

Dynamique de réseaux multi-échelles complexes sous contraintes: Modélisation et Analyse

Liam Toran

Stage de fin de M2A 2019 au Laboratoire J.A. Dieudonné de l'Université de Nice
sous la supervision d'Yves D'Angelo, Rémi Catellier et Laurent Monasse.

Thèmes : Mathématiques et leurs Interactions, Modélisation, Analyse, Processus Stochastiques, Équations aux dérivées partielles et ordinaires, Stabilité, Réaction-Diffusion, Ondes progressives, Simulation Numérique.



FIGURE 1 – Capture d'un réseau de champignon en expansion,
par Éric Herbert, Gwenaël Ruprich-Robert et Florence Leclerc.

Table des matières

0	Introduction	3
1	L'équation de Fisher ou KPP	4
1.1	Preliminaire	4
1.2	Réaction	4
1.3	Réaction-Diffusion	4
1.4	Solutions d'ondes plane stationnaire / onde progressive	5
1.5	Dans l'exemple de Fisher-KPP	6
1.6	Théorèmes de sélection de la vitesse pour KPP	6
2	Dynamique de Réseaux en Croissance	8
2.1	Explication des équations du système (9)	8
2.2	Dérivation de l'équation "KPP avec mémoire"	9
2.3	Propriétés de l'équation de réaction associée à "KPP avec mémoire"	9
3	Recherche de la vitesse d'onde des solutions progressives de l'Équation KPP avec Mémoire	11
3.1	Linéarisation au voisinage de $(0, 0, C_0)$	11
3.2	Linéarisation au voisinage de $(0, \rho_\infty, 0)$	12
4	Schémas Numériques	14
4.1	Pour l'équation différentielle ordinaire	14
4.2	Pour l'équation aux dérivées partielles	15
5	Résolution numérique	17
5.1	Résolution de l'EDO	17
5.2	Résolution de l'EDP en 1D	19
5.3	Résolution de l'EDP en 2D	21
6	Recherche de la vitesse d'onde des solutions progressives de l'Équation fluide complète du champignon.	23
6.1	Condition d'existence de racines toutes réelles	24
6.2	Condition d'amortissement et détermination de la vitesse d'onde sélectionnée	27
7	Simulation de l'équation fluide et confirmation du résultat de convergence de la vitesse d'onde sélectionnée vers la vitesse d'onde s_-	31
7.1	Schéma Numérique	31
7.2	Convergence de la vitesse du front	32
7.3	Sélection de la vitesse minimale d'amortissement	33
7.4	Validation de la condition d'amortissement critique	34

0 Introduction

Comment une information ou une rumeur peut être relayée et se propager au sein d'un réseau numérique ou social? Comment un champignon ou une plante envahit un milieu pour y chercher au mieux des substances nutritives? Comment des virus ou des microbes pathogènes peuvent se propager au sein d'une population humaine ou animale? Comment les marchandises, l'énergie, l'argent peuvent circuler de la "meilleure" façon au sein d'une économie?

Toutes ces questions semblent se référer à des problématiques sensiblement différentes et à priori étudiées dans des disciplines différentes. L'analyse de ces phénomènes est liée à la dynamique de propagation et diffusion au sein d'un réseau d'agents connectés. Leur description mathématique repose alors sur des modèles très similaires, qui portent sur la description et la caractérisation d'un nombre croissant d'"individus" en évolution, ainsi que de leurs interactions au sein d'un réseau en expansion spatiale.

Le but de ce stage consistait d'une part en l'analyse mathématique des modèles proposés, et d'autre part à développer des approches numériques permettant de simuler et d'analyser la dynamique de ces réseaux.

La première section de ce rapport est un rappel de résultats classiques sur les équations de réaction diffusion et en particulier l'équation de Fisher-KPP.

La seconde section consiste à l'introduction et l'explication du modèle étudié, le modèle de croissance de réseaux dynamiques branchant, ainsi que l'étude et l'analyse de certaines de ces propriétés. La troisième section expose le calcul de recherche de la vitesse d'onde pour les solutions progressives d'une approximation du modèle.

La quatrième section introduit les schémas numériques utilisés pour simuler le modèle approché, ainsi que l'analyse de ces schémas.

La cinquième expose alors les résultats de la simulation numérique ainsi que l'analyse de ces résultats : notamment, on obtient dans cette partie une validation pour la vitesse d'onde obtenue dans la troisième section.

La sixième section revient alors sur le modèle complet (non simplifié) et expose comment retrouver la vitesse d'onde dans ce cas.

La septième et dernière section valide ensuite le résultat de la section 6 sur différentes simulations.

1 L'équation de Fisher ou KPP

1.1 Préliminaire

Notre point de départ est l'équation de diffusion :

$$\partial_t u = \Delta u \quad (1)$$

En plus de la diffusion, considérons des modèles où le taux d'accroissement de u dépend aussi de la densité u .

Ceci donne les équations de réaction-diffusion :

$$\partial_t u = \Delta u + F(u) \quad (2)$$

où F est assez lisse.

Il est souvent naturel dans les modèles de considérer $F(u)$ proportionnel à u pour u petit ("croissance"), et quand u devient proche de 1, l'accroissement $F(u)$ s'arrête : $F(1) = 0$ ("saturation").

Ces types de modèles ont été introduits et examinés par les travaux de Fisher[1] et Kolmogorov, Petrovsky et Piscounov (abrégiés KPP).

Un exemple d'une telle équation est :

$$\partial_t u = \Delta u + ru(1 - u) \quad (3)$$

où $r > 0$, qui sera dans la suite étudiée dans le cas 1-dimensionnel en x : $u = u(x, t)$.

1.2 Réaction

En observant les solutions constantes en x : $u(x, t) = v(t)$ dans (3), l'équation différentielle ordinaire (EDO ou ODE) suivante est obtenue :

$$\partial_t v = r(v - v^2) = F(v) \quad (4)$$

Il y a deux équilibres ($F(v) = 0$) pour $v = 0$ et $v = 1$.

Par le théorème de stabilité de Lyapunov, $F'(0) > 0$ montre que $v = 0$ est instable et $F'(1) < 0$ montre $v = 1$ est asymptotiquement stable.

1.3 Réaction-Diffusion

Dans l'espace $X = C_{b,unif}^0(\mathbb{R}, \mathbb{R})$ des fonctions bornées et uniformément continues, il y a existence locale et unicité des solutions de l'équation de Fisher-KPP (2). Grâce à un principe du maximum, il y a aussi existence globale et unicité des solutions.

Théorème 1. Existence et Unicité de la solution de Fisher-KPP dans X :

Soit $U_0 \in X$. Il existe une unique solution de l'équation de Fisher-KPP (2) $U \in C([0, \infty[, X)$ avec condition initiale U_0 .

Théorème 2. Principe de comparaison :

Soient u_1 une sous-solution $C^{2,1}$ et u_2 une sur-solution $C^{2,1}$ de (2).

Si $u_1(x, 0) < u_2(x, 0) \forall x$ alors $u_1(x, t) < u_2(x, t) \forall x$ et $\forall t > 0$.

En particulier si u est une solution de (2) telle que $u_1(x, 0) < u(x, 0) < u_2(x, 0) \forall x$ alors :

$$u_1(x, t) < u(x, t) < u_2(x, t) \forall x, \forall t > 0 \quad (5)$$

Démonstration. Supposons par l'absurde qu'il existe $t_0 = \inf\{t > 0, \exists x/u_2(x, t) = u_1(x, t)\}$. Soit $x_0 = \inf\{x/u_1(x, t_0) = u_2(x, t_0)\}$. Par définition de x_0 et t_0 et comme u_1 et u_2 sont C^1 par rapport à t et comme $u_2(x_0, 0) < u_1(x_0, 0)$, il existe un voisinage de t_0 tel que $\partial_t(u_2 - u_1)(x_0, \cdot) < 0$. Comme de plus u_1 est une sur-solution et u_2 une sous solution, et $F(u_1(x_0, t_0)) = F(u_2(x_0, t_0))$ on en déduit :

$$\partial_{xx}^2(u_1 - u_2)(x_0, t_0) < 0. \quad (6)$$

Mais x_0 est un minimum local de la fonction $x \mapsto (u_1 - u_2)(t_0, x)$, ce qui contredit l'inégalité précédente donc l'existence de t_0 . \square

1.4 Solutions d'ondes plane stationnaire / onde progressive

Rappelons la définition d'une solution en onde plane stationnaire / onde progressive :

Définition 1.1. Solutions en onde plane stationnaires.

Une solution en onde plane stationnaire est une solution de la forme $u(x, t) = h(x - st)$ où $c \in \mathbb{R}$. On fera parfois l'abus de notation $u(x, t) = u(x - st)$

Sous des hypothèses "faibles" sur F , l'équation (2) : $\partial_t u = \Delta u + F(u)$ a alors la propriété surprenante et importante de posséder des solutions en ondes planes stationnaires liant les états d'équilibre $u = 1$ (à $-\infty$) et $u = 0$ (à $+\infty$).

Les hypothèses sur F portent en partie sur le fait que (2) doit posséder :

- Deux états d'équilibre $u = 1$ et $u = 0$: $F(0) = F(1) = 0$:
- Un phénomène de "croissance" : $F'(0) > 0$
- Un phénomène de "saturation" : $F'(1) < 0$

Étude des solutions en ondes progressive de (2) :

En substituant $u(x, t) = h(x - st) = h(y)$ pour $y = x - st$ dans (2), les équations obtenues sur h sont :

$$\begin{cases} h''(y) + sh'(y) + F(h(y)) = 0 \\ h(-\infty) = 1 \\ h(+\infty) = 0 \end{cases} \quad (7)$$

qui est une équation elliptique non linéaire. Le problème est donc de trouver s et $h \in C^2$ tels que le système (7) soit vérifié. Le théorème obtenu est le suivant :

Théorème 3. Existence de solutions en onde progressive pour les équations de réaction-diffusion :

Soit $F \in C^1([0, 1])$ tel $F(0) = F(1) = 0$ et $F \geq 0$.

Il existe une vitesse critique s_* telle que $s_*^2 \geq 4F'(0)$ et :

- i) $\forall s \geq s_*$, l'équation (7) a une solution $h_s : \mathbb{R} \rightarrow]0, 1[$ de classe C^3 . Cette solution est unique à translation près.
- ii) $\forall s < s_*$ l'équation (7) n'a pas de solution $h : \mathbb{R} \rightarrow [0, 1]$

Remarques :

Dans le cas ii) il existe des solutions en ondes planes mais elles ne sont pas confinées dans $[0, 1]$ ni dans \mathbb{R}^+ , ce qui ne fait pas de sens dans une étude de densité de population.

Dans le cas de l'équation de Fisher-KPP, c'est à dire pour $F(u) = r(u - u^2)$, on a $s_*^2 = 4F'(0) = 4r$: la vitesse minimale de propagation est $s^* = 2\sqrt{r}$.

1.5 Dans l'exemple de Fisher-KPP

Considérons l'équation de Fisher-KPP (3) : $\partial_t u = \Delta u + ru(1 - u)$.

Comme $u \equiv 0$ et $u \equiv 1$ sont des solutions particulières de (3), si $0 \leq u_0(x) \leq 1 \forall x$, alors par le principe du maximum on a $0 \leq u(x, t) \leq 1 \forall x, t$.

Soit h une solution en onde plane de (7) avec $0 \leq h \leq 1 \forall y$, i.e. $h''(y) + sh'(y) + rh(y) - rh^2(y) = 0$.

En linéarisant autour de l'état $h = 0$ on obtient :

$$h''(y) + sh'(y) + rh(y) = 0 \quad (8)$$

de polynôme caractéristique $X^2 + sX + r = 0$ et de discriminant $\Delta = s^2 - 4r$.

On voit alors que la condition $s^2 \geq 4r$ est nécessaire pour que $0 \leq h \leq 1$: c'est la condition d'amortissement fort de l'oscillateur autour de l'état $h = 0$.

1.6 Théorèmes de sélection de la vitesse pour KPP

Le théorème important suivant est du aux travaux de Kolmogorov, Petrovsky et Piscounov de 1937. C'est l'article et le résultat fondateur de la théorie des ondes planes dans les systèmes de réaction-diffusion.

Théorème 4. Convergence vers une solution d'onde à vitesse minimale pour les solutions de l'équation de Fisher-KPP avec une donnée initiale à support compact

Soit $u_0 \rightarrow]0, 1[$ une donnée initiale à support compact. Soit u la solution de l'équation de Fisher-KPP (3) avec $r = 1$ et de donnée initiale u_0 . Alors quand $t \rightarrow \infty$, u converge uniformément en x vers une solution d'onde h_{s^*} de (7) qui se déplace à vitesse minimale $s^* = 2$:

$$\sup_{y \in \mathbb{R}} |u(y + m(t), t) - h_{s^*}(y)| \rightarrow_{t \rightarrow \infty} 0$$

où $m(t) = 2t - (3/2) \log(t) + y_0$.

Remarque : La vitesse du front est alors $s(t) = \partial_t m(t) = 2 - \frac{3}{2t} \rightarrow_{t \rightarrow \infty} 2$.

Ce résultat a été raffiné par la suite par Uchiyama, Bramson et Lau. Leurs travaux apportent plus d'informations sur comment la vitesse du front se sélectionne en fonction de la donnée initiale, et comment il est possible d'obtenir d'autres vitesses de fronts que la vitesse minimale en fonction de la donnée initiale.

