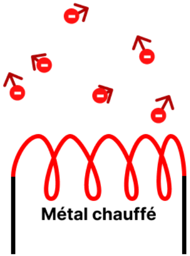
Gaine plasma associée à l'émission secondaire d'électrons

C. Dufour, M. Muraglia, G. Fubiani, N. Claire, N. Dubuit, O. Agullo

Contact: clement.dufour@ik.me

Les émissions secondaires d'électrons (1)

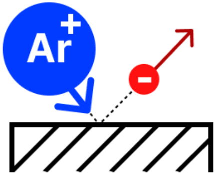
L'émission thermionique[a] :



[a] Chapitre 1 : **Modinos1984**

Le bombardement ionique [a] :

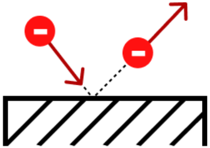
Collision ion/paroi qui entraîne des émissions secondaires.



[a] Chapitre 9.3 : **Lieberman2005**

Les collisions électrons parois :

Backscattering/ True secondary[a]



[a] **Furman2002**; **Bradshaw2024**.

Les émissions secondaires d'électrons (2)

Pour la physique de la gaine, on définit :

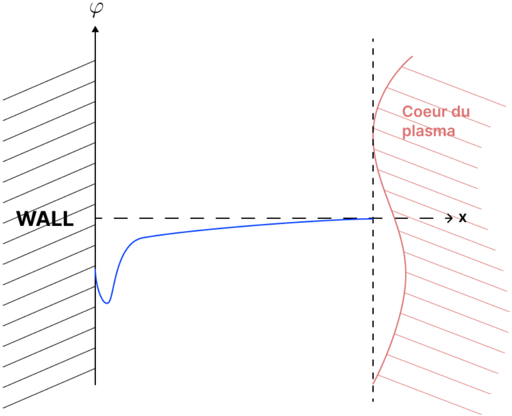
$$\gamma = \frac{\Gamma_{e^-,secondaire}}{\Gamma_{e^-,primaire}} \tag{1}$$

Dans les Tokamaks : $\gamma > 1$, avant la température de fusion du tungsten[1].

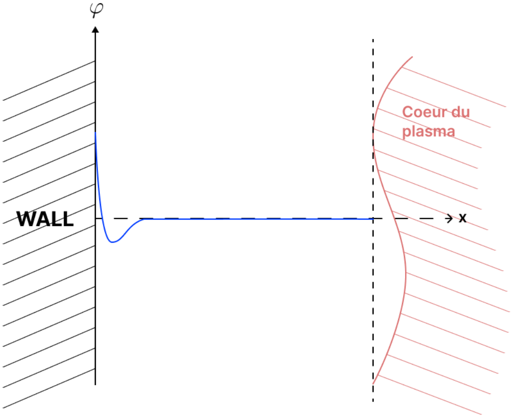
[1] **Campanell2019**.

La gaine avec émissions secondaires d'électrons ($\gamma > 1$)

Gaine SCL :



Gaine Inverse[a]:



[a] **Campanell2017.**

La gaine Inverse (Campanell[2])

Propriétés :

- Accumulation d'électrons à la paroi :
- Ions repoussés par la paroi :
- $\gamma > 1$

Avantages:

- $T_{e,primaire} = T_{mur}$
- Réduction du sputtering

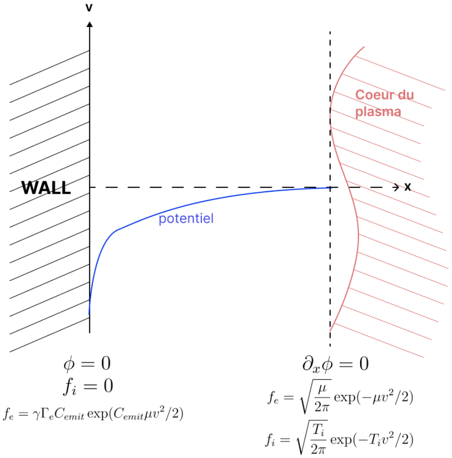
Quels sont les conditions d'apparition de la gaine inverse ?

