

Chapter 1

Introduction à la physique des plasmas

Gabriel Fruit

IRAP (Roche) - Bureau 103
Email : gfruit@irap.omp.eu

2014 - 2015

Bibliographie

- En français :
 - ▶ Physique des plasmas tomes 1 et 2, J.L. Delcroix et A. Beers, ed. EDP Sciences : "historique"
 - ▶ Introduction à la physique des plasmas, G. Belmont et al., ISTE edition
 - ▶ Nouveau : Magnétohydrodynamique, S. Galtier, ed. Dunod
- En anglais :
 - ▶ Plasma Physics, A. Piel, Springer
 - ▶ Introduction to Plasma Physics with Space and Laboratory Applications, D. Gurnett & A. Battacherjee, ed. Cambridge
 - ▶ Fundamental of Plasma Physics, P. Bellan, ed. Cambridge
- la liste est loin d'être exhaustive... bien d'autres ouvrages tout aussi intéressants peuvent se trouver à la BU ou à la bibliothèque de l'OMP !

Qu'est-ce qu'un plasma ?

Definition

Un plasma est un **gaz ionisé** contenant une certaine fraction de charges libres et montrant un "**comportement collectif**".

Remarques

- Souvent appelé le 4e état de la matière
- Nommé ainsi par I. Langmuir dans les années 1920 suite à ses expériences sur les décharges dans les gaz.
- La physique des plasmas est une science jeune qui n'a réellement démarré qu'après 1945 avec la recherche nucléaire et l'exploration spatiale.
- Elle utilise un mélange d'électromagnétisme et de mécanique statistique mais a aussi contribué à développer des techniques mathématiques propres.

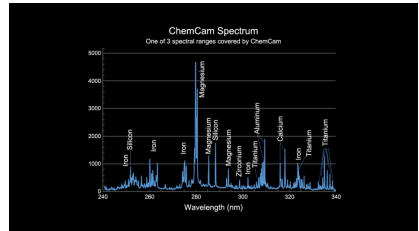
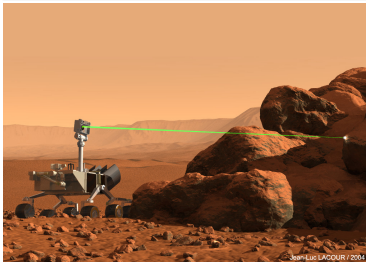
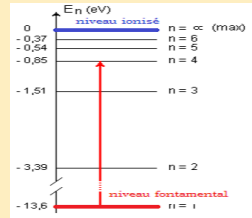
Les quatre états de la matière
Copyright 1994 General Atomics

Solid	Liquid	Gas	Plasma
Example Ice H_2O	Example Water H_2O	Example Steam H_2O	Example Ionized Gas $H_2 \rightarrow H^+ + H^+ + 2e^-$
Cold $T < 0^\circ C$	Warm $0 < T < 100^\circ C$	Hot $T > 100^\circ C$	Hotter $T > 100,000^\circ C$ $T > 10$ electron Volts
			
Molecules Fixed in Lattice	Molecules Free to Move	Molecules Free to Move, Large Spacing	Ions and Electrons Move Independently, Large Spacing

Comment atteindre l'état plasma ?

Par chauffage

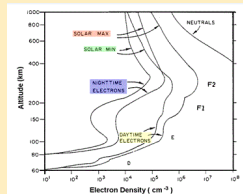
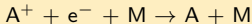
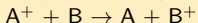
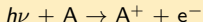
- $k_B T > E_I \Rightarrow T > 10^4 \text{ K}$
- Atmosphères stellaires
- Plasmas de fusion (laser ou ondes radio comme source d'énergie)
- **Expérience CHEMCAM** sur Mars : analyse de la composition d'une roche par ablation laser



Comment atteindre l'état plasma ?

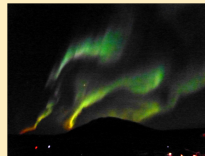
Par rayonnement

- $h\nu > E_I \Rightarrow \lambda < 100 \text{ nm}$: domaine UV
- Ionosphères planétaires : équilibre entre photoionization et recombinaison avec les neutres



Par impact d'électrons énergétiques

- précipitation d'électrons issus de la queue magnétosphérique dans la haute atmosphère terrestre (latitudes $> 70^\circ$)
- aurores polaires issues de la désexcitation des atomes ionisés



Comment atteindre l'état plasma ?