Théorème 5. Sélection de la vitesse pour les solutions de l'équation de Fisher-KPP en fonction de la donnée initiale

Si $u_0 \rightarrow]0, 1[$ vérifie $\liminf_{x \rightarrow -\infty} u_0(x) > 0$ et $\int_0^{+\infty} x e^x u_0(x) / dx < \infty$

alors il existe $y_0 \in \mathbb{R}$ tel que la solution de (3) avec données initiales u_0 vérifie

$$\sup_{y \in \mathbb{R}} |u(y + m(t), t) - h_{s^*}(y)| \rightarrow_{t \rightarrow \infty} 0$$

où $m(t) = 2t - (3/2) \log(t) + y_0$.

D'autres vitesses peuvent être sélectionnées : Si la donnée initiale vérifie $u_0(x) \approx e^{-\lambda_-(s)x}$ quand $x \rightarrow +\infty$, où $\lambda_-(s)$ est la plus petite racine du polynôme caractéristique $X^2 + sX + r = 0$, alors la solution converge vers une onde progressive de vitesse s .

La preuve de ces résultats ne sera pas étudiée dans ce rapport mais nous allons montrer un résultat un peu plus faible pour une condition initiale $\mathbf{1}_{x < 0}$ et pour la fonction de KPP classique $F(u) = u(1 - u)$: on va montrer que sa vitesse limite "faible" est égale à 2.

Définition 1.2. Vitesse limite faible de propagation

$u(x, t)$ se propage faiblement à la vitesse s^* si et seulement si :

$$\begin{cases} \inf_{x \leq st} u(x, t) \rightarrow 1 \text{ si } s < s^* \\ \sup_{x \geq st} u(x, t) \rightarrow 0 \text{ si } s > s^* \end{cases}$$

Pour montrer que la vitesse limite de la solution u de condition initiale $u(x, 0) = \mathbf{1}_{x < 0}$ est égale à 2, on va construire une sous-solution et une sur-solution de (2) qui ont toutes les deux une vitesse limite faible arbitrairement proche de 2. Par le principe de comparaison, u aura alors une vitesse limite faible égale à 2.

Construction d'une sur-solution :

Soit $v(x, t) = v_c(x, t)e^t$ où v_c est la solution de l'équation de la chaleur avec condition initiale $v_c(x, 0) = \mathbf{1}_{x < 0}$. Alors v est $C^{1,2}$ et $\forall t > 0$:

$$\begin{aligned} \partial_t v - \Delta v &= e^t v_c + e^t (\partial_t v_c - \Delta v_c) \\ &= e^t v_c \\ &= v \\ &\geq F(v) = v - v^2 \end{aligned}$$

Donc v est une sur-solution, de donnée initiale égale à u . Le théorème de comparaison peut donc s'appliquer et donne $u \leq v$, $\forall x, t > 0$. Il faut alors montrer que v satisfait la définition de vitesse limite faible pour la vitesse $s^* = 2$. La preuve de ce point peut se trouver dans

Construction d'une sous-solution :

Soit $\epsilon > 0$, posons $s_\epsilon = 2 - \epsilon$. Les solutions de la linéarisation de (7) autour du point d'équilibre 0 sont oscillantes et s'écrivent de la forme $h(y) = A \exp(Ry + C) \cos(\omega y + C)$ où $R + i\omega = -(1 - \frac{\epsilon}{2})(1 + i\sqrt{1 - (1 - \frac{\epsilon}{2})^2})$, $y = x - s_\epsilon t$. On va choisir $C = \frac{\pi + \omega}{2}$ et l'on va tronquer cette fonction pour obtenir une fonction $w(x, t) = h(x - s_\epsilon t)$ telle que :

$$w(x, 0) = \begin{cases} h(x) & \forall x \in [-\frac{1}{2} - \pi, -\frac{1}{2}] \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

On peut alors choisir A tel que $h(y) < 1$ ce qui donne $w(x, 0) < \mathbf{1}_{x < 0} \forall x$.

La vitesse limite de w est de plus bien s_ϵ .

Il reste alors à montrer que w est une sous-solution de (2), ce qui nécessite quelques calculs effectués dans .

Par le théorème de comparaison, on a donc $w \leq u$, $\forall x, t > 0$.

On a alors $w \leq u \leq v$, donc $2 - \epsilon \leq s^* \leq 2$, ceci $\forall \epsilon$ donc $s^* = 2$.

2 Dynamique de Réseaux en Croissance

Dans cette section et par la suite nous étudions le modèle sur la croissance de réseaux dynamiques branchants, par exemple un champignon, proposé par Rémi Catellier, Yves D'Angelo et Cristiano Ricci, avec rescaling adéquat :

$$\begin{cases} \partial_t \mu + \nabla(\mu v) = f(C)(\mu + \rho) - \mu \rho \\ \partial_t(\mu v) + \nabla(\mu v \times v) + T \nabla \mu = -\lambda \mu v + \mu \nabla C - \mu v \rho \\ \partial_t \rho = F(v) \mu \\ \partial_t C = -b \rho C \end{cases} \quad (9)$$

L'inconnue μ représente la densité des apex du champignon.

L'inconnue ρ représente la densité des hyphes/ du réseau.

L'inconnue v représente la vitesse des apex.

L'inconnue C représente la concentration des nutriments.

Les paramètres T , λ et b sont des scalaires représentant la température, l'amortissement fluide sur la vitesse des apex, et le taux de consommation des nutriments par le réseau.

La fonction f indique l'influence de la concentration de nutriments sur la croissance du champignon. Pour avoir un état stationnaire sur la croissance du champignon, $f(0) = 0$ et $f(x)/x$ dans L^1 proche de 0 sont imposés.

La fonction F représente l'inverse du temps moyen passé par les apex dans un point donné, et est donné par l'expression :

$$F(V) = \left(\frac{1}{2\pi T}\right)^{\frac{d}{2}} \int_{\mathbb{R}^d} |v| \exp\left(-\frac{|v - V|^2}{2T}\right) dv \quad (10)$$

où d est la dimension du problème. Ceci est souvent simplifié en substituant $F(V)$ par une constante : $F(V) = F_0$.

2.1 Explication des équations du système (9)

Le champignon est un réseau branchant dynamique qui peut être étudié en deux parties : les apex (pointes du réseau) représentés par leur densité μ et les hyphes (branches du réseau) représentés par leur densité ρ

Les lignes du système (9) représentent :

i) La première ligne du système est le bilan de masse sur les apex avec le terme gauche classique $\partial_t \mu + \nabla(\mu v)$. Le terme de droite est composé de : - $f(C)(\mu + \rho)$ correspondant à une croissance proportionnelle à la concentration de nutriments du réseau et la masse existante d'apex et d'hyphes, - et un terme $-\mu \rho$ qui correspond à l'anastomose : une pointe qui rencontre une branche va fusionner avec elle et être détruite. Il y a un terme de croissance et un terme de saturation comme pour le modèle KPP.

ii) La deuxième ligne est le bilan de vitesse avec le terme de gauche classique $\partial_t(\mu v) + \nabla(\mu v \times v)$. Le terme $T \nabla \mu$ représente le mouvement brownien suivi par les apex. Le terme $-\lambda \mu v$ représente un amortissement fluide dans la physique du problème. Le terme $+\mu \nabla C$ représente la tendance des apex à aller vers les milieux de forte concentration. Le terme $-\mu v \rho$ représente la perte de vitesse due à l'anastomose.

iii) La troisième ligne correspond à la relation entre les branches et les pointes : la trace laissée par les apex sont les branches.

iv) La quatrième ligne décrit l'évolution de la concentration de nutriments : ils sont consommés par les hyphes avec un taux bC où b est une constante positive.

2.2 Dérivation de l'équation "KPP avec mémoire"

En faisant tendre T et λ vers $+\infty$, avec $\frac{T}{\lambda} = K$ constant, la deuxième ligne de (9) donne :

$$+K\nabla\mu = -\mu v \quad (11)$$

En injectant ceci dans la ligne 1 du système, on obtient le système de 3 inconnues suivant :

$$\begin{cases} \partial_t \mu = K\Delta\mu + f(C)(\mu + \rho) - \mu\rho \\ \partial_t \rho = F_0\mu \\ \partial_t C = -b\rho C \end{cases} \quad (12)$$

dit "KPP avec mémoire".

2.3 Propriétés de l'équation de réaction associée à "KPP avec mémoire"

Soit (μ, ρ, C) vérifiant le système d'équations suivant :

$$\begin{cases} \partial_t \mu = f(C)(\mu + \rho) - \mu\rho \\ \partial_t \rho = F_0\mu \\ \partial_t C = -b\rho C \end{cases} \quad (13)$$

avec $f(0) = 0$.

Ce système correspond au système "KPP avec mémoire" sans le terme de diffusion. On s'intéresse au comportement de (μ, ρ, C) sur \mathbb{R}^+ :

Lemme 1. C est de signe constant.

En effet on a $C(t) = C(0) \exp(-b \int_0^t \rho(s) ds)$.

Lemme 2. Soit (μ, ρ, C) tel que $(\mu(0), \rho(0)) > (0, 0)$ (les deux positifs, au moins un non nul), $C(0) > 0$.

Alors $\mu(t) \geq 0 \forall t > 0$.

Démonstration. Supposons par l'absurde que μ devient négatif alors soit $t^* = \inf(t > 0 / \mu(t) < 0)$. Alors :

$$\mu(t) \geq 0 \forall t \leq t^*$$

$$\partial_t \mu(t^*) \leq 0 \text{ par définition de } t^*. \text{ (Sinon } \mu(t^* + \epsilon) > 0 \forall \epsilon \ll 1)$$

$$\rho(t) > 0 \forall t \leq t^* \text{ car } \partial_t \rho = F_0\mu \text{ et } F_0 > 0$$

$$\partial_t \mu(t^*) = f(C(t^*))\rho(t^*) > 0 \text{ ce qui est en contradiction avec la deuxième affirmation.} \quad \square$$

Dans la suite on se place dans le cas où $(\mu(0), \rho(0)) > (0, 0)$, $C(0) > 0$:

Lemme 3. ρ est croissante car $\partial_t \rho = F_0\mu \geq 0$. En particulier ρ est positive.

Lemme 4. C est décroissante et $\lim_{t \rightarrow +\infty} C(t) = 0$

Démonstration. ρ est positive donc C est décroissante.

$(\mu(0), \rho(0)) > (0, 0)$ et $\partial_t \rho = F_0\mu$ impliquent qu'il existe un t_0 tel que $\rho(t_0) > 0$.

Comme ρ est croissante $\forall t \geq t_0$, $\rho(t) \geq \rho(t_0)$.

$$\text{Donc } \forall t \geq t_0, 0 < C(t) = C(0) \exp(-b \int_0^t \rho(s) ds) \leq C_{ste} e^{-b\rho(t_0)t} \xrightarrow[t \rightarrow +\infty]{} 0$$

Donc $\lim_{t \rightarrow +\infty} C(t) = 0$. \square

Lemme 5. Si f est croissante et $\int_0^1 \frac{f(x)}{x} dx < \infty$ alors μ est bornée.

Démonstration. On a $\partial_t \mu = f(C)(\mu + \rho) - \mu\rho \leq f(C)\mu + f(C)\rho$.

Montrons que $f(C)$ est intégrable :

$C(t) \leq C_{ste} e^{-b\rho(t_0)t}$ et f est croissante donc $\int_0^\infty f(C) dt \leq \int_0^\infty f(C_{ste} e^{-b\rho(t_0)t}) dt$.

Soit le changement de variable $u = C_{ste} e^{-b\rho(t_0)t}$, $du = -b\rho(t_0)u dt$:

$\int_0^\infty f(C_{ste} e^{-b\rho(t_0)t}) dt = \frac{1}{b\rho(t_0)} \int_0^1 \frac{f(u)}{u} du < \infty$ car $\int_0^{C_{ste}} \frac{f(x)}{x} dx < \infty$ donc $f(C)$ est intégrable.

Montrons que $\phi = f(C)\rho$ est intégrable :

Effectuons le changement de variable $u = C$, $du = -b\rho u dt$ dans $\int_0^\infty f(C)\rho dt$:

$\int_0^\infty f(C)\rho dt = \frac{1}{b\rho(t_0)} \int_0^{C_{ste}} \frac{f(u)}{u} du < \infty$ car $\int_0^{C_{ste}} \frac{f(x)}{x} dx < \infty$ donc $\phi = f(C)\rho$ est intégrable.

On a $\partial_t \mu \leq f(C)\mu + \phi$.

Par le lemme de Gronwall :

$\mu(t) \leq \mu(0) + \int_0^t \phi(s) ds + \int_0^t \phi(s) f(C)(s) \exp(\int_s^t f(C)(u) du) ds$

$\leq \mu(0) + \int_0^{+\infty} \phi(s) ds + \int_0^t \phi(s) f(C)(s) \exp(\int_0^{+\infty} f(C)(u) du) ds$

$\leq \mu(0) + \int_0^{+\infty} \phi(s) ds + \exp(\int_0^{+\infty} f(C)(u) du) \int_0^t \phi(s) f(C)(s) ds$

$f(C)$ est bornée et ϕ est intégrable donc $f(C)\phi$ est intégrable.

On a donc : $\mu(t) \leq \mu(0) + \int_0^{+\infty} \phi(s) ds + \exp(\int_0^{+\infty} f(C)(u) du) \int_0^{+\infty} \phi(s) f(C)(s) ds \quad \forall t$ □

Dans la suite on se place dans le cas où f est croissante et $\int_0^1 \frac{f(x)}{x} dx < \infty$

Lemme 6. $\lim_{t \rightarrow +\infty} \mu = 0$ et $\lim_{t \rightarrow +\infty} \rho = \rho_\infty < +\infty$

Démonstration. μ est bornée, soit μ_n une suite extraite de la fonction μ qui tend vers ℓ .