[2] **Campanell2017**.

Modèle cinétique de la gaine : Inversion de la gaine

La gaine est décrite par le système de Vlasov-Poisson :

$$
\begin{aligned}
\partial_t f_e + \vec{v}\cdot\nabla_{\vec{x}} f_e + \frac{e}{m_e}\nabla_{\vec{x}}\phi\cdot\nabla_{\vec{v}} f_e &= \hat{C}_e \\
\partial_t f_i + \vec{v}\cdot\nabla_{\vec{x}} f_i - \frac{e}{m_i}\nabla_{\vec{x}}\phi\cdot\nabla_{\vec{v}} f_i &= \hat{C}_i \\
\Delta\phi &= -\frac{n_i - n_e}{\epsilon_0}
\end{aligned}
\tag{2}
$$



Modèle cinétique pour simuler l'expérience

Collisions et chimie

- Ionisation: [1]

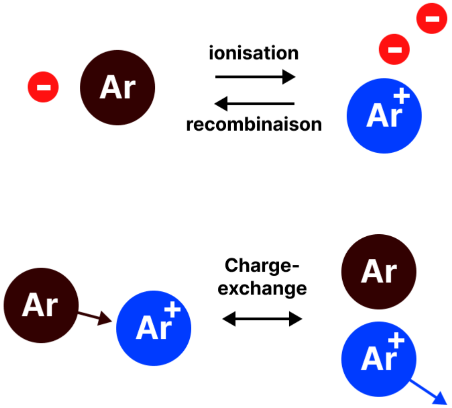
$$\hat{C}_e = \langle \sigma v_e \rangle n_n (2 f_{e,0} - f_e) \qquad \hat{C}_i = \langle \sigma v_e \rangle n_e f_n \tag{3}$$

- 3-body recombinaison: [2]

$$\hat{C}_e = -\tau_{rec} f_e n_i \qquad \hat{C}_i = -\tau_{rec} f_i n_e \tag{4}$$

- Charge-Exchange: [3]

$$\hat{C}_i = -\hat{C}_n = \int (f_n' f_i - f_i' f_n) \sigma |v - v'| \, dv' \tag{5}$$



[1] Carbone2021; Bartschat2016
[2] Fujimoto
[3] Phelps1994

Les équations résolues

Equations résolues

$$\begin{aligned} \partial_t f_e + \vec{v}\cdot\nabla_{\vec{x}} f_e + \frac{e}{m_e}\nabla_{\vec{x}}\phi\cdot\nabla_{\vec{v}} f_e &= \hat{C}_e \\ \partial_t f_i + \vec{v}\cdot\nabla_{\vec{x}} f_i - \frac{e}{m_i}\nabla_{\vec{x}}\phi\cdot\nabla_{\vec{v}} f_i &= \hat{C}_i \\ \partial_t f_n + \vec{v}\cdot\nabla_{\vec{x}} f_n &= \hat{C}_n \\ \Delta\phi &= -\frac{n_i - n_e}{\epsilon_0} \end{aligned} \tag{6}$$

Opérateur de collision

- BGK : $\hat{C}_s = \nu_s\big(f_{0,s} - f_s\big)$
- Dougherty[a] : $\hat{C}_s = \nu_s\partial_v\big[(v-\bar{v})f_s + T_s\partial_v f_s\big]$

Opérateur de collision/source (Chimie)

- Ionisation : $\hat{C}_e = \langle\sigma v_e\rangle n_n(2f_{e,0} - f_e)$[b]
- Charge-Exchange : $\hat{C}_{CX} = \int (f_n' f_i - f_i' f_n)\sigma|v - v'|\,dv'$
- Recombinaison : $\hat{C}_e = -\tau_{rec} f_e n_i$[c]

[a] **Pezzi_2014**.
[b] **Bernard2022**.
[c] τ_{rec} obtenu par *detailed balance*

Méthodes numériques (1)

Schéma numérique pour résoudre :

- Séparation des opérateurs (Strang Splitting)
- Advection (SL-CWENO 3[3])
- Poisson (SOR)
- Opérateur de Dougherty (Crank-Nicolson[4])
- BGK (RK4)

CAMON est théoriquement en $o(\Delta v^2 + \Delta x^2 + \Delta t^2)$

[3] **Cho2021**.
[4] **Donnel2019**; **dutykh:hal-01401125**.

