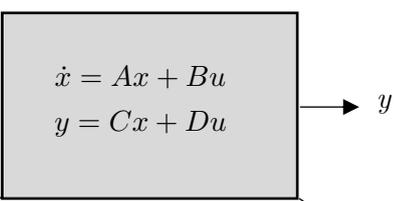
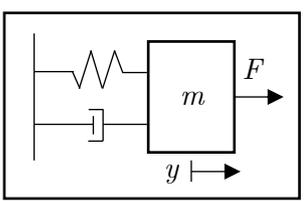
Linéariser autour
 (u^*, x^*, y^*)
 Point Fixe $\dot{x} = 0$

OUI

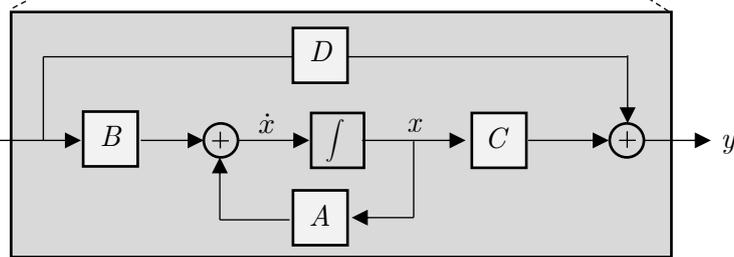
Ecriture matricielle

$\dot{x} = Ax + Bu$
 $y = Cx + Du$

BOITE NOIRE



ZOOM - DESCRIPTION DE LA BOITE NOIRE



- A est appelée matrice d'état du système, de dimension $n \times n$.
- B est appelée matrice de commande du système, de dimension $n \times m$.
- C est appelée matrice de sortie du système, de dimension $p \times n$.
- D est appelée matrice de transmission directe du système, de dimension $p \times m$.

2 Exercices résolus au tableau

Exercice 1 = Exercice 4.26 (suite du 2.7) [TXB]

Soit le système à deux réservoirs de l'exercice 2.7 (au TP précédent).

- Calculer le point de fonctionnement stationnaire (h_1^*, h_2^*) en fonction d'un débit d'entrée constant u^* .
- Linéariser le modèle d'état autour de ce point de fonctionnement.

Questions préliminaires

- Est-ce que le système est LTI?
- Que signifie LTI? Pourquoi sommes-nous intéressé-e-s par les systèmes LTI?

a) Points de fonctionnement stationnaire = Points fixes



Trouver les points de fonctionnement stationnaire signifie trouver les points $(x_1^*, x_2^*) = (h_1^*, h_2^*)$ ici, en fonction d'un débit constant u^* , qui vérifient la définition d'un point stationnaire.

Par définition ♡, un *point stationnaire* est tel que $\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{0}$.

b) Linéarisation du modèle d'état autour des points de fonctionnement

• Méthode 1



Schéma de résolution : linéariser selon la méthode des petites perturbations

Dans chaque loi de mise à jour et chaque loi de sortie, il suffit de répéter les 4 étapes suivantes :

- Remplacer (u, x, y) par $(u^* + \delta u, x^* + \delta x, y^* + \delta y)$
- Développer les termes non-linéaires par Mac Laurin en fonction de $\delta u, \delta x, \delta y$:
 $f(\delta x) = f(0) + f'(0)\delta x$
- Négliger les termes d'ordre ≥ 2 en $\delta u, \delta x, \delta y$
- Compenser les termes indépendants

• Méthode 2 :

Lors du TP3, on a vu comment linéariser un système de deux équations non-linéaires. Pour rappel, il suffit de calculer les points d'équilibre, de calculer la matrice jacobienne et de l'évaluer aux points d'équilibre.

Ici, le système considéré est décrit à l'aide des lois de mise à jour et des lois de sortie. Il suffit d'extrapoler la méthode de la matrice jacobienne à ces lois.

Pour la loi de sortie, $g(x_1, x_2, u)$, il faut donc calculer sa dérivée par rapport à x_1 , sa dérivée par rapport à x_2 et sa dérivée par rapport à u . Il faut ensuite remplacer les signaux x_1, x_2, u par la valeur des points fixes x_1^*, x_2^*, u^* . On répète l'opération pour les lois de mise à jour.

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x, u) \\ y = g(x, u) \end{cases} \rightarrow \boxed{\text{linéarisation autour du point fixe}} \rightarrow \begin{cases} \delta \dot{x} = A\delta x + B\delta u \\ \delta y = C\delta x + D\delta u \end{cases}$$

Schéma de résolution : linéariser un système selon la méthode des dérivées
 Résoudre les dérivées suivantes évaluées aux points fixes pour obtenir les matrices ABCD.



$$\begin{aligned}
 A &= \begin{pmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1}{\partial x_2} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2}{\partial x_2} \end{pmatrix} \Big|_{(x_1^*, x_2^*, u^*)} \\
 B &= \begin{pmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial u} \\ \frac{\partial f_2}{\partial u} \end{pmatrix} \Big|_{(x_1^*, x_2^*, u^*)} \\
 C &= \begin{pmatrix} \frac{\partial g}{\partial x_1} & \frac{\partial g}{\partial x_2} \end{pmatrix} \Big|_{(x_1^*, x_2^*, u^*)} \\
 D &= \left(\frac{\partial g}{\partial u} \right) \Big|_{(x_1^*, x_2^*, u^*)}
 \end{aligned}$$

3 Exercices à faire

Exercice 2 = Exercice 4.11 [TXB]

Soit le système décrit par l'équation différentielle

$$y + (\dot{y} - 2)u = u^2 \quad (6)$$

a) Linéarisez le système autour de la solution

$$\begin{cases} y^*(t) = 2t + 1 \\ u^*(t) = \sqrt{2t + 1} \end{cases}$$

- b) Pourquoi ce système linéarisé n'est-il pas analysable par l'ensemble des outils vus dans le cours de systèmes ?
- c) Choisissez une autre solution (u^*, y^*) du système non-linéaire telle que le système linéarisé dans le voisinage de cette solution soit un système LTI.

Question préliminaire : d'où vient la non-linéarité de cette équation ?

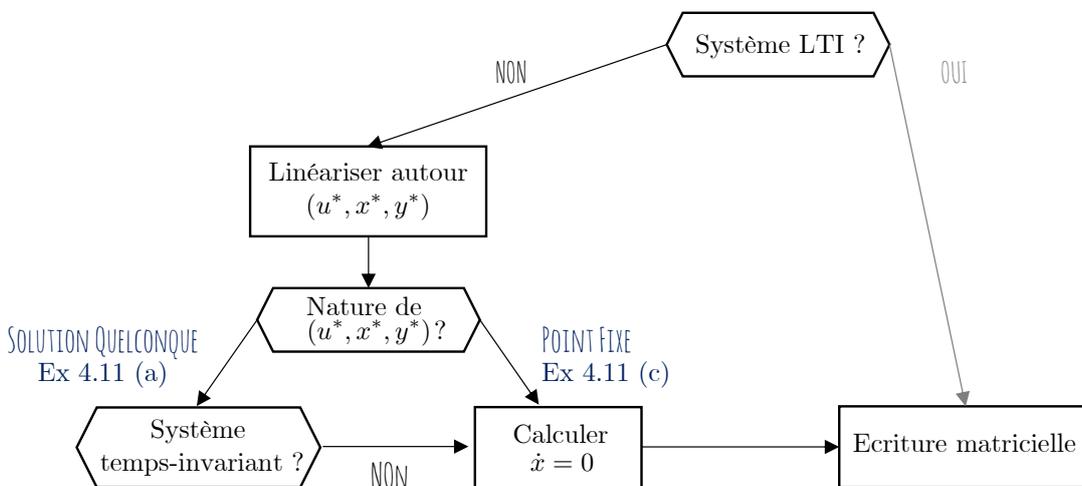


Schéma de résolution : linéariser un système autour d'une solution imposée

- a) On donne la solution autour de laquelle on veut linéariser. Les points autour desquels on veut linéariser le système sont donnés. Il suffit donc de choisir sa méthode de linéarisation. Dans cet exercice, le système est décrit par l'équation entrée-sortie. La méthode des petites perturbations s'applique très facilement car il suffit de remplacer : u par $u^* + \delta u$ et y par $y^* + \delta y$. Si on choisit la méthode des dérivées, il faut d'abord transformer l'équation entrée-sortie en modèle d'état à l'aide de variable x et ensuite calculer toutes les dérivées.
- b) Le système est-il linéaire ? Oui/Non ? Pourquoi ?
Le système est-il temps-invariant ? Oui/Non ? Pourquoi ?
- c) Pour que le système soit *LTI*, il faut linéariser autour d'un point **stationnaire**
 $\implies \dot{x} = \dot{y} = \dot{u} = 0$



- Première étape : trouver le point stationnaire :

$$y^* + (0 - 2)u^* = u^{*2} \iff y^* = u^{*2} + 2u^*$$

- Deuxième étape : linéarisation
Le système est-il linéaire ? Oui/Non ? Pourquoi ?

Le système est-il temps-invariant ? Oui/Non ? Pourquoi ?

4 Pour s'exercer

Exercice 3 = Exercice 4.20 (suite du 2.1) [TXB]

Soit le système de pendule inversé modélisé dans l'exercice 2.1. Pour rappel, on a

$$\ddot{\theta} = \frac{u}{mL^2} - \frac{b\dot{\theta}}{mL^2} - \frac{ka^2}{mL^2} \tan \theta + \frac{g}{L} \sin \theta$$

avec $m, L, a, k \geq 0$ et le modèle d'état est

$$\begin{pmatrix} \dot{\theta} \\ \ddot{\theta} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_2 \\ \frac{u}{mL^2} - \frac{b}{mL^2}x_2 - \frac{ka^2}{mL^2} \tan x_1 + \frac{g}{L} \sin x_1 \end{pmatrix}$$

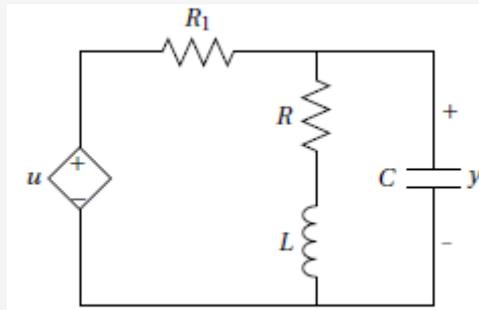
$y = x_1$

- Pour $u = 0$, déterminez une condition sur les paramètres pour que le système possède trois points d'équilibre.
- Étudiez la stabilité des trois points d'équilibre sur base d'un raisonnement physique.
- Linéarisez le modèle d'état autour d'un point d'équilibre stable du système.

Questions d'examens

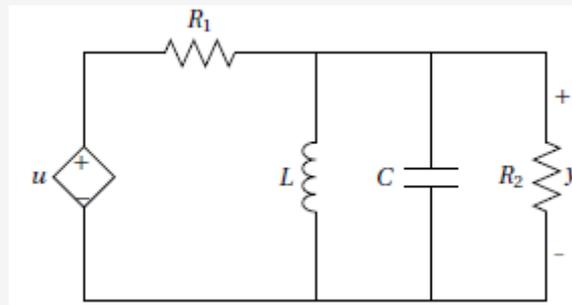
- Remarque : les années précédentes, il était demandé de trouver les lois des circuits ou d'autres systèmes physiques depuis le début. Ici, il suffit juste de mettre sous forme de modèle d'état à partir des équations associées au système.

- Juin 2016 - Q1 - (i) - (ii) (NB : dans la matrice A , la réponse est $\frac{-R}{L}$ et non $-R$)
Soit le système LTI causal représenté par le circuit électrique suivant :



L'entrée est la tension u aux bornes du générateur et la sortie est la tension y aux bornes du condensateur C. On demande

- (i) de donner une représentation d'état sous forme de modèle (A,B,C,D) de ce système, en choisissant les accumulateurs d'énergie comme variables d'état.
 - (ii) de donner l'équation entrée-sortie du système.
- Août 2016 - Q1 - (i) - (ii) (NB : dans l'équation entrée-sortie, c'est \dot{u} et non u)
Soit le système LTI représenté par le circuit électrique suivant.



L'entrée est la tension u aux bornes du générateur et la sortie est la tension y aux bornes de la résistance R_2 . On demande

- (i) de donner une représentation d'état sous forme de modèle (A,B,C,D) de ce système, en choisissant les accumulateurs d'énergie comme variables d'état.
- (ii) de donner l'équation entrée-sortie du système.

- Janvier 2017 - Q1

Nous proposons d'étudier la dynamique d'un système écologique composé uniquement de deux espèces animales, les proies et les prédateurs. Plus précisément, nous nous intéressons à l'évolution au cours du temps du nombre de proies, noté $x(t)$, et du nombre de prédateurs, noté $y(t)$, dans ce système. Pour ce faire, nous considérons les hypothèses suivantes :

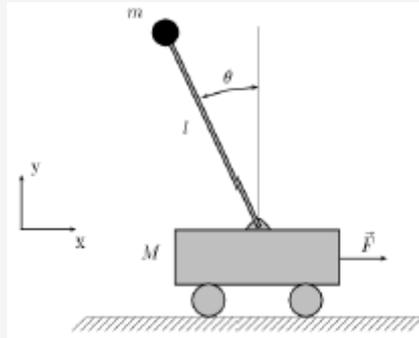
- le taux de reproduction α des proies est constant ;
- plus il y a de prédateurs, plus les proies se font manger. Le taux de mortalité des proies est donc proportionnel (avec un facteur β) au nombre de prédateurs dans le système ;
- le taux de mortalité γ des prédateurs est constant ;
- plus il y a de proies, plus il y a à manger pour les prédateurs et plus les prédateurs se reproduisent. Le taux de reproduction des prédateurs est donc proportionnel (avec un facteur δ) au nombre de proies dans le système.

- (i) Modélisez le système proie-prédateur via les deux équations différentielles décrivant l'évolution de $x(t)$ et $y(t)$ en fonction du temps.
- (ii) Ce système est non-linéaire. Expliquez pourquoi.
- (iii) Quels sont les points d'équilibre du système ?
- (iv) Linéarisez le système autour des points de fonctionnement obtenus ci-dessus.
- (v) Etudiez la stabilité des points d'équilibre du système.

- Août 2017 - Q1 + Q2 - (i) - (ii)

Q1 :

Nous proposons d'étudier la dynamique d'un *segway*. Son comportement peut être modélisé par celui du pendule inversé suivant :



Afin de mener à bien la modélisation, les hypothèses suivantes sont considérées :

- le pendule de masse m est suspendu à une tige rigide de longueur l et de masse négligeable ;
- θ est l'angle d'inclinaison du pendule par rapport à la verticale ;
- le pendule reste toujours en position "haute" tel que $-\frac{\pi}{2} < \theta < \frac{\pi}{2}$;
- le chariot est de masse M et soumis à une force F ;
- la position du chariot est notée x ;
- g dénomine l'accélération de la pesanteur.

Les équations du mouvement sont alors données par

$$(M + m)\ddot{x} - ml\ddot{\theta} \cos \theta + ml\dot{\theta}^2 \sin \theta = F$$

$$l\ddot{\theta} - \ddot{x} \cos \theta = g \sin \theta$$

- Décrivez le signal d'entrée et les variables d'état du système (donnez les domaine et image des signaux également).
- Ce système est non-linéaire. Expliquez pourquoi.
- Calculez le(s) point(s) d'équilibre de ce système et discutez leur stabilité.
- Linéarisez le système autour du point de fonctionnement suivant : $(\theta, \dot{\theta}, x, \dot{x}) = (0, 0, 0, 0)$ et $F = 0$.
- Donnez la représentation d'état (A,B,C,D) du système linéarisé. La sortie du système est le mouvement horizontal du chariot.
- Donnez un bloc diagramme pour ce système linéarisé.