On a $\ell - \mu(t) = \lim_{n \rightarrow +\infty} \int_t^{t_n} \partial_t \mu ds = \lim_{n \rightarrow +\infty} \int_t^{t_n} f(C)(\mu + \rho) - \mu\rho ds$.

Or $f(C)$ est intégrable (c.f. preuve du lemme 5) et μ est bornée donc $f(C)\mu$ est intégrable.

De même $f(C)\rho$ est intégrable (c.f. preuve du lemme 5).

On a donc $\lim_{n \rightarrow +\infty} \int_t^{t_n} \mu\rho = \int_t^{+\infty} (f(C)\mu + f(C)\rho) dt + \ell - \mu(t)$

Or $\mu\rho = F_0 \rho \partial_t \rho = \frac{F_0}{2} \partial_t \rho^2$ donc $\int_t^{t_n} \mu\rho dt = \frac{F_0}{2} (\rho(t_n)^2 - \rho(t)^2)$.

Or ρ est croissante donc a une limite dans $[0, +\infty]$.

Ainsi ℓ est déterminée entièrement par la limite de ρ et ne dépend pas de la suite extraite.

Par critère séquentiel μ a une limite ℓ qui est finie car μ est bornée.

Mais alors $\lim_{t \rightarrow +\infty} \frac{F_0}{2} (\rho(t)^2 - \rho(T)^2) = \int_T^\infty (f(C)\mu + f(C)\rho) dt + \ell - \mu(T) < \infty$.

Donc ρ^2 a une limite finie et donc ρ aussi.

Comme $\mu = \frac{\partial_t \rho}{F_0}$ et ρ a une limite finie et μ aussi, μ tend nécessairement vers 0. □

3 Recherche de la vitesse d'onde des solutions progressives de l'Équation KPP avec Mémoire

On a le modèle suivant :

$$\begin{cases} \partial_t \mu - K \Delta \mu = f(C)(\mu + \rho) - \mu \rho \\ \partial_t \rho = F_0 \mu \\ \partial_t C = -b \rho C \end{cases} \quad (14)$$

où $f(0) = 0$ et f est positive. Typiquement, $f(C) = C$:

On recherche des solutions en onde plane, on pose s la vitesse d'onde et $\xi = x - st$.

Par abus de notation, on pose $\mu(\xi) = \mu(x, t)$, $\rho(\xi) = \rho(x, t)$, etc...

On a alors :

$$\begin{cases} -s\mu' - K\mu'' = f(C)(\mu + \rho) - \mu \rho \\ -s\rho' = F_0 \mu \\ C' = \frac{b\rho C}{s} \end{cases} \quad (15)$$

Nos états stationnaires (i.e. qui correspondent à des dérivées nulles) sont :

$$(\mu, \rho, C) = \begin{cases} (0, 0, C_0) \\ (0, \rho_\infty, 0), \rho_\infty > 0 \end{cases} \quad (16)$$

3.1 Linéarisation au voisinage de $(0, 0, C_0)$

Au voisinage de $(0, 0, C_0)$ on a, en posant $f(C_0) = f_0$, la linéarisation de 14 :

$$\begin{cases} -s\mu' - K\mu'' = f_0(\mu + \rho) \\ -s\rho' = F_0 \mu \end{cases} \quad (17)$$

ce qui devient :

$$\rho''' + \frac{s}{K}\rho'' + \frac{f_0}{K}\rho' - \frac{F_0 f_0}{Ks}\rho = 0 \quad (18)$$

de polynôme caractéristique :

$$P(X) = X^3 + \frac{s}{K}X^2 + \frac{f_0}{K}X - \frac{F_0 f_0}{Ks}. \quad (19)$$

Le signe de s correspondant à la direction de propagation, il y'a symétrie en s : on prend ici $s < 0$ ce qui correspond à une propagation vers la gauche.

Pour $s < 0$, P est de degré 3 et $P(0) > 0$ donc P a une racine négative r_1 .

Pour conserver la positivité autour de l'état $(0, 0, C_0)$ il faut que les racines de P soit réelles : sinon on obtient des oscillations autour de 0.

Pour que P ait deux autres racines réelles $r_3 > r_2 > r_1$ il faut (condition nécessaire et suffisante) que P' s'annule deux fois et que le discriminant Δ de P soit positif.

3.1.1 Première condition : P' a deux annulations :

$P'(X) = 3X^2 + 2\frac{s}{K}X + \frac{f_0}{K}$ a pour discriminant $\Delta' = 4\frac{1}{K^2}(s^2 - 3Kf_0)$ ce qui donne la condition

$$\boxed{s^2 > 3Kf_0.} \quad (20)$$

3.1.2 Deuxième condition : $\Delta > 0$:

Pour $P = aX^3 + bX^2 + cX + d$ on a $\Delta = b^2c^2 + 18abcd - 27a^2d^2 - 4ac^3 - 4b^3d$ ce qui dans notre cas donne

$$\begin{aligned}\Delta &= \frac{1}{K^4}f_0^2s^2 - 18\frac{f_0^2F_0}{K^3} - 27\frac{F_0^2f_0^2}{K^2s^2} - 4\frac{f_0^3}{K^3} + 4\frac{F_0f_0s^2}{K^4} \\ &= s^2\frac{f_0(f_0 + 4F_0)}{K^4} - \frac{f_0^2(18F_0 + 4)}{K^3} - \frac{27F_0^2f_0^2}{K^2}\frac{1}{s^2} \\ &= \frac{f_0}{K^4s^2}[(f_0 + 4F_0)s^4 - Kf_0(18F_0 + 4)s^2 - 27K^2F_0^2f_0].\end{aligned}$$

On est revenu à étudier le signe du polynôme en s^2 :

$$D(s^2) = (f_0 + 4F_0)s^4 - Kf_0(18F_0 + 4)s^2 - 27K^2F_0^2f_0 \quad (21)$$

de discriminant d :

$$\begin{aligned}d &= \left(Kf_0(18F_0 + 4)\right)^2 + 108(f_0 + 4F_0)K^2F_0^2f_0 \\ &= K^2f_0(f_0(18F_0 + 4)^2 + 108(f_0 + 4F_0)F_0^2) > 0.\end{aligned}$$

On obtient donc la condition sur la positivité de Δ :

$$s^2 > K \frac{f_0(18F_0 + 4) + \sqrt{f_0(f_0(18F_0 + 4)^2 + 108(f_0 + 4F_0)F_0^2)}}{2(f_0 + 4F_0)}. \quad (22)$$

3.1.3 Signe des racines au voisinage de $(0, 0, C_0)$

On sait déjà que $r_3 < 0$. Comme $r_1r_2r_3 < 0$, on remarque que r_2 et r_1 sont du même signe. De plus P' a un axe de symétrie $X = -\frac{s}{3K} > 0$ car $s < 0$ donc P atteint un minimum local (forcement négatif) en un point positif donc P a une racine positive.

On en déduit $r_1 > r_2 > 0$:

Sous les conditions (20) et (22), P a deux racines positives et une négative.

Conclusion Comme pour l'équation de KPP, la linéarisation autour de l'état $(0, 0, C_0)$ fait apparaître une condition sur s nécessaire pour préserver la positivité.

3.2 Linéarisation au voisinage de $(0, \rho_\infty, 0)$

Autour de $(0, \rho_\infty, 0)$: Posons $(\mu, \rho, C) = (\mu, \rho_\infty + \epsilon, C)$. On a

$$\begin{cases} -s\mu' - K\mu'' = f(C)\rho_\infty - \mu\rho_\infty \\ C' = \frac{b\rho_\infty C}{s} \\ -s\epsilon' = F_0\mu. \end{cases} \quad (23)$$

La deuxième ligne donne

$$C(y) = \Lambda \exp\left(\frac{b\rho_\infty}{s}y\right) \quad (24)$$

et la réunion de la première et la troisième se traduit sur ϵ par :

$$s^2\epsilon'' + Ks\epsilon''' = f(C)F_0\rho_\infty + s\epsilon'\rho_\infty \quad (25)$$

qui est une EDO d'ordre trois en ϵ avec terme source $\frac{F_0 f(C)}{Ks} \rho_\infty$ de polynôme caractéristique :

$$Q(X) = X^3 + \frac{s}{K} X^2 - \frac{\rho_\infty}{K} X \quad (26)$$

qui possède toujours trois racines : 0, une négative et une positive : $X = -\frac{1}{2K}(s \pm \sqrt{s^2 + 4\rho_\infty Ks})$.
Sur μ on a :

$$-s\mu' - Ks\mu'' = f(C)\rho_\infty - \mu\rho_\infty. \quad (27)$$

Dans le cas $f(C) = C$:

μ a pour polynôme caractéristique homogène $M(X) = X^2 + \frac{1}{K}X - \frac{\rho_\infty}{Ks}$ de racines :

$$r_{+,-} = -\frac{1}{2K}(1 \pm \sqrt{1 + 4\frac{\rho_\infty K}{s}})$$

donc $\mu_H = Ae^{r_+y} + Be^{r_-y}$ (On choisit $r_+ > 0, r_- < 0$).

En cherchant une solution particulière de la forme $\mu_p = M \exp(\frac{b\rho_\infty}{s}y)$ on obtient $M = -\frac{\Lambda}{b^2\rho_\infty K + b - 1}$

et donc $\mu = Ae^{r_+y} + Be^{r_-y} + Me^{\frac{b\rho_\infty}{s}y}$ et donc $\rho = \rho_\infty + \alpha e^{r_+y} + \beta e^{r_-y} + \frac{Ms}{b\rho_\infty} \exp(\frac{b\rho_\infty}{s}y)$.

Conclusion Comme pour l'équation de KPP, on obtient à priori pas de condition sur s suite à la linéarisation autour de l'état $(0, \rho_\infty, 0)$ mais seulement des informations sur la dynamique autour de ces états.

4 Schémas Numériques

On a le modèle suivant (“KPP avec mémoire”) :

$$\begin{cases} \partial_t \mu = K \Delta \mu + C(\mu + \rho) - \mu \rho \\ \partial_t \rho = F_0 \mu \\ \partial_t C = -b \rho C \end{cases} \quad (28)$$

que l’on souhaite simuler par différences finies.

Il y a plusieurs difficultés : capture de fronts raides, exigence de positivité, difficulté calculatoire du schéma entièrement implicite... C’est pour cela que l’on choisira un schéma semi-implicite.

4.1 Pour l’équation différentielle ordinaire

Sans dépendance spatiale (équation de réaction) :

$$\begin{cases} \partial_t \mu = C(\mu + \rho) - \mu \rho \\ \partial_t \rho = F_0 \mu \\ \partial_t C = -b \rho C. \end{cases} \quad (29)$$

4.1.1 Schéma semi-implicite I pour l’EDO

Soit le schéma semi-implicite I pour l’EDO :

$$\boxed{\begin{cases} \mu^{n+1} = \mu^n + \Delta t(C^n(\mu^{n+1} + \rho^{n+1}) - \mu^{n+1}\rho^n) \\ \rho^{n+1} = \rho^n + \Delta t(F_0 \mu^{n+1}) \\ C^{n+1} = C^n - \Delta t(b \rho^{n+1} C^{n+1}) \end{cases}} \quad (30)$$

Ce schéma peut se résoudre efficacement avec la reformulation suivante :

$$\begin{cases} \mu^{n+1}(1 - \Delta t(C^n(1 + \Delta t F_0)) + \rho^n) = \mu^n + \Delta t C^n \rho^n \\ \rho^{n+1} = \rho^n + \Delta t(F_0 \mu^{n+1}) \\ C^{n+1} = C^n \frac{1}{1 + \Delta t b \rho^{n+1}} \end{cases}$$

Positivité du schéma Pour conserver la positivité il suffit que le terme $(1 - \Delta t(C^n(1 + \Delta t F_0)) + \rho^n)$ reste positif :

Par exemple :

$$\boxed{\Delta t(1 + F_0 \Delta t) < \frac{1}{C_0}}. \quad (31)$$

4.1.2 Schéma semi-implicite II pour l’EDO

Soit le schéma semi-implicite II pour l’EDO :

$$\boxed{\begin{cases} \mu^{n+1} = \mu^n + \Delta t(C^n(\mu^{n+1} + \rho^{n+1}) - \mu^n \rho^n) \\ \rho^{n+1} = \rho^n + \Delta t(F_0 \mu^{n+1}) \\ C^{n+1} = C^n - \Delta t(b \rho^{n+1} C^{n+1}). \end{cases}} \quad (32)$$

Ce schéma peut se résoudre efficacement avec la reformulation suivante :

$$\begin{cases} \mu^{n+1}(1 - \Delta t(C^n(1 + \Delta t F_0))) = \mu^n + \Delta t \rho^n (C^n - \mu^n) \\ \rho^{n+1} = \rho^n + \Delta t(F_0 \mu^{n+1}) \\ C^{n+1} = C^n \frac{1}{1 + \Delta t b \rho^{n+1}}. \end{cases}$$

Positivité du schéma Pour conserver la positivité il suffit que les terme $(1 - \Delta t(C^n(1 + \Delta t F_0)))$ et $\mu^n + \Delta t \rho^n(C^n - \mu^n)$ restent positif :
Par exemple :

$$C^0 < \frac{1}{\Delta t(1 + F_0 \Delta t)} \quad (33)$$

et

$$\rho^n < \frac{1}{\Delta t}. \quad (34)$$

En explicitant un terme de plus que le schéma I, on obtient une condition de plus sur la positivité que le schéma semi-implicite I, condition qui dépend en plus du temps ! La schéma I étant déjà relativement aussi difficile à inverser, on choisira dans la suite de simuler le schéma I.