Méthodes numériques (2)

Séparation des opérateurs

Objectif : se ramener à $\partial_t f = \hat{L} f$

$$\partial_t f = (\hat{L}_1 + \hat{L}_2) f \tag{7}$$

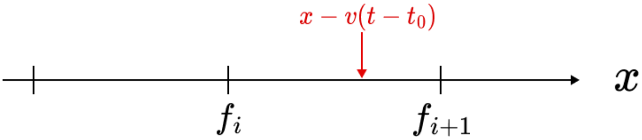
Solution : $f = \exp((\hat{L}_1 + \hat{L}_2)\, t) f_0 = \exp(\hat{L}_1\, t) \exp(\hat{L}_2\, t) f_0 + o(t)$

On utilise le strang splitting d'ordre 2.

Méthodes numériques : Advection (3)

Méthode semi-lagrangienne

- Objectif : Résoudre $\partial_t f = -v\partial_x f$.
- Solution analytique : $f(t,x) = f(t_0, x - v(t-t_0))$



Reconstruction : CWENO 3-2[5]

[5] **Cho2021**.

Validation du code (Atténuation Landau)

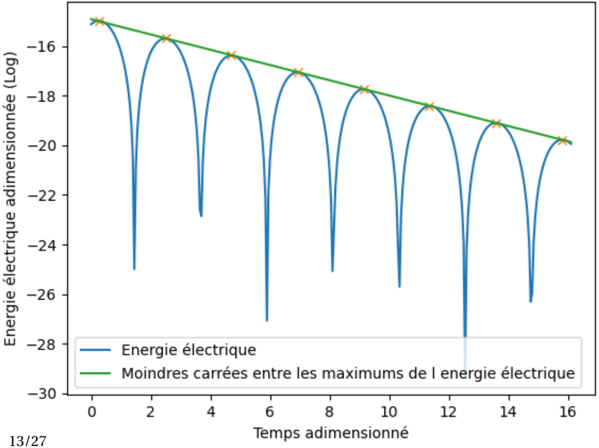
En développant linéairement la distribution et le potentiel $f = f_0 + \delta f$, $\phi = \delta\phi$:

$$\delta\phi = \delta\phi_0 e^{-i(\omega t + kx)} \qquad (8)$$

Si $\omega = \omega_R + i\gamma$ =>

- Théorie : k = 0.5 => $\gamma = -0.3066$[a]
- Simulation : k = 0.5 => $\gamma = -0.307$[b]

[a] **Utsumi1998**.
[b] Conditions aux bord périodiques



Validation du code (Method of Manufactured Solution)

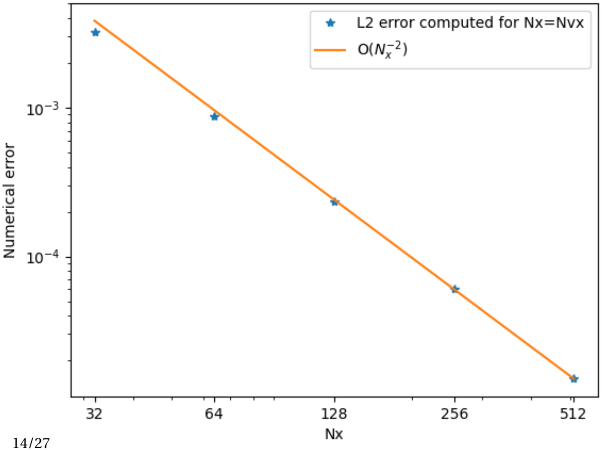
On construit f_e pour vérifier l'équation de Poisson[a] :

$$\begin{aligned} \phi &= -\frac{A\cos(kx)\sin(t)}{k^2} \\ f_e &= e^{-v^2/2}/\sqrt{2\pi}(1 + A\cos(kx)\sin(t)) \\ \mathrm{d}_t f &= \mathrm{d}_t f_e \\ \Delta\phi &= n_e - n_i \end{aligned} \tag{9}$$

CAMON est donc à l'ordre 2

Erreur = $\int (f_{theorie} - f_{num})^2$

[a] **Banks2019**.