Par décharge électrique

- tube "néon", éclairage public
- tubes fluorescents, ampoules compactes
- éclairs atmosphériques



Sous pressions extrêmes

- intérieurs stellaires ou des planètes géantes
- naines blanches (étoiles à neutrons)
- la matière est si comprimée que des effets quantiques la rendent conductrice
⇒ plasmas dégénérés



Degré d'ionisation d'un plasma

Definition

Si n_0 est la densité des neutres et $n_i = n_e$ la densité des espèces chargées, le degré d'ionisation s'écrit

$$\alpha = \frac{n_e}{n_e + n_0}.$$

En général, si $\alpha < 10^{-4}$ le plasma est dit *faiblement ionisé*. Les collisions entre particules chargées et particules neutres jouent un rôle prédominant dans la dynamique du plasma (diffusion, mobilité...).

Si $\alpha > 10^{-4}$, le plasma est *fortement ionisé* (voire totalement si $\alpha = 1$). La dynamique est plus complexe et les collisions entre particules chargées ne sont pas indispensables.

Formule de Saha

Lorsque le plasma est en équilibre thermodynamique avec le gaz neutre qui le crée, on peut dériver une loi d'action de masse pour la réaction $A \leftrightarrow A^+ + e^-$:

$$\frac{n_e n_i}{n_0} = \frac{2g_{A^+}}{g_A} \left(\frac{2\pi m_e k_B T}{h^2} \right)^{3/2} \exp \left(-\frac{E_{\text{ion}}}{k_B T} \right).$$

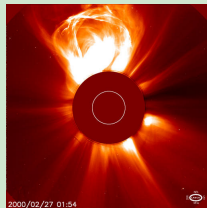
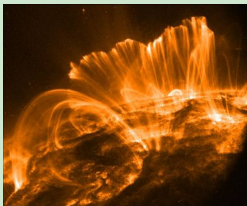
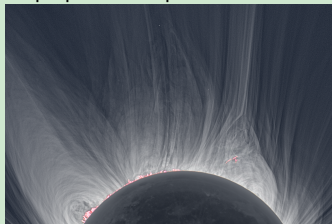
où g_A et g_{A^+} sont les degrés de dégénérescence, fonction du spin et des degrés de liberté de la particule.

Où trouver des plasmas dans la nature ?

Pas difficile : 99% de la matière dans l'univers est sous forme plasma... nous ne vivons que dans le pourcent restant !

La couronne solaire

L'atmosphère d'une étoile n'est pas en équilibre statique (cf. cours planétologie) mais en perpétuelle expansion $\Rightarrow$ couronne et vent solaire



Le plasma (H^+ et e^-) est organisé par le champ magnétique solaire formant des boucles à sa surface. Ces boucles sont le siège d'instabilités chroniques (éruptions) qui libèrent l'énergie magnétique en chaleur ou en ejecta de matière $\Rightarrow$ éjections de masse coronale (CME).

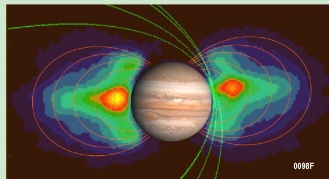
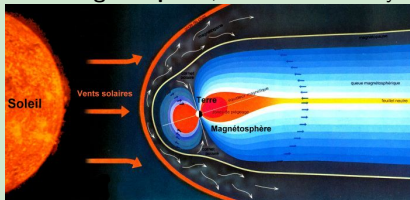
Quelques grandes questions :

- pourquoi la couronne est-elle aussi chaude ($T \sim 10^6$ K) ?
- mécanisme des éruptions solaires et des CME ?
- cycle magnétique de 11 ans : dynamo solaire ?

Où trouver des plasmas dans la nature ?

L'environnement magnétisé d'une planète

De l'interaction entre le vent solaire et une planète magnétisée résulte la formation d'une **magnétosphère**, laboratoire très dynamique de la physique des plasmas.



