

**Pr P. ANDRE**  
**Laboratoire de Physique de Clermont**

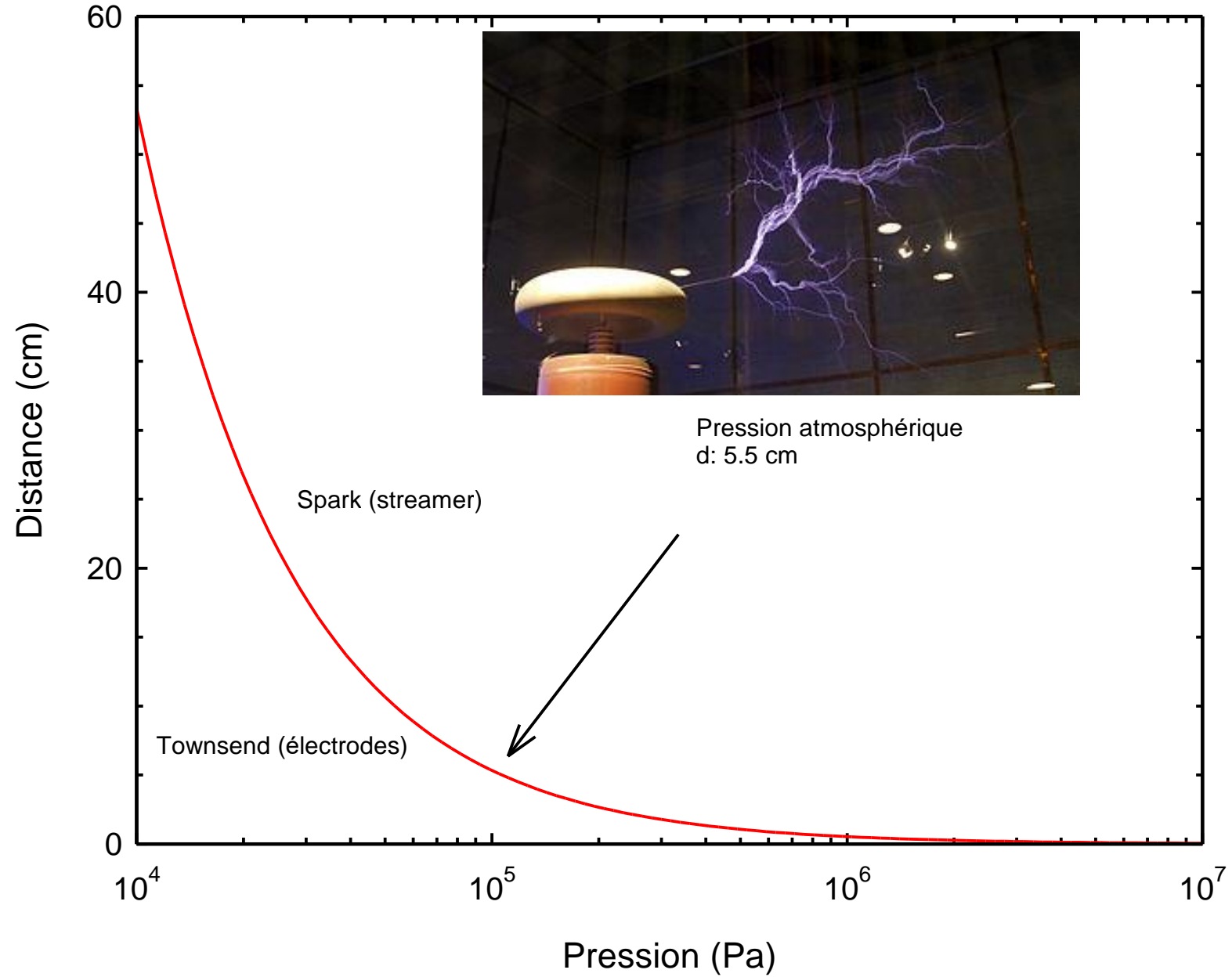
## Rôle de la pression

- lors d'un claquage
- au niveau du contact électrique
- dans un arc électrique

# Rôle de la pression lors d'un Claquage

Champ électrique est supérieur à un champ électrique critique

$$\vec{E} > \overrightarrow{E_{crit}}$$

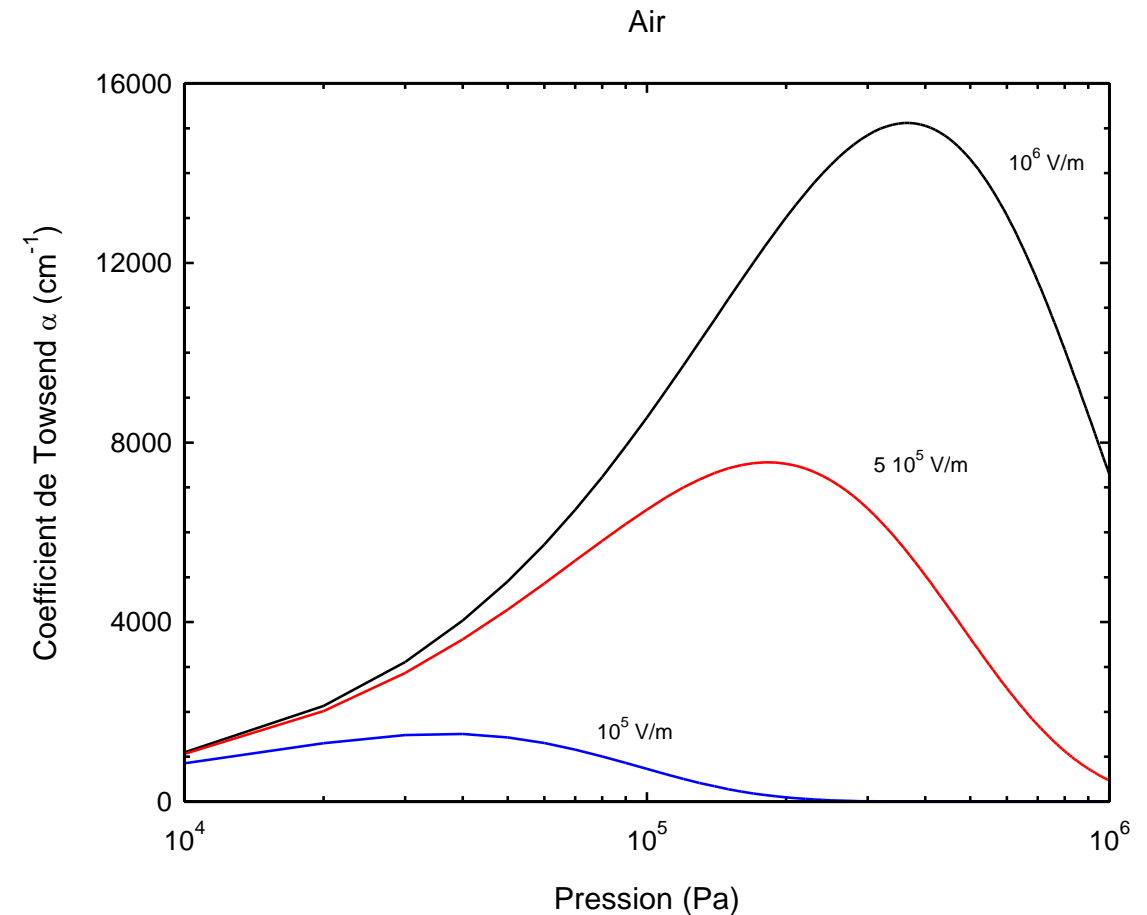


- Mise en place d'un phénomène d'avalanche (0.01 à 100  $\mu s$ )
- Coefficient de Townsend  $\alpha$

$$\frac{dn_e}{dx} = \alpha n_e \text{ qui peut s'écrire } n_e(x) = n_{e0} e^{\alpha x}$$

$n_{e0}$  densité électronique initiale

*$\alpha$  varie en fonction de la pression  
et du champ électrique*



Avalanche  $n_e(x) = n_{e0} e^{\alpha x}$

L'ionisation a crée  $e^{\alpha d} - 1$  ions

Ils vont rencontrer la cathode et produire  $\gamma(e^{\alpha d} - 1)$  électrons secondaires.

$\gamma$  est le second coefficient d'émission de Townsend

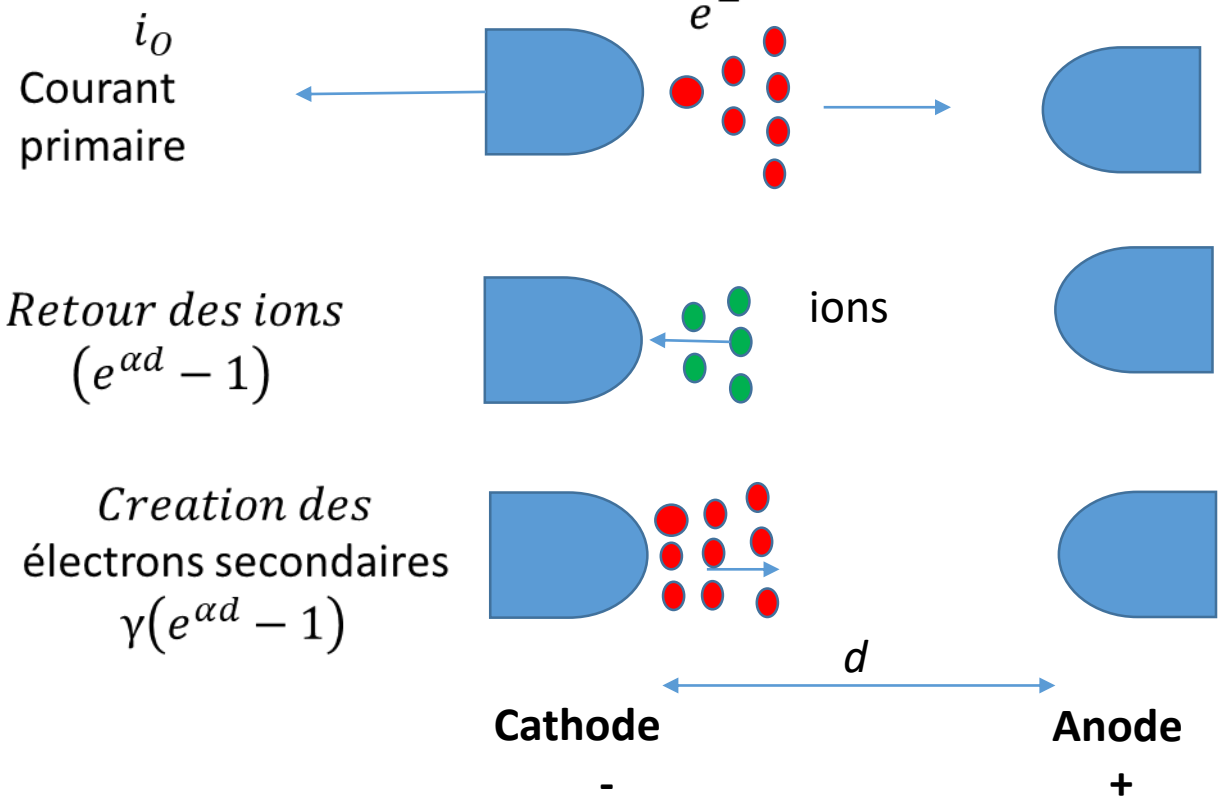
On déduit le courant à la cathode  $i_{cath} = i_0 + i_{cath} \gamma(e^{\alpha d} - 1)$

A l'anode on a le courant  $i_{anode} = i_{cath} e^{\alpha d}$

1902 Formule de Towsend

$$i_{anode} = \frac{i_0 e^{\alpha d}}{1 - \gamma(e^{\alpha d} - 1)}$$

Critère de claquage (simple)



$$i_{anode} = \frac{i_0 e^{\alpha d}}{1 - \gamma(e^{\alpha d} - 1)}$$

Critère de claquage (simple)

$$1 - \gamma(e^{\alpha d} - 1) = 0$$

$\gamma$  dépend de l'électrode (0.01 à 0.1)