Collisions et émissions secondaires[6]

La gaine collisionnelle

- Collisions électrons : $\hat{C} = \frac{1}{\tau_s}(n_s f_{0,s} - f_s)$
- Collisions ions : $\hat{C} = \langle \sigma \omega \rangle (n_s f_{0,s} - f_s)$
- Emission secondaire : $\Gamma_{e,secondaire} = 0$

La gaine SCL : (Space-Charge-Limited)

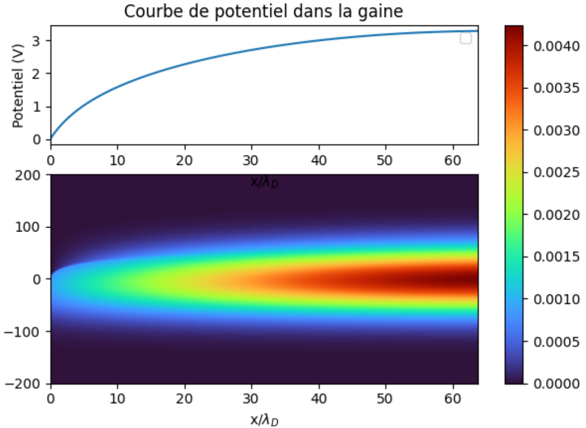
- Collisions électrons : $\hat{C} = \frac{1}{\tau_s}(n_s f_{0,s} - f_s)$
- Collisions ions : $\hat{C} = 0$
- Emission secondaire : $\Gamma_{e,secondaire} = \gamma \Gamma_{e,primaire}$

La gaine Inverse

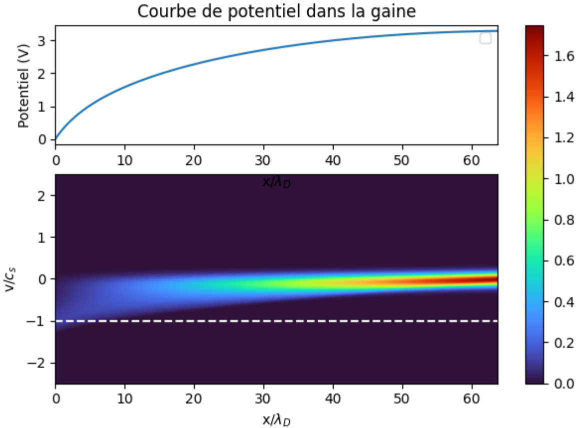
- Collisions électrons : $\hat{C} = \frac{1}{\tau_s}(n_s f_{0,s} - f_s)$
- Collisions ions : $\hat{C} = \langle \sigma \omega \rangle (n_s f_{0,s} - f_s)$
- Emission secondaire : $\Gamma_{e,secondaire} = \gamma \Gamma_{e,primaire}$

[6] **Campanell2017**.