Les lignes de champ planétaires fermées deviennent ouvertes côté jour (reconnexion magnétique) puis elles sont convectées par le vent solaire vers le côté nuit où elles forment la queue magnétosphérique. De fréquentes instabilités se produisent dans la queue magnétique et conduisent à refermer les lignes de champ (sous-orage magnétosphérique) et sont aussi à l'origine des aurores polaires.

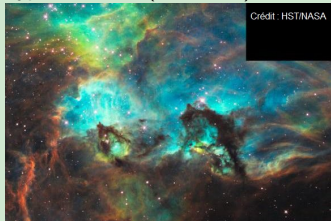
Quelques grandes questions :

- mécanismes physiques de la reconnexion magnétique ?
- origine des aurores (accélération des particules) ?
- interaction plasma / satellites de glace ?

Où trouver des plasmas dans la nature ?

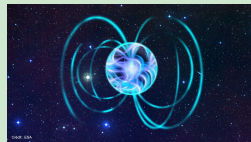
Dans l'Univers lointain

Domaine des conditions extrêmes : matière ultra-dense, jets galactiques supersoniques (énergie $> \text{GeV}$), rayons cosmiques (énergie $> \text{TeV}$), champs magnétiques hyper-intenses ($B > 10^6 \text{ T}$)



Quelques grandes questions :

- production du rayonnement X et γ (sursauts) ?
- accélération des rayons cosmiques ?
- création et maintien de champs magnétiques intenses ?
- rôle de la turbulence du milieu interstellaire dans l'évolution des galaxies ?



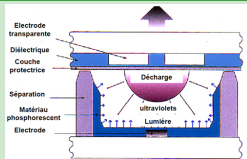
Où trouver des plasmas dans l'industrie ?

Lampes d'éclairage

Soumis à une différence de potentiel électrique, une vapeur de Hg est partiellement ionisée. En revenant à l'état fondamental, elle émet une radiation ultraviolette qui excite le revêtement fluorescent de l'ampoule. C'est le principe des tubes fluorescents au-dessus de nos têtes.

En modifiant la nature de la vapeur (halogènes, métaux), on génère des rayonnements de longueur d'onde et de puissance différentes.

Ecrans plasmas des téléviseurs



Même principe : un mélange $\text{Ne} + \text{Xe}$ est soumis à une ddp qui le transforme en un plasma émettant une raie UV qui excite un photophore de couleur rouge, bleu ou vert...

Bien d'autres applications encore : torches à plasma (pour la découpe), dépôt d'ions sur des circuits imprimés (micro-électronique), ...

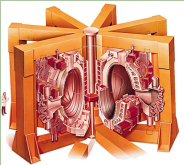
Plasmas de fusion

Principe de la fusion

- Les isotopes lourds de l'hydrogène fusionnent pour former des noyaux encore plus lourds selon par exemple :
 $D + D \rightarrow T + p + 4.0 \text{ MeV}$
 $D + T \rightarrow {}^4\text{He} + n + 17.6 \text{ MeV}$
- La fusion n'est initiée que si les particules ont suffisamment d'énergie pour contrecarrer la répulsion coulombienne. En gros, il faut atteindre au moins 20 keV, soit 2.10^8 K .
- Ces températures sont atteintes en chauffant par des ondes radio ou microondes
- Aucune paroi matérielle ne peut retenir de la matière aussi chaude $\Rightarrow$ idée d'un confinement immatériel

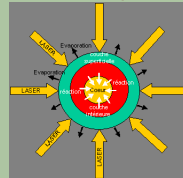
Deux technologies différentes

Tokamaks ou Stellarators :
confinement magnétique



Projet ITER (France) :
atteindre 500 MW !

Fusion inertielle (LLNL, Calif.) :
confinement par laser



Interactions binaires / collectives

Dans un gaz neutre

- Interaction de courte portée entre particules : force de Van der Waals en $1/r^7$
- Une particule ne "ressent" la présence de ses congénères qu'au cours des collisions binaires ou ternaires
- **Dans la matière "ordinaire", l'information est transmise de proche en proche via les collisions (diffusion). Un gaz neutre suffisamment dense relaxe très rapidement vers un état d'équilibre thermodynamique caractérisé par des paramètres uniformes.**

Dans un plasma

- Interaction entre particules chargées est de longue portée : force en $1/r^2$
- Une particule rencontre ses voisines au cours de collisions binaires mais elle "sent" déjà leur présence à distance par le champ électromagnétique que celles-ci créent.
- On parle d'**interaction collective** entre toutes les particules du plasma.