$\alpha$  dépend de  $P$  et  $\vec{E}$

**$10^5$  Pa**

**$X=3$  cm**

**$E \sim 30 \cdot 10^5$  V/m**

**$Ddp \sim 90$  kV**

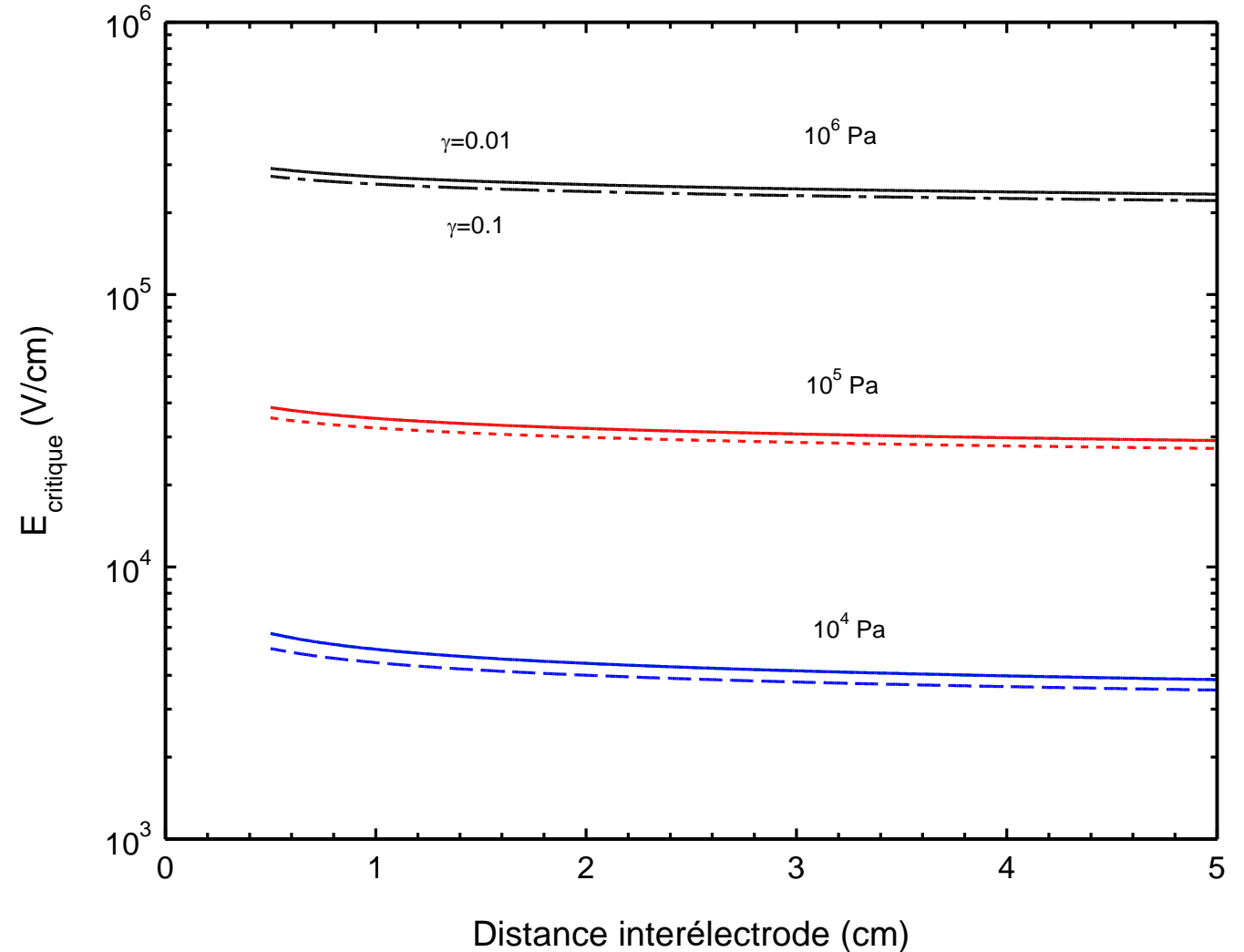
**$10^4$  Pa**

**$X=3$  cm**

**$E \sim 30 \cdot 10^4$  V/m**

**$Ddp \sim 9$  kV**

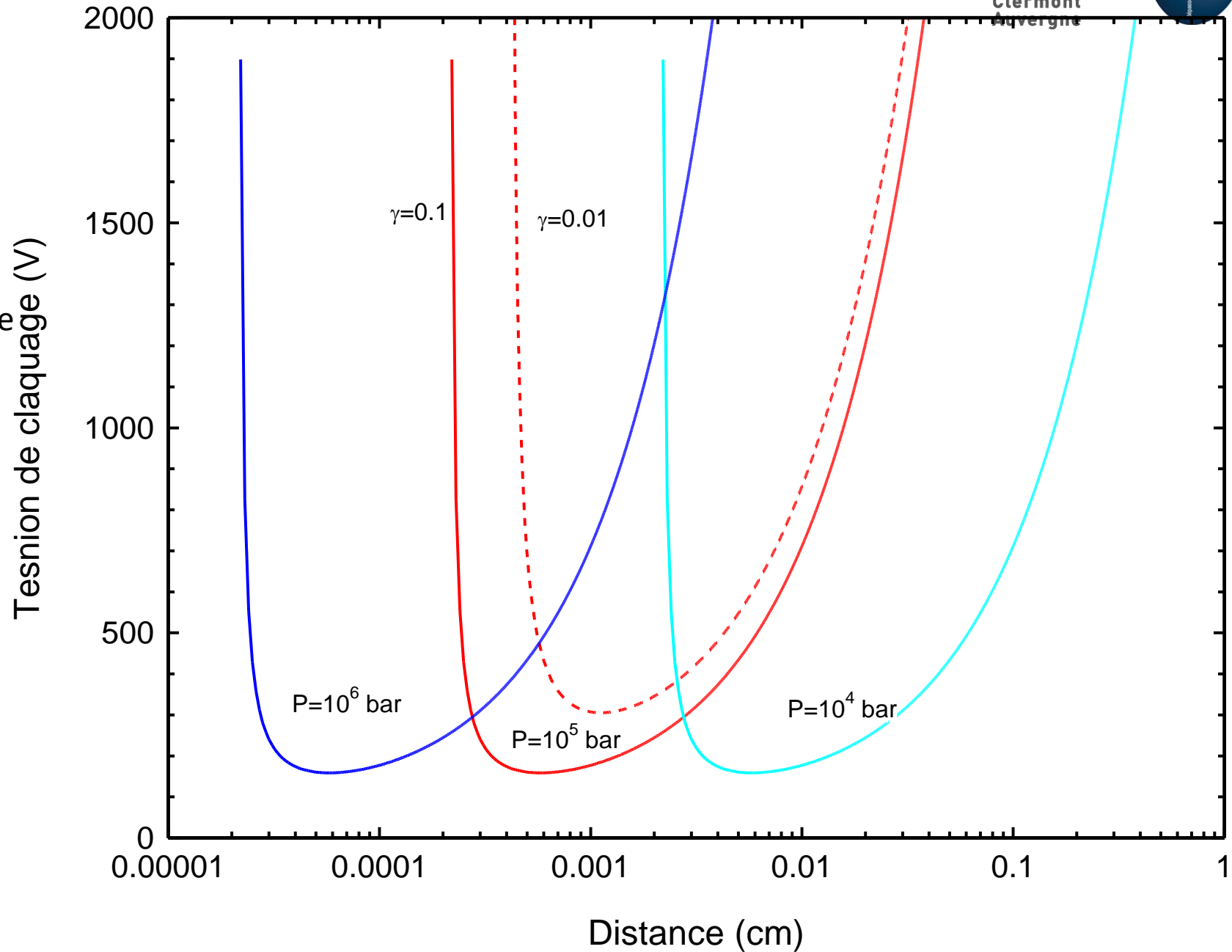
Si simple ?



### Loi de Paschen 1889

- Pression diminue plus le nombre de molécule diminue plus la tension doit être grande.
- Plus la pression est grande plus le libre parcours moyen des électrons est faible plus la tension disruptive est importante
- Influence des électrodes

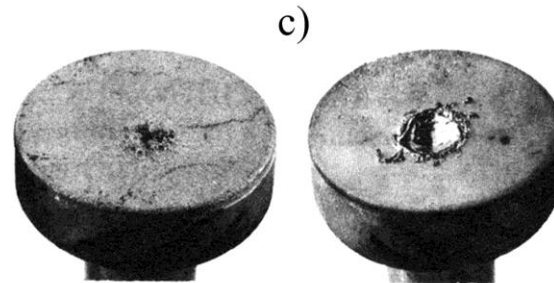
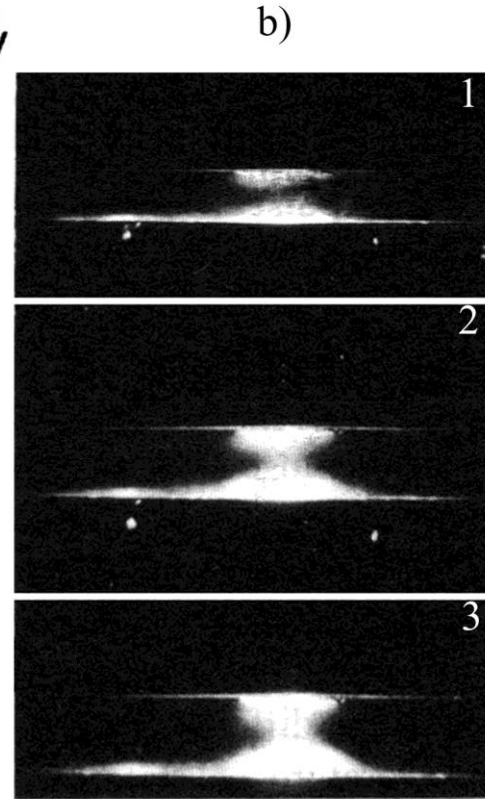
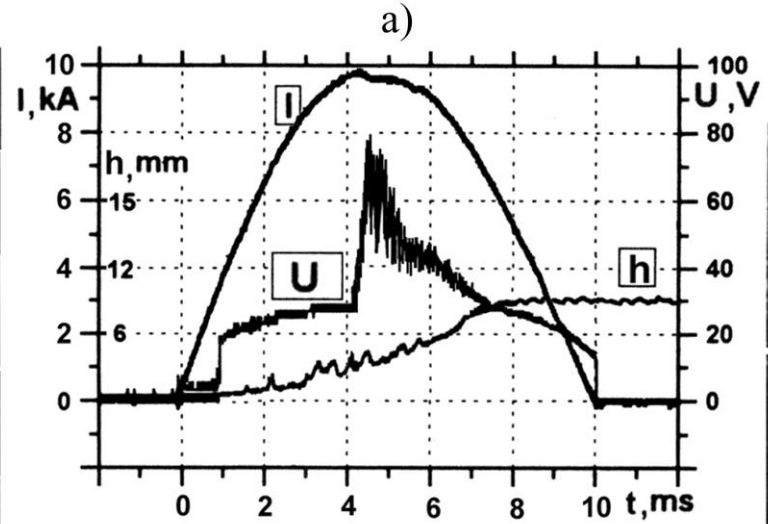
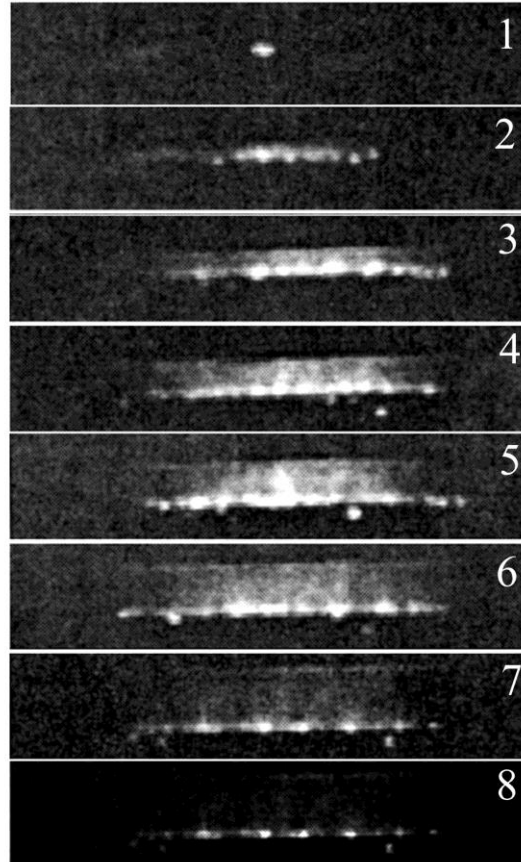
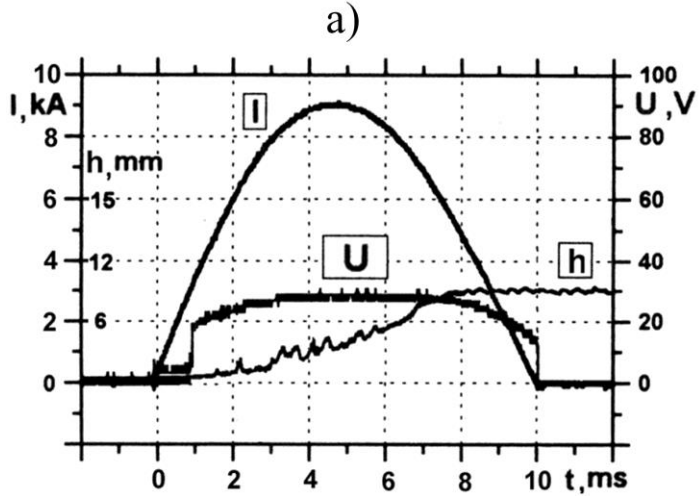
Pression, Distance



# Rôle de la pression au niveau du contact électrique



Densité de courant



S Shkol'nik et al , Ioffe Institute (Russie)

## Evaluation de la pression dans la zone cathodique **Modèle simple**

- Tache cathodique composée de plusieurs spots qui se déplacent aléatoirement

*Surface de la tache  $\pi r^2$*

- Soit  $I$  le courant total la densité de courant est donnée par  $j = \frac{I}{\pi r^2}$
- Le matériau constituant l'électrode est soumis localement à un champ électrique  $E_{local}$  intense. L'émission électronique peut être évaluée par la formule de Murphy et Good (1956):

$$j_e = f(T, E, W_s)$$

- Relation de Poisson et McKeon permet d'écrire dans une zone de charge d'espace:

$$E = \left[ \frac{4}{\epsilon_0} j \left( (1-s) \left( \frac{M_{at}}{2e} \right)^{1/2} - s \left( \frac{M_{electron}}{2e} \right)^{1/2} \right) \right]^{1/2} V_c$$