Q2 :

Soit le système LTI causal décrit par l'équation différentielle $\ddot{y} - y = \ddot{u} + 2\dot{u} + u$

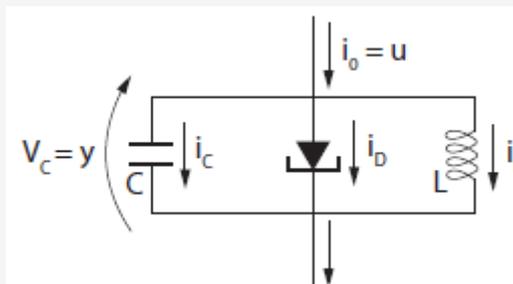
- Donnez une représentation d'état (A,B,C,D) du système. Pour ce faire, utilisez la méthode des variables auxiliaires avec $x(t) = (v(t), \dot{v}(t))^T$.
- Déduisez-en le bloc-diagramme correspondant.

- Janvier 2018 - Q1

(NB : il manque un $\frac{1}{C}$ à l'équation (4))

Q1 :

L'oscillateur de Van der Pol est un système dynamique qui a une grande importance en théorie des systèmes. Il peut être réalisé par un circuit électrique comprenant une inductance (L), une capacité (C) et une diode à effet tunnel en parallèle :



Le courant dans la diode à effet tunnel i_D est fonction de la différence de potentiel V_D suivant la relation

$$i_D = V_D^3 - \alpha V_D, \quad \alpha \in \mathbb{R}$$

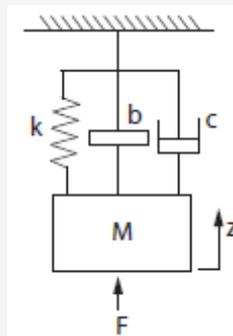
On considère le courant i_0 comme entrée du système et la différence de potentiel autour de la capacité V_C comme sortie.

- (i) Décrivez la dynamique du système sous forme d'équation(s) différentielle(s) ordinaire(s).
- (ii) Le système est-il linéaire? Le système est-il temps-invariant? Calculez se(s) point(s) d'équilibre pour une entrée nulle (on considérera une entrée nulle pour le reste de la question).
- (iii) Si le système est linéaire, donnez une représentation d'état (A, B, C, D). Si le système est non linéaire, linéarisez le système autour de chaque point fixe et donnez une représentation d'état pour chacun d'eux (A, B, C, D).
- (iv) Pour un des systèmes linéarisés (au choix), déterminez les valeurs du paramètre α pour lesquelles le système est
 - i. stable et de réponse impulsionnelle monotone.
 - ii. stable et de réponse impulsionnelle oscillatoire.
 - iii. instable et de réponse impulsionnelle monotone.
 - iv. instable et de réponse impulsionnelle oscillatoire.

• Août 2018 - Q1

(NB : sauf le point (v))

La suspension d'un véhicule peut être approximée par un modèle mécanique composé d'une masse (M), d'un ressort (k), d'un amortisseur (c) et d'un inerteur (b).

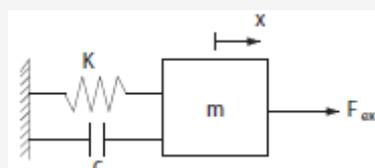


L'inerteur est un composant très léger qui a été conçu pour obéir à la loi $F = b \frac{dv}{dt}$ où v est la vitesse de déplacement relative entre ses deux extrémités. Pour ce modèle, on demande

- (i) de définir les signaux d'entrée et de sortie, ainsi que leur domaine et leur image.
- (ii) d'écrire l'équation entrée/sortie du système (on néglige l'effet de la pesanteur sur la masse).
- (iii) de proposer une représentation d'état du système (matrices A,B,C,D) et de discuter la stabilité du système.
- (iv) de calculer le point d'équilibre du système en fonction de l'entrée F .
- (v) de proposer une relation entre les différents paramètres M , b , c et k qui aboutit à une réponse stable et oscillatoire.

• Janvier 2019 - Q1

Un amortisseur de voiture peut-être étudié à l'aide d'un modèle mécanique composé d'une masse (m), d'un ressort (K) et d'un amortisseur (c) :



x correspond au déplacement de la masse, F_{ext} à la force extérieure appliquée sur la masse et $c \in \mathbb{R}^+$ est une constante d'amortissement. La masse peut se déplacer sans frottement.

Le ressort K obéit à la loi : $K = k_1 x + k_2 x^3$, $k_1, k_2 \in \mathbb{R}$ où k_1, k_2 sont des constantes de raideur. Pour ce modèle, on demande de

- (i) Donner les signaux d'entrée, de sortie et les variables d'états, en spécifiant leur domaine et image.
- (ii) Donner les lois de sortie et de mise à jour.
- (iii) Le système est-t-il temps-invariant ? Justifier.
- (iv) Le système est-t-il linéaire ? Justifier.

Si oui, donner une représentation d'état (A,B,C,D).

Si non,

- Calculer (tous) le(s) point(s) d'équilibre(s) pour une force extérieure appliquée nulle ($F_{ext} = 0$) et discuter leur existence en fonction des valeurs des paramètres k_1, k_2 .
 - Linéariser le système autour du (de chaque) point d'équilibre.
 - Donner une représentation d'état (A,B,C,D) pour le(s) système(s) linéarisé(s).
- (v) Étudier la stabilité en fonction des paramètres k_1, k_2 . Préciser si la réponse est monotone ou oscillatoire.
- (vi) Tracer la position d'équilibre du chariot en fonction du paramètre k_1 pour ($k_2 > 0$). Tracer le trait en pointillé pour une position instable et en trait normal pour une position stable ou marginalement stable.

Algèbre linéaire : concepts à maîtriser

Exercice 1

Rappel énoncé :

$$\begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{pmatrix} = \underbrace{\begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 16 & 1 \end{pmatrix}}_A \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}$$

Calculer $x(t)$ et $y(t)$ à l'aide des valeurs propres et des vecteurs propres et discuter la stabilité du système.

Solution :

étape 1 : Les valeurs propres du système, après annulation du polynôme caractéristique (*i.e.* $\det(A - \lambda I) = \lambda^2 - 2\lambda - 15 = 0$), sont données par

$$\lambda_1 = 5, \lambda_2 = -3.$$

Les vecteurs propres associés (*i.e.* résolution de $(A - \lambda_i I)(\vec{e}^{(i)}) = 0, i \in \{1, 2\}$) sont eux donnés par

$$\vec{e}^{(1)} = \begin{pmatrix} 1 \\ 4 \end{pmatrix}, \vec{e}^{(2)} = \begin{pmatrix} 1 \\ -4 \end{pmatrix}.$$

étape 2 : La décomposition de $x(t)$ et $y(t)$ donne

$$\begin{cases} x(t) = c_1(t)e_1^{(1)} + c_2(t)e_1^{(2)} \\ y(t) = c_1(t)e_2^{(1)} + c_2(t)e_2^{(2)}. \end{cases}$$

avec

$$\begin{aligned} c_1(t) &= (c_1(0) - c_{1,\infty})e^{\lambda_1 t} + c_{1,\infty} \\ c_2(t) &= (c_2(0) - c_{2,\infty})e^{\lambda_2 t} + c_{2,\infty} \end{aligned}$$

où $c_{1,\infty} = -b_1/\lambda_1 = 0$ et $c_{2,\infty} = -b_2/\lambda_2 = 0$ puisqu'il n'y a aucune entrée externe appliquée ni à x ($\rightarrow b_1 = 0$), ni à y ($\rightarrow b_2 = 0$).

étape 3 : En considérant les conditions génériques $c_1(t=0) = c_1(0)$ et $c_2(t=0) = c_2(0)$, on obtient le nouveau système

$$\begin{cases} c_1(t) = c_1(0)e^{\lambda_1 t} = c_1(0)e^{5t} \\ c_2(t) = c_2(0)e^{\lambda_2 t} = c_2(0)e^{-3t}. \end{cases}$$

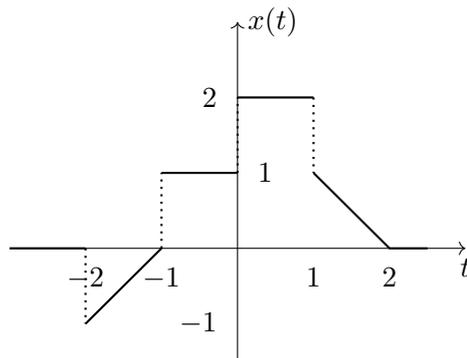
étape 4 : La solution s'écrit donc

$$\begin{cases} x(t) = c_1(0)e^{5t} + c_2(0)e^{-3t} \\ y(t) = 4c_1(0)e^{5t} - 4c_2(0)e^{-3t}. \end{cases}$$

TP1

Exercice 1 = Exercice 1.2 (a)-(c)

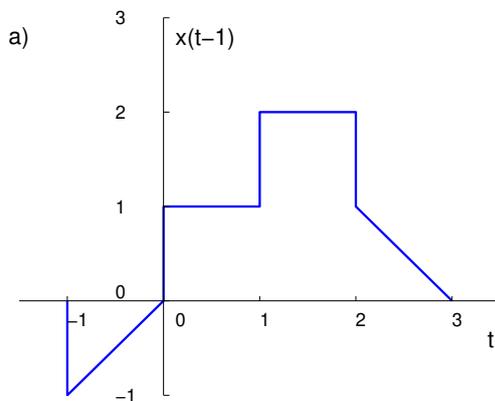
Rappel énoncé :



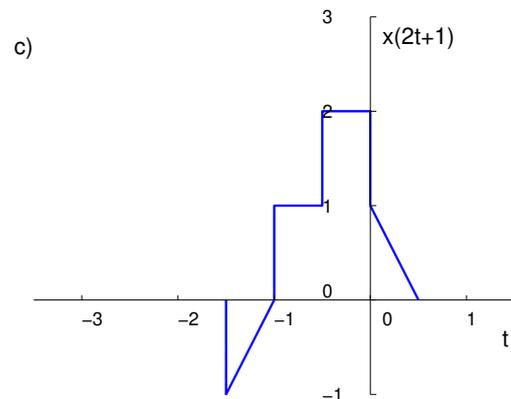
Tracer les signaux suivants.

(a) $x(t - 1)$

(c) $x(2t + 1)$



Décalage d'une unité temporelle vers la droite



Décalage d'une unité temporelle vers la gauche
 PUIS contraction du signal sur $[-1.5, 0.5]$ (*i.e.* reporte les valeurs du signal à des temps $2x$ plus petit)

Exercice 2 = Exercice 3.1 (a)-(b)

(a) Système dynamique, non-causal, linéaire, variant.

Résolution complète :

Système : $y(t) = u(t - 2) + u(2 - t)$

Énoncé (résumé) : Pour chaque système, identifier les différentes propriétés soit en démontrant, soit en donnant un contre-exemple.

- Statique-dynamique ?

Pour rappel, un système est statique si $y(t^*)$ ne dépend que de la valeur de l'entrée en $t = t^*$. Ici, $y(t^*) = u(t^* - 2) + u(2 - t^*)$ (exemple : $t^* = 4$ $y(4) = u(2) + u(-2)$). La sortie dépend donc de l'entrée en $t^* - 2$ et en $2 - t^*$. Par conséquent, le système est dynamique.

- Causalité ?

Pour rappel, un système est causal si $y(t^*)$ ne dépend que de la valeur de l'entrée en $t \leq t^*$. Intuitivement, on voit que $2 - t^*$ ne sera pas forcément ≤ 2 . En effet, on peut facilement trouver un contre-exemple : pour $t^* = -1$, on a en effet $y(-1) = u(-3) + u(3)$. Si on a bien $-3 \leq -1$, on a aussi que la sortie dépend du futur ($3 > -1$), de sorte que le système n'est pas causal.

Comment qualifier ce système alors ? Anticausal signifie que $y(t^*)$ ne dépend que de la valeur de l'entrée en $t \geq t^*$. Non-causal signifie que le système n'est ni causal, ni anti-causal. Au vu de l'équation $y(-1) = u(-3) + u(3)$, le système est donc non-causal puisqu'il existe des valeurs pour lesquelles il dépend à la fois du passé et du futur.

- Linéarité ?

Pour rappel, un système est linéaire si (u_1, y_1) et (u_2, y_2) sont des paires entrées-sortie valides du système, toute combinaison de la forme $(\alpha u_1 + \beta u_2, \alpha y_1 + \beta y_2)$ est également une paire valide. Pour déterminer si le système est linéaire, il suffit de démontrer que toute combinaison $\alpha u_1 + \beta u_2$ donne une sortie $\alpha y_1 + \beta y_2$.

Démo :

1. On écrit les paires entrées-sorties (u_1, y_1) et (u_2, y_2)

$$\begin{aligned} u_1(t) &\xrightarrow{S} y_1(t) = u_1(t-2) + u_1(2-t) \\ u_2(t) &\xrightarrow{S} y_2(t) = u_2(t-2) + u_2(2-t) \end{aligned}$$

2. On calcule la nouvelle entrée qui est une combinaison linéaire des deux entrées $u_1(t)$ et $u_2(t)$: $u(t) = \alpha u_1(t) + \beta u_2(t)$.
3. On fait passer cette nouvelle entrée dans le système

$$u(t) \xrightarrow{S} y(t) = u(t-2) + u(2-t)$$

On remplace alors grâce à la définition de $u(t)$ exprimée au point 2.

$$y(t) = \alpha u_1(t-2) + \beta u_2(t-2) + \alpha u_1(2-t) + \beta u_2(2-t)$$

Enfin, on associe pour retrouver $y_1(t)$ et $y_2(t)$:

$$y(t) = \alpha \underbrace{(u_1(t-2) + u_1(2-t))}_{y_1(t)} + \beta \underbrace{(u_2(t-2) + u_2(2-t))}_{y_2(t)} = \alpha y_1(t) + \beta y_2(t)$$

Par conséquent, le système est bien linéaire.

Autre méthode : Une autre façon de voir si un système est linéaire est de regarder si les entrées/sorties/signaux (plus généralement, les variables dépendantes) sont exprimées/modifiées par une fonction non linéaire. Cela n'a donc pas de rapport avec "t", mais bien uniquement avec les fonctions qui sont appliquées sur les entrées/sorties/signaux. Exemple : $\cos(u(t))$, $\sqrt{y(t)}$, $\ln(u(t-1))$, $u(t)y(t)$, ... Si une fonction non-linéaire est présente, on pourra conclure immédiatement que le système est non-linéaire, et, inversement, qu'il est linéaire. Le reste du cours utilisera cette deuxième méthode afin d'identifier la linéarité d'un système.

- Temps-variant ou invariant ?

Pour rappel, un système est dit invariant dans le temps lorsque la loi qu'il établit entre entrées et sorties ne change pas au cours du temps, c'est-à-dire si l'équation ne dépend pas explicitement de la valeur de la variable indépendante.

Démo :

1. L'entrée subit un décalage temporel puis cette entrée différée est modifiée par le système :

$$u(t) \xrightarrow{-\Delta} u_1(t) = u(t-\Delta) \xrightarrow{S} y_1(t) = u_1(t-2) + u_1(2-t)$$

c'est-à-dire $y_1(t) = u((t-2)-\Delta) + u((2-t)-\Delta)$ (puisque $u_1(t) = u(t-\Delta)$).

2. L'entrée est tout d'abord modifiée par le système puis cette sortie associée subit un décalage temporel.

$$u(t) \xrightarrow{S} y(t) (= u(t-2) + u(2-t)) \xrightarrow{-\Delta} y_2(t) = y(t-\Delta) = u((t-\Delta)-2) + u(2-(t-\Delta))$$

c'est-à-dire $y_2(t) = u(t-2-\Delta) + u(2-t+\Delta)$.