Les effets collectifs sont une caractéristique importante et fondamentalement nouvelle de l'état plasma. Ils donnent naissance à des phénomènes uniques comme la filamentation, l'amortissement Landau... Ils dominent les collisions binaires qui seront alors considérées comme de petites perturbations.

Paramètre plasma (I)

Comment quantifier le rôle des interactions collectives / interactions binaires ?

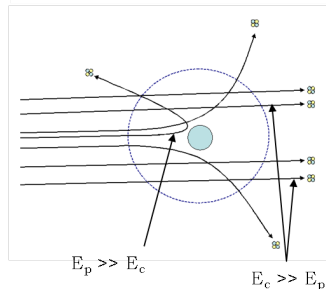
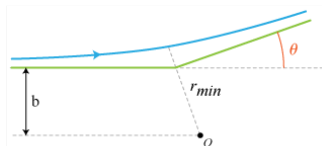
Diffusion Rutherford (cf. Perez)

L'angle de diffusion θ dépend de la vitesse v_0 à l'infini et du paramètre d'impact b :

$$\tan \frac{\theta}{2} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{mv_0^2 b}$$

Une collision binaire est efficace dans le transfert d'impulsion si l'énergie potentielle du projectile est supérieure à son énergie cinétique.

Sinon, la trajectoire est à peine affectée par la présence de la cible (ligne droite)



Paramètre plasma (II)

Dans un plasma de densité n et de température T

- Densité d'énergie cinétique : $\langle E_k \rangle \approx nk_B T$
- Densité d'énergie potentielle : $\langle E_p \rangle \approx ne^2/(4\pi\epsilon_0 d)$ avec $d \sim n^{-1/3}$ la distance moyenne entre particules
- Les deux énergies sont équivalentes si

$$d \simeq r_0 = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 k_B T} \quad \text{longueur de Landau}$$

- On définit le paramètre plasma par

$$\Lambda = \frac{\langle E_p \rangle}{\langle E_k \rangle} = \frac{r_0}{d} \propto \frac{n^{1/3}}{k_B T}$$

Remarque : limite quantique

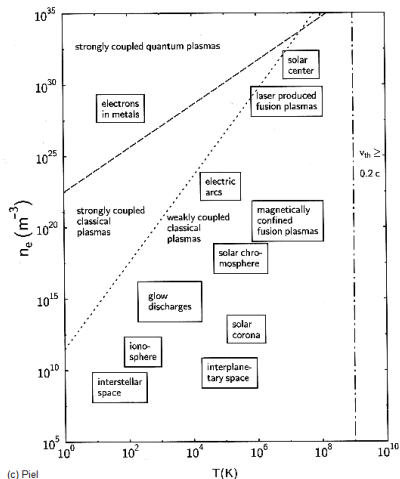
Les effets quantiques interviennent lorsque la distance entre électrons devient de l'ordre de grandeur de la longueur de de Broglie thermique :

$$d \simeq \lambda_B = \frac{h}{m_e} \sqrt{\frac{m_e}{2k_B T}}.$$

Si tel est le cas, les électrons doivent être décrits par la statistique de Fermi-Dirac
 $\Rightarrow$ plasma dégénérés.