- Bilan de puissance

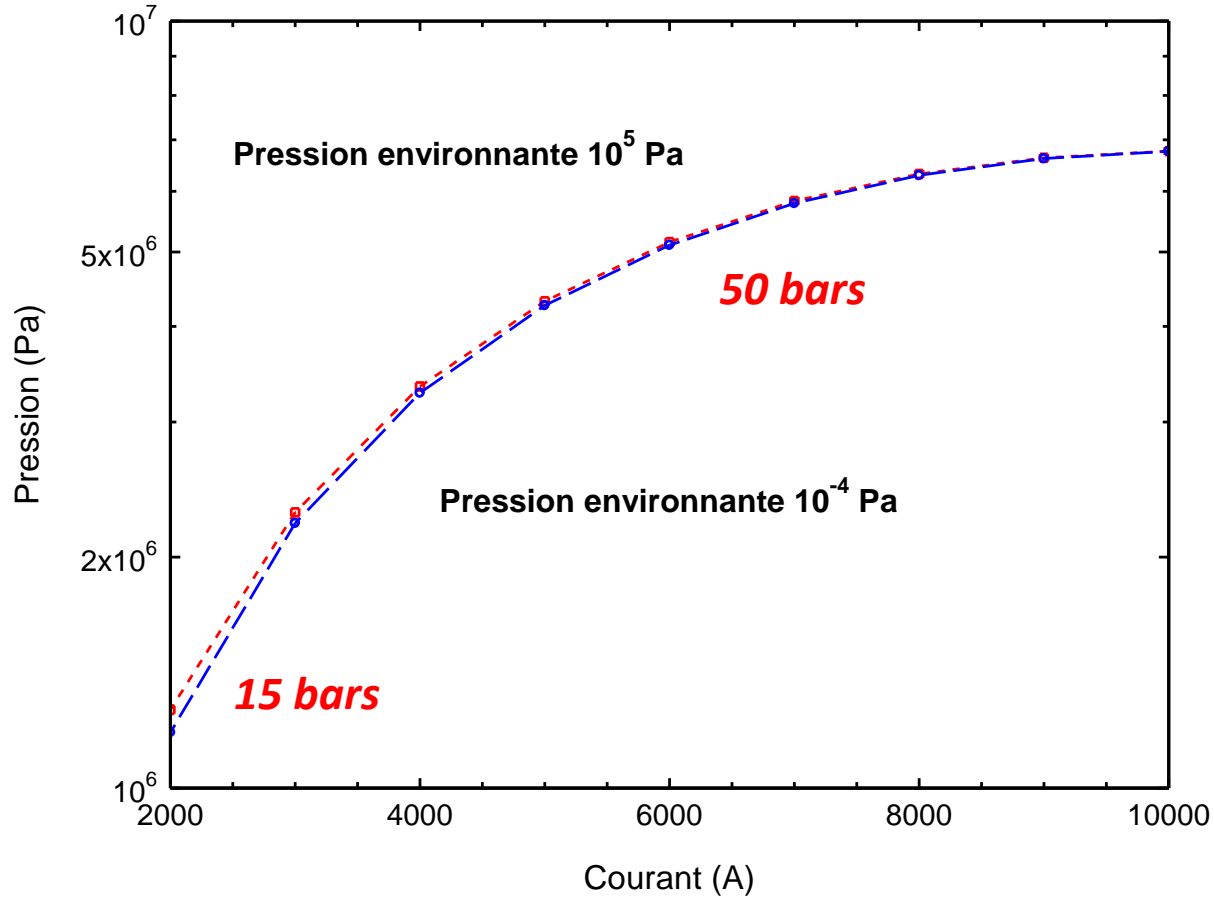
Perte par conduction thermique

Rayonnement corps noir

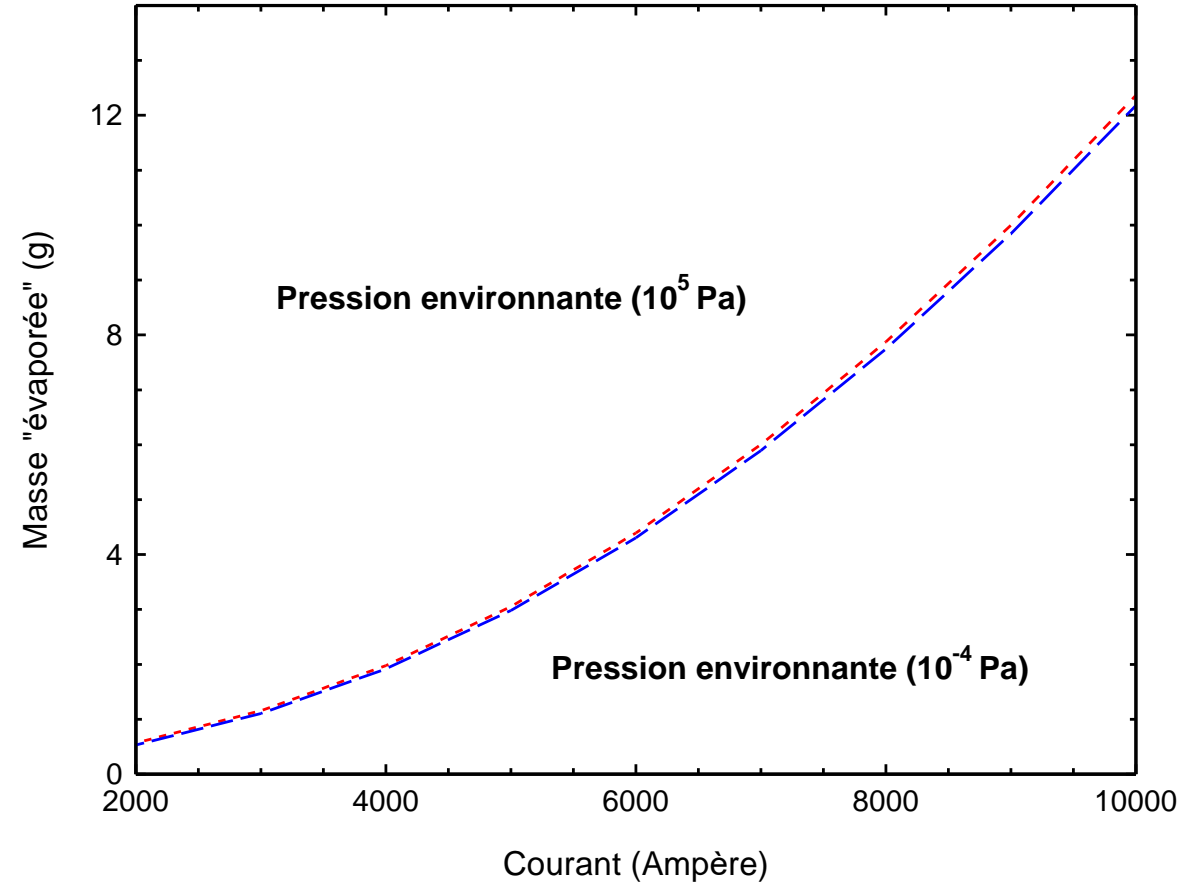
Puissance électrique :  $f(V_i, V_c, V_s)$

- Pression : Magnétique = Pression vapeur saturante

### Pression Zone Cathodique

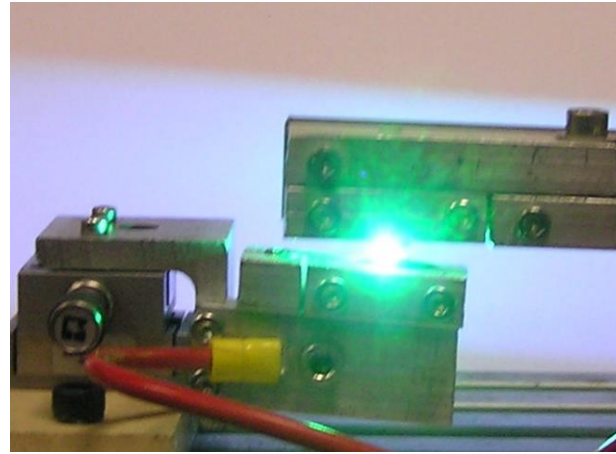
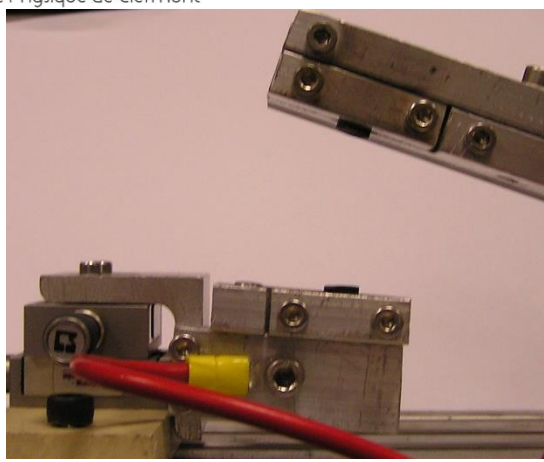


### Masse « évaporée » Cathodique



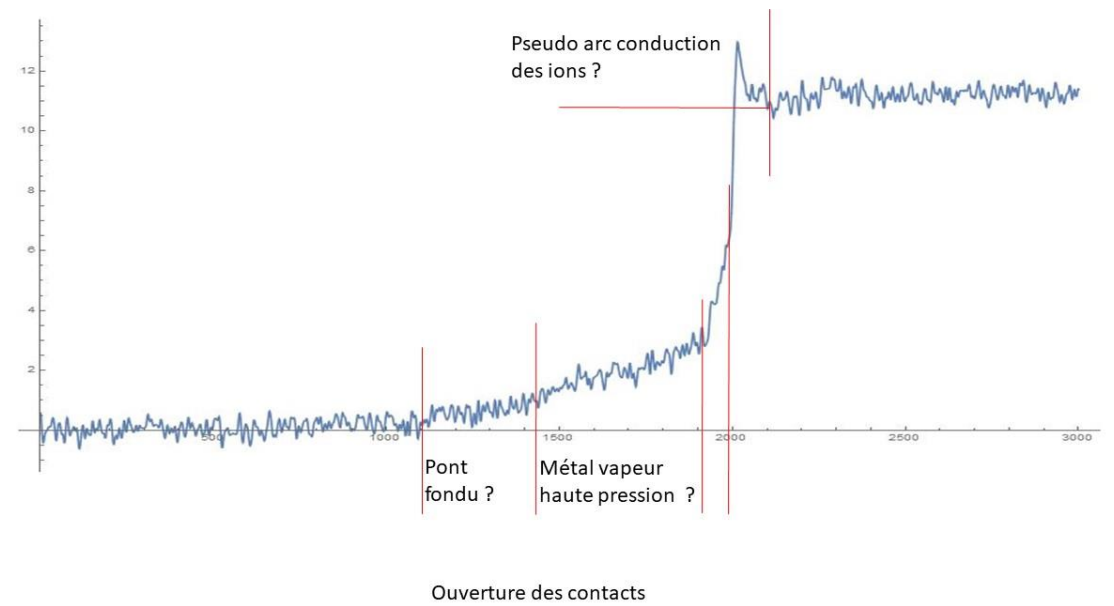
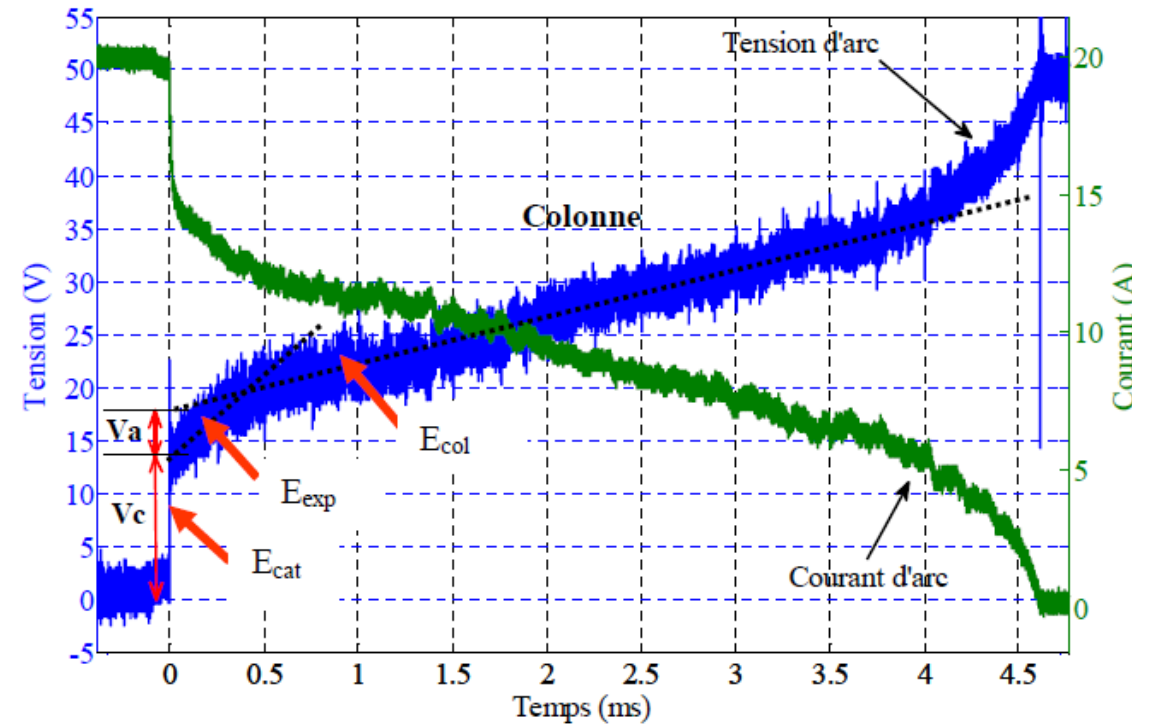
**Ne dépend pas de la pression environnante**

**Pression : Magnétique = Pression vapeur saturante ?**

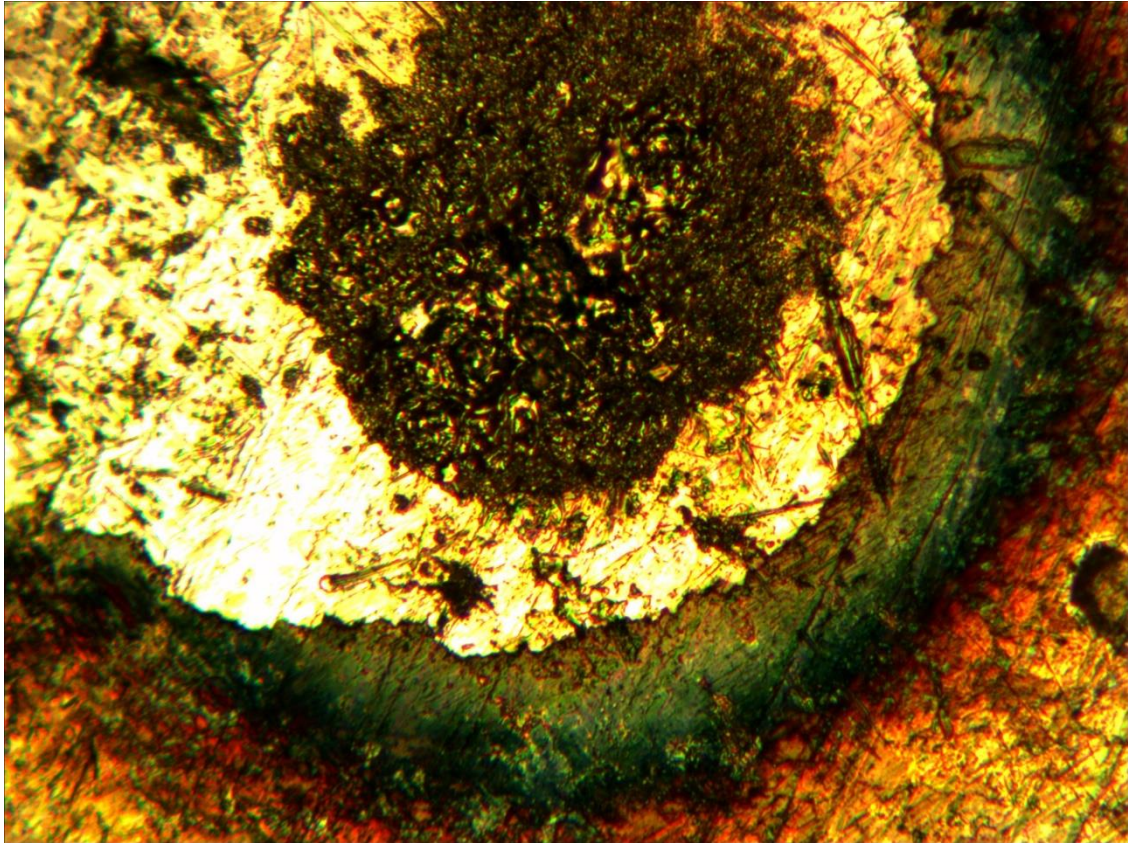


Ouverture de contact électrique

30 A  
48 V

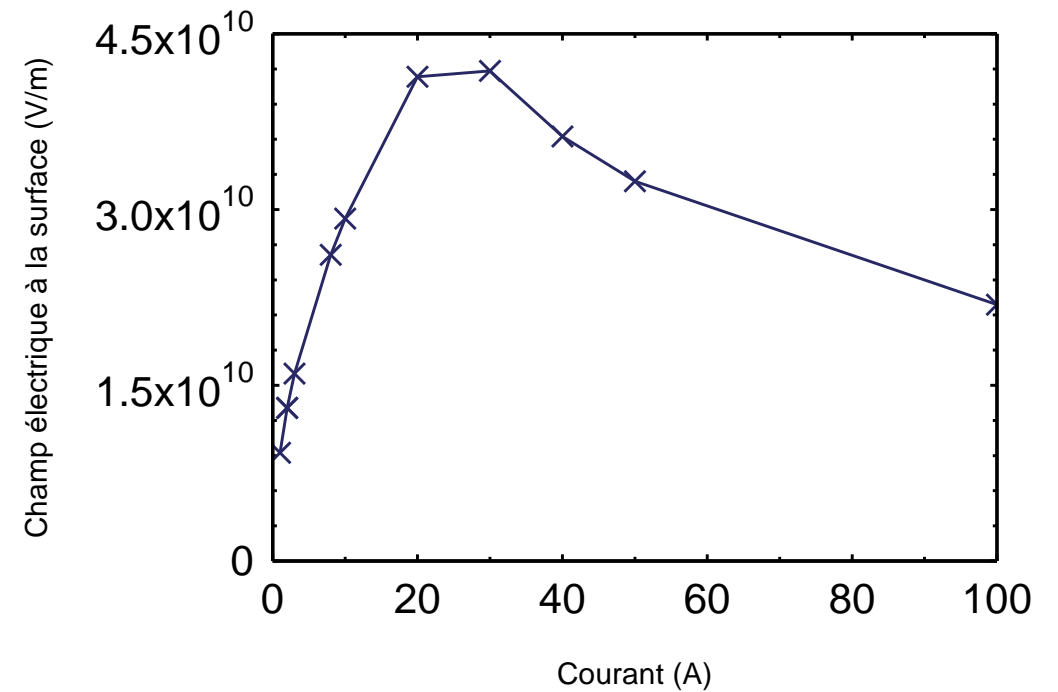


Ouverture des contacts



## Champ électrique à la surface

$$10^8 \frac{V}{m} \text{ à } 10^{10} \frac{V}{m}$$



Rôle du champ électrique  
Nouveau modèle thermodynamique

## Matériau déposé

Energie libre de Gibbs (Enthalpie libre)  $G = U + PV - TS$

Pour un changement élémentaire  $dG = dU + PdV + VdP - TdS - SdT$

Or le premier principe de thermodynamique  $dU = \delta Q + \delta W$  d'où  $dG = \delta Q + VdP - TdS - SdT$