La gaine collisionnelle

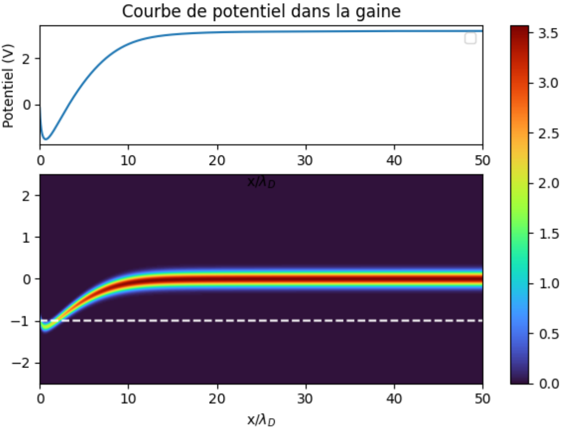


Fonction de distribution des électrons dans la gaine

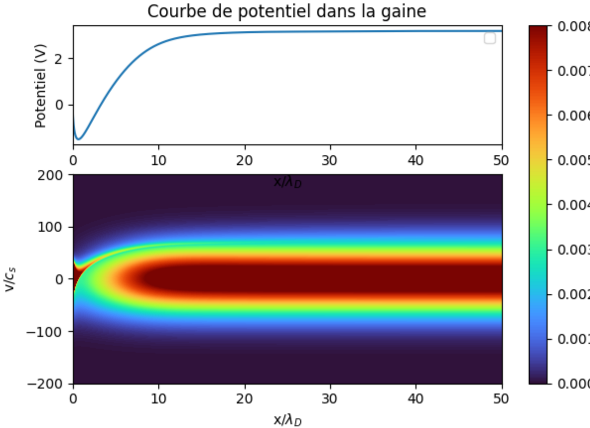


Fonction de distribution des ions dans la gaine

La gaine Space-Charge-Limited (SCL)



Fonction de distribution des ions dans la gaine



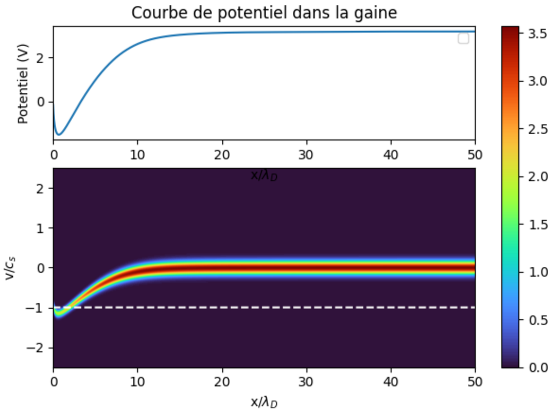
Fonction de distribution des électrons dans la gaine

Transition vers la gaine inverse

Charge Exchange collision[a]

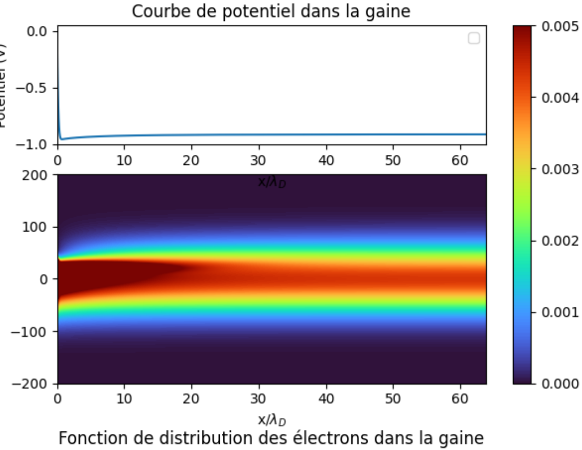
- Les collisions font perdre la vitesse des ions.
- Les ions sont piégés dans le puits de potentiel.
- Le potentiel remonte.
- La gaine s'inverse.

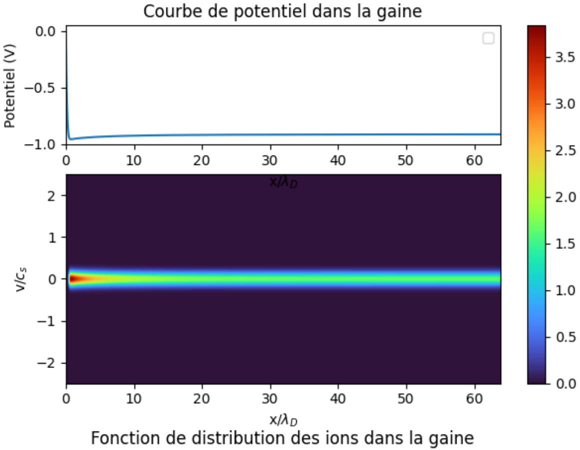
[a] **Campanell2017**.