Paramètre plasma (III) : classification

- La limite $\Lambda = 1$ correspond à une droite de pente 3 dans un diagramme $\ln n = f(\ln T)$
- Les plasmas pour lesquels $\Lambda \ll 1$ sont dits *faiblement couplés* ou *idéaux*. Cela correspond à quasiment tous les plasmas astrophysiques, géophysiques et même industriels.
- Les plasmas pour lesquels $\Lambda \gg 1$ sont *fortement couplés*. Il s'agit des électrons dans les métaux qui doivent être de plus traités quantiquement. Il s'agit d'une toute autre physique que l'on étudiera pas dans ce cours.
- La physique des plasmas "classiques" se restreint aux plasmas faiblement couplés et non relativistes. Pour eux, l'énergie cinétique domine l'énergie potentielle coulombienne. **Les particules interagissent entre elles par le champ électromagnétique qu'elle créent collectivement**

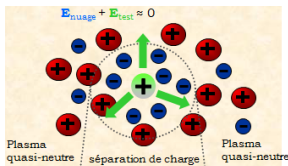


Quasineutralité - Ecrantage de Debye

Propriété fondamentale des plasmas :

Ils sont globalement électriquement neutres à l'échelle macroscopique : $n_{ion} = n_e$.

- Cependant, l'agitation thermique ou des ondes électromagnétiques rapides empêchent de respecter l'électroneutralité à la lettre. Des séparations de charges peuvent être observées sur des échelles spatiales L et/ou sur des échelles temporelles τ .
- A quelles quantités physiques correspondent L et τ correspond ?
- Expérience (de pensée !) : placer une charge positive q dans un plasma neutre et au repos, que se passe-t-il ?
 - Un nuage d'électrons va se former autour de q et les ions sont repoussés. A l'équilibre, le champ électrique du nuage compense celui de la charge q .
 - La charge q n'est plus "sentie" par le reste du plasma au-delà d'une certaine distance λ_D , typiquement le rayon du nuage électronique.
 - On parle d'**écrantage de Debye**. La séparation de charge existe seulement dans une zone de taille λ_D , longueur de Debye.



Ecrantage de Debye - Longueur de Debye (I)

- Charge-test dans le vide : $V(r) = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r} \Leftrightarrow \Delta V = -\frac{q}{\epsilon_0}\delta(r)$
- Charge-test dans un plasma : on doit inclure l'effet du nuage électronique de densité $n_e(r)$
 - ions sont supposés immobiles de densité $n_i = n_0$ (rappel : $m_i = 1800m_e$)
 - electrons en équilibre thermodynamique dans le potentiel $V(r)$, ils suivent la loi de Boltzmann :

$$n_e(r) = n_0 \exp\left(\frac{eV(r)}{k_B T}\right)$$

- symétrie sphérique autour de la charge-test
- Equation de Poisson

$$\Delta V = -\frac{q}{\epsilon_0}\delta(r) - \frac{e(n_i - n_e)}{\epsilon_0} = -\frac{q}{\epsilon_0}\delta(r) + \frac{en_0}{\epsilon_0} \left[e^{eV/k_B T} - 1 \right]$$

- Simplification : $eV \ll k_B T$ (plasma faiblement couplé)

$$\Delta V = -\frac{q}{\epsilon_0}\delta(r) + \frac{V}{\lambda_D^2} \quad \lambda_D = \sqrt{\frac{\epsilon_0 k_B T}{n_0 e^2}} : \text{longueur de Debye}$$

Ecrantage de Debye - Longueur de Debye (II)

- Solution pour le potentiel écranté :

$$V(r) = \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \frac{\exp(-r/\lambda_D)}{r}$$

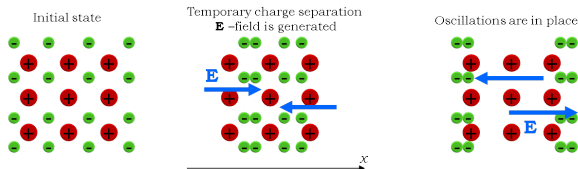
- pour $r \rightarrow 0$ on retrouve le potentiel dans le vide
- pour $r > \lambda_D$, $V(r) \simeq 0$ mais V décroît plus rapidement que dans le vide (effet d'écrantage)
- Au-delà de quelques longueurs de Debye, la charge-test n'affecte plus la quasi-neutralité du plasma. En pratique, toutes les particules jouent le rôle de charge test. La longueur de Debye caractérise l'échelle typique sur laquelle la séparation de charge est autorisée.
- Validité du modèle : pour avoir équilibre thermodynamique, il faut un grand nombre d'électrons dans la sphère de Debye

$$N_D \sim n_0 \lambda_D^3 \propto \frac{T^{3/2}}{n_0^{1/2}} \propto \frac{1}{\Lambda^{3/2}}$$

- Pour les plasmas faiblement couplés : $\Lambda \ll 1$ et donc $N_D \gg 1$, le modèle est valide.
- Un calcul d'ordre de grandeur (cf. Td) montre que la longueur de Debye est très souvent petite devant la taille caractéristique du phénomène étudié...