Avec le second principe de la thermodynamique on a  $TdS^{crée} + TdS^{échangée} \geq \delta Q$  soit  $0 \geq \delta Q - TdS$

On obtient  $(dG)_{T,P} \leq 0$

## Matériau déposé

Pour un plasma on a  $G = G_e + G_{pg\_i} + G_{ls}$

- La contribution électronique :

$$G_e = n_e \left[ \mu_e^0 + kT_e \ln \left( \frac{T_e n_e}{T_e n_e + T_h \sum_{i=1; i \neq e}^{N_{pg}} n_i} \right) + kT_e \ln \left( \frac{P}{P_0} \right) \right]$$

- La contribution des particules lourdes :

$$G_{pg\_i} = \sum_{i=1}^{N_{pg}} n_i \left[ \mu_i^0 + kT_h \ln \left( \frac{T_h n_i}{T_e n_e + T_h \sum_{i=1; i \neq e}^{N_{pg}} n_i} \right) + kT_h \ln \left( \frac{P}{P_0} \right) \right]$$

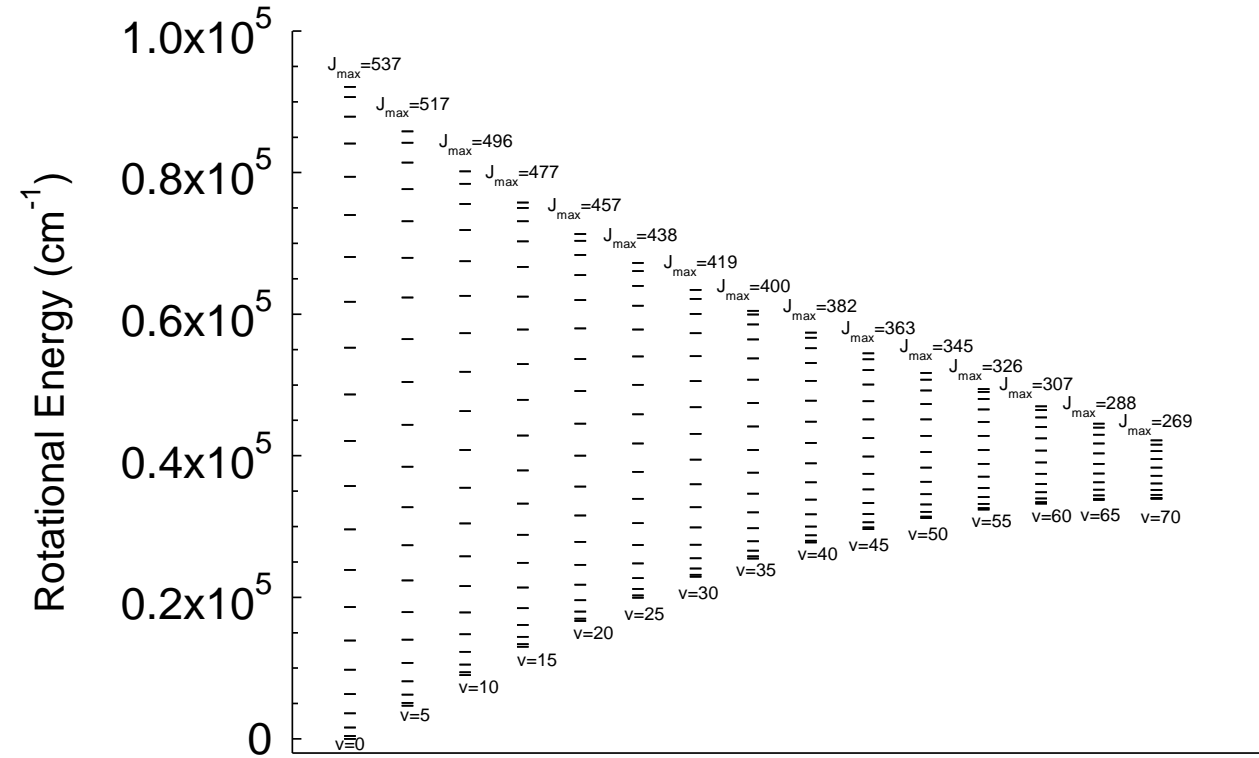
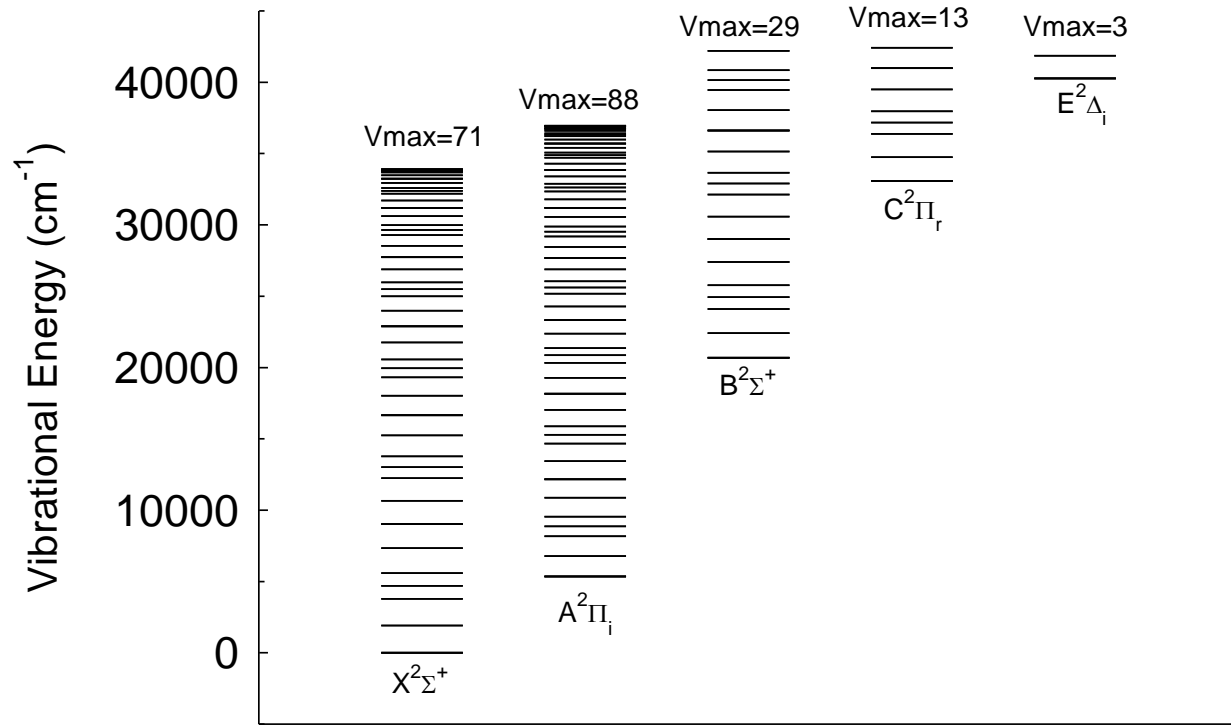
- La contribution des phases condensées :

$$G_{ls} = \sum_{i=1}^{N_{ls}} \mu_i^0$$

## Matériau déposé

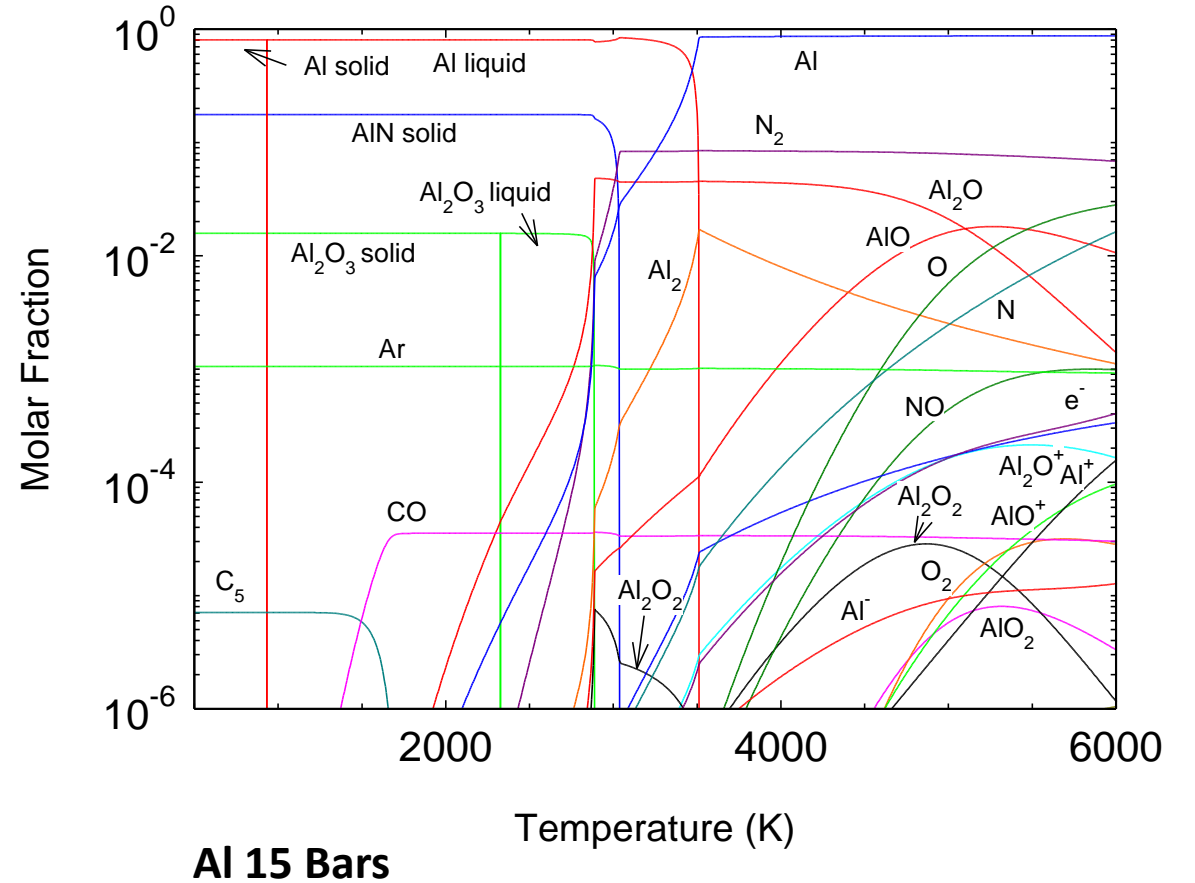
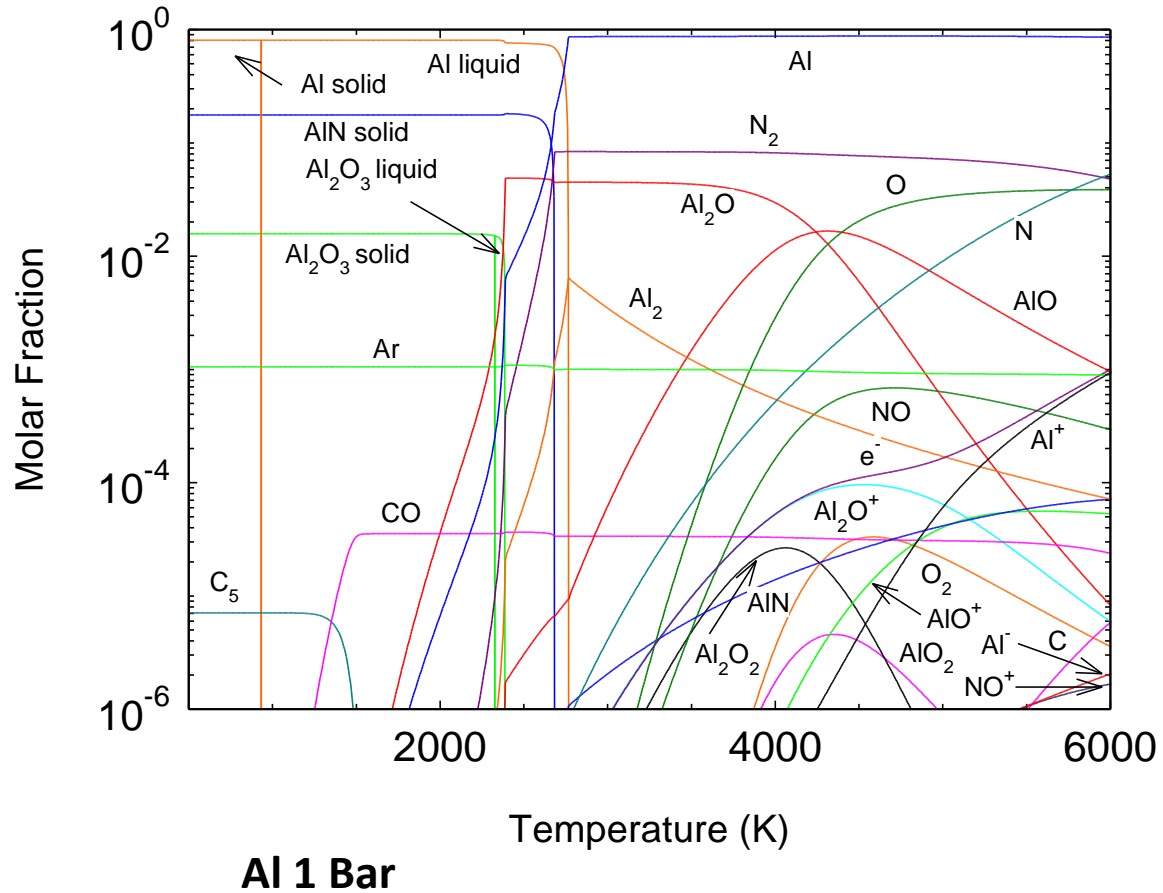
- Air sec (US Standard): N<sub>2</sub> 78.084 %; O<sub>2</sub> 20.9476 % ; Ar 0.934 % ; CO<sub>2</sub> 0.0314 % (pourcentage molaire)
  - Oxide d'Aluminium Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> en phase solide nous ne distinguons pas les phases (α, δ, γ...),
  - Oxide d'Aluminium Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> en phase liquide,
  - Nitrure d'aluminium AlN
  - Aluminium en phase solide et liquide
- 
- 13 espèces chimiques monoatomiques: Al, Al<sup>-</sup>, Al<sup>+</sup>, Ar, Ar<sup>+</sup>, C, C<sup>-</sup>, C<sup>+</sup>, N, N<sup>+</sup>, O, O<sup>-</sup>, and O<sup>+</sup>,
  - 23 espèces chimiques diatomiques Al<sub>2</sub>, AlN, AlO, AlO<sup>-</sup>, AlO<sup>+</sup>, C<sub>2</sub>, C<sub>2</sub><sup>-</sup>, C<sub>2</sub><sup>+</sup>, CN, CN<sup>-</sup>, CN<sup>+</sup>, CO, CO<sup>-</sup>, CO<sup>+</sup>, N<sub>2</sub>, N<sub>2</sub><sup>-</sup>, N<sub>2</sub><sup>+</sup>, NO, NO<sup>-</sup>, NO<sup>+</sup>, O<sub>2</sub>, O<sub>2</sub><sup>-</sup>, O<sub>2</sub><sup>+</sup>,
  - 31 espèces chimiques polyatomiques Al<sub>2</sub>O, Al<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>2</sub><sup>+</sup>, Al<sub>2</sub>O<sup>+</sup>, AlO<sub>2</sub>, AlO<sub>2</sub><sup>-</sup>, C<sub>2</sub>N, C<sub>2</sub>N<sub>2</sub>, C<sub>2</sub>O, C<sub>3</sub>, C<sub>3</sub>O<sub>2</sub>, C<sub>4</sub>, C<sub>4</sub>N<sub>2</sub>, C<sub>5</sub>, CNN, CNO, CO<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub><sup>-</sup>, N<sub>2</sub>O, N<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, N<sub>2</sub>O<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, N<sub>2</sub>O<sup>+</sup>, N<sub>3</sub>, NCN, NO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub><sup>-</sup>, NO<sub>3</sub>, O<sub>3</sub>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, CO<sub>2</sub><sup>+</sup>
  - électrons