3. Comparer les résultats des points 1 et 2. S'ils sont identiques \rightarrow le système est temps-invariant. Ici, le système est donc temps-variant. Lorsque l'on applique un décalage temporel à l'entrée, le système n'associe pas à ce signal décalé la sortie associée au signal initial mais décalée.

Autre méthode : Dire qu'un système est invariant signifie que si l'entrée est décalée (exemple : $u(t - \Delta)$), la sortie l'est également, de la même valeur ($y(t - \Delta)$). Cela signifie en outre que le système ne dépend pas de la variable indépendante. Une équation de la forme $\sum_i a_i y(\tau_i(t)) = \sum_j b_j u(\tau'_j(t))$ sera temps-invariante si les a_i et les b_j ne sont pas fonction du temps, et si les τ_i et les τ'_j sont de la forme $t - t_0$. C'est cette simple identification que l'on utilisera par la suite en général.

(b) Système statique, causal, linéaire, variant.

Résolution complète :

Système : $y(t) = \cos(3t)u(t)$

Énoncé : idem

- Statique-dynamique ?

Pour rappel, les définitions concernant les propriétés des systèmes se focalisent sur les signaux d'entrées et de sorties uniquement. Ainsi, $y(t^*) = \cos(3t^*)u(t^*)$: la sortie en t^* ne dépend bien de l'entrée qu'en t^* . En conclusion, le système est statique. Le $\cos(3t^*)$ signifie juste que le coefficient devant le signal d'entrée n'est pas constant, mais cela reste un simple nombre et on ne considère pas une entrée à un autre moment.

- Causalité ?

Pour rappel, un système est causal si $y(t^*)$ ne dépend que de la valeur de l'entrée en $t \leq t^*$. La sortie en t^* , $y(t^*)$ ne dépend que de l'entrée qu'en t^* . Le système est donc causal.

- Linéarité ?

Pour rappel, un système est linéaire si (u_1, y_1) et (u_2, y_2) sont des paires entrées-sortie valides du système, toute combinaison de la forme $(\alpha u_1 + \beta u_2, \alpha y_1 + \beta y_2)$ est également une paire valide. Comme indiqué dans le rappel, on regarde si les signaux sont affectés par une fonction non-linéaire du type $\sqrt{u(t)}$, $\tan y(t)$. Si on observe ce type de non-linéarité, le système est bien défini comme un système non-linéaire. Dans cet énoncé, $y(t)$ et $u(t)$ ne sont pas touchés par des expressions non-linéaires. Le terme $\cos(3t)$ est simplement un coefficient multiplicatif du signal d'entrée.

→ Le système est donc linéaire.

Voici la démonstration pour s'en convaincre.

1. On écrit les paires entrées-sorties (u_1, y_1) et (u_2, y_2) (on voit que le $\cos(3t)$ est bien un simple coefficient).

$$\begin{aligned} u_1(t) &\xrightarrow{S} y_1(t) = \cos(3t)u_1(t) \\ u_2(t) &\xrightarrow{S} y_2(t) = \cos(3t)u_2(t) \end{aligned}$$

2. On calcule la nouvelle entrée qui est une combinaison linéaire des deux entrées $u_1(t)$ et $u_2(t)$: $u(t) = \alpha u_1(t) + \beta u_2(t)$.
3. On fait passer cette nouvelle entrée dans le système

$$u(t) \xrightarrow{S} y(t) = \cos(3t)u(t)$$

On remplace alors grâce à la définition de $u(t)$ exprimée dans le point 2.

$$y(t) = \alpha \cos(3t)u_1(t) + \beta \cos(3t)u_2(t)$$

Enfin, on fait alors réapparaître $y_1(t)$ et $y_2(t)$:

$$y(t) = \underbrace{\alpha \cos(3t)u_1(t)}_{y_1(t)} + \underbrace{\beta \cos(3t)u_2(t)}_{y_2(t)} = \alpha y_1(t) + \beta y_2(t)$$

Par conséquent, le système est bien linéaire. En effet, les signaux d'entrées et de sorties ne présentent aucune non-linéarité.

- Temps-variant ou temps-invariant ?

Pour rappel, un système est dit invariant dans le temps lorsque la loi qu'il établit entre entrées et sorties ne change pas au cours du temps.

Il suffit de regarder si les coefficients devant les signaux d'entrée et sortie dépendent du temps. Cela montre ainsi que le système est temps-variant. Dans cet énoncé, le terme $\cos(3t)$ multiplie l'entrée $u(t)$. Pour des instants différents, le terme prend des valeurs différentes.

→ Cela rend le système temps-variant.

Voici la démonstration pour s'en convaincre.

1. Décaler d'abord l'entrée puis appliquer cette entrée différée dans le système :

$$u(t) \xrightarrow{-\Delta} u_1(t) = u(t - \Delta) \xrightarrow{S} y_1(t) = \cos(3t)u_1(t)$$

c'est-à-dire $y_1(t) = \cos(3t)u(t - \Delta)$ (puisque $u_1(t) = u(t - \Delta)$).

2. Appliquer d'abord l'entrée dans le système puis décaler la sortie associée.

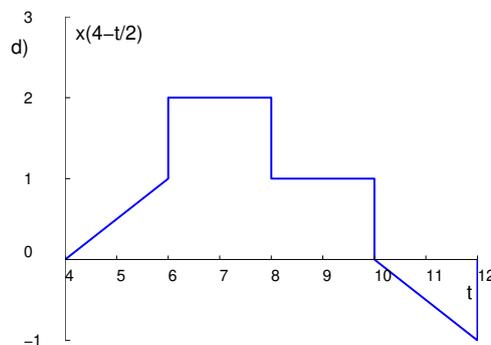
$$u(t) \xrightarrow{S} y(t) (= \cos(3t)u(t)) \xrightarrow{-\Delta} y_2(t) = y(t - \Delta) = \cos(3(t - \Delta))u(t - \Delta)$$

c'est-à-dire $y_2(t) = \cos(3(t - \Delta))u(t - \Delta)$.

3. Comparer les résultats des points 1 et 2. S'ils sont identiques → le système est temps-invariant.

Ce n'est pas le cas ici, les deux expressions diffèrent. Le système dépend de la variable t , il est bien temps-variant.

Exercice 3 = Exercice 1.2 (d)



Transformations combinées :

- 1) Décalage temporel de 4 unités vers la gauche ($t \rightarrow t + 4$) ;
- 2) Inversion temporelle, *i.e.* reporter la valeur du signal en t au temps $-t$, ($t \rightarrow -t$ donc $t+4 \rightarrow -t+4$) ;
- 3) Dilatation temporelle d'un facteur 2, *i.e.* valeurs du signal sur un domaine 2x plus grand, ($t \rightarrow t/2$ donc $-t + 4 \rightarrow -t/2 + 4$).

Exercice 4 = Exercice 3.1 (f)-(g) [TXB]

Système dynamique, non-causal (! cas où $t > 0$ et $t < 0$!), linéaire, variant ($t \rightarrow t/3$ puis $t/3 \rightarrow (t - \Delta)/3 \neq t \rightarrow t - \Delta$ puis $t - \Delta \rightarrow t/3 - \Delta$).

Exercice 5 = Exercice 3.15 (a)-(c) [TXB]

- (a) Système linéaire, variant ($t^2 - \Delta \neq (t - \Delta)^2$)
- (c) Système linéaire et invariant.

Exercice 6 = Interro 2013

$y(t) = \sin(u(t))$: non-linéaire ($\sin(u_1 + u_2) \neq \sin(u_1) + \sin(u_2)$), causal, temps-invariant.

$y(t) = u(\sin(t))$: linéaire, non-causal, temps-variant ($u(\sin(t) - \Delta) \neq u(\sin(t - \Delta))$).

Exercice 7 = Exercice 3.9 [TXB]

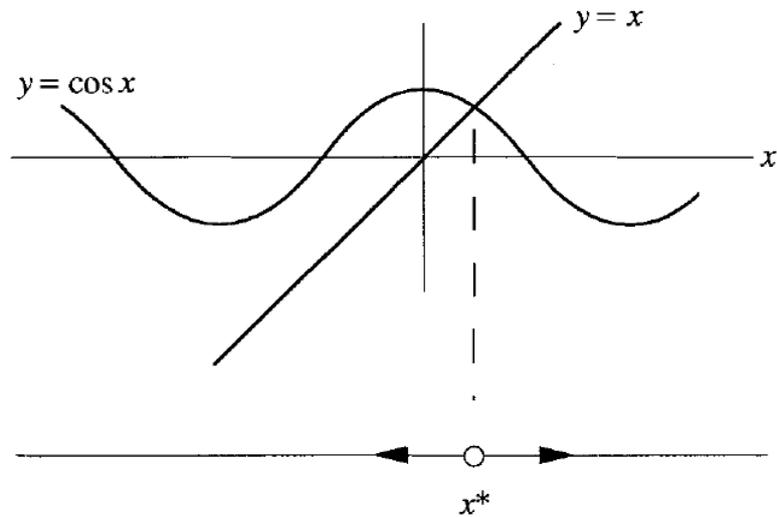
- a) Des non-linéarités peuvent apparaître de différentes manières dans les composants électriques ; citons par exemple la dépendance des paramètres R , L et C en fonction de la température (qui elle-même dépend de l'intensité de courant), le claquage des condensateurs ou l'effet de diélectriques non-linéaires. Si le circuit est couplé à un système électromécanique, des dépendances non-linéaires en fonction de la position des pièces mécaniques apparaissent lorsque l'on veut considérer les lois exactes pour le couple rotorique et la force contre-électro-motrice.
- b) L'usure des composants est inévitable. Des appareils électriques extérieurs peuvent perturber le circuit par le champ électromagnétique qu'ils créent ; ces perturbations sont en général non-constantes et donc variantes.

Exercice 8 = Exercice 3.12 (a) [TXB]

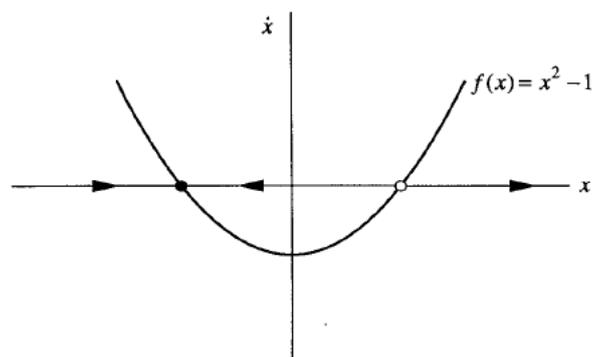
(a) Les trois systèmes sont linéaires, les systèmes (ii) et (iii) ne sont pas statiques ; la bonne réponse est donc (i) (bien que ce système soit variant et comporte une non-linéarité vis-à-vis du temps).

TP2

Exercice 1 = Exemple 2.2.3 [STR]



Exercice 2 = Exemple 2.2.1 [STR]



Point(s) fixe(s) ?

- Graphiquement : intersection de $f(x)$ avec axe des $x \Rightarrow 2$ points fixes
- Mathématiquement : résoudre $\dot{x} = 0 \Rightarrow x = \pm 1$

Stabilité ? Selon le champ de vecteurs et/ou calcul de la pente, on a $x = -1$ stable et $x = +1$ instable

Exercice 3 = Paragraphe 2.3 [STR]

Les points fixes sont donnés par

$$\dot{N} = 0 \iff rN\left(1 - \frac{N}{K}\right) = 0 \iff N_1^* = 0, N_2^* = K.$$

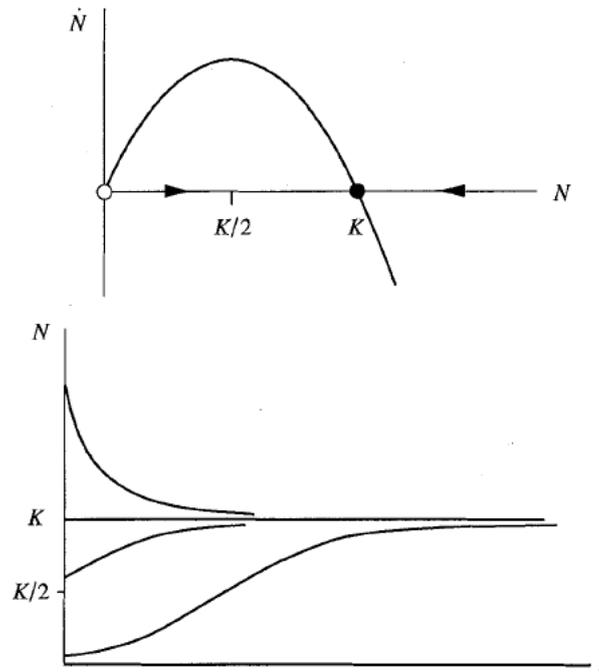
Leur stabilité s'évalue analytiquement en considérant $f(N) = rN\left(1 - \frac{N}{K}\right)$ et donc

$$f'(N_1^*) = r > 0 \rightarrow \text{instable},$$

et

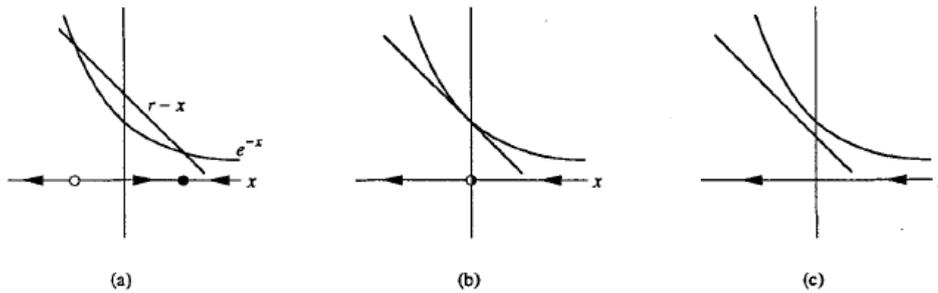
$$f'(N_2^*) = -r < 0 \rightarrow \text{stable}.$$

Graphiquement, on a :



Exercice 4 = Exemple 3.1.2 [STR]

- (a) : $r > 1$, 2 PF (celui de gauche instable et celui de droite stable);
- (b) : $r = 1$, 1 PF en $x = 0$, si $x(0) > 0$, alors $x(t)$ converge et stationne en $x = 0$ sinon ($x(0) < 0$) $x(t)$ diverge à $-\infty$;
- (c) : $r < 1$, pas de PF, \dot{x} toujours < 0 donc x décroît indéfiniment.



Exercice 5 = Exercice 2.3.2 [STR]

$x_1^* = 0$, instable; $x_2^* = k_1 a / k_{-1}$ stable; si $a = 0$, $x_1^* = x_2^* = 0$.