Fonction de distribution des ions dans la gaine

La gaine inverse





Conclusions et perspectives

Conclusions

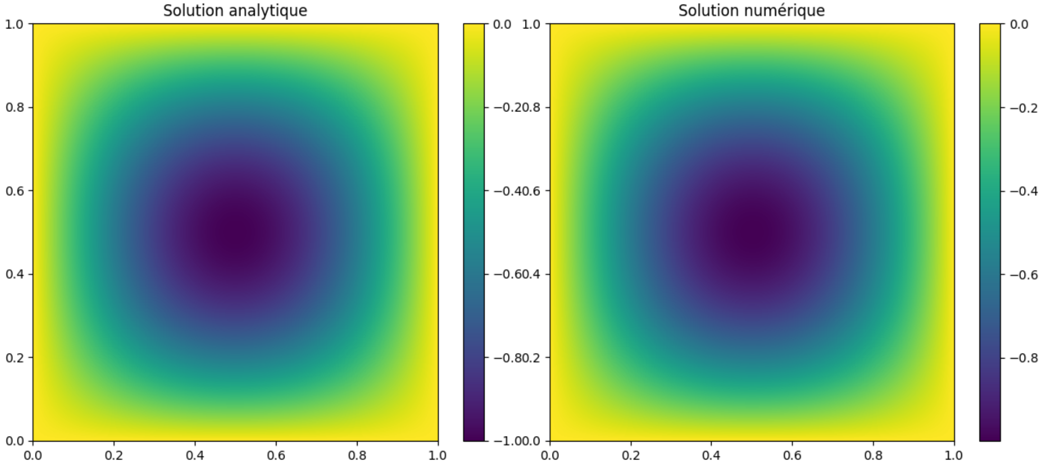
- Développement et validation de CAMON : Code cinétique pour étudier la dynamique de la gaine avec émission secondaire.

Perspectives

- Comparer les résultats avec des résultats expérimentaux
- Prise en compte d'un champ magnétique. Etude dans des cas pertinents pour les tokamaks.

Bibliography I

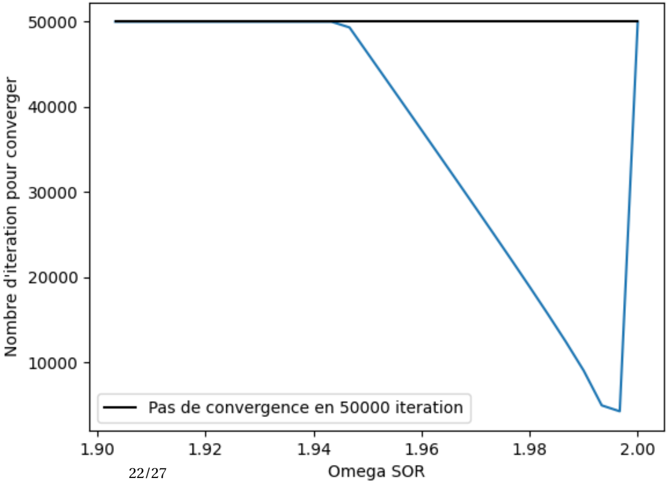
Validation Poisson (1)



Validation Poisson (2)

Successive Over Relaxation (SOR) :

$$\boxed{\phi^{n+1} = (1-\omega)\phi^n + \omega\hat{A}\phi^{n+1}} \quad (10)$$



Accélération : rapport de masse électrons ions

- Rescaled Mass method : On diminue la masse des ions.
- Subcycling method : On itère N fois pour les électrons et 1 fois pour les ions.
- **Numerical Time method (ou asynchronous subcycling) :** On pose deux pas de temps différents dt_{ions} et dt_{e^-}.
  => si convergence : la solution vérifie :

$$\vec{v} \cdot \nabla_{\vec{x}} f_s - \frac{q_s}{m_s} \nabla_{\vec{x}} \phi \cdot \nabla_{\vec{v}} f_s = 0 \tag{11}$$

Schémas numériques

Tableaux de Butcher RK4 :

$$\begin{array}{c|cccc} 0 & & & & \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & & & \\ \frac{1}{2} & 0 & \frac{1}{2} & & \\ 1 & 0 & 0 & 1 & \\ \hline & \frac{1}{6} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & \frac{1}{6} \end{array}$$