Enthalpie de formation connue à 5% à 10%

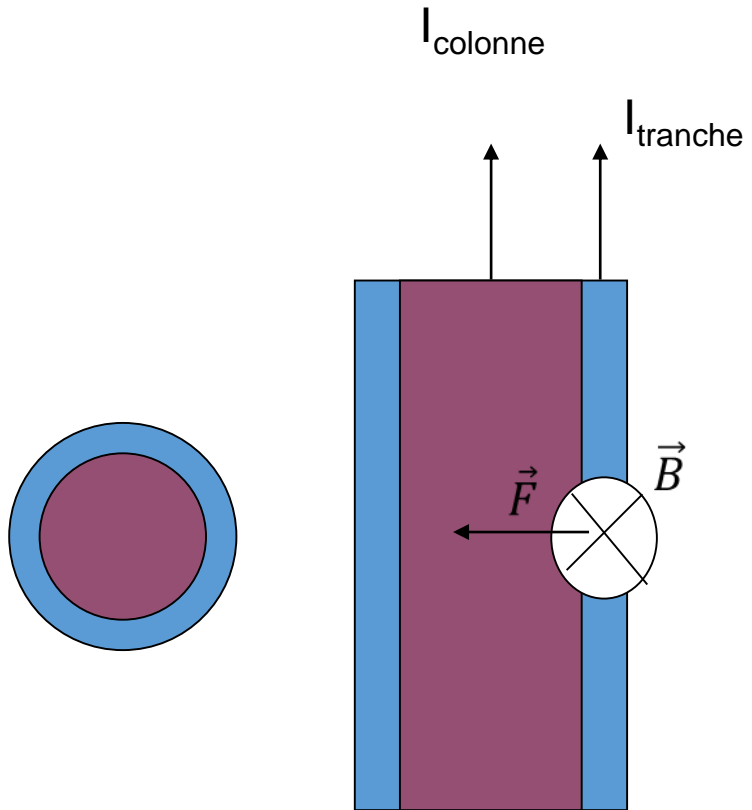
## Matériau déposé Pression de vaporisation ?



Température de vaporisation augmente si la pression augmente

# Rôle de la pression dans un arc électrique





Le courant de la colonne => B (Laplace)

$$\vec{F} = I \vec{dl} \wedge \vec{B}$$

$$\overrightarrow{grad}P = f(\vec{j} \wedge \vec{B})$$

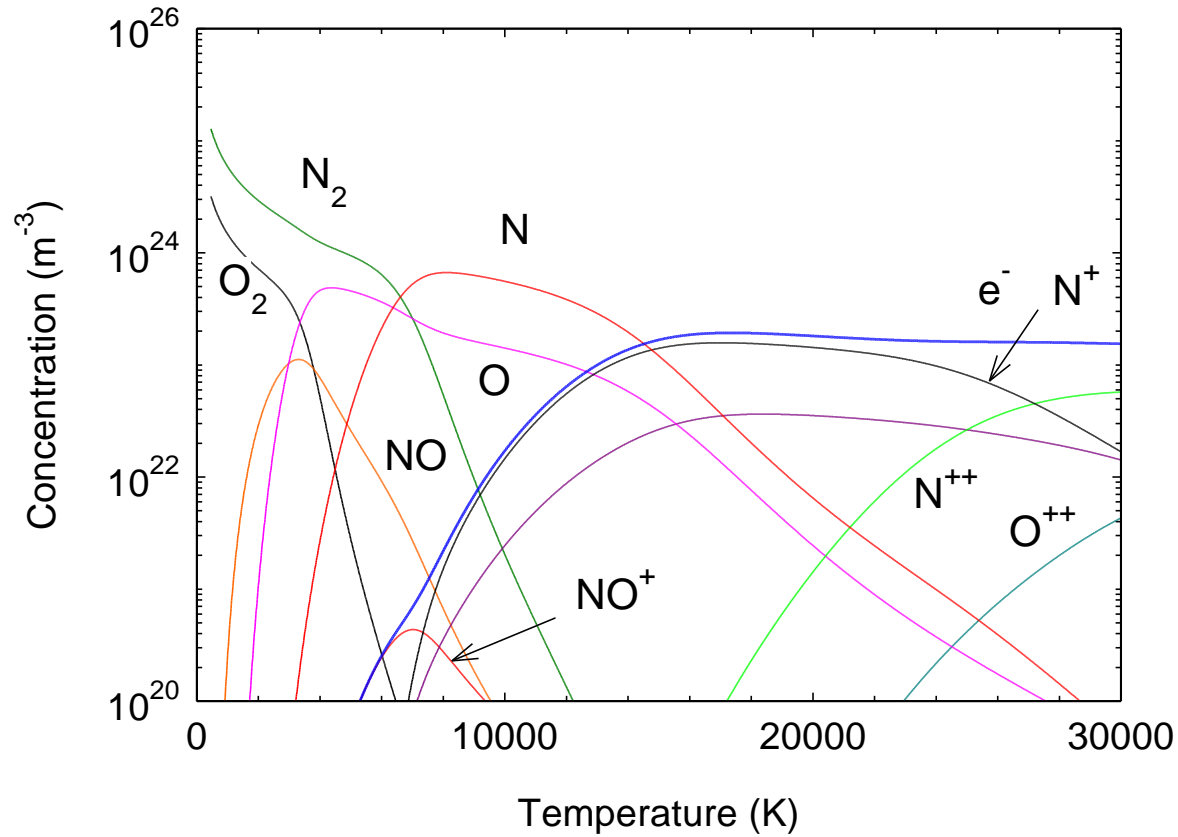
Surpression (rayon 0.5 mm):

**100 A ~ 13 Pa.**

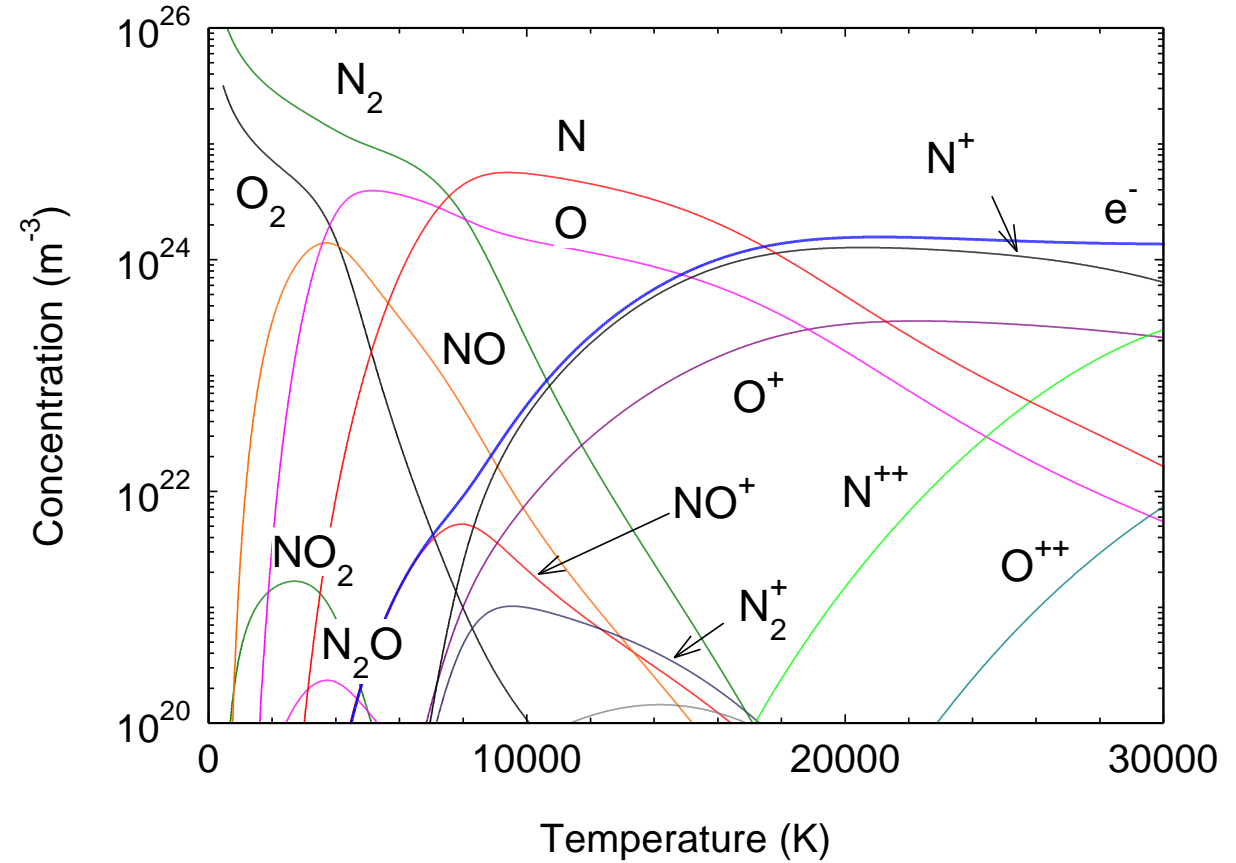
**1000 A ~ 1300 Pa.**

**100 000 A ~ 130 000 Pa.**

Air; P=1 atm



Air; P=10 atm



Type (neutre-neutre, neutre-ions, ions-ions) de collision varie avec la temperature

Réactions chimiques se décalent vers les hautes températures

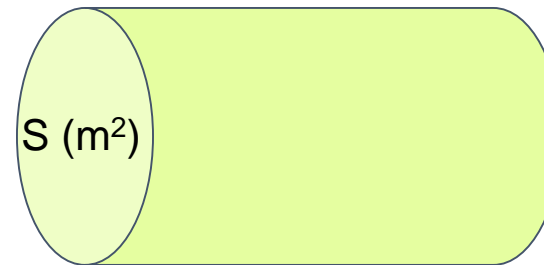
Concentration électronique

Conductivité Electrique  $\sigma$  ( $\Omega^{-1} \cdot m^{-1}$ ):

$$\vec{j} = -\sigma \overrightarrow{grad}V$$

$$U_a \approx \frac{I}{\sigma} \frac{d}{S}$$

$I$  (A)



$U_a$  (V)

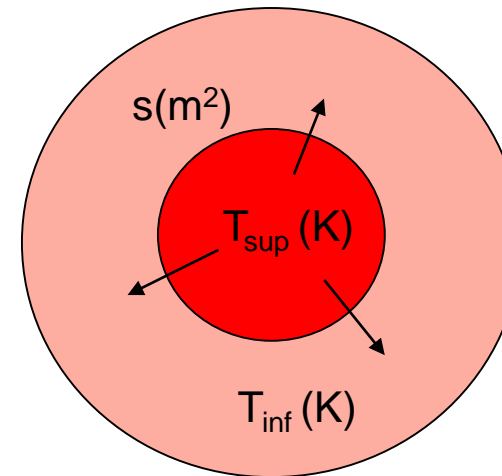
Modèle canal: évaluation de la température

## Conductivité thermique $\lambda$ (W.m/K)

$$\vec{q} = -\lambda * s * \overrightarrow{\text{grad } T}$$

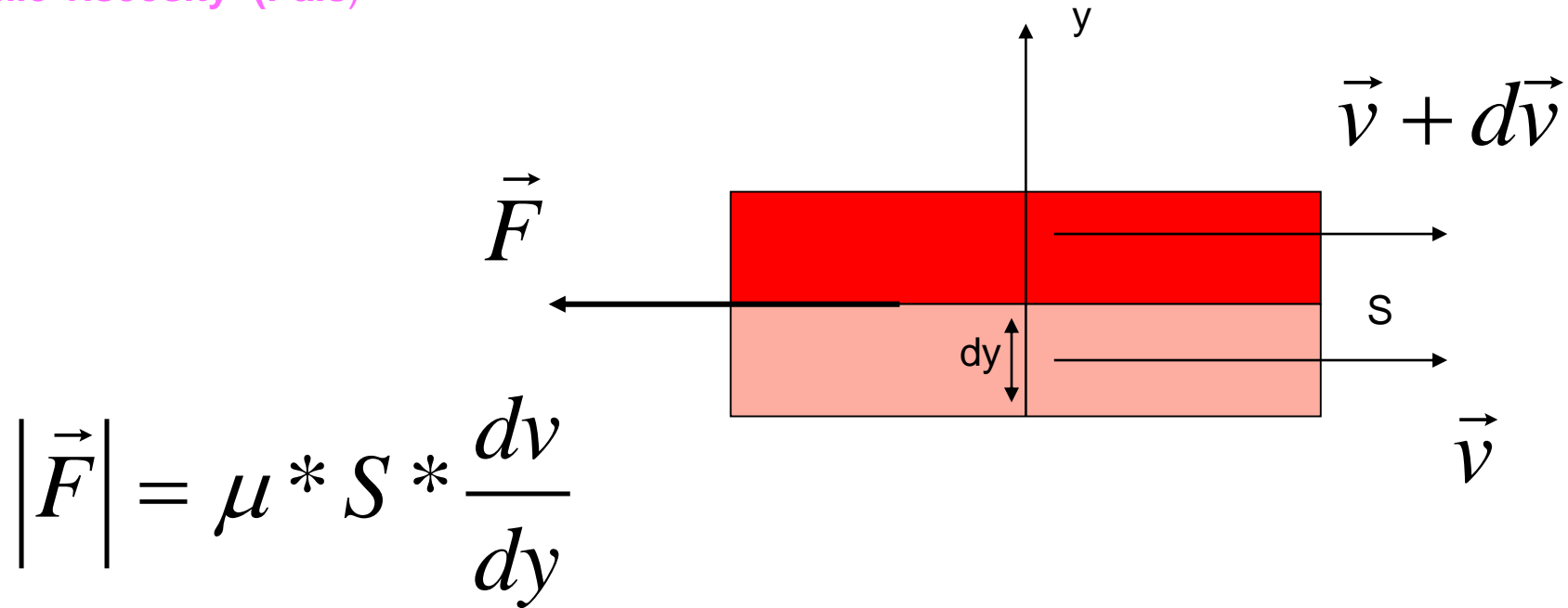
$$[\text{J/s}] = [\text{W/m/K}] [\text{m}^2] [\text{K/m}]$$