4.2 Pour l'équation aux dérivées partielles

4.2.1 Schéma semi-implicite I pour l'EDP en 1D

Soit le schéma semi-implicite I pour l'EDP en 1D :

$$\begin{cases} \mu_i^{n+1} = \mu_i^n + K \Delta t \frac{\mu_{i+1}^{n+1} - 2\mu_i^{n+1} + \mu_{i-1}^{n+1}}{\Delta x^2} + \Delta t(C_i^n(\mu_i^{n+1} + \rho_i^{n+1}) - \mu_i^{n+1} \rho_i^n) \\ \rho_i^{n+1} = \rho_i^n + \Delta t(F_0 \mu_i^{n+1}) \\ C_i^{n+1} = C_i^n - \Delta t(b \rho_i^{n+1} C_i^{n+1}) \end{cases} \quad (35)$$

Ce schéma a été construit pour donner une équation linéaire en μ^{n+1} :

$$\begin{cases} (1 + \frac{K \Delta t}{\Delta x^2} A - \Delta t(C^n(1 + \Delta t F_0)) + \rho^n) \mu^{n+1} = \mu^n + \Delta t C^n \rho^n \\ \rho^{n+1} = \rho^n + \Delta t(F_0 \mu^{n+1}) \\ C^{n+1} = C^n \frac{1}{1 + \Delta t b \rho^{n+1}} \end{cases}$$

où A est la matrice de discrétisation par différences finies de $-\Delta$ en 1D :

$$A = \begin{bmatrix} 2 & -1 & & 0 \\ -1 & \ddots & \ddots & \\ & \ddots & \ddots & -1 \\ 0 & & -1 & 2 \end{bmatrix} \quad (36)$$

Remarque : pour le schéma en dimension $n \geq 2$, il suffit de remplacer A par la matrice de discrétisation par différences finies de $-\Delta$ en dimension n .

Positivité du schéma : Afin de préserver la positivité, on obtient la même condition (suffisante) que pour l'EDO :

$$C^0 < \frac{1}{\Delta t(1 + F_0 \Delta t)} \quad (37)$$

Démonstration. Supposons $\mu^0 > 0$.

Raisonnons par l'absurde et supposons que $n = \min n \mid \exists j \mid \mu_j^{n+1} < 0$ existe. Soit $j = \arg \min \mu_i^{n+1}$.

On a $(1 - \Delta t(C_j^n(1 + \Delta t F_0)) + \rho_j^n) \mu_j^{n+1} = \mu_j^n + \Delta t C_j^n + \frac{K \Delta t}{\Delta x^2} (\mu_{j+1}^{n+1} - 2\mu_j^{n+1} + \mu_{j-1}^{n+1})$.
Or par définition de n et comme $C^0 < \frac{1}{\Delta t(1 + F_0 \Delta t)}$ et $C^n < C^0$:

Donc $\mu^n + \Delta t C^n > 0$ et $1 - \Delta t(C_j^n(1 + \Delta t F_0)) + \rho_j^n > 0$.

Et par définition de j : $\mu_{j+1}^{n+1} - 2\mu_j^{n+1} + \mu_{j-1}^{n+1} \geq 0$.

On a donc $\mu_j^{n+1} > 0$ mais $\mu_j^{n+1} = \min(\mu_i^{n+1}) < 0$ par définition de j et n : Contradiction. □

5 Résolution numérique

5.1 Résolution de l'EDO

5.1.1 Résultat de la simulation de l'EDO

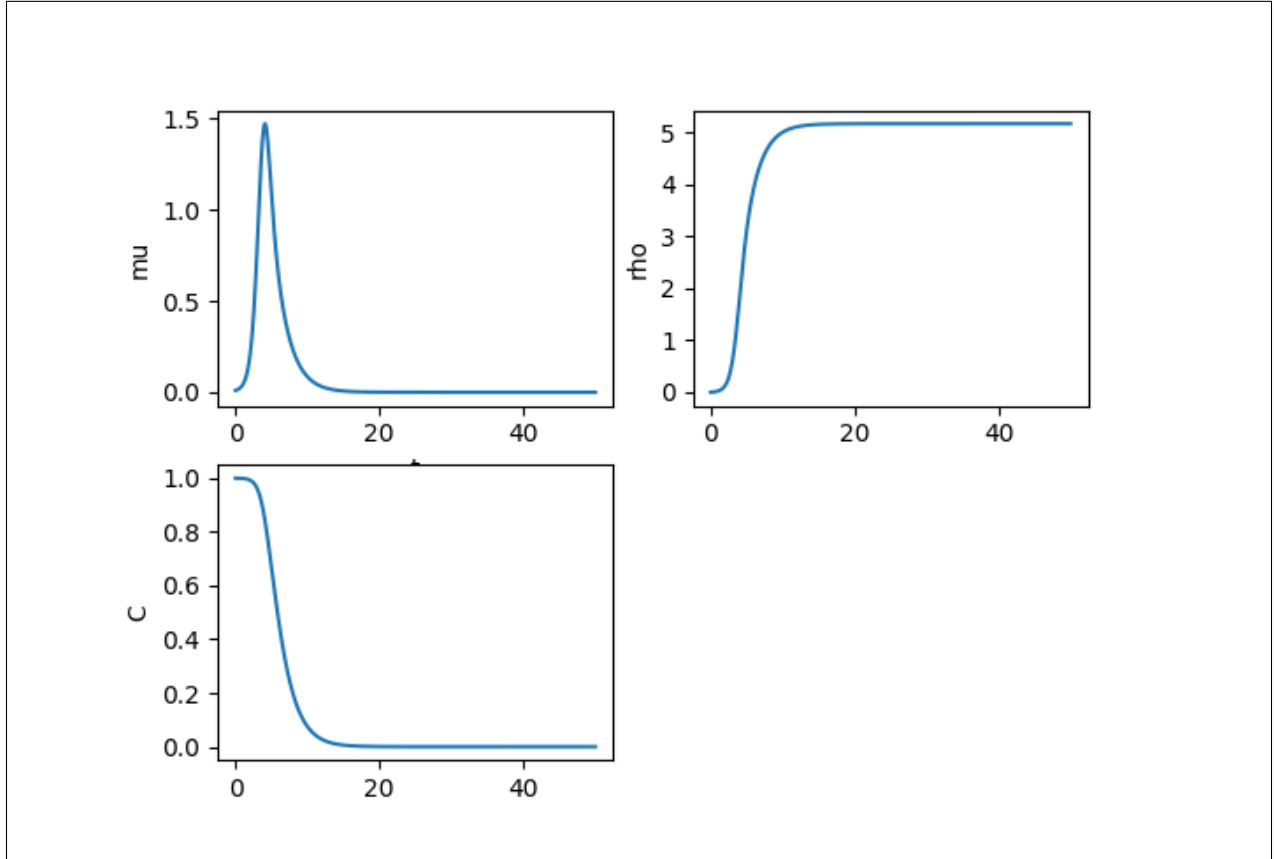


FIGURE 2 – Résolution du schéma semi-implicite I pour l'EDO (équation de réaction)

5.1.2 Observations de la simulation de l'EDO

On observe les phénomènes attendus sur l'EDO :

- i) μ est bornée et tend vers 0.
- ii) ρ est croissante et bornée.
- iii) C décroît vers 0.

-iv) Les solutions ont un comportement exponentiel autour des états stationnaires et ce comportement est bien prédit par la linéarisation de l'EDO autour de ces états :

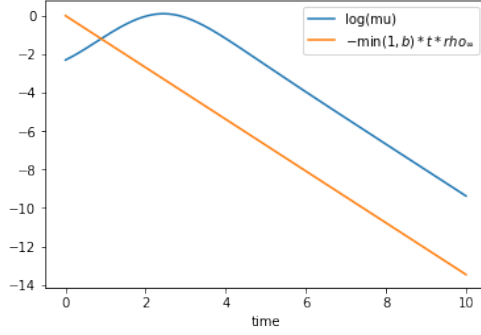


FIGURE 3 – Comportement de $\log(\mu)$, en particulier autour de $(\mu, \rho, C) = (0, \rho_\infty, 0)$. $\log(\mu)$ est bien linéaire autour des états stationnaires et sa pente (le facteur dans l'exponentielle) correspond exactement à $-\min(1, b)\rho_\infty$ ce qui est un résultat obtenu dans la partie Linéarisation

-v) L'ordre de convergence de l'EDO observé est de 1 :

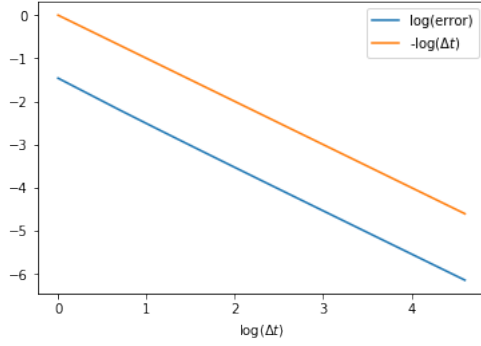


FIGURE 4 – Comportement de l'erreur en norme infinie quand $\Delta t \rightarrow 0$. La solution du schéma semi implicite I est comparée à différents pas de temps Δt à la solution numérique du schéma de Runge-Kutta à l'ordre 4 (RK4) avec $\Delta t = 2 * 10^{-7}$. On observe bien que la convergence est d'ordre 1.

5.2 Résolution de l'EDP en 1D

5.2.1 Résultat de la simulation de l'EDP en 1D

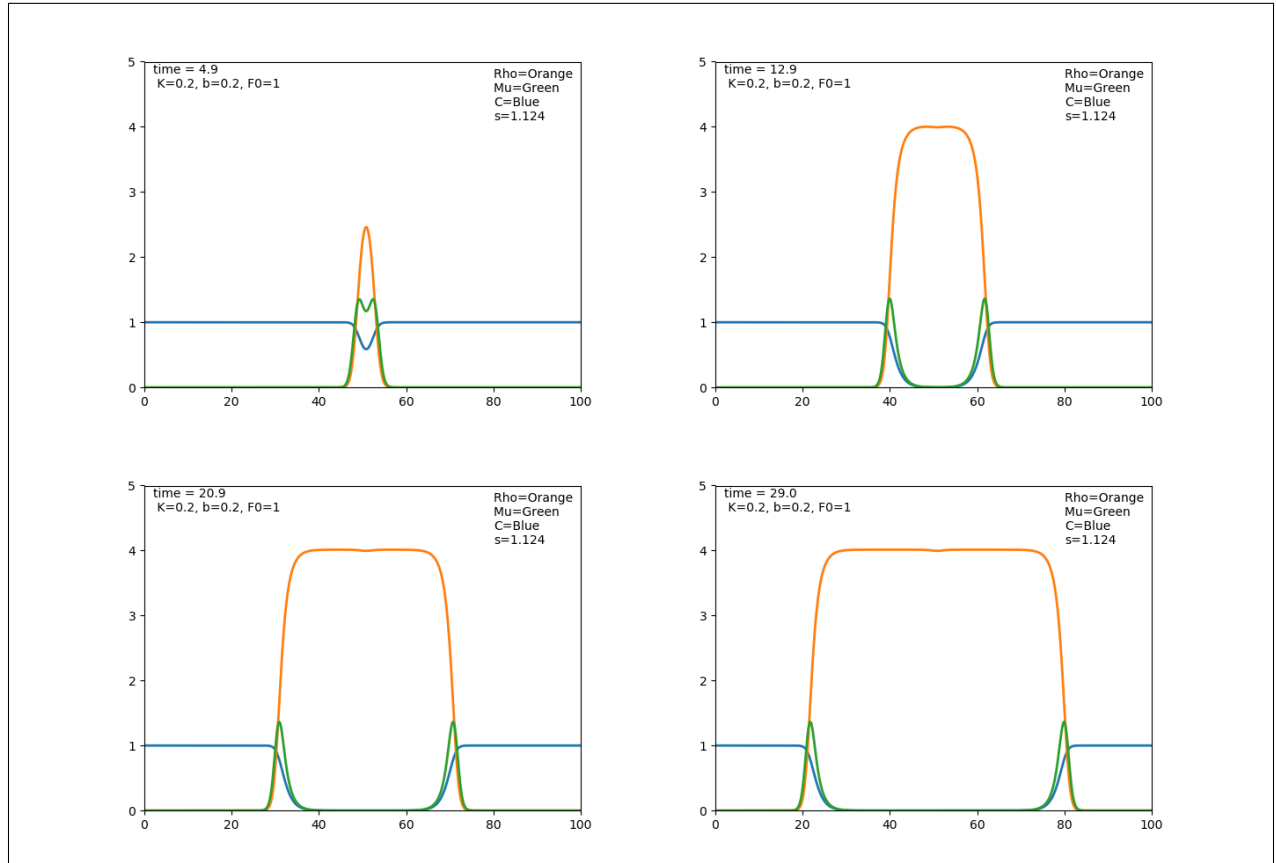


FIGURE 5 – Résolution du schéma semi implicite I pour l'EDP en 1D

On voit sur les simulations que la solution tend vers une solution de type onde plane stationnaire. Il est possible de calculer cette vitesse et de la comparer avec la vitesse théorique minimale obtenue dans la partie 3 :