TP3

Exercice 1 = Lapin vs Mouton [STR]

PF? Solution(s) de $\dot{x} = \dot{y} = 0$:

$$\begin{cases} \dot{x} = 0 = x(3 - x - 2y) \rightarrow x = 0 \text{ OU } 3 - 2y = x \\ \dot{y} = 0 = y(2 - x - y) \rightarrow y = 0 \text{ OU } 2 - y = x \end{cases}$$

Combinaisons possibles (x, y) : $(0, 0)$; $(3, 0)$; $(0, 2)$; $(1, 1)$

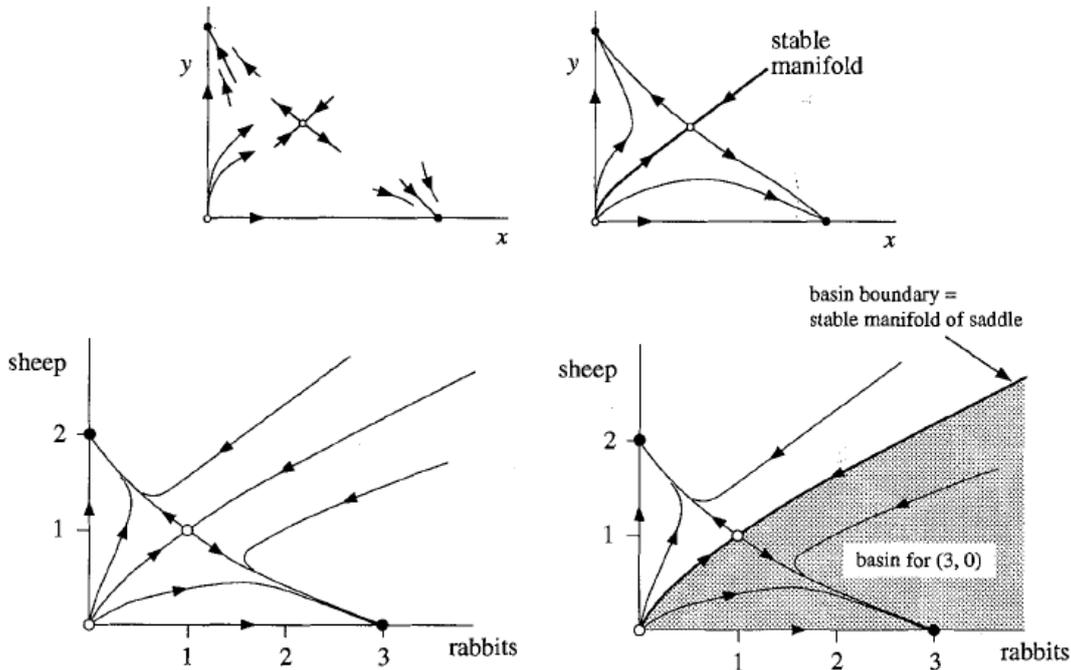
Stabilité?

- Jacobienne? $A = \begin{pmatrix} 3 - 2x - 2y & -2x \\ -y & 2 - x - 2y \end{pmatrix}$

- Valeurs propres au PF? :

- $(0, 0)$: $A = \begin{pmatrix} 3 & 0 \\ 0 & 2 \end{pmatrix} \rightarrow \lambda_1 = 3 > 0; \lambda_2 = 2 > 0 \Rightarrow (0, 0)$ instable
- $(3, 0)$: $A = \begin{pmatrix} -3 & -6 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} \rightarrow \lambda_{1,2} = \frac{-4 \pm \sqrt{16 - 4 \cdot 3}}{2} = \begin{cases} -1 < 0 \\ -3 < 0 \end{cases} \Rightarrow (3, 0)$ stable
- $(0, 2)$: $A = \begin{pmatrix} -1 & 0 \\ -2 & -2 \end{pmatrix} \rightarrow \lambda_{1,2} = \frac{-3 \pm \sqrt{9 - 4 \cdot 2}}{2} = \begin{cases} -1 < 0 \\ -2 < 0 \end{cases} \Rightarrow (0, 2)$ stable
- $(1, 1)$: $A = \begin{pmatrix} -1 & -2 \\ -1 & -1 \end{pmatrix} \rightarrow \lambda_{1,2} = \frac{-2 \pm \sqrt{4 - 4 \cdot (-1)}}{2} = \begin{cases} -1 + \sqrt{2} > 0 \\ -3 - \sqrt{2} < 0 \end{cases} \Rightarrow (1, 1)$ point de selle

Plan de phase :



Exercice 2

1. PF? Solution(s) de $\dot{x} = \dot{y} = 0$:

$$\begin{cases} \dot{x} = 0 = 10x - 5xy \rightarrow x = 0 \text{ OU } y = 2 \\ \dot{y} = 0 = 3y + xy - 3y^2 \rightarrow y = 0 \text{ OU } 3y - 3 = x \end{cases}$$

Combinaisons possibles (x, y) : $(0, 0)$; $(0, 1)$; $(3, 2)$

2. Stabilité?

– Jacobienne? $A = \begin{pmatrix} 10 - 5y & -5x \\ y & 3 + x - 6y \end{pmatrix}$

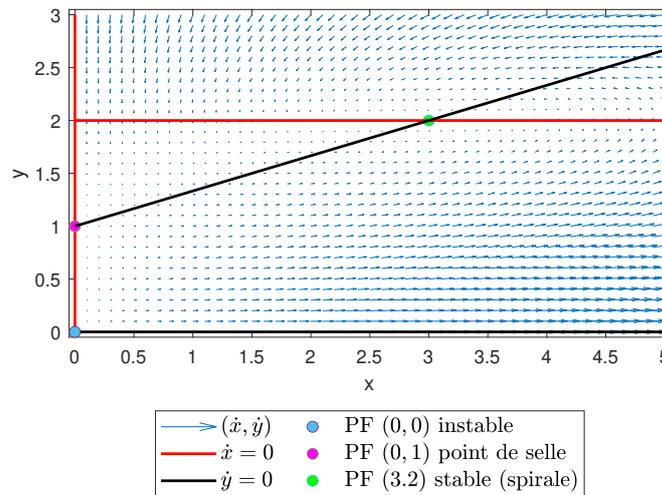
– Valeurs propres au PF? :

• $(0, 0) : A = \begin{pmatrix} 10 & 0 \\ 0 & 3 \end{pmatrix} \rightarrow \lambda_1 = 10 > 0; \quad \lambda_2 = 3 > 0 \Rightarrow (0, 0)$ instable

• $(0, 1) : A = \begin{pmatrix} 5 & 0 \\ 1 & -3 \end{pmatrix} \rightarrow \lambda_{1,2} = \frac{2 \pm \sqrt{4 - 4(-15)}}{2} = \begin{cases} 5 > 0 \\ -3 < 0 \end{cases} \Rightarrow (0, 1)$ point de selle

• $(3, 2) : A = \begin{pmatrix} 0 & -15 \\ 2 & -6 \end{pmatrix} \rightarrow \lambda_{1,2} = \frac{-6 \pm \sqrt{36 - 4(30)}}{2} = \begin{cases} -3 + i\sqrt{21} \\ -3 - i\sqrt{21} \end{cases} \Rightarrow (3, 2)$ spirale stable

3. Plan de phase :



Exercice 3 = Exercice 6.3.6 [STR]

1. PF? Solution(s) de $\dot{x} = \dot{y} = 0$:

$$\begin{cases} \dot{x} = 0 = xy - 1 & \rightarrow y = 1/x \text{ (x different from 0)} \\ \dot{y} = 0 = x - y^3 & \rightarrow y = \sqrt[3]{x} \\ & \Rightarrow 1 = x \sqrt[3]{x} \end{cases}$$

Combinaisons possibles (x, y) : $(1, 1); (-1, -1)$

2. Stabilité?

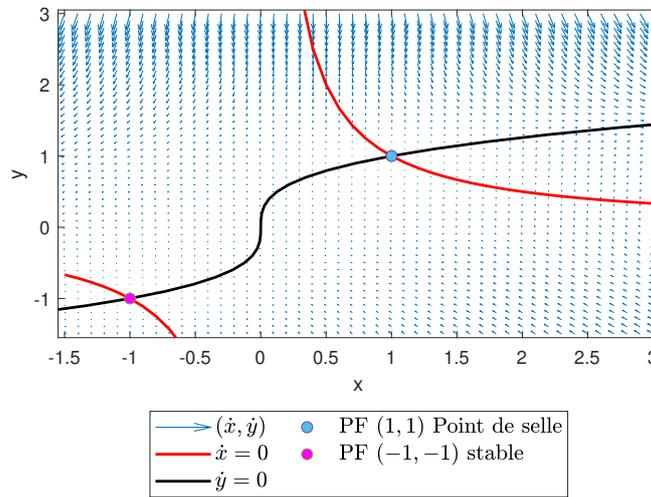
– Jacobienne? $A = \begin{pmatrix} y & x \\ 1 & -3y^2 \end{pmatrix}$

– Valeurs propres au PF? :

• $(1, 1) : A = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -3 \end{pmatrix} \rightarrow \lambda_{1,2} = \frac{-2 \pm \sqrt{4 - 4(-4)}}{2} = \begin{cases} -1 + \sqrt{5} > 0 \\ -1 - \sqrt{5} < 0 \end{cases} \Rightarrow (1, 1)$ Point de selle

• $(-1, -1) : A = \begin{pmatrix} -1 & -1 \\ 1 & -3 \end{pmatrix} \rightarrow \lambda_{1,2} = \frac{-4 \pm \sqrt{16 - 4(4)}}{2} = -2$ (double) $< 0 \Rightarrow (-1, -1)$ stable

3. Plan de phase :



Exercice 4 = Janvier 2020 - Q1

- (i) — Entrée : g =concentration en gène, $\mathbb{R}^+ \rightarrow \mathbb{R}^+$.
 — Sortie : p =concentration de protéines, $\mathbb{R}^+ \rightarrow \mathbb{R}^+$.
 — Variables d'état :
 — m =concentration en ARN-m, $\mathbb{R}^+ \rightarrow \mathbb{R}^+$,
 — p =concentration en protéines, $\mathbb{R}^+ \rightarrow \mathbb{R}^+$.
- (ii) — Le système est non-linéaire car gp est un produit du signal d'entrée et de sortie + présence du terme non-linéaire $p/(1/2 + p)$.
 — Le système est temps-invariant car aucun des coefficients devant g ou p ne dépend du temps. Les paramètres sont bien constants.
- (iii) — p -nullcline : $m = p$.
 — m -nullcline : $g \frac{p}{0.5+p} - m = 0$.
 Pour $g = 1$, point d'équilibre : $(m^*, p^*) = (0, 0)$. Ensuite, on dessine le champ de vecteurs dans les différents quadrants délimités par les nullclines. Par exemple en $(1, 0) : \nearrow$, $(0, 1) : \searrow$, $(2, 1) : \swarrow$ et $(0.1, 0.15) : \nearrow$.
- (iv) Calcul des points d'équilibre : PF1 = $(g - 1/2, g - 1/2)$, PF2 = $(0, 0)$.
- (v) Calcul de la matrice jacobienne :

$$J = \begin{pmatrix} -1 & \frac{g/2}{(0.5+p)^2} \\ 1 & -1 \end{pmatrix}.$$

— Pour le PF1, la matrice devient

$$J_1 = \begin{pmatrix} -1 & 1/2g \\ 1 & -1 \end{pmatrix}.$$

Polynôme caractéristique : $s^2 + 2s + (1 - 1/2g)$.

Stable si les valeurs propres sont négatives, donc si $g > 1/2$.

— Pour le PF2, la matrice devient

$$J_2 = \begin{pmatrix} -1 & 2g \\ 1 & -1 \end{pmatrix}.$$

Polynôme caractéristique : $s^2 + 2s + (1 - 2g)$.

Stable si les valeurs propres sont négatives, donc si $g < 1/2$.

- (vi) Ainsi, si $g < 1/2$, le système converge vers le PF2. Aucune protéine ne sera produite. Si $g > 1/2$, le système converge vers le PF1. La protéine sera produite durablement.
- (vii) Pour observer une convergence monotone vers le point stable, les valeurs propres doivent être purement réelles (en plus d'être négatives). Dans le calcul des valeurs propres, cela veut dire que l'on doit avoir $2g > 0$. C'est toujours le cas car $g > 0$.

Exercice 5 = Janvier 2021 - Q1

- (i) Le système est non-linéaire. La non-linéarité vient du terme x^2 .
- (ii) Les points fixes sont donnés par PF1 : $(x = 1, y = -1)$ et PF2 : $(x = -1, y = 1)$.
La matrice jacobienne est donnée par

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

Le polynôme caractéristique est donc donné par $s^2 - s + 2x$. Le calcul des valeurs propres ($s^2 - s + 2x = 0$) donne

- PF1 : $\lambda_{1,2} = \frac{1 \pm j\sqrt{7}}{2}$. Cela correspond à une spirale instable.
- PF2 : $\lambda_1 = -1$ et $\lambda_2 = 2$. Cela correspond à un point de selle.

- (iii) Le plan de phase obtenu avec Geogebra est donné à la figure 9.

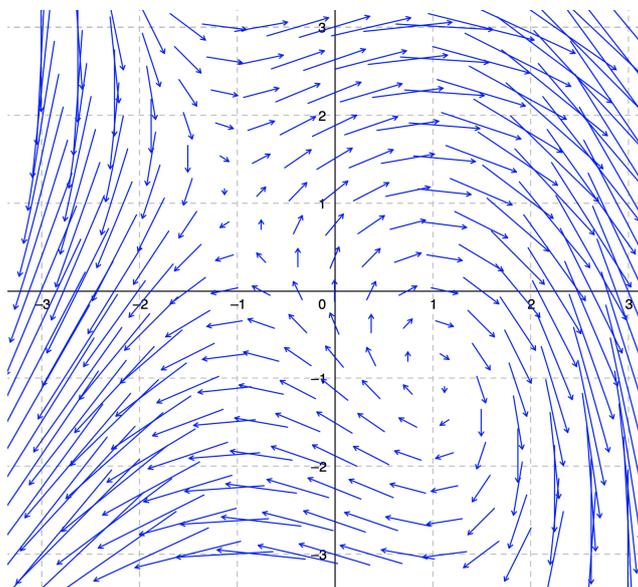


FIGURE 9 – Plan de phase dans la zone $x \in [-3, 3]$, $y \in [-3, 3]$.

- (iv) En se plaçant au point initial $(x_0, y_0) = (0, 3)$, le système va suivre les lignes de champ et entamer une descente vers le 4ème quadrant. En l'absence de point stable, le système diverge.
- (v) La composante vitesse selon la verticale est doublée. Les vecteurs ont donc une composante verticale deux fois plus importante.

Exercice 6 = Janvier 2022 - Q1

- (i) Le système est non-linéaire. La non-linéarité vient du terme x^3 .
- (ii) — Pour toutes les valeurs de μ , on a PF1 : $(x, y) = (0, 0)$.
— Si $\mu < 0$, on a uniquement le PF1.
— Si $\mu \geq 0$, on obtient également PF2 : $(\sqrt{\mu}, 0)$ et PF3 : $(-\sqrt{\mu}, 0)$.
- (iii) La matrice jacobienne est donnée par

$$J = \begin{pmatrix} \mu - 3x^2 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}.$$

- PF1 : les valeurs propres sont $\lambda_1 = \mu$ et $\lambda_2 = -1$.
— si $\mu < 0$: les deux valeurs propres sont négatives et réelles \rightarrow point stable.

- si $\mu = 0$: $\lambda_1 = 0$ et $\lambda_2 < 0$ et réelle \rightarrow point stable.
 - si $\mu > 0$: les deux valeurs propres sont réelles et de signes contraires \rightarrow point de selle.
 - PF2 : les valeurs propres sont $\lambda_1 = -2\mu$ et $\lambda_2 = -1$.
Avec la condition sur μ pour l'existence de PF2, les deux valeurs propres sont réelles et négatives \rightarrow point stable.
 - PF3 : les valeurs propres sont $\lambda_1 = -2\mu$ et $\lambda_2 = -1$.
Avec la condition sur μ pour l'existence de PF3, les deux valeurs propres sont réelles et négatives \rightarrow point stable.
- (iv) — x -nullcline : $x = 0$ et, si $\mu > 0$, $x = \pm\sqrt{\mu}$. Ces nullclines sont donc des droites verticales.
- y -nullcline : $y = 0$. Il s'agit de l'axe des abscisses.
- (v) Les plans de phase, obtenus avec Geogebra, sont donnés aux figures 10 et 11 pour la valeur de $\mu = 1$.