Plus  $\lambda$  est grand plus on refroidit





Dynamic viscosity (Pa.s)



$$[N] = [Pa.s] * [m^2] * [s^{-1}]$$

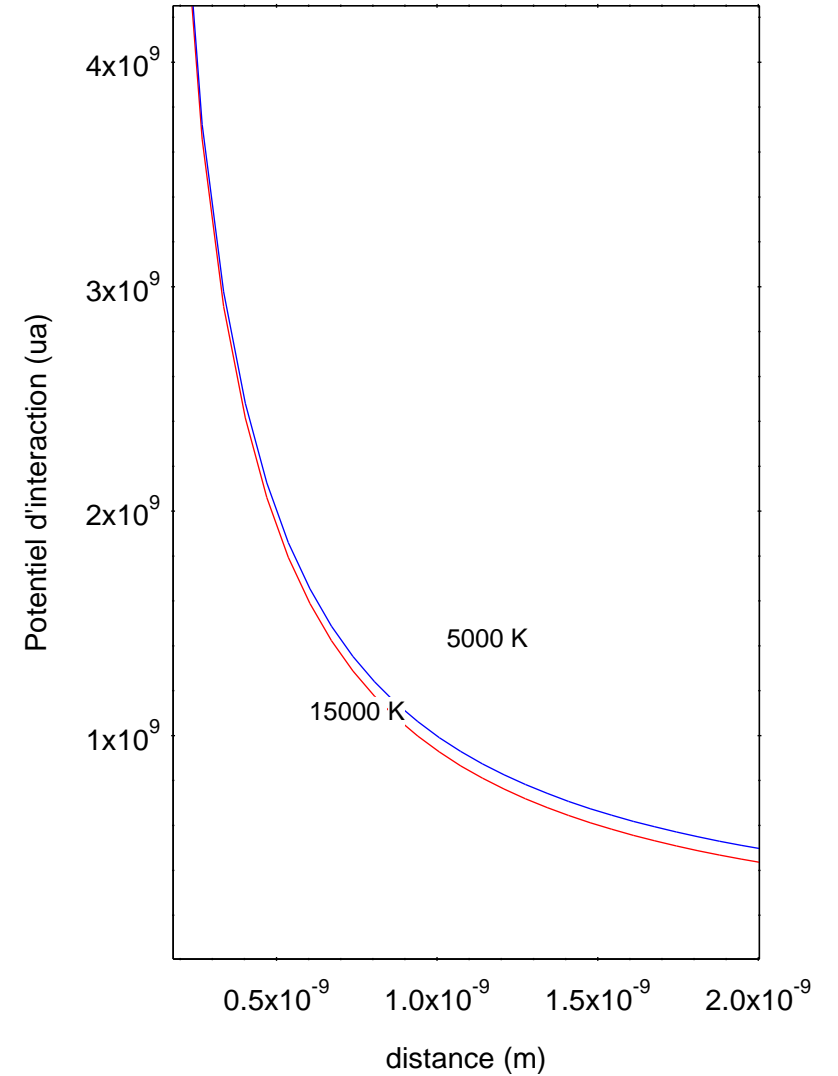
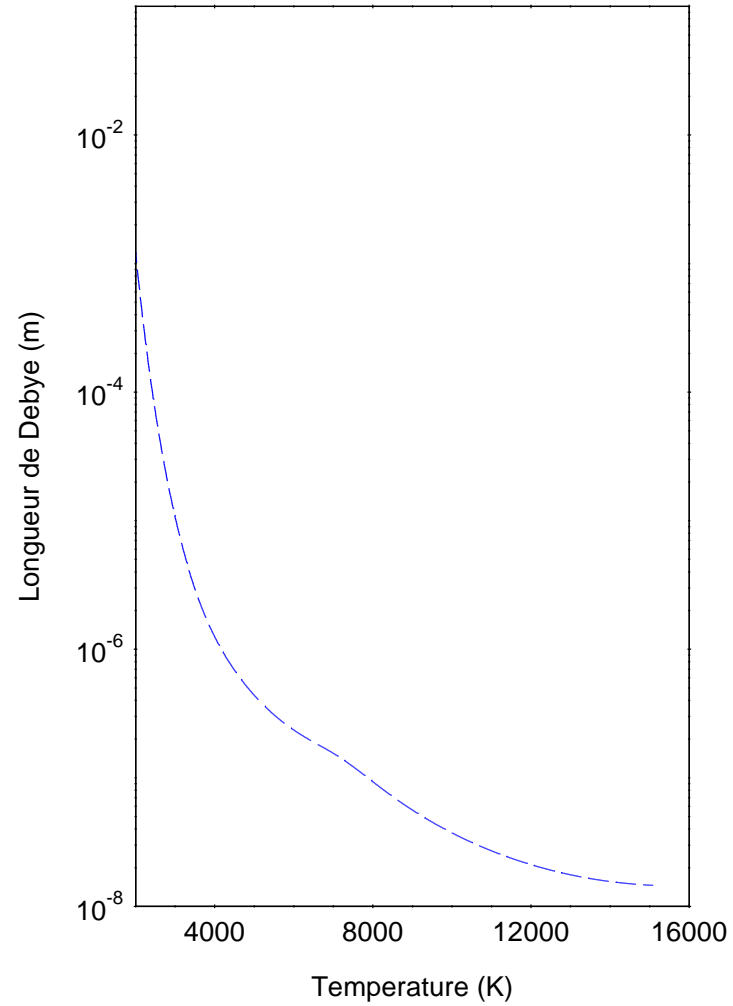
Plus la viscosité est importante plus le plasma reste sur place  
Si l'arc reste à la même place la paroi fond

## Calcul des coefficients de transport

- La composition chimique
- Les potentiels d'interaction (collision binaire)
  - Chargé-Chargé
  - Neutre – Neutre
  - Neutre-Chargé
  - Electron-neutre

## Chargé-Chargé :

$$V(r) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_i q_j}{r} e^{-r/\lambda_D}$$



### Hulbert Hirschfelder potential

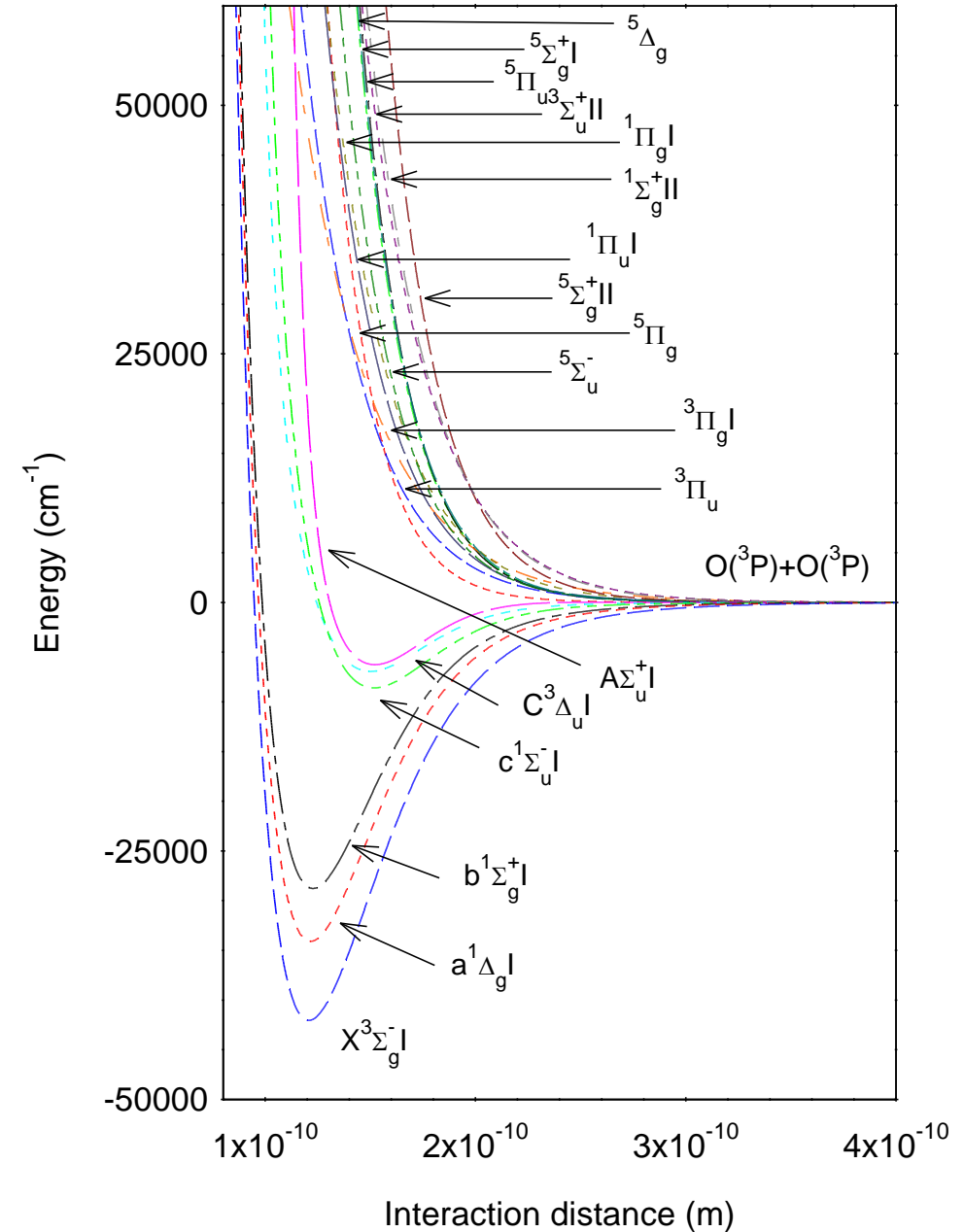
$$V_{HH}(r^*) = \varepsilon \left\{ e^{-2\alpha \left(\frac{r^*}{d}-1\right)} - 2 e^{-\alpha \left(\frac{r^*}{d}-1\right)} + \beta \left(\frac{r^*}{d}-1\right)^3 \left(1 + \gamma \left(\frac{r^*}{d}-1\right)\right) e^{-2\alpha \left(\frac{r^*}{d}-1\right)} \right\}$$

### Lennard Jones Potential

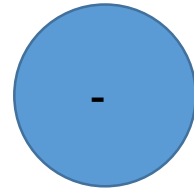
$$V(r_{ij}) = 4\varepsilon_{ij} \left[ \left(\frac{\sigma_{ij}}{r_{ij}}\right)^{12} - \left(\frac{\sigma_{ij}}{r_{ij}}\right)^6 \right]$$

### Repulsif potential

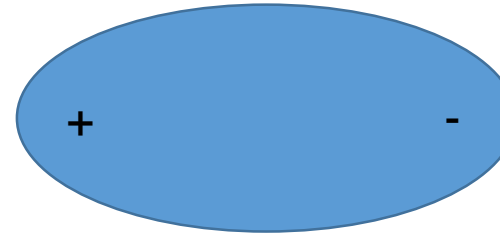
$$V_{rep}(r) = \alpha e^{-\frac{r}{\beta}}$$



## Neutre-chargé



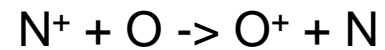
On forme un dipôle



$$V(r) = \frac{-\alpha Z e^2}{4\pi \epsilon_0 r^4}$$

$\alpha$  Coefficient de polarisation

## Transfert de charge



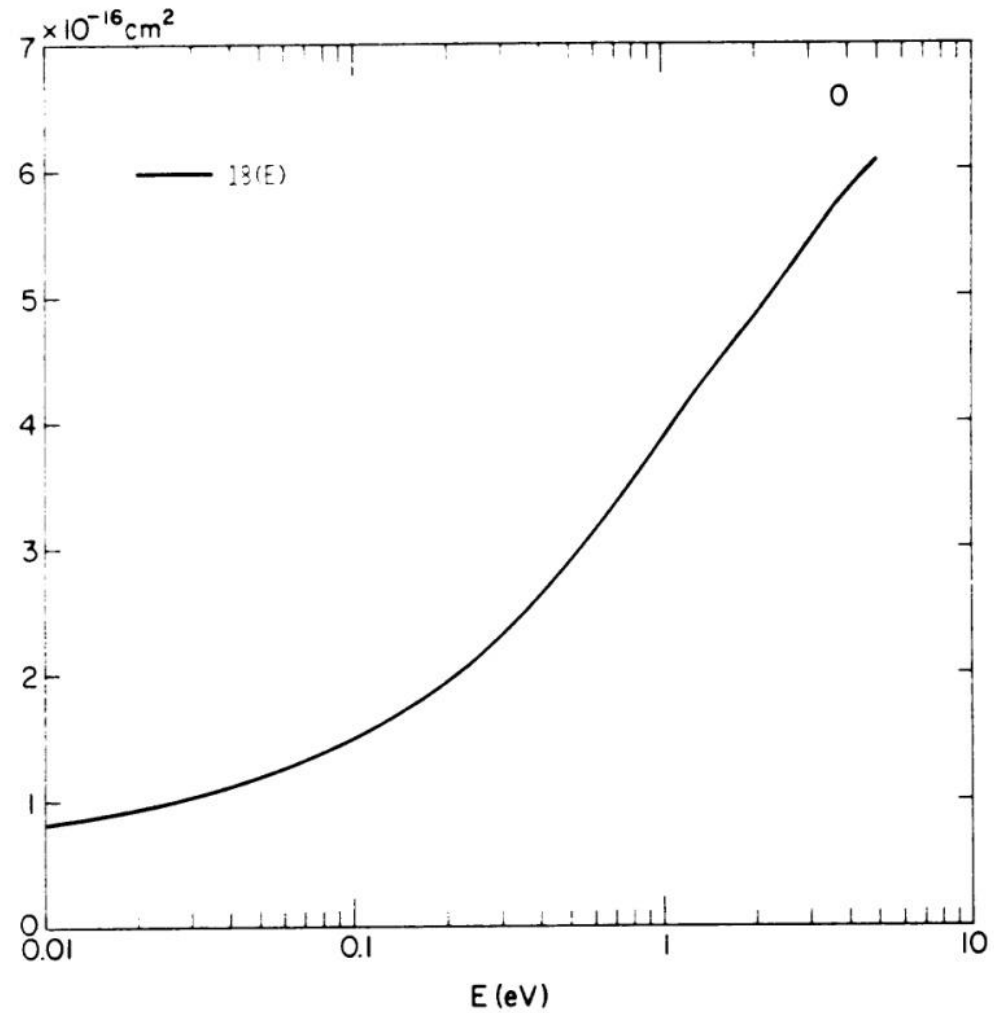
Collision inélastique

Transfert de charge : validité des paramètres ?