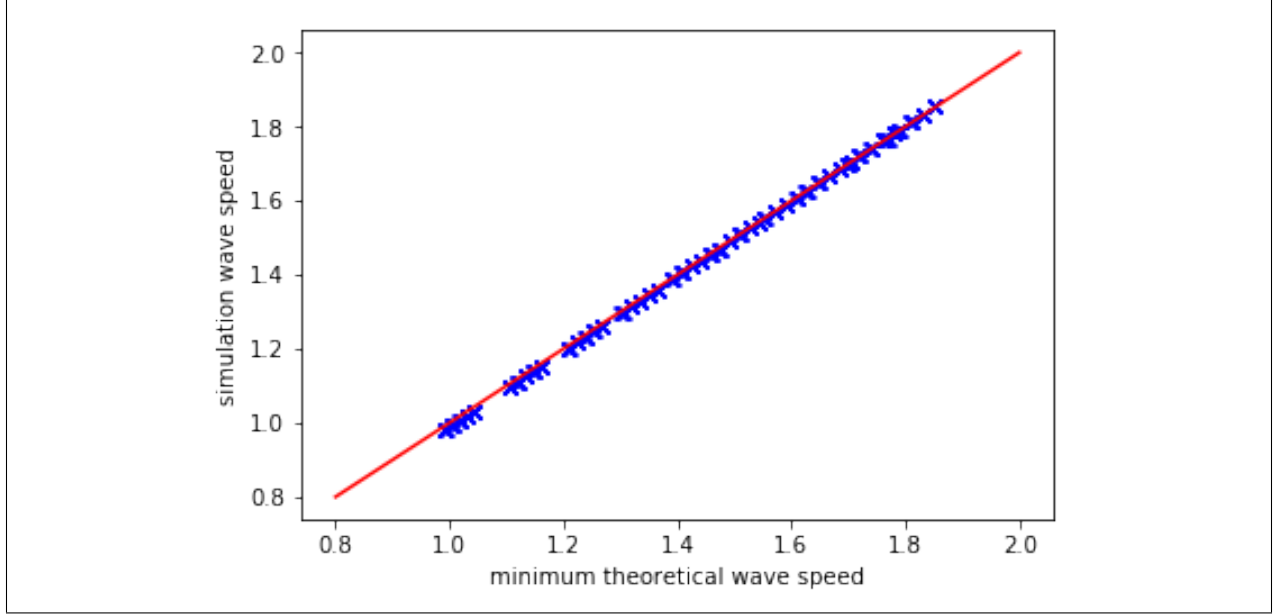


FIGURE 6 – Vitesse du front observée numériquement en fonction de la vitesse minimale théorique

Soit

$$s_{theorique}^* = \sqrt{K \frac{f_0(18F_0 + 4) + \sqrt{f_0(f_0(18F_0 + 4)^2 + 108(f_0 + 4F_0)F_0^2)}}{2(f_0 + 4F_0)}} \quad (38)$$

la vitesse minimale théorique obtenue dans la partie 3.

Soit $\rho_\infty = \sup(\rho)$ et

$$X(t) = \inf(x/\rho(x, t) > \frac{\rho_\infty}{2}). \quad (39)$$

$X(t)$ est alors une approximation de la position du front à l'instant t .

La vitesse observée numériquement est alors choisie comme étant :

$$s_{simulation} = \frac{X(t_1 + t_2) - X(t_1)}{t_2} \quad (40)$$

où t_1 et t_2 sont deux temps arbitraires où le front est déjà établi.

Le graphe ci dessus représente par les points bleus la vitesse du front observée numériquement pour différentes simulations (différents K , F_0 et f_0 et données initiales) en fonction de la vitesse minimale théorique associée à cette simulation. La droite rouge est la droite $s_{simu} = s_{theorique}^*$.

On remarque que la vitesse du front observée numériquement est très proche de la vitesse minimale théorique : ce phénomène est similaire à celui de l'équation de Fisher-KPP : pour une donnée initiale à support compact, **le front se propage asymptotiquement à la vitesse minimale de l'équation d'onde associée à l'EDP, obtenu par linéarisation autour de l'état $(0, 0, C_0)$.**

5.3 Résolution de l'EDP en 2D

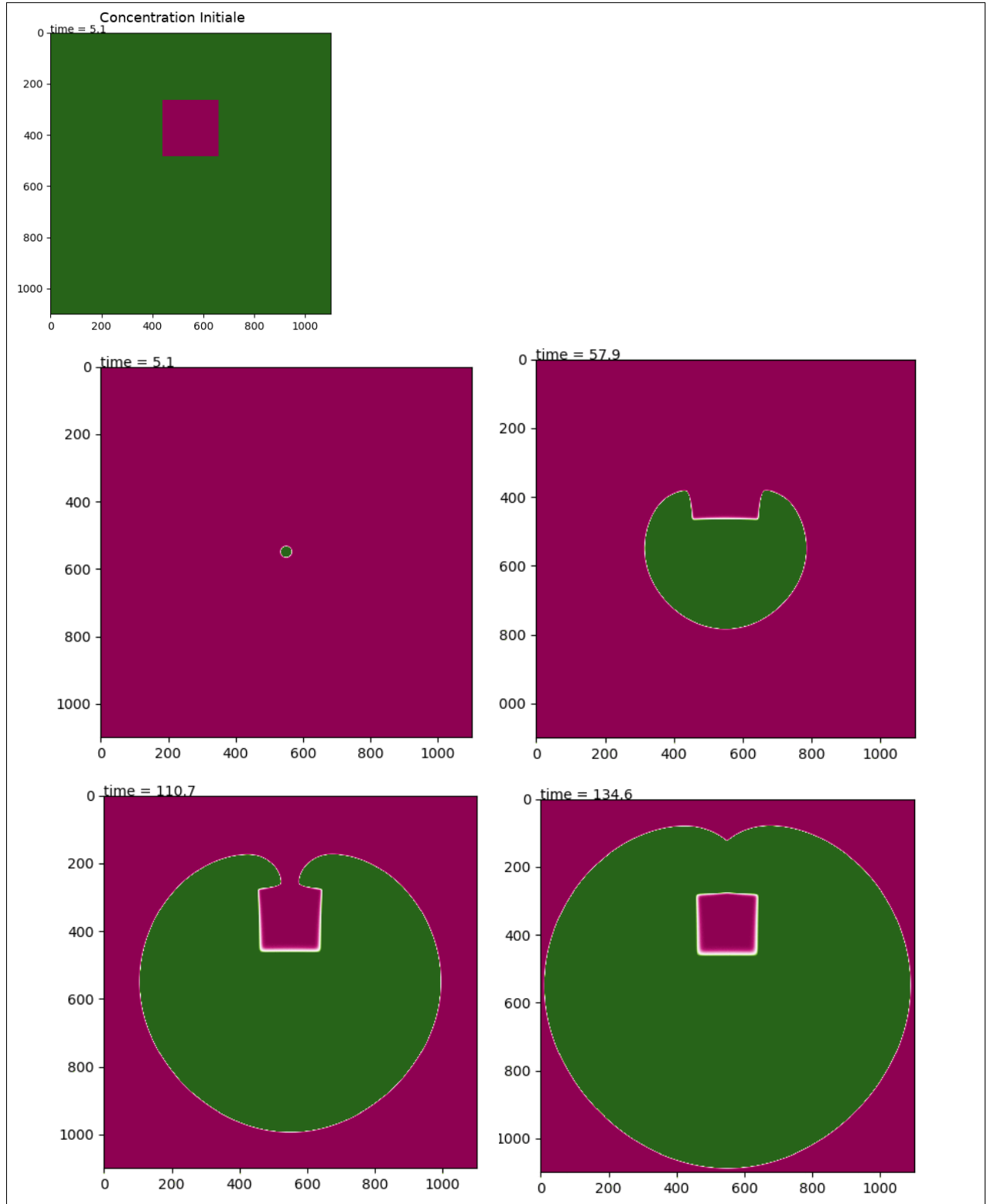


FIGURE 7 – Évolution de ρ pour la résolution du schéma semi implicite I pour l'EDP en 2D avec un trou de concentration. Ici la grille est de taille 1100x100, avec 1000 pas de temps.

Deux challenges numériques ont été rencontrés :

- 1) Temps d'exécution : le schéma consiste principalement à résoudre à chaque pas de temps une équation matricielle $AX = B$, où A est de taille $n = 1100 * 1100 = 1.21 * 10^6$. Une idée naïve serait alors de calculer A^{-1} par exemple par pivot de gauss, qui a un coût $\mathcal{O}(n^3)$, ou par l'algorithme de Strassen qui est un peu plus efficace $\mathcal{O}(n^{2.8})$. Cependant ces stratégies ne sont pas efficaces car il n'est pas nécessaire de calculer l'inverse de A : On cherche seulement l'antécédent d'une image. La stratégie implémentée ici est de trouver X par méthode des minimums résiduels, c'est à dire minimiser la fonction $x \rightarrow \|Ax - B\|^2$ par méthode des moindres carrés, méthode qui fonctionne pour les matrices symétriques et qui est très rapide pour les matrices creuses (notre cas).

On peut encore accélérer la convergence de la méthode des minimums résiduels en précisant pour μ^{n+1} le guess μ^n .

- 2) Coût en mémoire : Une matrice carrée de taille $1.21 * 10^6$ pèse 10GB de RAM sous Python... Heureusement, dans notre cas la matrice A est creuse et il existe des méthodes et bibliothèques adaptées pour représenter de telles matrices efficacement. De plus chaque ρ^n, μ^n et C^n est représenté par une matrice carrée de taille 1100, ce qui pèse 10MB. Ces matrices ne sont pas creuses donc il est plus dur de les compresser. Si l'on veut stocker ces quantités pour ensuite retracer l'évolution de ρ, μ, C pour 1000 pas de temps, ceci coûterait 30GB de RAM... Il faut donc faire des compromis, ce qui est classique : par exemple, on ne sort pas toutes les solutions mais uniquement à certains pas de temps bien choisis.

6 Recherche de la vitesse d'onde des solutions progressives de l'Équation fluide complète du champignon.

Le but de cette section est de montrer comment l'on peut obtenir la vitesse d'onde pour l'équation du champignon complète :

$$\begin{cases} \partial_t \mu + \nabla(\mu v) = f(C)(\mu + \rho) - \mu \rho \\ \partial_t(\mu v) + \nabla(\mu v \times v) + T \nabla \mu = -\lambda \mu v + \mu \nabla C - \mu v \rho \\ \partial_t \rho = F(v) \mu \\ \partial_t C = -b \rho C. \end{cases} \quad (41)$$

En effet dans les sections précédentes nous avons travaillé dans le cas λ et T très grands ce qui simplifiait les équations.

Cependant nous avons pu voir que, comme pour l'équation de Fisher KPP, pour une donnée initiale à support compact, la solution tend vers une solution d'onde et que la vitesse d'onde peut être retrouvée grâce à la linéarisation autour de l'état initial.

Nous allons alors adopter la même stratégie pour l'équation complète.

Ici nous allons linéariser autour de l'état $(\mu, \rho, C, v) = (0, 0, C_0, v)$.

Équation d'onde pour le fluide :

Soit s la vitesse d'onde, $y = x - st$, par le même argument de symétrie que pour l'équation de "KPP avec mémoire", nous allons nous placer dans le cas $s < 0$. Avec abus de notation : $(x, t) =: (y)$, où $y = x - st$, l'équation d'onde pour le fluide est :

$$\begin{cases} -s\mu' + (\mu v)' = f(C)(\mu + \rho) - \mu \rho \\ -s(\mu v)' + (\mu v \times v)' + T\mu' = -\lambda \mu v + \mu C' - \mu v \rho \\ -s\rho' = F(v)\mu \\ -sC' = -b\rho C. \end{cases} \quad (42)$$

Linéarisation autour de l'état $(\mu, \rho, C, v) = (0, 0, C_0, v)$:

On pose $f(C_0) = f_0$, et on cherche des solutions de la forme $\rho = \rho_0 \exp(Xy)$ autour de $\rho = 0$.

On obtient en intégrant la quatrième ligne $C = C_0 - \frac{b\rho_0 C_0}{X} \exp(Xy)$.

La troisième ligne donne : $-sX\rho_0 \exp(Xy) = F_0\mu$ donc $\mu = \frac{-sX\rho_0}{F_0} \exp(Xy)$.

Autour de $(\mu, \rho, C, v) = (0, 0, C_0, v)$, la première ligne donne : $-s\mu' + (\mu v)' = f_0(\mu + \rho)$ car on peut négliger $\mu\rho$ devant μ et ρ . On a donc

$$(\mu v)' = (f_0\rho_0 - \frac{sXf_0\rho_0}{F_0} - \frac{s^2X^2\rho_0}{F_0}) \exp(Xy) \quad (43)$$

donc

$$\mu v = (\frac{f_0\rho_0}{X} - \frac{f_0s\rho_0}{F_0} - \frac{s^2X\rho_0}{F_0}) \exp(Xy). \quad (44)$$

Ainsi

$$v = \frac{\mu v}{\mu} = v_0 = s + \frac{f_0}{X} - \frac{f_0F_0}{X^2s}. \quad (45)$$

La deuxième ligne donne $-s(\mu v)' + (\mu v \times v)' + T\mu' = -\lambda \mu v + \mu C' - \mu v \rho$.