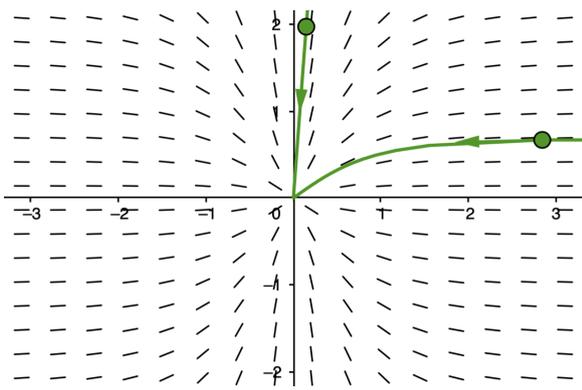


FIGURE 10 – Plan de phase pour $\mu < 0$.

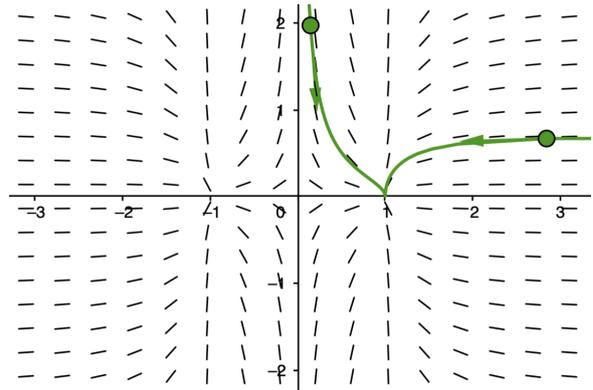


FIGURE 11 – Plan de phase pour $\mu \geq 0$.

- (vi) Il y a différentes configurations possibles :
- Si $\mu < 0$: la trajectoire converge vers le PF1.
 - Si $\mu \geq 0$:
 - Si $\mu = 0$: les points fixes se confondent, idem que pour $\mu < 0$.
 - Si $0 < \sqrt{\mu} < 0.5$, la trajectoire converge vers le PF2 par la droite.
 - Si $0.5 < \sqrt{\mu}$, la trajectoire converge vers le PF2 par la gauche.
- (vii) L'ordonnée des points fixes est augmentée de deux unités. La nature de ces points fixes n'est pas modifiée.
- (viii) Le diagramme de bifurcation est donné à la figure 12. L'abscisse du PF vaut 0 pour μ négatif. Ensuite, pour μ positif, il y a trois points fixes, l'abscisse nulle est un PF instable et les deux autres abscisses caractérisant les PF stables sont égales à $\pm\sqrt{\mu}$.
Légende : les points fixes stables sont en trait plein, les points instables en trait discontinu.

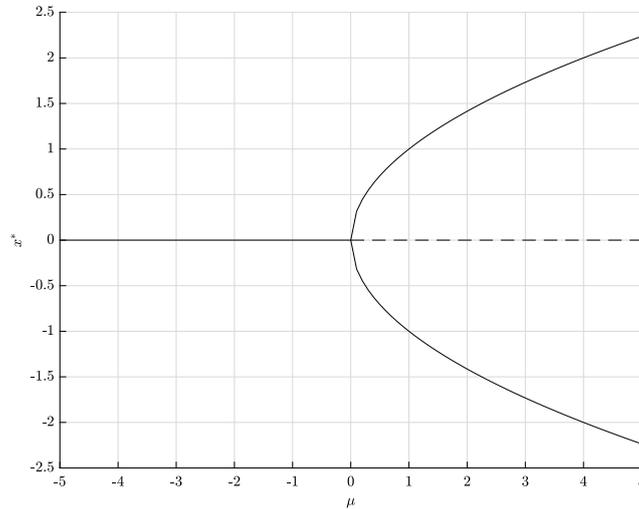


FIGURE 12 – Diagramme de bifurcation pour l'abscisse x^* en fonction du paramètre μ .

- (ix) Les points fixes obtenus étant de type "noeud", on cherche à modifier le système afin d'obtenir des points fixes de type "spirale". Cela correspond à des comportements oscillatoires qui s'observent lorsque les valeurs propres associées à la matrice jacobienne du système ne sont pas purement réelles. Dès lors, pour obtenir des valeurs propres complexes, une manière simple de faire est de s'arranger pour obtenir un déterminant négatif et ainsi obtenir des valeurs propres complexes. Par exemple, le système modifié peut être

$$\begin{aligned}\dot{x} &= \mu x - x^3 + y \\ \dot{y} &= -y.\end{aligned}$$

Ainsi, on a

$$J = \begin{pmatrix} \mu - 3x^2 & 1 \\ 0 & -1 \end{pmatrix},$$

ce qui amène une discussion paramétrique sur le déterminant et qui permet d'avoir des valeurs propres complexes conjuguées.

Exercice 7 = Aout 2021 - Q1

- (i) Le système est non-linéaire. La non-linéarité vient du terme $\cos(y)$.
(ii) Les points fixes sont donnés par $\text{PF}_k : (x, y) = (0, k\pi/2)$ pour $k \in \{-3, -1, 1, 3\}$.
La matrice jacobienne est donnée par

$$J = \begin{pmatrix} 0 & -\sin(y) \\ 1 & 0 \end{pmatrix}.$$

- PF_k pour $k \in \{-3, 1\}$: valeurs propres complexes ($\pm j$) \rightarrow centre.
- PF_k pour $k \in \{-1, 3\}$: valeurs propres réelles (± 1) \rightarrow point de selle.

- (iii) Le plan de phase est donné à la figure 13.
(iv) Les graphes demandés sont donnés à la figure 14.
(v) Pour le point fixe $(0, 3\pi/2)$; il suffit de calculer les vecteurs propres associées aux valeurs propres $\lambda = \pm 1$ en résolvant l'équation suivante

$$\begin{pmatrix} \lambda & -1 \\ 1 & \lambda \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}.$$

On obtient le vecteur propre $(1, 1)$ pour la valeur propre $\lambda = 1$ et le vecteur propre $(1, -1)$ pour la valeur propre $\lambda = -1$. Le bassin d'attraction associée à un point fixe est formé des deux droites dont les directions sont données par les vecteurs propres et passant par ce point fixe.

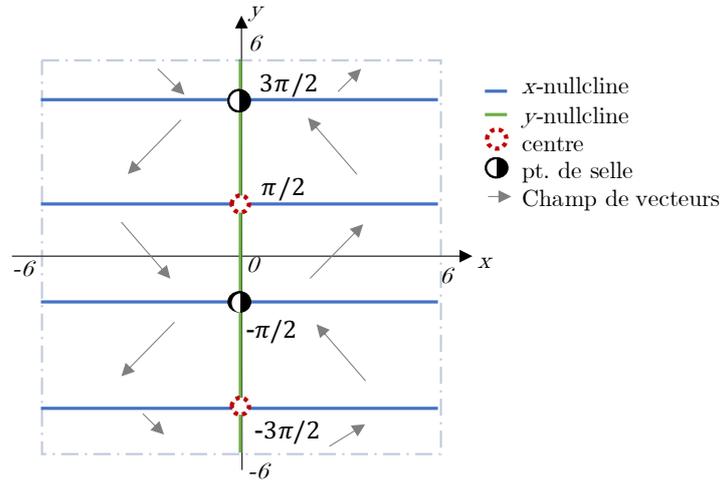
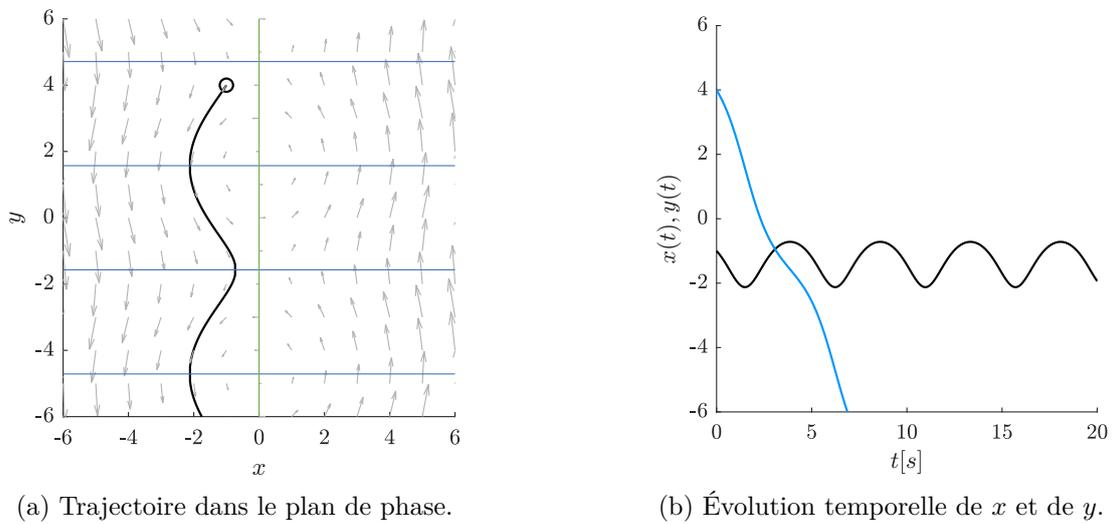


FIGURE 13 – Plan de phase.



(a) Trajectoire dans le plan de phase.

(b) Évolution temporelle de x et de y .

FIGURE 14 – Représentations graphiques de l'évolution du système depuis $(x_0, y_0) = (-1, 4)$.

Les deux valeurs propres donnent une indication sur la vitesse avec laquelle le point se déplace selon ces directions préférentielles. Ici, les deux valeurs propres ont la même amplitude. Une "particule" dans le plan de phase se déplace à la même vitesse selon ces deux directions.

- (vi) La composante vitesse selon la verticale est inversée. Une flèche qui pointait vers le bas à droite pointerait maintenant vers le haut à droite.

TP4

Exercice 1 = Exercice 2.1 [TXB]

Résolution complète :

1- Signal d'entrée :

- signification : couple externe (information explicite de l'énoncé)
- notation : $u(t)$
- domaine : \mathbb{R}^+
- image : \mathbb{R}

2- Signaux de sortie :

- signification : position angulaire du pendule (information explicite de l'énoncé)
- notation : $y(t) = \theta(t)$
- domaine : \mathbb{R}^+
- image : $[-\theta_{max}, \theta_{max}]$, $\theta_{max} = \arccos(\frac{a}{L})$
(en général : $[0, 2\pi]$ mais restriction physique à cause de la configuration du pendule et du ressort).

3- Variables d'état : $x(t) = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \theta \\ \dot{\theta} \end{pmatrix}$ (données explicitement dans l'énoncé) : $\mathbb{R}^+ \rightarrow [-\theta_{max}, \theta_{max}] \times \mathbb{R}$.

4- Loi de sortie : $y(t) = \theta(t) = x_1(t)$.

5- Loi de mise à jour : $mL^2\ddot{\theta} = u - b\dot{\theta} - ka^2 \tan(\theta) + mgL \sin(\theta)$ (On applique la loi de Newton en rotation).

$$\begin{cases} \dot{x}_1(t) &= x_2(t) \\ \dot{x}_2(t) &= \frac{u(t)}{mL^2} - \frac{bx_2(t)}{mL^2} + \frac{g}{L} \sin(x_1(t)) - \frac{a^2k}{mL^2} \tan(x_1(t)) \end{cases}$$

Note : Modèle d'état = loi de mise à jour + loi de sortie

Modèle linéaire ? Non car $\tan(\theta(t))$ et $\sin(\theta(t))$ sont non-linéaires (ex : $\tan(\theta_1(t) + \theta_2(t)) \neq \tan\theta_1(t) + \tan\theta_2(t)$)

Modèle temps-invariant ? Oui car les coefficients sont constants et pas de transformations combinées dans les signaux.

Exercice 2 = Exercice 4.1 [TXB]

a) Équation différentielle : $LC\ddot{y}(t) + RC\dot{y}(t) + y(t) = u(t)$

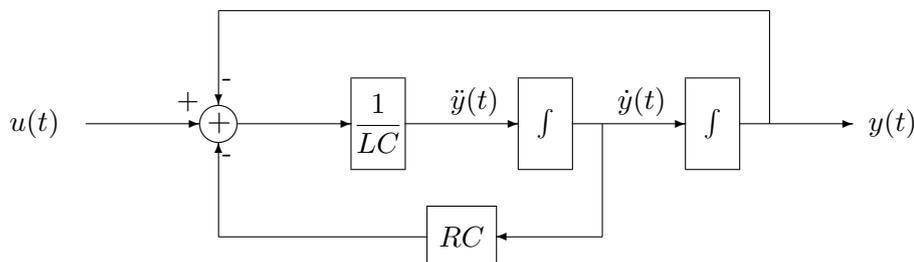
Pour $u(t) = 0$, la solution générale s'écrit :

$$y(t) = Ae^{(-\zeta + j\sqrt{\omega^2 - \zeta^2})t} + Be^{(-\zeta - j\sqrt{\omega^2 - \zeta^2})t}$$

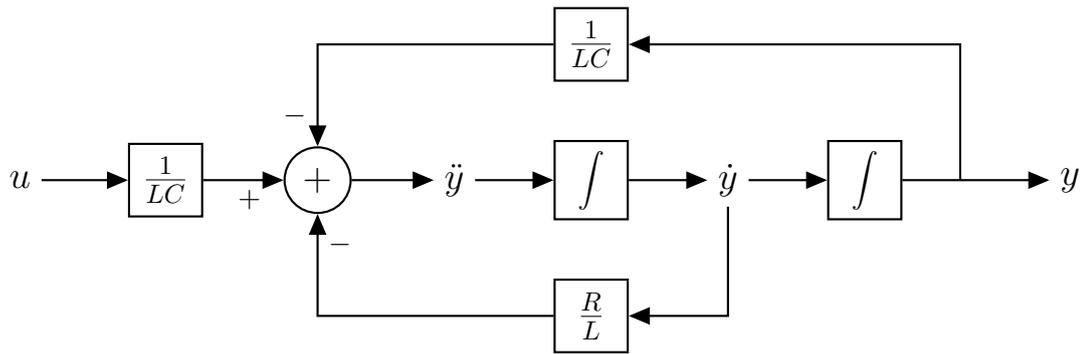
où $\zeta = \frac{R}{2L}$ et $\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}$.

(Simplement pour montrer la résolution ODE comme au cours d'analyse - à ne pas savoir faire dans le cadre de ce cours).

b) Bloc-diagramme :



peut aussi être dessiné comme ceci :



Entrée : tension au générateur $u(t) : \mathbb{R}^+ \rightarrow \mathbb{R}$

Sortie : tension aux bornes de la capacité $y(t) = V_C(t)$

1- Ici, on voit apparaître \ddot{y} qui donne l'ordre de l'équation différentielle ($n = 2$), et donc le nombre de variable d'état dans le système. Cela vient de la définition des variables d'état qui permettent de décrire la dynamique interne du système.

$$x = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} y \\ \dot{y} \end{pmatrix}$$

Par ailleurs, par définition de la représentation d'état, il faut que y et u apparaissent sans dérivée.