## Electron-neutre

Section efficace du transfert de  
quantité de mouvement

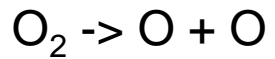
Itikawa 1974



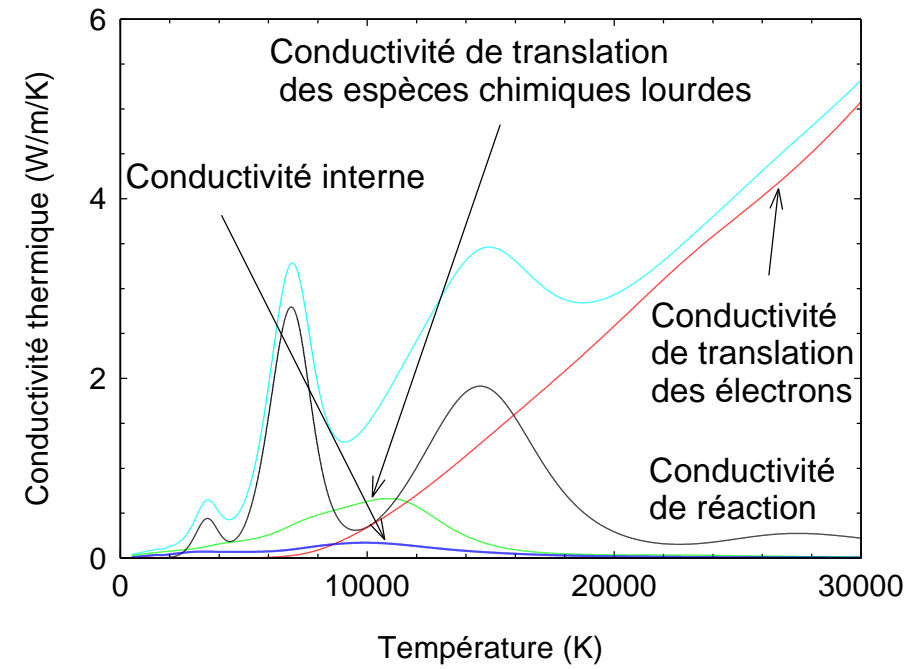
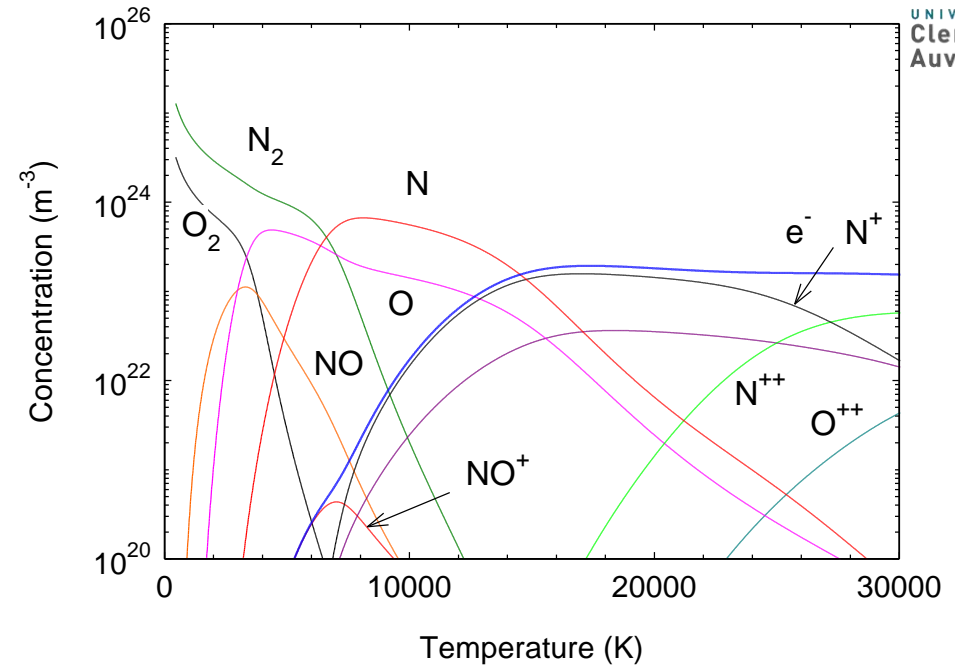
## Conductibilité Thermique

Conductibilité thermique des e-  
Conductibilité thermique des lourds  
Conductibilité thermique de réaction  
Conductibilité internes

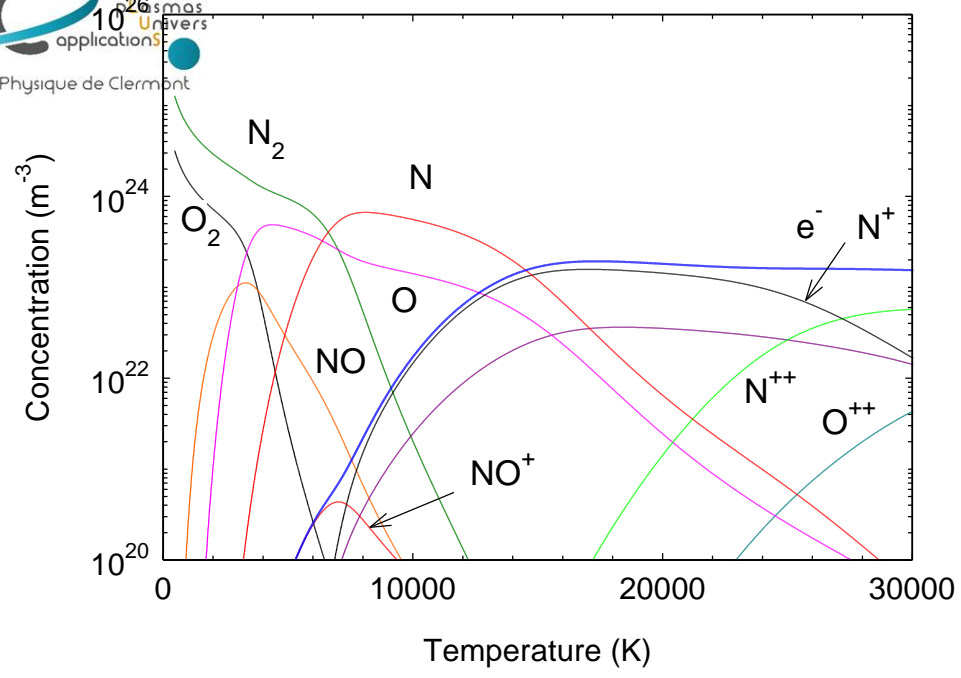
Pics= réactions chimiques



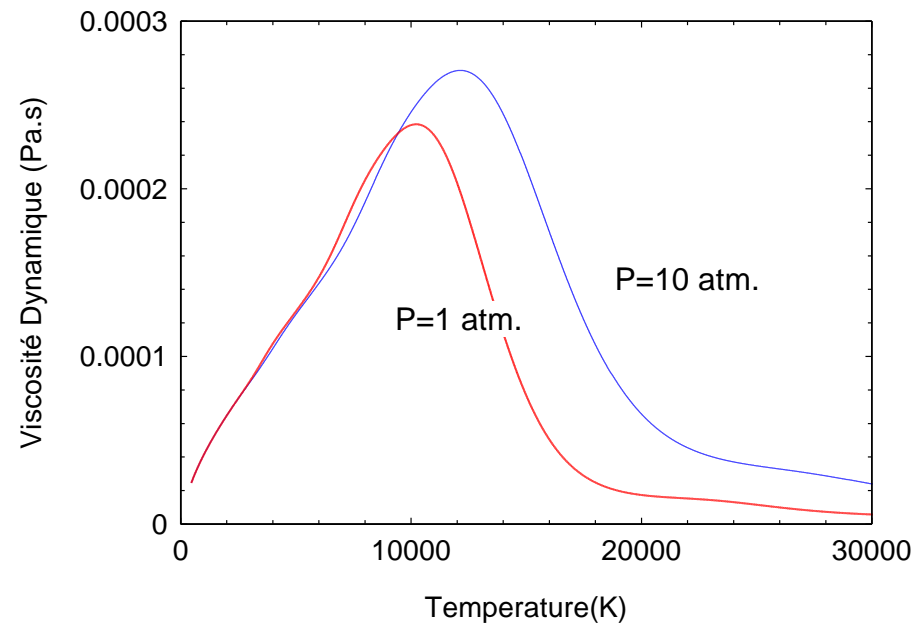
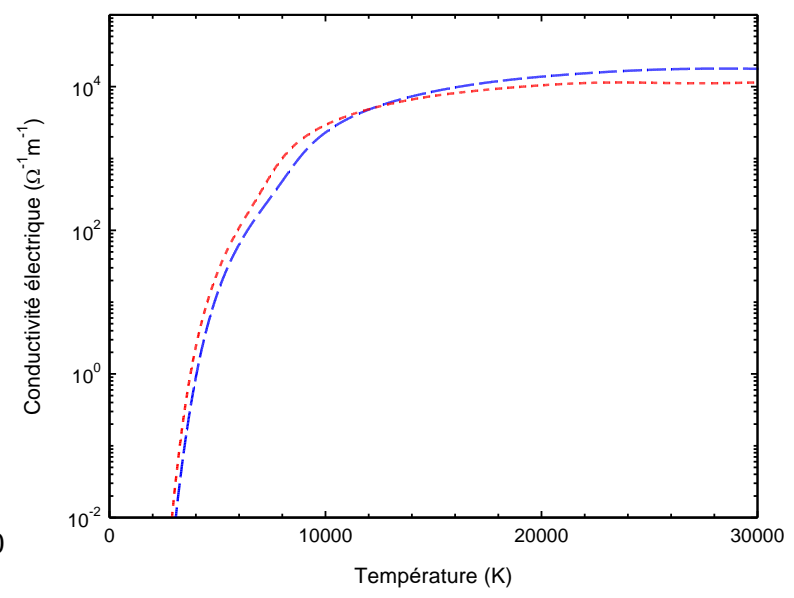
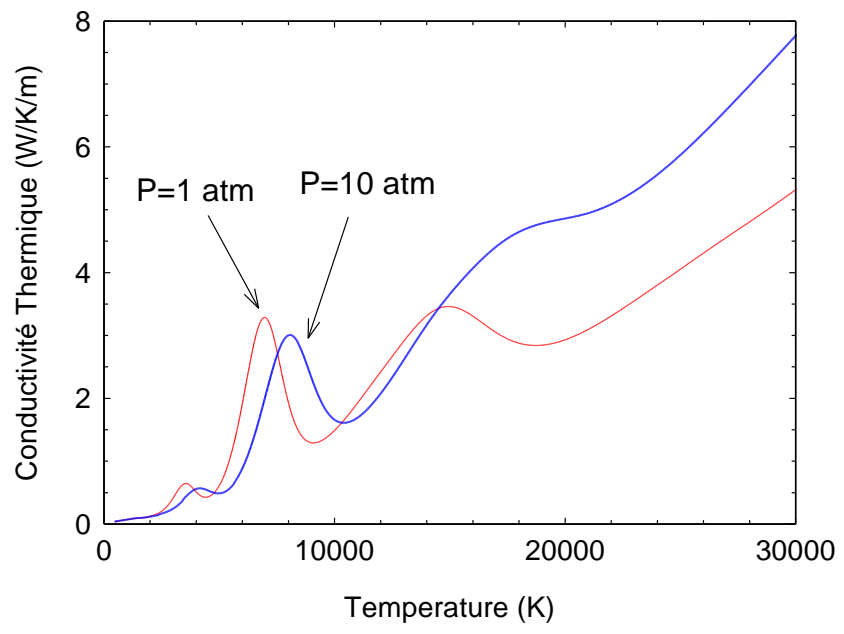
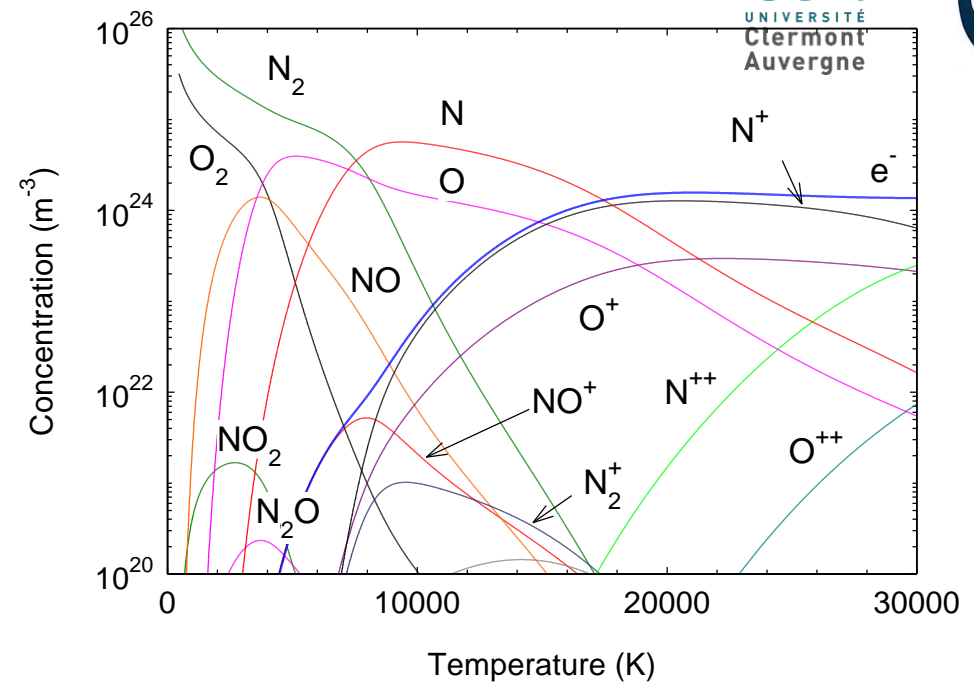
Ionisation



Air; P=1 atm



Air; P=10 atm





## Cinétique temps de relaxation chimique (N, O)

REACTION 1:  $O_2 + O_2 \rightarrow O_2 + 2 O$

REACTION 2:  $O_2 + NO \rightarrow O + O + NO$

REACTION 3:  $O_2 + O \rightarrow O + O + O$

REACTION 4:  $O_2 + N \rightarrow O + O + N$

REACTION 5:  $NO + O_2 \rightarrow N + O + O_2$

REACTION 6:  $NO + NO \rightarrow N + O + NO$

...