On peut ici négliger $\mu v \rho$ et $\mu C'$ devant μv . On a donc :

$$(-v_0sX\mu_0 + v_0^2X\mu_0 + T\mu_0X) \exp(Xy) = -\lambda\mu_0v_0 \exp(Xy) \quad (46)$$

donc

$$-sXv_0 + v_0^2X + TX = -\lambda v_0. \quad (47)$$

En multipliant par X^2 et en substituant $v_0 = s + \frac{f_0}{X} - \frac{f_0 F_0}{X^2 s}$ on a alors l'équation caractéristique :

$$X^4(Ts^2) + X^3(\lambda + f_0)s^3 + X^2(f_0^2 s^2 + \lambda f_0 s^2 - f_0 F_0 s^2) + X(-s F_0 f_0)(\lambda + 2f_0) + f_0^2 F_0^2 = 0. \quad (48)$$

En posant $Y = sX$ on obtient :

$$A(Y) \equiv Y^4 + \frac{s^2}{T} P_3(Y) = 0 \quad (49)$$

où

$$P_3(Y) \equiv Y^3(\lambda + f_0) + Y^2(f_0^2 + \lambda f_0 - f_0 F_0) - Y(F_0 f_0(\lambda + 2f_0)) + f_0^2 F_0^2 \quad (50)$$

est un polynôme de degré 3 dont les coefficients ne dépendent que des données f_0 , F_0 , λ et T .

6.1 Condition d'existence de racines toutes réelles

La vitesse recherchée est le plus petit $s > 0$ (ou plus grand $s < 0$) tel que le polynôme de degré 4 A défini dans 49 possède quatre racines réelles (comptées avec multiplicité).

Effectuons le changement de variable $Y = Y - \frac{b}{4}$ où b est le coefficient devant Y^3 dans A et posons $S = \frac{s^2}{T} > 0$.

Ce nouveau polynôme (noté B) s'écrit :

$$B(Y) \equiv A(Y - \frac{b}{4}) = Y^4 + qY^2 + rY + \sigma. \quad (51)$$

B est dénommé le polynôme réduit de A : on a annulé le terme en Y^3 . Pour que B ait 4 racines réelles, les coefficients de B doivent satisfaire trois conditions (de façon nécessaire et suffisante) CITER EQUATION D'ORDRE 4 :

- i) $q < 0$,
- ii) $q^2 - 4\sigma > 0$,
- iii) Le discriminant Δ_B de B est positif : $\Delta_B > 0$.

Les calculs étant très lourds, j'ai utilisé un module de calcul formel pour les effectuer et trouver des factorisations et simplifications. Dans toute la suite, comme $S = \frac{s^2}{T}$, on s'intéressera aux conditions dans le cas $S > 0$.

6.1.1 Condition $q < 0$

On a

$$q = -\frac{S(S(3\lambda^2 + 6\lambda f_0 + 3f_0^2) + 8F_0 f_0 + -8\lambda f_0 - 8f_0^2)}{8}. \quad (52)$$

Ainsi on a $q < 0$ sur un domaine de la forme $[a, \infty[$. Ce domaine est illustré dans la sous-section récapitulative suivante.

6.1.2 Condition $q^2 - 4\sigma > 0$

Le calcul formel donne :

$$q^2 - 4\sigma = S^3 \left(\frac{3\lambda^4}{16} + \frac{3\lambda^3 f_0}{4} + \frac{9\lambda^2 f_0^2}{8} + \frac{3\lambda f_0^3}{4} + \frac{3f_0^4}{16} \right) + S^2 (F_0 \lambda^2 f_0 + 2F_0 \lambda f_0^2 + F_0 f_0^3 - \lambda^3 f_0 - 3\lambda^2 f_0^2 - 3\lambda f_0^3 - f_0^4) + S (F_0^2 f_0^2 - F_0 \lambda^2 f_0 - 5F_0 \lambda f_0^2 - 4F_0 f_0^3 + \lambda^2 f_0^2 + 2\lambda f_0^3 + f_0^4) - 4F_0^2 f_0^2. \quad (53)$$

En particulier c'est un polynôme de degré 3, de coefficient dominant positif, et négatif en 0.

Il admet donc une ou trois racines strictement positives.

Dans le premier cas, on a $q^2 - 4\sigma > 0$ sur un domaine de la forme $[b, \infty[$ et dans le deuxième cas $[b, c] \cup [d, +\infty[$. Ces cas et ces domaines sont illustrés dans la sous-section récapitulative suivante.

6.1.3 Condition $\Delta_B > 0$

Le calcul formel montre que Δ_B s'écrit de la forme :

$$\Delta_B = S^3 L(S) \quad (54)$$

où L est un polynôme de degré au plus 3 en S .

Plus particulièrement :

- Son coefficient en S^3 est égal à :

$$F_0^2 f_0^3 (4F_0 + f_0) (\lambda + f_0)^2 (F_0 f_0 - \lambda^2 - \lambda f_0)^2 \geq 0 \quad (55)$$

- Son discriminant Δ_L est égal à :

$$\Delta_L = 16F_0^{12} \lambda^2 f_0^{15} (4F_0 f_0 - \lambda^2 - 2\lambda f_0)^2 (32F_0^3 f_0^2 + 9F_0^2 \lambda^2 f_0 + 48F_0^2 \lambda f_0^2 + 48F_0^2 f_0^3 + 27F_0 \lambda^4 + 63F_0 \lambda^3 f_0 + 60F_0 \lambda^2 f_0^2 + 48F_0 \lambda f_0^3 + 24F_0 f_0^4 + 9\lambda^4 f_0 + 22\lambda^3 f_0^2 + 21\lambda^2 f_0^3 + 12\lambda f_0^4 + 4f_0^5)^3 \geq 0 \quad (56)$$

Donc $\Delta_L \geq 0$ et donc L a trois racines.

- Son terme de degré nul $L(0) = 256f_0^6 F_0^6$ est positif : $L(0) > 0$.

Ainsi Δ_B a zéro ou deux racines strictement positives, ce qui donne dans le premier cas un domaine de vitesse possible de la forme $[0, \infty[$ pour cette condition et dans le deuxième cas $[0, e[\cap [f, +\infty[$. Ces cas et ces domaines sont illustrés dans la sous-section récapitulative suivante.

6.1.4 Domaine des vitesses possibles et existence d'une vitesse minimale

La deuxième condition montre en particulier l'existence d'une vitesse minimale strictement positive (en valeur absolue) de propagation. Le domaine du carré des vitesses possible étant l'intersection des trois domaines relatifs aux conditions, il est de la forme :

$$\mathcal{D} = [a, b[\cap [c, d[\cap [e, +\infty[\text{ ou } \mathcal{D} = [a, b[\cap [c, +\infty[\text{ ou } \mathcal{D} = [a, +\infty[\quad (57)$$

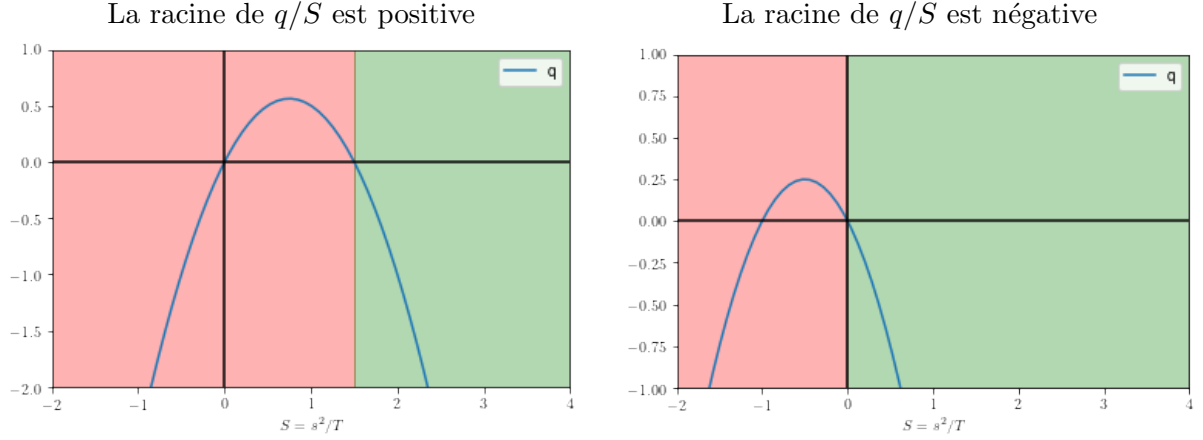
où $0 < a < b < c < d < e$.

6.1.5 Récapitulatif et discussion graphique des trois conditions.

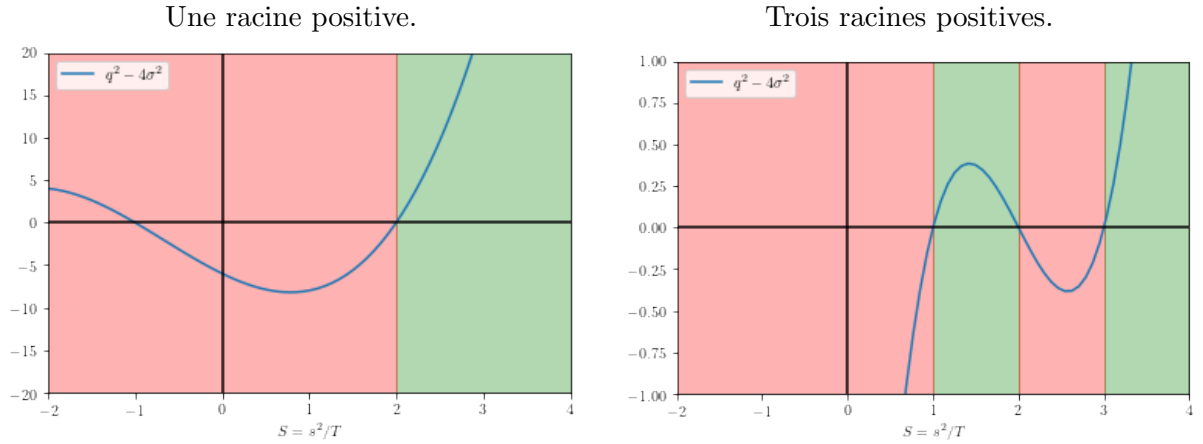
Partout, la zone $S < 0$ est invalide (rouge) car $S = \frac{s^2}{T} > 0$.

Le domaine des vitesses possible est alors l'intersection des domaines valides (verts) pour les trois conditions :

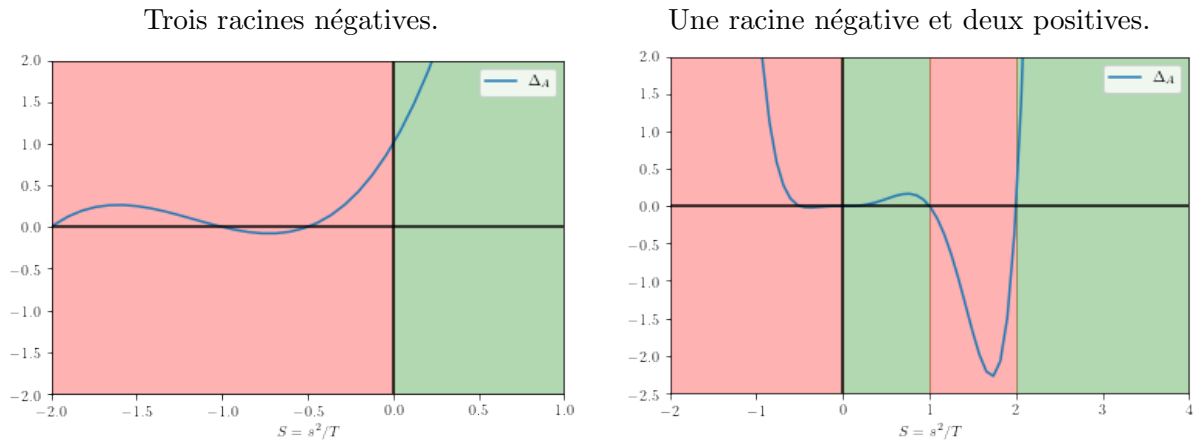
i) Deux cas possibles sur la condition $q(S) < 0$:



ii) Deux cas possibles sur la condition $q(S)^2 - 4\sigma(S) > 0$:



iii) Deux cas possibles sur la condition $\Delta_A(S) > 0$:



6.2 Condition d'amortissement et détermination de la vitesse d'onde sélectionnée

Lors des simulations, on s'aperçoit que la vitesse d'onde sélectionnée n'est pas pour tous les paramètres λ, f_0, F_0, T le plus petit s tel que le polynôme A admet 4 racines réelles (condition de régime apériodique en physique). Une autre condition apparaît : le s cherché est la plus petite vitesse d'onde positive (ou la plus grande négative) tel que la linéarisation autour de l'état $(\mu, \rho, C, v) = (0, 0, C_0, v_0)$ satisfait une condition dite "d'amortissement" (qui sera analogue à la condition de régime critique en physique).

Définition 6.1. Condition d'amortissement

Un polynôme $P \in \mathbb{R}[X]$ est dit satisfaire la condition d'amortissement pour notre problème si sa racine de plus petite partie réelle négative est réelle.

La condition d'amortissement pour un polynôme montre que la dynamique de l'EDO liée au polynôme

Théorème 6. Condition d'amortissement et positivité

P vérifie la condition d'amortissement si et seulement si l'EDO associée à P ne s'annule pas autour de $-\infty$ pour des données initiales positives.

Démonstration. Si P vérifie la condition d'amortissement, soit alors r_1 la racine de plus petite partie réelle de P : elle est réelle.

Les solutions de l'EDO associé à P avec conditions initiales positives sont de la forme :

$$f(x) = A_1 \exp(r_1 x) + \sum_{i>1, r_i \in \mathbb{R}} (A_i \exp(r_i x)) + \sum_{i>1, r_i \notin \mathbb{R}} B_i \exp(\Re(r_i)) \cos(\omega_i t) \quad (58)$$

En particulier quand $x \rightarrow -\infty$, $f(x) \sim A_1 \exp(r_1 x) > 0$.