2- La loi de sortie peut donc être directement écrite :

$$y(t) = x_1(t)$$

3- Ensuite, on peut réécrire l'équation donnée en fonction des nouvelles notations introduites :

$$\dot{x}_2 = \frac{u}{LC} - \frac{R}{L}x_2 - \frac{1}{LC}x_1$$

Et la deuxième loi de mise à jour découle directement du choix des variables d'état

$$\dot{x}_1 = x_2$$

4- Ainsi, le modèle d'état s'écrit :

$$\begin{pmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{pmatrix} = \underbrace{\begin{pmatrix} 0 & 1 \\ \frac{-1}{LC} & \frac{-R}{L} \end{pmatrix}}_A \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} + \underbrace{\begin{pmatrix} 0 \\ \frac{1}{LC} \end{pmatrix}}_B u$$

$$y = \underbrace{\begin{pmatrix} 1 & 0 \end{pmatrix}}_C \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} + \underbrace{\begin{pmatrix} 0 \end{pmatrix}}_D u$$

Exercice 3 = Août 2019 - Q2

Résolution complète

a) Équation entrée-sortie

Lire au niveau du grand symbole somme : "sortie du symbole +" (\ddot{y}) = somme des entrées, avec le signe associé :

$$\ddot{y} = 6\dot{u} + 6u - 10\dot{y} - 16y$$

b) Modèle d'état

On réécrit l'équation $\ddot{y} + 10\dot{y} + 16y = 6\dot{u} + 6u$ et on introduit la variable auxiliaire v . Deux équations :

$$\begin{cases} \ddot{v} + 10\dot{v} + 16v = u \\ y = 6\dot{v} + 6v \end{cases}$$

Entrée : $u (\mathbb{R}^+ \rightarrow \mathbb{R})$; Sortie : $y (\mathbb{R}^+ \rightarrow \mathbb{R})$

En choisissant le vecteur d'état (x_1 et x_2 peuvent être inversés ; $\mathbb{R}^+ \rightarrow \mathbb{R}^2$)

$$\begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} v \\ \dot{v} \end{pmatrix}$$

On obtient directement le modèle d'état suivant :

$$\begin{pmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{pmatrix} = \underbrace{\begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -16 & -10 \end{pmatrix}}_A \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} + \underbrace{\begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}}_B u$$
$$y = \underbrace{\begin{pmatrix} 6 & 6 \end{pmatrix}}_C \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} + \underbrace{\begin{pmatrix} 0 \end{pmatrix}}_D u$$

Exercice 4 = Exercice 2.7 [TXB]

Comportement des réservoirs :

$$\gamma \dot{h}_1 = u - \alpha \sqrt{h_1}$$
$$\gamma \dot{h}_2 = u + \alpha (\sqrt{h_1} - \sqrt{h_2})$$

⇒ Modèle d'état :

- Signal d'entrée : $u : \mathbb{R}^+ \rightarrow \mathbb{R}^+$, débit d'entrée extérieur
- Signal de sortie : $y : \mathbb{R}^+ \rightarrow \mathbb{R}^+$, débit de sortie du second réservoir
- Signal d'état : $x = (x_1, x_2) = (h_1, h_2) : \mathbb{R}^+ \rightarrow \mathbb{R}^{+2}$, hauteurs d'eau dans les réservoirs
- Loi de sortie : $y(t) = \alpha \sqrt{x_2(t)}$
- Mise à jour de l'état :

$$\dot{x}_1 = \frac{1}{\gamma} (u - \alpha \sqrt{x_1})$$
$$\dot{x}_2 = \frac{1}{\gamma} (u + \alpha (\sqrt{x_1} - \sqrt{x_2}))$$

Linéaire ? Non car racines carrées sur les signaux des hauteurs

Temps-invariant ? Oui car coefficients constants et pas de transformations combinées dans les signaux.

Matrices ABCD ? Voir TP suivant. Pour l'instant, pas possible de les obtenir car le système est non-linéaire.

Exercice 5 = Janvier 2020 - Q1 (i)

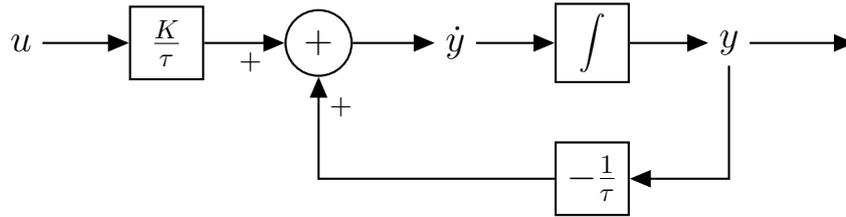
Voir TP précédent.

Exercice 6 = Janvier 2023 - Q2 (ii) et adapté

(a) Modèle d'état ?

- Entrée $u(t) : \mathbb{R}^+ \rightarrow \mathbb{R}$
- Sortie $y(t) : \mathbb{R}^+ \rightarrow \mathbb{R}$
- Variable d'état : Ordre de la plus grande dérivée = 1 → 1 variable d'état = $x : \mathbb{R}^+ \rightarrow \mathbb{R}$
- Loi de mise à jour : $\dot{x} = \frac{1}{\tau} x + \frac{K}{\tau} u = \underbrace{\left(\frac{1}{\tau}\right)}_A x + \underbrace{\left(\frac{K}{\tau}\right)}_B u$
- Loi de sortie : $y = x = \underbrace{(1)}_C x + \underbrace{(0)}_D u$

(b) Bloc diagramme :



Exercice 7 = Exercice 2 modifié de <https://jalelghabi.weebly.com>

(a) Modèle d'état ?

- Entrée $u(t) : \mathbb{R}^+ \rightarrow \mathbb{R}$
- Sortie $y(t) : \mathbb{R}^+ \rightarrow \mathbb{R}$
- Méthode des variables auxiliaires car l'entrée est sous forme dérivée. En utilisant la variable auxiliaire v , on a

$$\begin{cases} \ddot{v} - \ddot{v} = u \\ y = \dot{v} + 2\ddot{v} \end{cases}$$

Vecteur d'état à 3 variables $\underline{x} = (x_1, x_2, x_3)^T = (v, \dot{v}, \ddot{v})^T (\mathbb{R}^+ \rightarrow \mathbb{R}^3)$

- Loi de mise à jour : $\begin{pmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_2 \\ x_3 \\ x_3 + u \end{pmatrix} = \underbrace{\begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}}_A \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} + \underbrace{\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}}_B u$
- Loi de sortie : $y = x_2 + 2x_3 = \underbrace{\begin{pmatrix} 0 & 1 & 2 \end{pmatrix}}_C \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} + \underbrace{\begin{pmatrix} 0 \end{pmatrix}}_D u$

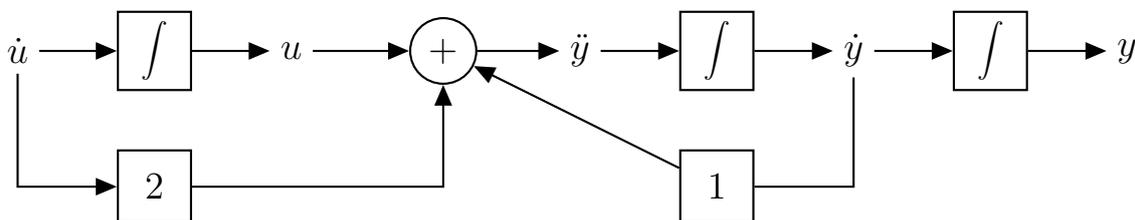
(b) Non, ce vecteur d'état à 3 variables n'est pas minimal car l'état x_1 n'apporte aucune information nécessaire et suffisante \Rightarrow elle est redondante ou inutile. Un modèle d'état minimal dérivé de (a) est $(x = (x_2, x_3)^T)$:

$$\begin{pmatrix} \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_3 \\ x_3 + u \end{pmatrix} = \underbrace{\begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}}_A \begin{pmatrix} x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} + \underbrace{\begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}}_B u$$

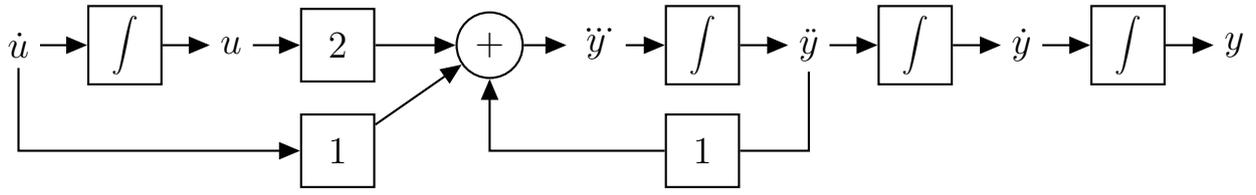
$$y = x_2 + 2x_3 = \underbrace{\begin{pmatrix} 1 & 2 \end{pmatrix}}_C \begin{pmatrix} x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} + \underbrace{\begin{pmatrix} 0 \end{pmatrix}}_D u$$

(c) Si on a $\dot{u} + 2u$ au lieu de $\ddot{u} + u$, alors le modèle d'état en (a) est minimal car on a besoin de x_1 et x_2 pour prédire la sortie et on a aussi besoin de x_3 pour décrire l'évolution de x_2 .

(d) Pour la version minimale en (b) : $\ddot{y} - \ddot{y} = 2\ddot{u} + \dot{u}$ (à noter que c'est équivalent à $\ddot{y} - \dot{y} = 2\dot{u} + u$)



Pour la version minimale en (c) (avec $2u + \dot{u}$) : $\ddot{y} - \dot{y} = 2u + \dot{u}$



L'étudiant.e remarquera entre autres le changement de nombre d'intégrateurs pour y et ses dérivées.

TP5

Remarque : Les modèles d'état et bloc-diagrammes associés à un système ne sont pas uniques (cf. rappel théorique). Nous présentons ici une seule possibilité, qui nous semble être la plus directe, pour chaque exercice. Les autres possibilités sont toutes équivalentes à cette première moyennant un changement de variable, que l'étudiant pourra rechercher explicitement (matrice T du rappel théorique) en cas de doute.

Exercice 1 = Exercice 4.26 [TXB]

a) $h_1^* = \left(\frac{u^*}{\alpha}\right)^2$ et $h_2^* = \left(\frac{2u^*}{\alpha}\right)^2$

b) Remplaçant les variables $u(t)$, $y(t)$ et $x(t)$ par leurs variations aux voisinages du point de fonctionnement stationnaire ($\bar{u}(t) = u(t) - q_i^*$, $\bar{y}(t) = y(t) - \alpha\sqrt{h_2^*}$, $\bar{x}_1(t) = x_1(t) - h_1^*$, $\bar{x}_2(t) = x_2(t) - h_2^*$) on obtient

- loi de sortie : $\bar{y} = \frac{\alpha}{2\sqrt{h_2^*}}\bar{x}_2$

- mise à jour de l'état :

$$\begin{aligned}\dot{\bar{x}}_1 &= \frac{1}{\gamma} \left(\bar{u} - \frac{\alpha}{2\sqrt{h_1^*}}\bar{x}_1 \right) \\ \dot{\bar{x}}_2 &= \frac{1}{\gamma} \left(\bar{u} + \frac{\alpha}{2\sqrt{h_1^*}}\bar{x}_1 - \frac{\alpha}{2\sqrt{h_2^*}}\bar{x}_2 \right)\end{aligned}$$

Résolution complète

(a) On a

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = 0 & \implies h_1^* = \left(\frac{u^*}{\alpha}\right)^2 \\ \dot{x}_2 = 0 & \implies h_2^* = \left(\frac{2u^*}{\alpha}\right)^2 \end{cases}$$

suivi de,

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = 0 & \iff 0 = \frac{1}{\gamma}u^* - \frac{\alpha}{\gamma}\sqrt{x_1^*} & \iff u^* = \alpha\sqrt{h_1^*} & \iff h_1^* = \left(\frac{u^*}{\alpha}\right)^2 \\ \dot{x}_2 = 0 & \iff 0 = u^* + \alpha\sqrt{h_1^*} - \alpha\sqrt{h_2^*} & \iff \sqrt{h_2^*} = \frac{2u^*}{\alpha} & \iff h_2^* = \left(\frac{2u^*}{\alpha}\right)^2 \end{cases}$$

et la sortie

$$y^* = \alpha\sqrt{h_2^*}$$

Le point de fonctionnement stationnaire (u^*, x^*, y^*) (avec $x^* = (h_1^*, h_2^*)^T$) est donc

$$\left(u^*, \begin{pmatrix} \left(\frac{u^*}{\alpha}\right)^2 \\ \left(\frac{2u^*}{\alpha}\right)^2 \end{pmatrix}, \alpha\sqrt{h_2^*} \right)$$

(b) **Méthode 1**

Résolution complète

Loi de sortie :

i. Remplacer (u, x, y) par $(u^* + \delta u, x^* + \delta x, y^* + \delta y)$ ⁸ :

$$y = \alpha\sqrt{x_2} \longrightarrow y^* + \delta y = \alpha\sqrt{x_2^* + \delta x_2}$$

ii. Développer les termes non-linéaires par Mac Laurin en fonction de δu , δx , δy :

Ici, le terme non-linéaire en δx_2 est $\sqrt{x_2^* + \delta x_2}$:

$$f(\delta x_2) = \alpha\sqrt{x_2^* + \delta x_2} \sim \alpha\sqrt{x_2^*} + \frac{\alpha}{2\sqrt{x_2^*}}\delta x_2$$

⁸. Au TP1, la petite perturbation était notée u et v mais afin de ne pas confondre avec la variable d'entrée et sortie, elle est remplacée par δx_1 et δx_2 .

- iii. Négliger les termes d'ordre ≥ 2 en $\delta u, \delta x, \delta y$:
Ici rien à faire, mais il aurait pu y avoir $\delta x \delta u, (\delta x)^2, \dots$

$$y^* + \delta y = \alpha \sqrt{x_2^*} + \frac{\alpha}{2\sqrt{x_2^*}} \delta x_2$$

- iv. Compenser les termes indépendants :
(Utiliser les résultats du point a).

$$y^* + \delta y = \alpha \sqrt{x_2^*} + \frac{\alpha}{2\sqrt{x_2^*}} \delta x_2$$

Notre loi de sortie est donc maintenant bien linéaire en $\delta u, \delta x, \delta y$

$$\boxed{\delta y = \frac{\alpha}{2\sqrt{x_2^*}} \delta x_2 = \frac{\alpha}{2\sqrt{h_2^*}} \delta x_2}$$

Loi de mise à jour (1) :

- i. Remplacer (u, x, y) par $(u^* + \delta u, x^* + \delta x, y^* + \delta y)$:

$$\dot{x}_1 = \frac{1}{\gamma} u - \frac{\alpha}{\gamma} \sqrt{x_1} \longrightarrow \dot{x}_1^* + \delta \dot{x}_1 = \frac{1}{\gamma} (u^* + \delta u) - \frac{\alpha}{\gamma} \sqrt{x_1^* + \delta x_1}$$

Sachant que $\dot{x}_1^* = 0$, puisqu'il s'agit de la dérivée du point stationnaire qui ici est bien un nombre)

- ii. Développer les termes non-linéaires par Mac Laurin en fonction de $\delta u, \delta x, \delta y$:

$$\sqrt{x_1^* + \delta x_1} \sim \sqrt{x_1^*} + \frac{1}{2\sqrt{x_1^*}} \delta x_1$$

- iii. Négliger les termes d'ordre ≥ 2 en $\delta u, \delta x, \delta y$:
Ici rien à faire.