Strang Splititng :

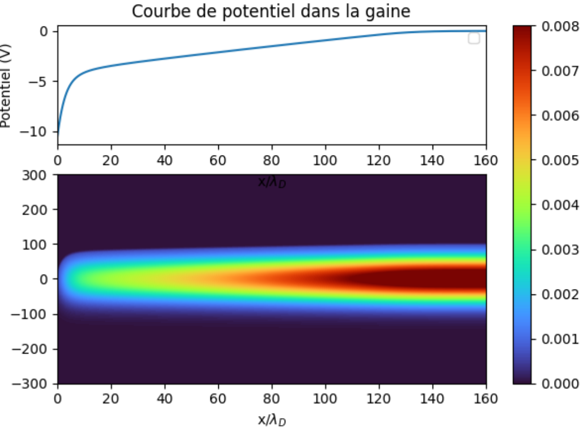
$$e^{(\hat{L}_1+\hat{L}_2)t} = e^{\frac{1}{2}\hat{L}_1 t} e^{\hat{L}_2 t} e^{\frac{1}{2}\hat{L}_1 t} \tag{12}$$

Intégration/dérivation :

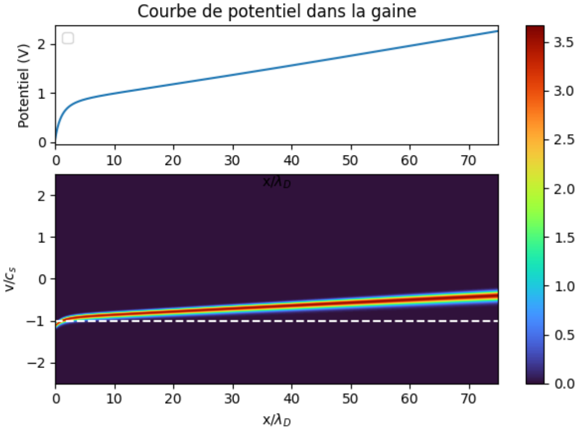
$$\int_a^b = \frac{1}{3} h(f(a)+4f(a+h)+f(b)) \tag{13}$$

$$\partial_\xi u_i = \frac{-u_{i-1}+u_{i+1}}{2\Delta\xi} \tag{14}$$

Gaine sans collision



Fonction de distribution des électrons dans la gaine



Fonction de distribution des ions dans la gaine

Opérateur de collisions

Dérivation de Liouville[a] :

$$\mathrm{d}_t f_1 = -n_0 \int d2\; a_{12} \nabla_{v1}\, g(12) \quad (15)$$

$$\partial_t g + \hat{V}_1{}^{b} g + \hat{V}_2 g = \hat{S}^{c} \quad (16)$$

[a] **Swanson2008**.
[b] $\hat{V}_1 = v_1 \nabla_{r_1} + (n_0 \int d_3 a_{13} g) \nabla_v f_1$
[c] $\hat{S} = -(a_{12} \nabla_{v_1} + a_{21} \nabla_{v_2}) f_1 f_2$

Fokker-Planck[a] :

$$\hat{C}_{s,s'} = \frac{\partial}{\partial v} \cdot [D \partial_v f_s + d_c f_s] \quad (17)$$

[a] **Hazeltime**.

Dougherty :

- Conservation (n, v, v^2)
- Ker(C) = maxwellienne

$$\hat{C} = \frac{\partial}{\partial v} \cdot [T \partial_v f_s + (v - \langle v \rangle) f_s] \quad (18)$$

Critère de Bohm

- Rupture à la quasi-neutralité : $\rho(\phi) = \partial_\phi \rho|_{\phi=0}\phi$
- $\left.\frac{\partial \rho}{\partial \phi}\right|_{\phi=0} \leq 0$
- $v_i \geq \sqrt{\frac{k_b T_e}{m_i}}$

=> Le critère de Bohm est un critère de stabilité[7].

[7] **Badsi2017**.