Réciproquement, les solutions f de l'EDO sont équivalentes à $A_i \exp(\Re(r_i)) \cos(\omega_i t)$, où r_i est la racine de plus petite partie réelle. Pour ne pas avoir d'annulation, il faut $\omega_i = 0$ donc $r_i \in \mathbb{R}$. \square

6.2.1 Recherche de la vitesse d'onde extrême satisfaisant la condition d'amortissement

Soit Y une racine du polynôme A défini 49, s est déterminé par Y par l'équation :

$$s^2 = -\frac{TY^4}{P_3(Y)}. \quad (59)$$

Étudions alors la fonction $s : Y \mapsto s(Y) = -\sqrt{\frac{TY^4}{P_3(Y)}}$.

Intervalle de définition : $s(Y)$ est défini pour tous les Y tels que $P_3(Y) < 0$. Étudions alors le polynôme $P_3(Y) = Y^3(\lambda + f_0) + Y^2(f_0^2 + \lambda f_0 - f_0 F_0) - Y(F_0 f_0(\lambda + 2f_0)) + f_0^2 F_0^2$:

i) Le coefficient dominant de P_3 est positif.

ii) Son discriminant est égal à :

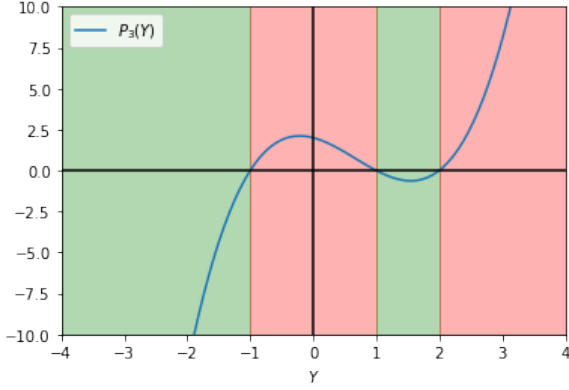
$$\Delta_{P_3} = F_0^2 f_0^3 (4F_0 + f_0)(F_0 f_0 - \lambda^2 - \lambda f_0)^2 \geq 0. \quad (60)$$

Donc P_3 a 3 racines réelles (comptées avec multiplicité), notées $r_1 \leq r_2 \leq r_3$.

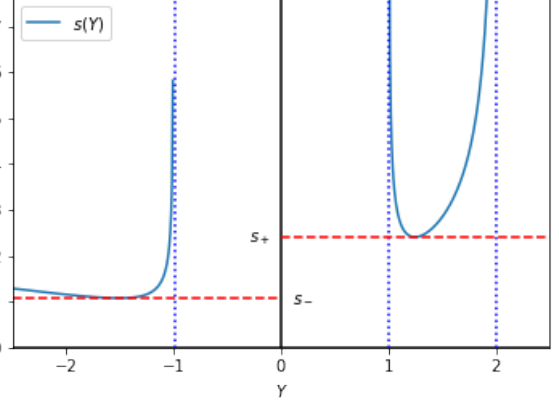
iii) Le coefficient constant de P_3 est positif donc $-r_1 r_2 r_3 > 0$. Donc $r_1 < 0$, et r_2 et r_3 sont de même

signe. Le coefficient d'ordre 1 de P_3 est négatif, donc $r_1 r_2 + r_2 r_3 + r_1 r_3 < 0$ donc $r_1(r_2 + r_3) + r_2 r_3 < 0$ donc $r_2 + r_3 > 0$ donc $r_2 > 0$ et $r_3 > 0$. P_3 a donc une racine négative et deux racines positives.

Polynôme $P_3(Y)$



Fonction $s(Y) = -\sqrt{\frac{TY^4}{P_3(Y)}}$



Extremums : Les extremums de s sont définis par la relation :

$$\frac{\partial s}{\partial Y} = 0 \quad (61)$$

Donc nécessairement :

$$\left(\frac{Y^4}{P_3(Y)} \right)' = 0 \quad (62)$$

i.e.

$$Q(Y) \equiv 4P_3(Y) - YP_3'(Y) = 0 \quad (63)$$

Y est alors une racine du polynôme Q défini ci dessus.

Un calcul formel montre que son discriminant Δ_Q est positif :

$$\begin{aligned} \Delta_Q = & 128F_0^5 f_0^5 + 36F_0^4 \lambda^2 f_0^4 + 192F_0^4 \lambda f_0^5 + 192F_0^4 f_0^6 + 108F_0^3 \lambda^4 f_0^3 + 252F_0^3 \lambda^3 f_0^4 + 240F_0^3 \lambda^2 f_0^5 \\ & + 192F_0^3 \lambda f_0^6 + 96F_0^3 f_0^7 + 36F_0^2 \lambda^4 f_0^4 + 88F_0^2 \lambda^3 f_0^5 + 84F_0^2 \lambda^2 f_0^6 + 48F_0^2 \lambda f_0^7 + 16F_0^2 f_0^8 > 0 \end{aligned}$$

donc Q a trois racines.

On obtient donc au plus trois extremums pour s par la formule :

$$s^2 = -\frac{Y^4}{P_3(Y)}.$$

où Y est une racine de Q . En fait, on a que deux extremum car l'une de ces racines correspond au cas $r_1 < Y < r_2$ pour le quel $P_3(Y) > 0$ et donc s n'est pas défini.

Un extremum, noté s_- (correspondant à la plus petite racine de Q) appartient au cas $Y < r_1 < 0$, et l'autre, noté s_+ (correspondant à la plus grande racine de Q) appartient au cas $0 < r_2 < Y < r_3$.

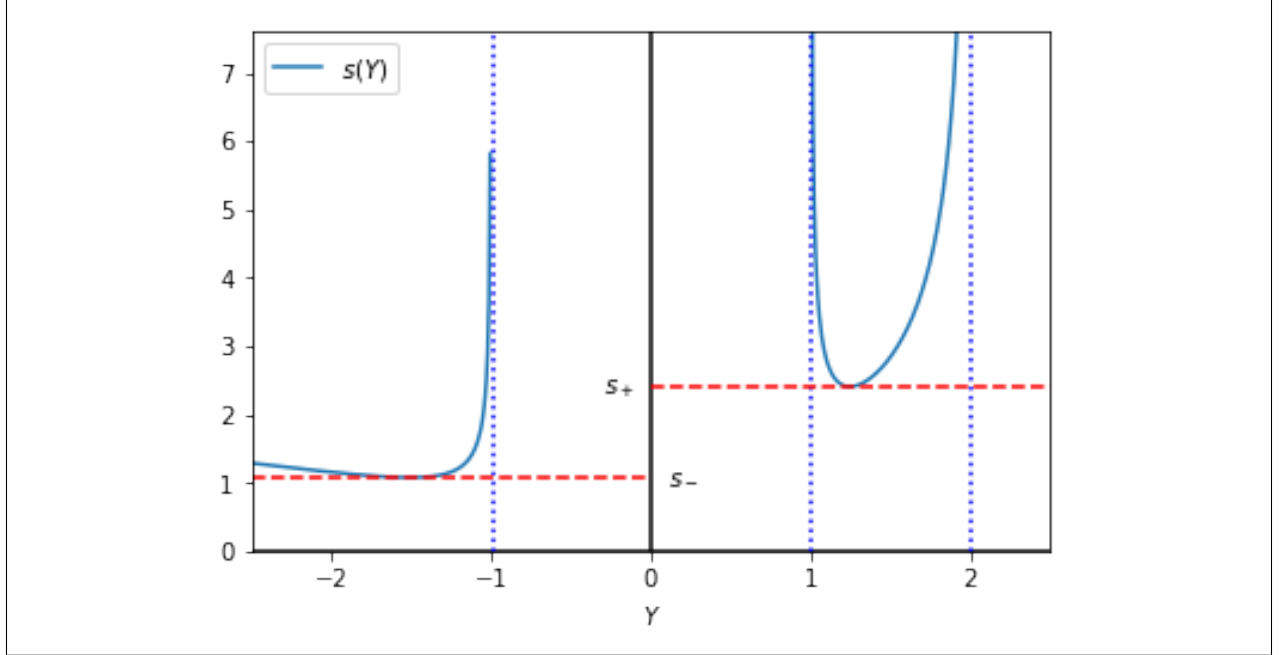


FIGURE 8 – Graphe de la fonction $s(Y)$ et points d'intérêt.

On cherche le plus petit s , noté s_{sel} tel que la condition d'amortissement sur A soit vérifiée. Pour $s > \max(s_+, s_-)$, A a 4 racines réelles donc la condition d'amortissement est vérifiée. Pour $s < \min(s_+, s_-)$, A n'a pas de racines réelles donc la condition d'amortissement est violée. Ainsi, $\min(s_+, s_-) \leq s_{sel} \leq \max(s_+, s_-)$. On va montrer que l'on a toujours $s_{sel} = s_-$:

Théorème 7. La plus petite vitesse en valeur absolue pour laquelle la condition d'amortissement est vérifiée correspond à la plus petite racine de Q , i.e. $s_{sel} = s_-$

Soit $s_{sel} = \min\{s > 0, \text{Le polynôme } A_s \text{ vérifie la condition d'amortissement}\}$, i.e. la racine de plus petite partie réelle du polynôme $A_s = Y^4 + \frac{s^2}{T}P_3(Y)$ est réelle.

Soit $Q = 4P_3(Y) - YP'_3(Y)$ et soit y_{min} sa plus petite racine (donc négative). Soit $s_- = \sqrt{\frac{Ty_i^4}{P_3(y_i)}}$. Alors $\boxed{s_- = s_{sel}}$

Démonstration.

On a $\min(s_+, s_-) \leq s_{sel} \leq \max(s_+, s_-)$.

La preuve se fait en deux cas :

i) Premier cas : $s_- < s_+$:

Dans ce cas, on sait déjà que $s_{sel} \geq s_-$.

On va alors montrer que $A_{s_-} = Y^4 + \frac{s_-^2}{T}P_3(Y)$, ce qui donnera $s_{sel} \leq s_-$ donc $s_{sel} = s_-$.

Soit Y_1 la plus petite racine de Q . Nécessairement, A_{s_-} a une racine double en Y_1 .

Soit alors Y_2 et Y_3 ses deux autres racines.

Comme $s_- < s_+$, Y_2 et Y_3 sont des racines complexe conjuguées.

Grace aux relations de Viète (relations coefficients racines), on a :

$$2Y_1 + 2\Re(Y_2) = -\frac{s_-^2}{T}(\lambda + f_0) \quad (64)$$

donc

$$2\Re(Y_2) = -\frac{s_-^2}{T}(\lambda + f_0) - 2Y_1. \quad (65)$$

Or

$$\frac{s_-^2}{T} = \frac{Y_1^4}{P_3(Y_1)} \quad (66)$$

donc :

$$\begin{aligned} 2\Re(Y_2) &= -\frac{Y_1^4}{P_3(Y_1)}(\lambda + f_0) - 2Y_1 \\ &= -\frac{Y_1}{P_3(Y_1)}((\lambda + f_0)Y_1^3 - 2P_3(Y_1)) \\ &= -\frac{Y_1}{P_3(Y_1)}(Q(Y_1) + F_0 f_0(\lambda + 2f_0)Y_1 - 2F_0^2 f_0^2) \end{aligned}$$

or $Q(Y_1) = 0$ et $Y_1 < 0$ et $P_3(Y_1) < 0$ donc :

$$\Re(Y_2) > 0. \quad (67)$$

En particulier $Y_1 < \Re(Y_2)$ donc la racine de plus petite partie réelle est réelle donc A_{s_-} satisfait la condition d'amortissement. Ainsi dans ce cas, $s_{sel} = s_-$.

ii) Deuxième cas : $s_- > s_+$:

Dans ce cas, on sait déjà que $s_{sel} \leq s_-$.

On va alors montrer que $s_{sel} \geq s_-$. Pour cela, on va prendre $s \in [s_+, s_-[$ et montrer que A_s ne satisfait pas la condition d'amortissement.

Soit $s \in [s_+, s[$.

A_s a deux racines réelles positives Y_3 et Y_4 et deux racines imaginaires conjuguées Y_1 et Y_2 .

Montrons que $\Re(Y_1) < 0$, ce qui montrera que la racine de plus petite partie réelle est imaginaire et donc $s_{sel} \neq s$.

Grace aux relations de Viète (relations coefficients racines), on a :

$$2\Re(Y_1) = -Y_3 - Y_4 - \frac{s^2}{T}(\lambda + f_0) < 0 \quad (68)$$

Ainsi, $\Re(Y_1) < 0 < Y_3, Y_4$ et donc $s_{sel} \neq s \forall s \in [s_+, s_-[$. Or $s_{sel} \in [s_+, s_-]$ donc $s_{sel} = s_-$.

Ainsi dans nos deux cas, on a $s_{sel} = s_-$.