- iv. Compenser les termes indépendants :
Utiliser les résultats du point a)

$$\delta \dot{x}_1 = \frac{1}{\gamma} \cancel{u^*} + \frac{1}{\gamma} \delta u - \frac{\alpha}{\gamma} \cancel{\sqrt{x_1^*}} - \frac{\alpha}{2\gamma\sqrt{x_1^*}} \delta x_1$$

Notre loi de mise à jour (1) est donc maintenant bien linéaire en $\delta u, \delta x, \delta y$

$$\boxed{\delta \dot{x}_1 = \frac{1}{\gamma} \delta u - \frac{\alpha}{2\gamma\sqrt{h_1^*}} \delta x_1}$$

Loi de mise à jour (2) :

- i.

$$\underbrace{\dot{x}_2^*}_{=0} + \delta \dot{x}_2 = \frac{1}{\gamma} (u^* + \delta u) + \frac{\alpha}{\gamma} \sqrt{x_1^* + \delta x_1} - \frac{\alpha}{\gamma} \sqrt{x_2^* + \delta x_2}$$

- ii.

$$\sqrt{x_i^* + \delta x_i} \sim \sqrt{x_i^*} + \frac{1}{2\sqrt{x_i^*}} \delta x_i \quad i \in \{1, 2\}$$

- iii. /

- iv.

$$\delta \dot{x}_2 = \frac{1}{\gamma} \cancel{u^*} + \frac{1}{\gamma} \delta u + \frac{\alpha}{\gamma} \cancel{\sqrt{x_1^*}} + \frac{\alpha}{2\gamma\sqrt{x_1^*}} \delta x_1 - \frac{\alpha}{\gamma} \cancel{\sqrt{x_2^*}} - \frac{\alpha}{2\gamma\sqrt{x_2^*}} \delta x_2$$

Notre loi de mise à jour (2) est donc maintenant bien linéaire en δu , δx , δy

$$\delta \dot{x}_2 = \frac{1}{\gamma} \delta u + \frac{\alpha}{2\gamma\sqrt{h_1^*}} \delta x_1 - \frac{\alpha}{2\gamma\sqrt{h_2^*}} \delta x_2$$

À faire : écrire la loi de sortie et celles de mise à jour sous forme matricielle (c'est-à-dire déterminer les matrices A , B , C , D) : c'est le *modèle d'état du système linéarisé* autour du point d'équilibre considéré!

$$\begin{pmatrix} \delta \dot{x}_1 \\ \delta \dot{x}_2 \end{pmatrix} = A \begin{pmatrix} \delta x_1 \\ \delta x_2 \end{pmatrix} + B \delta u$$

$$\delta y = C \begin{pmatrix} \delta x_1 \\ \delta x_2 \end{pmatrix} + D \delta u$$

$$A = \begin{pmatrix} -\frac{\alpha}{2\gamma\sqrt{h_1^*}} & 0 \\ \frac{\alpha}{2\gamma\sqrt{h_1^*}} & -\frac{\alpha}{2\gamma\sqrt{h_2^*}} \end{pmatrix} \quad B = \begin{pmatrix} \frac{1}{\gamma} \\ \frac{1}{\gamma} \end{pmatrix}$$

$$C = \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{\alpha}{2\sqrt{x_2^*}} \end{pmatrix} \quad D = (0)$$

Méthode 2

Résolution complète

Loi de sortie :

$$y = g(x_1, x_2, u) \rightarrow y = \left(\frac{\partial g}{\partial x_1} \quad \frac{\partial g}{\partial x_2} \right) \Big|_{(x_1^*, x_2^*, u^*)} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} + \frac{\partial g}{\partial u} \Big|_{(x_1^*, x_2^*, u^*)} u$$

Loi de mise à jour (1) :

$$\dot{x}_1 = f_1(x_1, x_2, u) \rightarrow \dot{x}_1 = \left(\frac{\partial f_1}{\partial x_1} \quad \frac{\partial f_1}{\partial x_2} \right) \Big|_{(x_1^*, x_2^*, u^*)} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} + \frac{\partial f_1}{\partial u} \Big|_{(x_1^*, x_2^*, u^*)} u$$

Loi de mise à jour (2) :

$$\dot{x}_2 = f_2(x_1, x_2, u) \rightarrow \dot{x}_2 = \left(\frac{\partial f_2}{\partial x_1} \quad \frac{\partial f_2}{\partial x_2} \right) \Big|_{(x_1^*, x_2^*, u^*)} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} + \frac{\partial f_2}{\partial u} \Big|_{(x_1^*, x_2^*, u^*)} u$$

Matriciellement, on peut écrire les équations précédentes :

$$\begin{pmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1}{\partial x_2} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2}{\partial x_2} \end{pmatrix} \Big|_{(x_1^*, x_2^*, u^*)} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial u} \\ \frac{\partial f_2}{\partial u} \end{pmatrix} \Big|_{(x_1^*, x_2^*, u^*)} u$$

$$y = \begin{pmatrix} \frac{\partial g}{\partial x_1} & \frac{\partial g}{\partial x_2} \end{pmatrix} \Big|_{(x_1^*, x_2^*, u^*)} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} + \left(\frac{\partial g}{\partial u} \right) \Big|_{(x_1^*, x_2^*, u^*)} u$$

On trouve

$$A = \begin{pmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1}{\partial x_2} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2}{\partial x_2} \end{pmatrix} \Big|_{(x_1^*, x_2^*, u^*)} = \begin{pmatrix} -\frac{\alpha}{2\gamma\sqrt{h_1^*}} & 0 \\ \frac{\alpha}{2\gamma\sqrt{h_1^*}} & -\frac{\alpha}{2\gamma\sqrt{h_2^*}} \end{pmatrix}$$

$$B = \begin{pmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial u} \\ \frac{\partial f_2}{\partial u} \end{pmatrix} \Big|_{(x_1^*, x_2^*, u^*)} = \begin{pmatrix} \frac{1}{\gamma} \\ \frac{1}{\gamma} \end{pmatrix}$$

$$C = \begin{pmatrix} \frac{\partial g}{\partial x_1} & \frac{\partial g}{\partial x_2} \end{pmatrix} \Big|_{(x_1^*, x_2^*, u^*)} = \begin{pmatrix} 0 & \frac{\alpha}{2\sqrt{x_2^*}} \end{pmatrix}$$

$$D = \left(\frac{\partial g}{\partial u} \right) \Big|_{(x_1^*, x_2^*, u^*)} = (0)$$

Pour conclure : La dynamique du système global est donnée par :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = f(x(t), u(t)) \\ y(t) = g(x(t), u(t)) \end{cases}$$

Si le système est non-linéaire, on linéarise autour de points fixes afin de rendre les lois de mise à jour et de sortie linéaires. On peut donc écrire les lois à l'aide des matrices A,B,C,D :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) = Cx(t) + Du(t) \end{cases}$$

Exercice 2 = Exercice 4.11 [TXB]

Rappel énoncé : $y + (\dot{y} - 2)u = u^2$

a) Linéariser autour d'une solution quelconque donnée :

On pose $y = y^* + \delta y$ et $u = u^* + \delta u$. On trouve alors

$$\dot{y} = \dot{y}^* + \delta \dot{y} = (2t + 1) + \delta \dot{y} = 2 + \delta \dot{y}$$

(! ne pas oublier de dériver la solution QUELCONQUE!) et

$$u^2 = (u^* + \delta u)^2 = (u^*)^2 + (\delta u)^2 + 2u^*\delta u$$

En remplaçant dans l'équation différentielle, on trouve :

$$\begin{aligned} (y^* + \delta y) + (\mathcal{Z} + \delta \dot{y} - \mathcal{Z})(u^* + \delta u) &= (u^*)^2 + (\delta u)^2 + 2u^*\delta u \\ 2t + 1 + \delta y + \underbrace{\delta \dot{y}(\sqrt{2t+1} + \delta u)}_{\sqrt{2t+1}\delta y + \delta y \delta u} &= 2t + 1 + (\delta u)^2 + 2\sqrt{2t+1}\delta u \end{aligned}$$

En négligeant les termes non-linéaires de second ordre et en simplifiant les termes égaux dans chaque membre, l'équation différentielle linéarisée est :

$$\sqrt{2t+1}\delta \dot{y} + \delta y = 2\sqrt{2t+1}\delta u$$

b) Pourquoi l'équation linéarisée n'est pas analysable avec les nouveaux outils développés ? Parce que ce système est temps-variant, alors que nous considérons particulièrement les systèmes LTI.

c) Choix de (u^*, y^*) pour que le système linéarisé soit LTI ? On aimerait choisir une solution où u^* et y^* sont constants, *i.e.* $\dot{y} = 0$. On obtient alors $y^* = (u^*)^2 + 2u^*$. A nouveau, on pose $y = y^* + \delta y$ et $u = u^* + \delta u$. On trouve alors $\dot{y} = \dot{y}^* + \delta \dot{y} = \delta \dot{y}$ et $u^2 = (u^* + \delta u)^2 = (u^*)^2 + (\delta u)^2 + 2u^*\delta u$. En remplaçant dans l'équation différentielle de départ, on a

$$\begin{aligned} (y^* + \delta y) + (\delta \dot{y} - 2)(u^* + \delta u) &= (u^*)^2 + (\delta u)^2 + 2u^*\delta u \\ ((u^*)^2 + 2u^* + \delta y) + \delta \dot{y}(u^* + \delta u) &= (u^*)^2 + (\delta u)^2 + 2u^*\delta u + 2\delta u + 2u^* \end{aligned}$$

En négligeant les termes non-linéaires de second ordre et en simplifiant les termes égaux dans chaque membre, l'équation différentielle linéarisée est :

$$u^*\delta \dot{y} + \delta y = (2u^* + 2)\delta u.$$

Exercice 3 = Exercice 4.20 [TXB]

a) Les PFs sont déterminés par $\dot{x}_1 = \dot{x}_2 = 0$. Ainsi, on trouve $x_2^* = 0$ et $\sin x_1 \left[\frac{g}{L} - \frac{ka^2}{mL^2 \cos x_1} \right] = 0$. Si on résout cette dernière équation, on trouve :

$$\begin{aligned} \sin x_1 = 0 \quad \text{OU} \quad \frac{g}{L} = \frac{ka^2}{mL^2 \cos x_1} \\ \Leftrightarrow \begin{cases} x_1^* = 0 \\ x_1^* = \pi \\ x_1^* = -\pi \end{cases} \quad \text{OU} \quad \cos x_1 = \frac{ka^2}{mLg} \Leftrightarrow \begin{cases} x_1^* = \arccos \frac{ka^2}{mLg} \\ x_1^* = -\arccos \frac{ka^2}{mLg} \end{cases} \end{aligned}$$

Pour $-\pi < -\theta_{max} < 0 < \theta_{max} < \pi$, les PFs $(\theta, \dot{\theta}) = (x_1, x_2)$ sont donc $(0, 0)$; $(\arccos \frac{ka^2}{mLg}, 0)$; $(-\arccos \frac{ka^2}{mLg}, 0)$
si et seulement si $\frac{a}{L} < \frac{ka^2}{mLg} < 1$

b) Pour déterminer la stabilité de chaque point fixe, il faut calculer les valeurs propres de

$$\begin{pmatrix} \frac{\partial \dot{x}_1}{\partial x_1} & \frac{\partial \dot{x}_1}{\partial x_2} \\ \frac{\partial \dot{x}_2}{\partial x_1} & \frac{\partial \dot{x}_2}{\partial x_2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{ka^2}{mL^2} \frac{1}{\cos^2 x_1} + \frac{g}{L} \cos x_1 & -\frac{b}{mL^2} \end{pmatrix}$$

Pour $\theta = x_1 = 0$, on a :

$$\begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{ka^2}{mL^2} + \frac{g}{L} & -\frac{b}{mL^2} \end{pmatrix} \rightarrow \lambda_{1,2} = \frac{-\frac{b}{mL^2} \pm \sqrt{\left(\frac{-b}{mL^2}\right)^2 - 4\left(\frac{ka^2}{mL^2} - \frac{g}{L}\right)}}{2}$$

Si $\frac{a}{L} < \frac{ka^2}{mLg} < 1$, alors l'argument de la racine carrée est positif. Une valeur propre est donc positive et l'autre négative \Rightarrow ce PF est un point de selle et donc instable. (Si $\frac{a}{L} < \frac{ka^2}{mLg} > 1$, alors le PF est un point stable ou une spirale stable selon les valeurs exactes des paramètres.)

Pour les 2 autres PFs, on a :

$$\begin{pmatrix} 0 & 1 \\ \frac{ka^2}{mL^2} \left[1 - \left(\frac{mLg}{ka^2}\right)^2\right] & -\frac{b}{mL^2} \end{pmatrix} \rightarrow \lambda_{1,2} = \frac{-\frac{b}{mL^2} \pm \sqrt{\left(\frac{-b}{mL^2}\right)^2 - 4\frac{ka^2}{mL^2} \left[\left(\frac{mLg}{ka^2}\right)^2 - 1\right]}}{2}$$

Puisque $\frac{ka^2}{mLg} < 1$, ces PFs sont stables (noeud ou spirale selon les valeurs de paramètres).

c) En linéarisant autour de $(\pm \arccos \frac{ka^2}{mLg}, 0)$ et en considérant $\bar{x} = x - x^*$ comme un vecteur colonne, on obtient

$$\begin{aligned} \dot{\bar{x}}(t) &= \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ \frac{a^2k}{mL^2} \left(1 - \left(\frac{mgL}{a^2k}\right)^2\right) & \frac{-b}{mL^2} \end{bmatrix} \bar{x}(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{mL^2} \end{bmatrix} \bar{u}(t) \\ y(t) &= \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \bar{x}(t) + \begin{bmatrix} 0 \end{bmatrix} \bar{u}(t). \end{aligned}$$

Exercice 4 Juin 2016

(i) On a par la loi des mailles que

$$y = v_C = v_{RL} = u - v_{R_1} = v_R + v_L$$

et par la loi des nœuds que

$$i_{RL} = i_{R_1} - i_C.$$

Enfin les lois des composantes nous donnent :

$$i_{R_1} = \frac{u - y}{R_1}, \quad v_L = Li'_{RL}, \quad i_C = Cy'.$$

Les variables d'état sont les accumulateurs d'énergie, à savoir v_C (le potentiel aux bornes de la capacité) et i_L (courant dans la bobine). Nous déduisons les relations de mise à jour suivantes :

$$\begin{aligned} v'_C &= \frac{1}{C} i_C = \frac{1}{C} \left(\frac{u - v_C}{R_1} - i_L \right), \\ i'_L &= \frac{1}{L} v_L = \frac{1}{L} (v_C - Ri_L). \end{aligned}$$

Et la sortie est donnée par $y = v_C$. En considérant comme vecteur d'état $x = (v_C, i_L)$, le modèle d'état correspondant est donné par

$$A = \begin{pmatrix} -\frac{1}{R_1 C} & -\frac{1}{C} \\ \frac{1}{L} & -R \end{pmatrix}, \quad B = \begin{pmatrix} \frac{1}{R_1 C} \\ 0 \end{pmatrix}, \quad C = \begin{pmatrix} 1 & 0 \end{pmatrix}, \quad D = 0.$$

(ii)

$$y = Ri_L + Li'_L = R\left(\frac{u-y}{R_1} - Cy'\right) + L\left(\frac{u'-y'}{R_1} - Cy''\right),$$
$$LCy'' + \left(\frac{L}{R_1} + CR\right)y' + \left(\frac{R}{R_1} + 1\right)y = \frac{L}{R_1}u' + \frac{R}{R_1}u.$$

Exercice 5 Août 2016

(i) On a par la loi des mailles que

$$y = v_C = x_1 = v_{RL}$$

et par la loi des nœuds que

$$i_C = i_{R_1} - i_{R_2} - i_L.$$

Enfin, les lois des composants nous donnent

$$i_{R_1} = \frac{u-y}{R_1}, \quad i_{R_2} = \frac{y}{R_2}, \quad v_L = Li'_L, \quad i_C = Cy'.$$

Les variables d'état sont les accumulateurs d'énergie, à savoir v_C (le potentiel aux bornes de la capacité) et i_L (courant dans la bobine). Nous déduisons les relations de mise à jour suivantes :

$$v'_C = \frac{1}{C}i_C = \frac{1}{C}\left(\frac{u-v_C}{R_1} - \frac{v_C}{R_2} - i_L\right),$$
$$i'_L = \frac{1}{L}v_L = \frac{1}{L}v_C.$$

La sortie est donnée par $y = v_C$. En considérant comme vecteur d'état $x = (v_C, i_L)$, le modèle d'état correspondant est donné par

$$A = \begin{pmatrix} -\frac{1}{R_1C} - \frac{1}{R_2C} & -\frac{1}{C} \\ \frac{1}{L} & 0 \end{pmatrix}, \quad B = \begin{pmatrix} \frac{1}{R_1C} \\ 0 \end{pmatrix}, \quad C = (1 \quad 0), \quad D = 0.$$

(ii)

$$y' = -\frac{1}{C}\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right)y - \frac{1}{C}x_2 + \frac{1}{R_1C}u,$$
$$y'' + \frac{1}{C}\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right)y' + \frac{1}{LC}y = \frac{1}{R_1C}u.$$

Exercice 6 Janvier 2017

(i)

$$\dot{x} = \alpha x - \beta xy,$$
$$\dot{y} = \delta xy - \gamma y.$$

(ii) À cause du produit xy .