Oscillations plasma

- Des phénomènes rapides comme les ondes peuvent séparer les charges pendant une brève période que l'écrantage de Debye n'a pas le temps de résorber.
- Qualitativement,



- Les oscillations plasma sont globales et liées au comportement collectif de l'ensemble des électrons du plasma.
- La fréquence plasma de ces oscillations ne dépend que de la densité électronique, on montrera en TD que

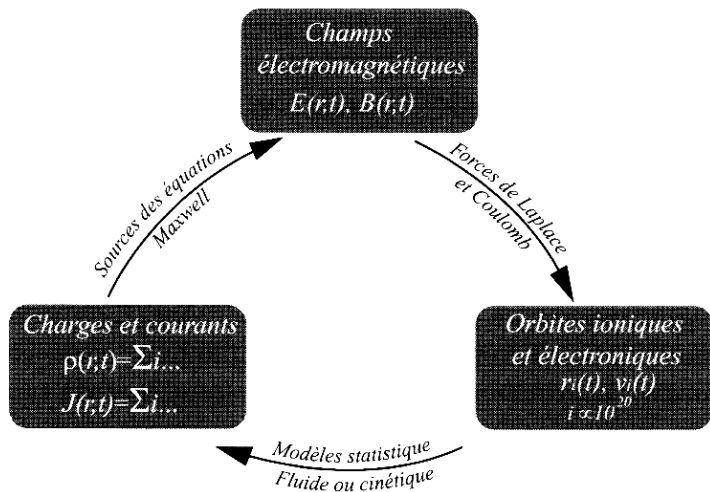
$$f_p = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{n_0 e^2}{m_e \epsilon_0}}$$

Conclusion

Pour des phénomènes plus lents que la fréquence plasma, le plasma a le temps de se réorganiser (les oscillations précédentes sont amorties par des collisions par exemples) et la quasi-neutralité est respectée.

Description mathématique d'un plasma (I)

Couplage électromécanique



Description mathématique d'un plasma : les différentes approches

Particules individuelles	Cinétique	Fluide (MHD)
Mouvement d'une particule chargée dans un champ (E, B) ● mouvement cyclotron ● dérives ● invariants adiabatiques	Chaque espèce est décrite par une fonction de distribution dans l'espace des phases $f_\alpha(\vec{r}, \vec{v}, t)$. ● équation de Vlasov ● moments de $f_\alpha =$ variables macroscopiques ● description complète et self-consistante	Quantités moyennées sur l'espace des vitesses : n_α, $\vec{u}_\alpha$, $P_\alpha \dots$ ● lois de conservation (impulsion, énergie...) ● fermeture adiabatique ● description plus simple que cinétique
Description non self-consistante : (E, B) est imposé aux particules et non créé par elles-mêmes	Difficile à résoudre mathématiquement	Effets fins microscopiques non décrits (interaction onde-particule)
Cours M1	Cours M2R	Cours M1+M2R

Conclusion

Quelques processus fondamentaux en physique des plasmas

- rayonnement : cyclotron, synchrotron, bremsstrahlung...
- accélération/chocs : rayons cosmiques, jets extragalactiques, vents stellaires...
- convection/dynamo : production auto-entretenu de champ magnétique
- ondes/instabilités : éruptions solaires, sous-orages, sursauts gamma...
- ondes/turbulence : chauffage du plasma

Quelle description choisir ?

Le choix d'une description plutôt qu'une autre dépend des objectifs fixés (argument qualitatif, simulation numérique, calcul analytique...).

- L'approche cinétique est indispensable pour tous les processus microscopiques d'interaction onde/particule, d'accélération, de rayonnement...
- L'approche fluide est correcte pour la modélisation à grande échelle des écoulements plasmas, de la dynamo, de la turbulence...