□

7 Simulation de l'équation fluide et confirmation du résultat de convergence de la vitesse d'onde sélectionnée vers la vitesse d'onde s_-

Dans cette partie nous allons expliquer la méthode de simulation de l'équation pour le fluide et le résultat obtenu sur la vitesse de propagation :

7.1 Schéma Numérique

On souhaite simuler le système d'équations :

$$\begin{cases} \partial_t \mu + \nabla(\mu v) = f(C)(\mu + \rho) - \mu \rho \\ \partial_t(\mu v) + \nabla(\mu v \times v) + T \nabla \mu = -\lambda \mu v + \mu \nabla C - \mu v \rho \\ \partial_t \rho = F(v) \mu \\ \partial_t C = -b \rho C. \end{cases} \quad (69)$$

Une simulation numérique eulérienne par splitting de Strang du système à été utilisée :

Pour la membre de gauche des équations (partie hyperbolique advective), on utilise un flux numérique approché. Plusieurs approches ont été tentées : un flux de Roe, un flux de Lax-Friedrichs et un flux WENO. Le flux Lax-Friedrichs a l'avantage d'être entropique et robuste en présence de vide, ce qui est exactement le problème autour du front. En revanche, ce flux est extrêmement diffusif, ce qui pose des problèmes lors de la capture du front. Le flux WENO, bien que basé sur le flux Lax-Friedrichs, est oscillant dans les zones de fort gradient, ce qui donne des densités μ négatives près du front. Le flux de Roe est celui qui a été choisi au final et semble bien se comporter, modulo la régularisation suivante près du front :

$$\begin{cases} \partial_t \mu + \nabla(\mu v) = f(C)(\mu + \rho) - \mu \rho \\ \partial_t(\mu v) + \nabla\left(\frac{\mu v \times \mu v}{\sqrt{\mu^2 + \epsilon^2}}\right) + T \nabla \mu = -\lambda \mu v + \mu \nabla C - \mu v \rho \end{cases} \quad (70)$$

La partie de gauche (partie réaction) est ensuite résolue de façon totalement implicite (c'est un système du second degré)

7.2 Convergence de la vitesse du front

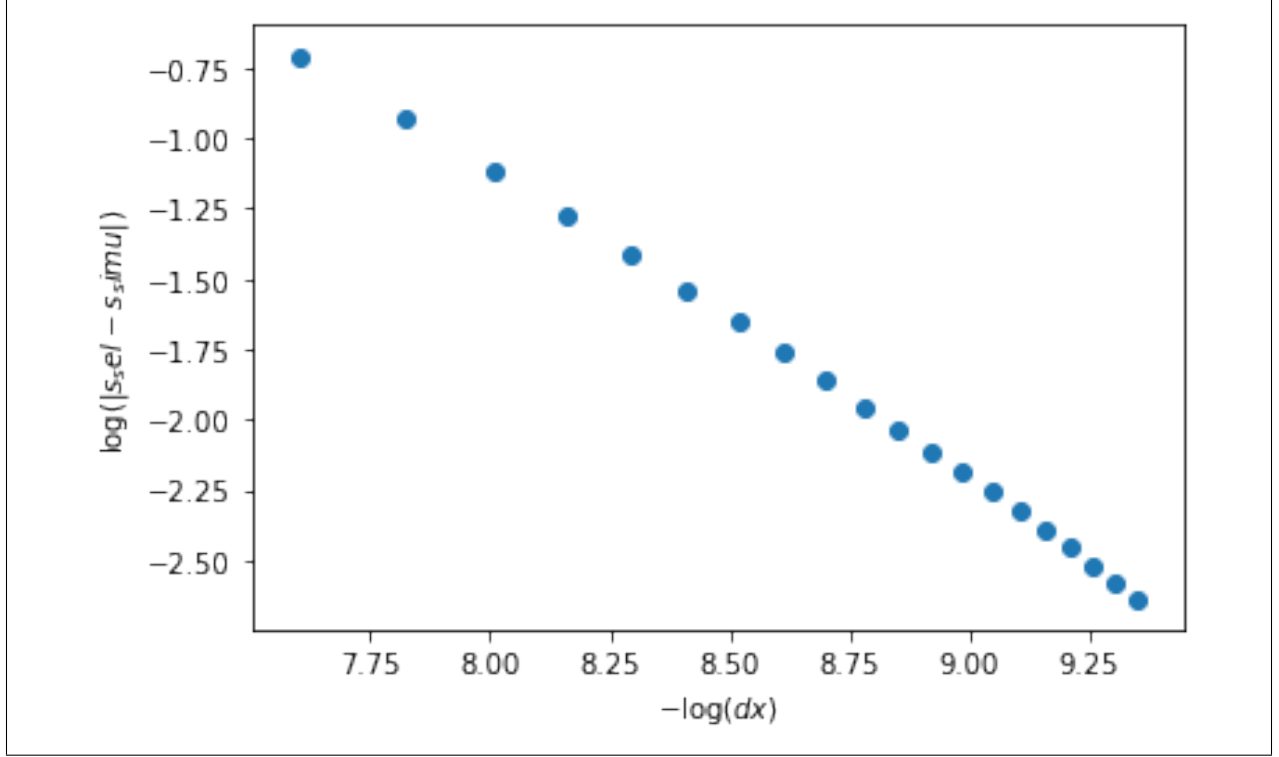


FIGURE 9 – Convergence de la vitesse du front observée numériquement

La figure ci dessus montre la convergence de la vitesse du front observée numériquement. Ici, $\epsilon = 10^{-7}$ et les paramètres physiques sont fixés : longueur totale = 1000, temps total = 100, $b = .7$, $F_0 = .8$, $f_0 = 1$, $T = 10$, $\lambda = 3$.

On fait alors varier le pas d'espace dx et on observe l'erreur $|s_{sel} - s_{simu}|$ où $s_{sel} = s_-$ est la vitesse déterminée dans la partie précédente par la condition d'amortissement et $s_{simu} = \frac{X(t_1+t_2) - X(t_1)}{t_2}$ où t_1 et t_2 sont deux temps arbitraires où le front est déjà établi et $X(t) = \inf(x/\rho(x, t) > \frac{\sup(\rho)}{2})$ est la position du front.

L'ordre de convergence (en fonction pas d'espace dx) est alors numériquement 1, ce qui est cohérent avec les méthodes et le schéma utilisé.

7.3 Sélection de la vitesse minimale d'amortissement

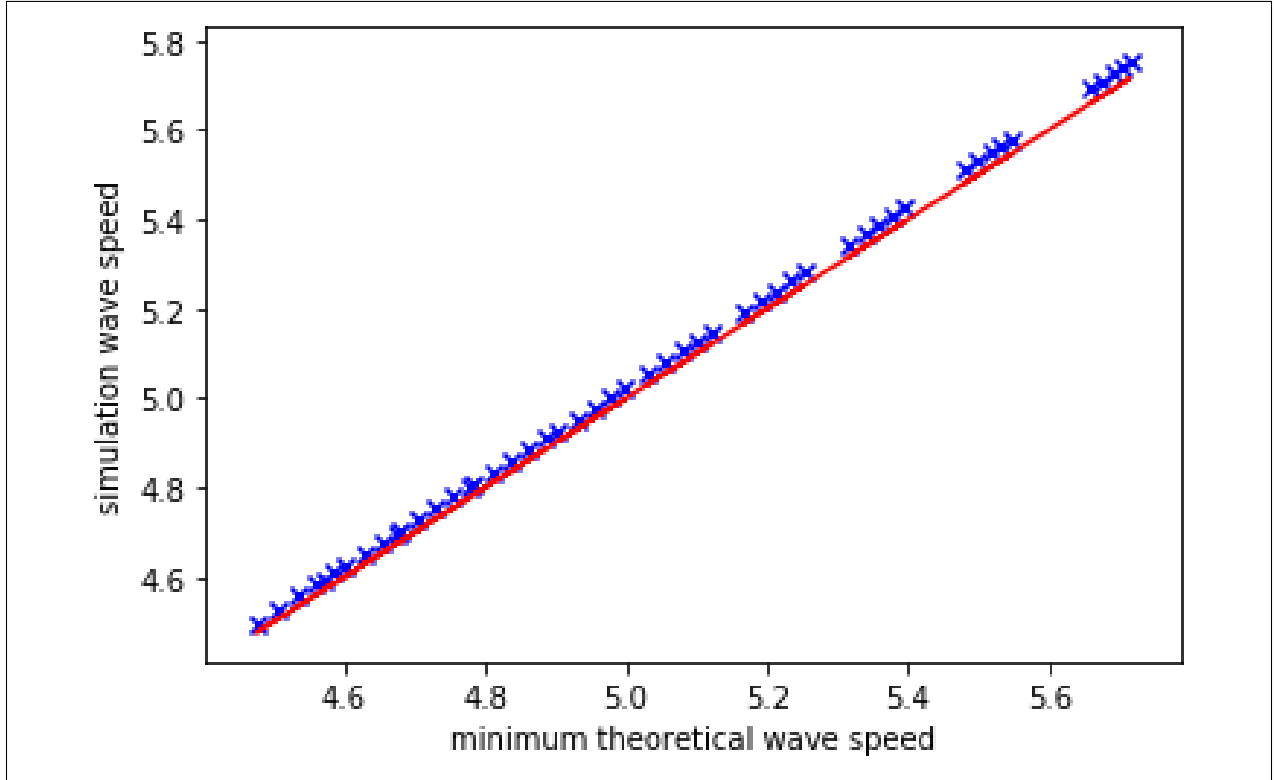


FIGURE 10 – Vitesse du front observée numériquement en fonction de la vitesse minimale d'amortissement $s_{sel} = s_-$

Le graphe ci dessus représente par les points bleus la vitesse du front observée numériquement pour différents paramètres physiques (différents T , λ , F_0 et f_0) en fonction de la vitesse minimale théorique d'amortissement $s_{sel} = s_-$ associée à cette simulation.

La droite rouge est la droite $s_{simu} = s_{theorique}^*$.

On remarque encore une fois que la vitesse du front observée numériquement est toujours très proche de la vitesse minimale théorique d'amortissement décrite ci dessus.

7.4 Validation de la condition d'amortissement critique

Pour certains jeux de paramètres T , λ , F_0 et f_0 , la vitesse $s_{sel} \approx s_{simu}$ ne donne que deux racines réelles au polynôme A_s , ce qui confirme que la vitesse de sélection correspond bien à la condition d'amortissement décrite dans la partie ci dessus (régime critique) et non pas le fait que toutes les racines soient réelles (solutions exponentielles décroissantes ou régime aperiodique).

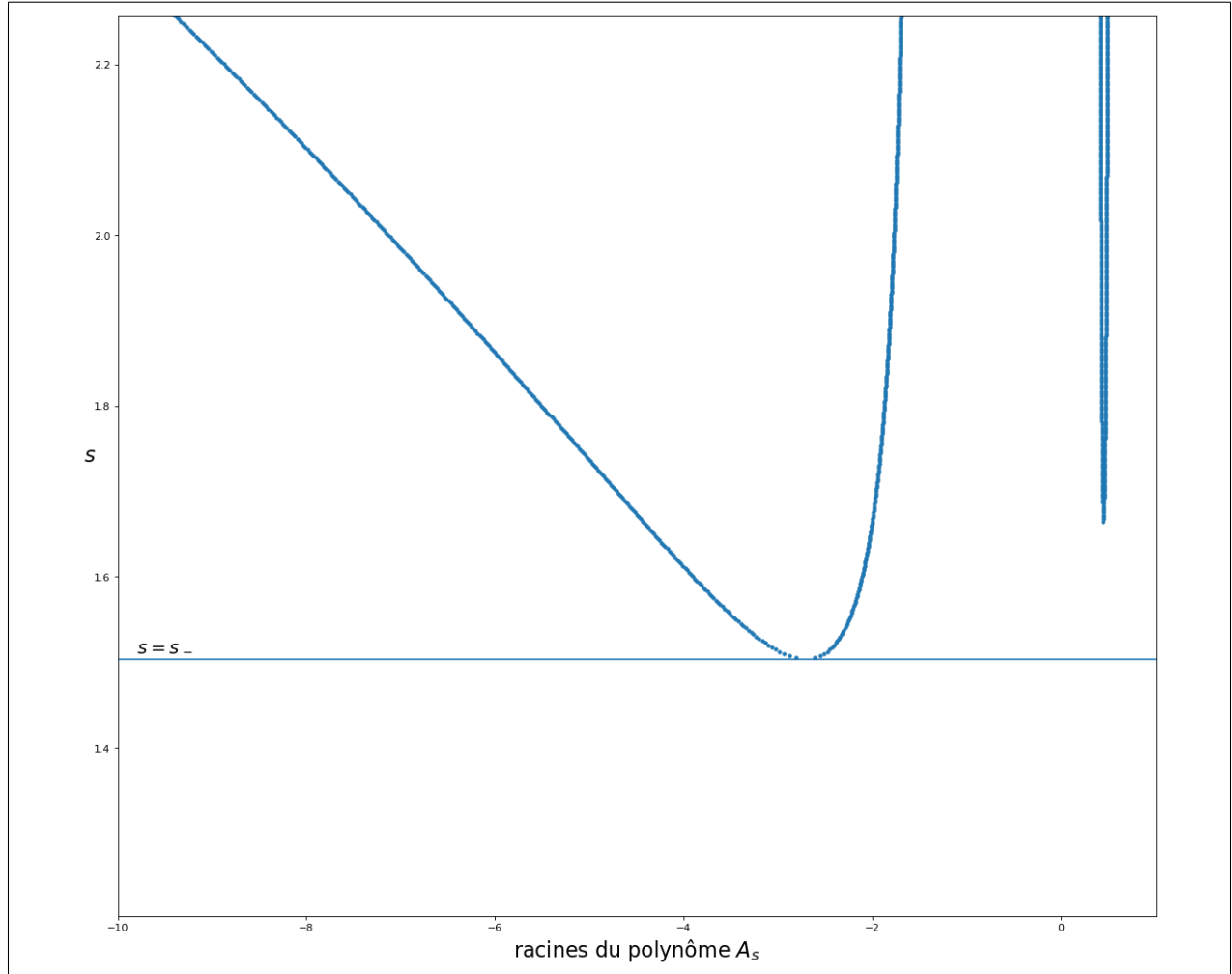


FIGURE 11 – Seulement deux racines réelles pour certains jeux de paramètres