(iii) Les points d'équilibre du système correspondent aux valeurs de x et y solutions du système obtenues pour $\dot{x} = \dot{y} = 0$.

On trouve donc comme solutions :

- PF1 : $(x^*, y^*) = (0, 0)$,
- PF2 : $(x^*, y^*) = \left(\frac{\gamma}{\delta}, \frac{\alpha}{\beta}\right)$.

(iv) Soient Δx et Δy des petites perturbations autour de la position d'équilibre (x^*, y^*) , on injecte

$$\begin{aligned}x &\rightarrow x^* + \Delta x, \\y &\rightarrow y^* + \Delta y\end{aligned}$$

et donc

$$\begin{aligned}\dot{x} &\rightarrow \Delta \dot{x}, \\ \dot{y} &\rightarrow \Delta \dot{y}\end{aligned}$$

dans le système.

Dès lors, on obtient (en négligeant les termes d'ordre 2)

— en $(0, 0)$:

$$\begin{aligned}\Delta \dot{x} &= \alpha \Delta x, \\ \Delta \dot{y} &= -\gamma \Delta x,\end{aligned}$$

— en $\left(\frac{\gamma}{\delta}, \frac{\alpha}{\beta}\right)$:

$$\begin{aligned}\Delta \dot{x} &= -\beta \frac{\gamma}{\delta} \Delta x, \\ \Delta \dot{y} &= \delta \frac{\alpha}{\beta} \Delta x.\end{aligned}$$

Le même résultat peut être obtenu en dérivant

$$\begin{pmatrix} \Delta \dot{x} \\ \Delta \dot{y} \end{pmatrix} = J \begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{pmatrix}$$

où J est la matrice jacobienne du système (évaluée au point fixe concerné) :

$$J = \begin{pmatrix} \frac{\partial f_x}{\partial x} & \frac{\partial f_x}{\partial y} \\ \frac{\partial f_y}{\partial x} & \frac{\partial f_y}{\partial y} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \alpha - \beta y & -\beta x \\ \delta y & -\gamma + \delta x \end{pmatrix}.$$

(v) La stabilité de chaque point d'équilibre est déterminée par le signe des valeurs propres de la matrice jacobienne évaluée en ces points.

En $(0, 0)$: $\lambda_1 = \alpha$ et $\lambda_2 = -\lambda$, le point est instable (point de selle).

En $\left(\frac{\gamma}{\delta}, \frac{\alpha}{\beta}\right)$: $\lambda_{1,2} = \pm j\sqrt{\gamma\alpha}$, le point est marginalement stable.

Exercice 7 Août 2017

Question 1

(i) — Entrée : $F, \mathbb{R}^+ \rightarrow \mathbb{R}$.

— Variables d'état :

— Position horizontale du chariot $x, \mathbb{R}^+ \rightarrow \mathbb{R}$.

— Vitesse horizontale du chariot $\dot{x}, \mathbb{R}^+ \rightarrow \mathbb{R}$.

— Position angulaire du pendule $\theta, \mathbb{R}^+ \rightarrow \left(-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right)$.

— Vitesse angulaire du pendule $\dot{\theta}, \mathbb{R}^+ \rightarrow \mathbb{R}$.

(ii) Fonctions non linéaires de θ , de $\dot{\theta}$ et produits de variables d'état.

(iii) Pour ce faire, on considère $\dot{\theta} = \dot{x} = \ddot{\theta} = \ddot{x} = 0$. On trouve donc $\theta = 0$ et $u = 0$. Dès lors, $x = 0$ aussi. Point d'équilibre instable.

(iv) Selon la méthode des petites perturbations, on trouve $\cos \theta \approx 1$ et $\sin \theta \approx \theta$. Dès lors, on a

$$\begin{aligned}(M + m)\delta\ddot{x} - ml\delta\ddot{\theta} &= \delta u, \\ l\delta\ddot{\theta} - \delta\ddot{x} &= g\delta\theta.\end{aligned}$$

(v) Soit le vecteur d'état $(\theta, \dot{\theta}, x, \dot{x})^T$, on obtient

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ \frac{M+m}{M} \frac{g}{l} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{m}{M} g & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, B = \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{1}{Ml} \\ 0 \\ \frac{1}{M} \end{pmatrix}, C = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}, D = 0.$$

(vi)

Question 2

(i) On introduit les variables intermédiaire $v(t)$ et $\dot{v}(t)$ telles que

$$\begin{aligned} \ddot{v} - v &= u, \\ \ddot{v} + 2\dot{v} + v &= y. \end{aligned}$$

Dès lors, en prenant $x(t) = (v(t), \dot{v}(t))^T$ comme vecteur d'état, on trouve le modèle d'état suivant :

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}, B = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}, C = \begin{pmatrix} 2 & 2 \end{pmatrix}, D = 1.$$

(ii) Bloc diagramme avec deux blocs de dérivation en série.

Exercice 8 Janvier 2018

(i)

$$\begin{aligned} i_C + i_D + i_L &= u \\ \Leftrightarrow C \frac{dV}{dt} + (V^3 - \alpha V) + \frac{1}{L} \int V dt &= u. \end{aligned}$$

En dérivant chaque membre, on obtient

$$\begin{aligned} C\ddot{V} + (3V^2 - \alpha)\dot{V} + \frac{1}{L}V &= \dot{u} \\ \Leftrightarrow \ddot{V} + \frac{1}{C}(3V^2 - \alpha)\dot{V} + \frac{1}{LC}V &= \dot{u}. \end{aligned}$$

(ii) Non-linéaire (terme en $V^2\dot{V}$), temps-invariant car aucun paramètre ne dépend du temps. On choisit les variables d'état $x_1 = V, x_2 = \dot{V}$, ce qui donne

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 & (= f_2) \\ \dot{x}_2 &= \frac{1}{C}(\alpha - 3x_1^2)x_2 - \frac{1}{LC}x_1 & (= f_2). \end{aligned}$$

On calcule les points d'équilibre en résolvant le système d'équations pour $\dot{x}_1 = \dot{x}_2 = 0$, ce qui donne le point $(x_1^*, x_2^*) = (0, 0)$.

(iii) Système non linéaire, calcul de la matrice jacobienne évalué au point fixe pour la linéarisation :

$$J = \left(\begin{array}{cc} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1}{\partial x_2} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2}{\partial x_2} \end{array} \right) \Big|_{(x_1^*, x_2^*)=(0,0)} = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{1}{LC} & \frac{\alpha}{C} \end{pmatrix},$$

ce qui donne (sans considérer l'effet de l'entrée)

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{1}{LC} & \frac{\alpha}{C} \end{pmatrix}, B = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}, C = \begin{pmatrix} 1 & 0 \end{pmatrix}, D = 0.$$

(iv) On calcule les valeurs propres de la matrice A ($\det(sI - A) = 0$) :

$$\begin{pmatrix} s & -1 \\ \frac{1}{LC} & s - \frac{\alpha}{C} \end{pmatrix} = 0 \\ \iff s^2 - \frac{\alpha}{C}s + \frac{1}{LC} = 0$$

ce qui donne les valeurs propres

$$s_{1,2} = \frac{1}{2} \left(\frac{\alpha}{C} \pm \sqrt{\frac{\alpha^2}{C^2} - 4 \frac{1}{LC}} \right).$$

i stable et de réponse impulsionnelle monotone si $\alpha < 0$ et $\frac{\alpha^2}{C^2} - 4 \frac{1}{LC} > 0$, ce qui donne

$$\alpha < -2\sqrt{\frac{C}{L}},$$

ii stable et de réponse impulsionnelle oscillatoire si $\alpha < 0$ et $\frac{\alpha^2}{C^2} - 4 \frac{1}{LC} < 0$, ce qui donne

$$-2\sqrt{\frac{C}{L}} < \alpha < 0,$$

iii instable et de réponse impulsionnelle monotone si $\alpha > 0$ et $\frac{\alpha^2}{C^2} - 4 \frac{1}{LC} > 0$, ce qui donne

$$-2\sqrt{\frac{C}{L}} < \alpha,$$

iv instable et de réponse impulsionnelle oscillatoire si $\alpha > 0$ et $\frac{\alpha^2}{C^2} - 4 \frac{1}{LC} < 0$, ce qui donne

$$0 < \alpha < -2\sqrt{\frac{C}{L}}.$$

Exercice 9 Août 2018

(i) — Entrée : $F, \mathbb{R}^+ \rightarrow \mathbb{R}$.

— Sortie : $z, \mathbb{R}^+ \rightarrow \mathbb{R}$.

(ii)

$$(M + b)\ddot{z} + c\dot{z} + kz = F.$$

(iii) Les variables d'état sont données par

$$x_1 = z, \quad x_2 = \dot{z}.$$

Les lois de mise-à-jour sont donc données par

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= \frac{1}{M + b}(-kx_1 - cx_2 + F). \end{aligned}$$

La représentation d'état du système est dans ce cas donnée par

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ \frac{-k}{M+b} & \frac{-c}{M+b} \end{pmatrix}, \quad B = \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{1}{M+b} \end{pmatrix}, \quad C = \begin{pmatrix} 1 & 0 \end{pmatrix}, \quad D = 0.$$

Les valeurs propres λ de la matrice A sont données par $\lambda I - A = 0$, ce qui donne

$$\lambda^2 + \frac{c}{M + b}\lambda + \frac{k}{M + b} = 0,$$

et donc

$$\lambda_{1,2} = \frac{-c \pm \sqrt{c^2 - 4(M + b)k}}{2(M + b)}.$$

Le système est stable si $c > 0$.

(iv) Le point d'équilibre est donné par $(x_1^*, x_2^*) = \left(\frac{F}{k}, 0\right)$.

(v) /

(vi) Une réponse stable et oscillatoire correspond à des valeurs propres complexes dont la partie réelle est négative et la partie imaginaire non nulle.

Dans le cas étudié, cela correspond à une valeur de c positive et telle que

$$c^2 - 4(M + b)k < 0.$$

Exercice 10 Janvier 2019

(i) — Entrée : $u = F_{ext}, \mathbb{R}^+ \rightarrow \mathbb{R}$.

— Sortie : $y = x, \mathbb{R}^+ \rightarrow \mathbb{R}$.

— Variables d'état :

— $x_1 = x, \mathbb{R}^+ \rightarrow \mathbb{R}$,

— $x_2 = \dot{x}, \mathbb{R}^+ \rightarrow \mathbb{R}$.

(ii) — Mise-à-jour :

$$\dot{x}_1 = x_2,$$

$$\dot{x}_2 = \frac{-k_1}{m}x_1 - \frac{k_2}{m}x_1^3 - \frac{c}{m}x_2 + \frac{u}{m}.$$

— Loi de sortie :

$$y = x_1.$$

(iii) Le système est temps-invariant car nous avons affaire à une équation différentielle ordinaire dont les paramètres ne dépendent pas du temps.

(iv) Le système est non-linéaire (terme en x_1^3 .)

Les points d'équilibre sont donnés par

— PF1 : $(x_1^*, x_2^*) = (0, 0)$.

— PF2,3 : $(x_1^*, x_2^*) = \left(\pm\sqrt{\frac{-k_1}{k_2}}, 0\right), \text{sign}(k_1) \neq \text{sign}(k_2)$.

La représentation d'état du système linéarisé est donnée par

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ \frac{-k_1}{m} - \frac{3k_2(x_1^*)^2}{m} & \frac{-c}{m} \end{pmatrix}, B = \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{1}{m} \end{pmatrix}, C = (1 \ 0), D = 0.$$

On a donc, aux différents points d'équilibre :

— PF1 :

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ \frac{-k_1}{m} & \frac{-c}{m} \end{pmatrix}, B = \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{1}{m} \end{pmatrix}, C = (1 \ 0), D = 0.$$

— PF2,3 :

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ \frac{2k_1}{m} & \frac{-c}{m} \end{pmatrix}, B = \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{1}{m} \end{pmatrix}, C = (1 \ 0), D = 0.$$

(v) — PF1 :

$$\lambda_{1,2} = \frac{1}{2} \left(\frac{-c}{m} \pm \sqrt{\frac{c^2}{m^2} - 4\frac{k_1}{m}} \right).$$

— Stable et oscillatoire si $\frac{c^2}{m^2} - 4\frac{k_1}{m} < 0$, ce qui donne

$$k_1 > \frac{c^2}{4m}.$$

— Stable et monotone si $\frac{c^2}{m^2} - 4\frac{k_1}{m} > 0$ et $\frac{1}{2} \left(\frac{-c}{m} + \sqrt{\frac{c^2}{m^2} - 4\frac{k_1}{m}} \right) < 0$, ce qui donne

$$0 < k_1 < \frac{c^2}{4m}.$$

— Instable si $\frac{1}{2} \left(\frac{-c}{m} + \sqrt{\frac{c^2}{m^2} - 4\frac{k_1}{m}} \right) > 0$, ce qui donne

$$k_1 < 0.$$

— PF2,3 :

$$\lambda_{1,2} = \frac{1}{2} \left(\frac{-c}{m} \pm \sqrt{\frac{c^2}{m^2} - 8\frac{k_1}{m}} \right).$$

— Stable et oscillatoire si $\frac{c^2}{m^2} - 8\frac{k_1}{m} < 0$, ce qui donne

$$k_1 < \frac{-c^2}{8m}.$$

— Stable et monotone si $\frac{c^2}{m^2} - 8\frac{k_1}{m} > 0$ et $\frac{1}{2} \left(\frac{-c}{m} + \sqrt{\frac{c^2}{m^2} - 8\frac{k_1}{m}} \right) < 0$, ce qui donne

$$\frac{-c^2}{8m} < k_1 < 0.$$

— Instable si $\frac{1}{2} \left(\frac{-c}{m} + \sqrt{\frac{c^2}{m^2} - 8\frac{k_1}{m}} \right) > 0$, ce qui donne

$$k_1 > 0.$$

(vi) On ne considère que l'évolution de x_1^* en fonction de k_1 . Pour une valeur positive de k_2 , les points fixes 2 et 3 n'existent que pour des valeurs négatives de k_1 . Le PF1, lui, existe pour toutes les valeurs de k_1 .

Pour $k_1 < 0$, trois points fixes coexistent. Les courbes des PF2 et PF3 ont l'allure de " $y = \pm\sqrt{-x}$ " et sont tracées en trait plein, ces points fixes étant stables pour $k_1 < 0$. Le PF1 est lui tracé en pointillé.

Pour $k_1 \geq 0$, seul le point fixe PF1 existe, et doit être tracé en trait plein car stable pour ces valeurs de k_1 .