REACTION 36:  $N + NO \rightarrow N_2O$

REACTION 37:  $NO + N_2O \rightarrow N_2 + NO_2$

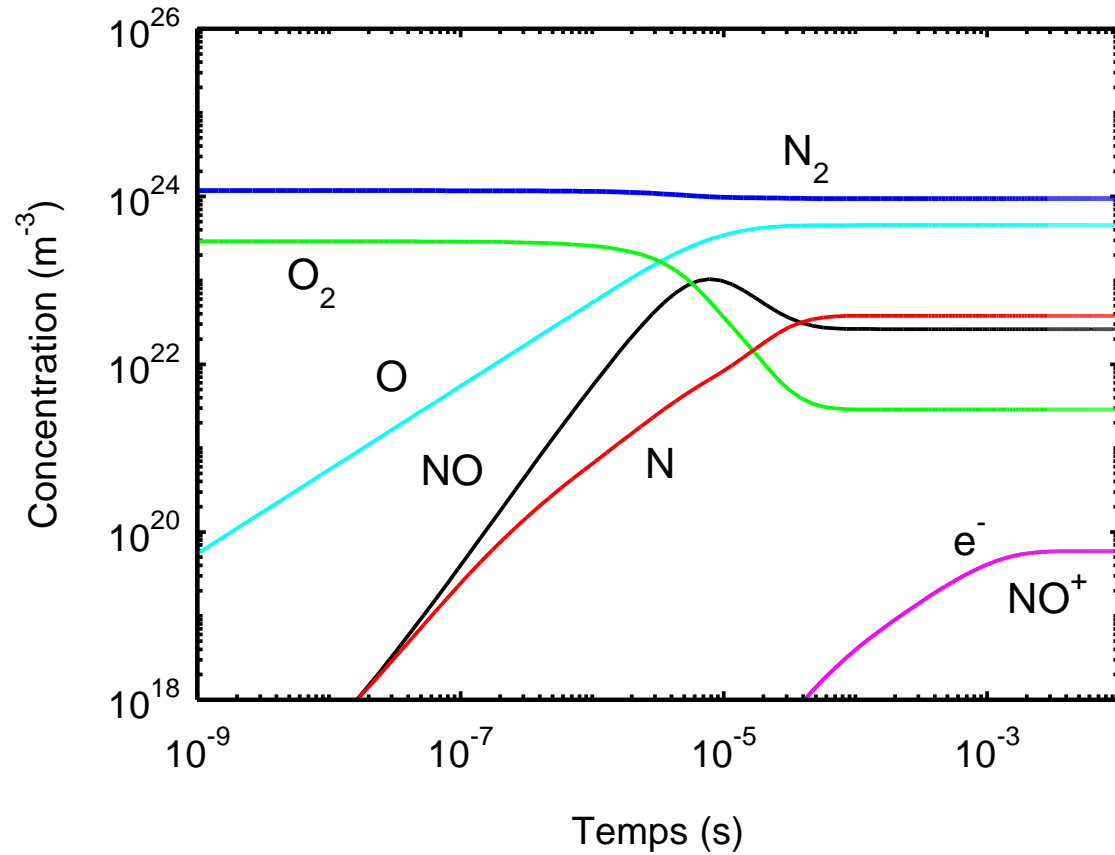
**avancement de la réaction**

$$\frac{d}{dt} \xi_l(t) = k_d^l \prod_i n_i^{v_{di}^l}(t) - k_r^l \prod_i n_i^{v_{ri}^l}(t)$$

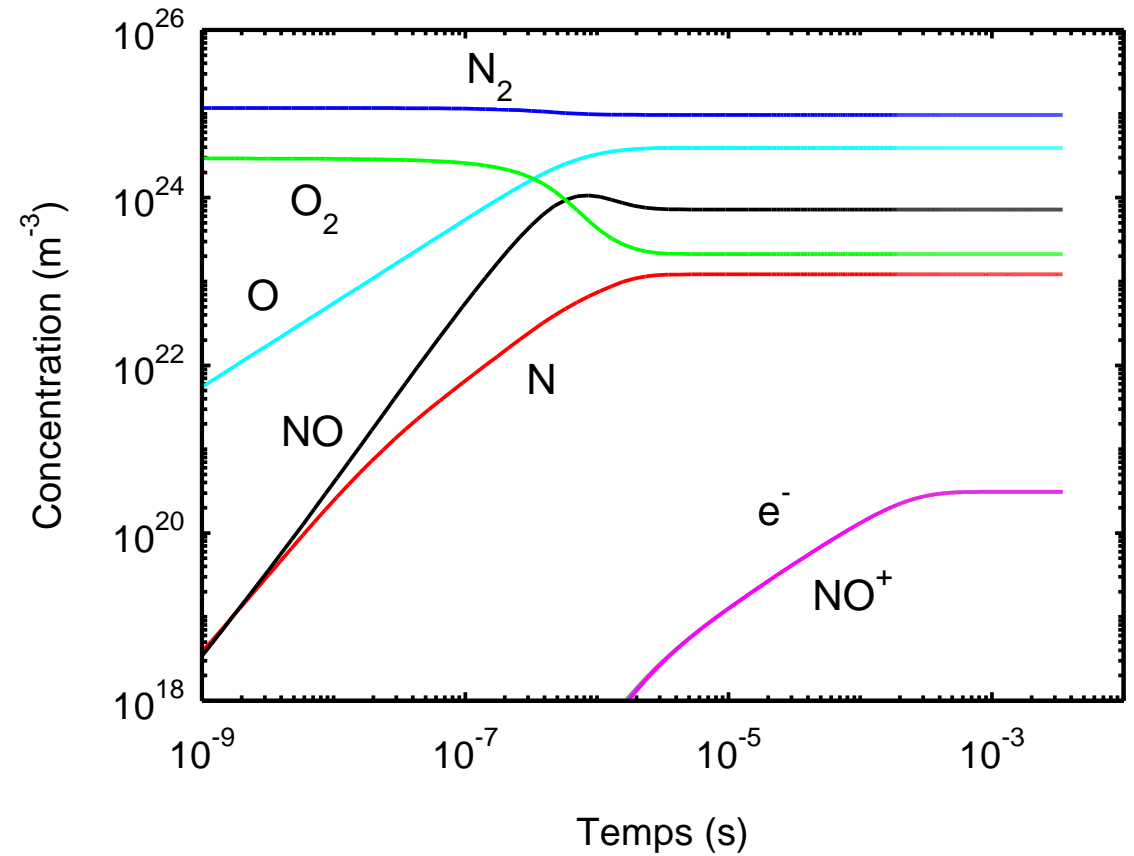
**Constante de réaction**

$$K_l(T) = \frac{k_d^l}{k_r^l}$$

Air ; P=1 atm.

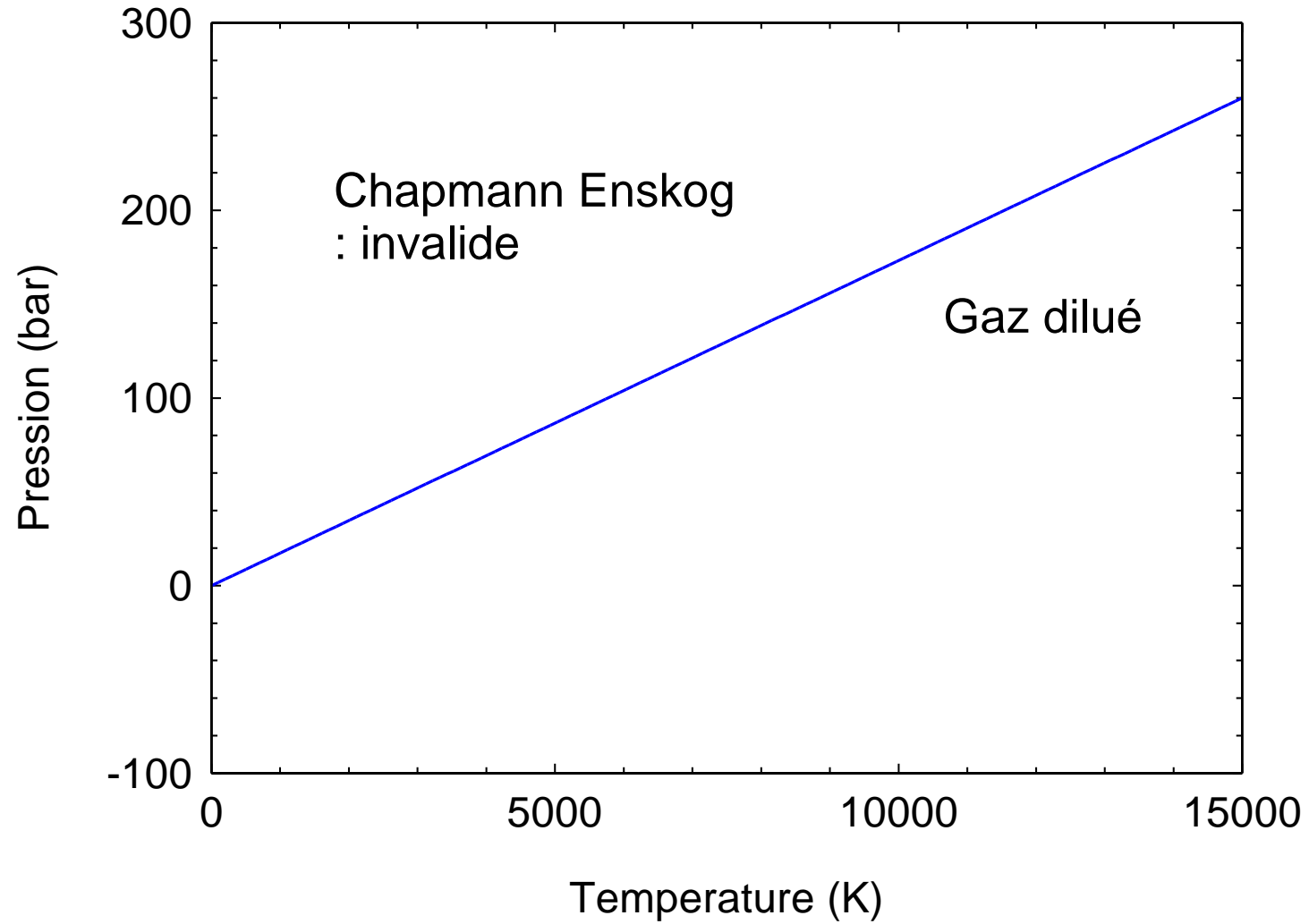


Air ; P=10 atm.



Temps équilibre chimique  $10^{-3}$  s pour P=1 atm;  $10^{-4}$  s pour P=10 atm;

Plus la pression augmente plus le temps d'équilibre chimique diminue



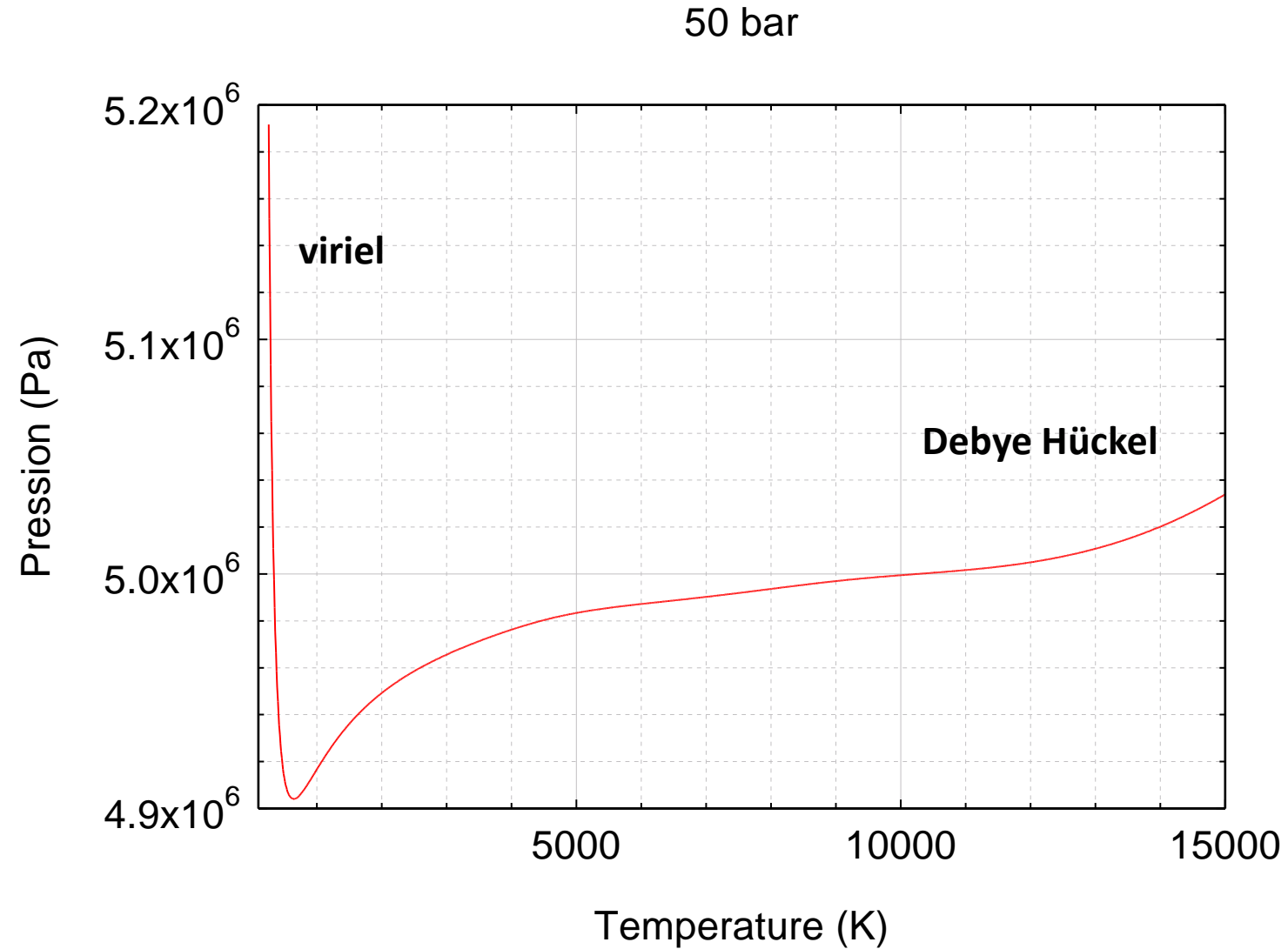
T(K)	P(Bar)
100	2
200	3
300	5
400	7
500	9
1000	17
5000	87
10000	173
15000	260

## Equation d'état

- Soave-Redlich-Kwong
- van der Waals
- du viriel
- ...

Dépend des potentiels d'interaction

À 50 bars on peut attendre 20% d'erreur



## Loi de Le Chatelier

Un système en équilibre chimique étant soumis à la variation d'un des facteurs qui règlent l'équilibre, il s'y produit un changement compensateur tel que, s'il était produit seul, il entrainerait une variation en sens inverse du facteur considéré

Cinétique chimique : plus la pression augmente plus le temps d'équilibre chimique diminue

Température de vaporisation augmente si la pression augmente

Réactions chimiques se décalent vers les hautes températures

## Loi de Le Chatelier ; Loi de modération

Un système en équilibre chimique étant soumis à la variation d'un des facteurs qui règlent l'équilibre, il s'y produit un changement compensateur tel que, s'il était produit seul, il entrainerait une variation en sens inverse du facteur considéré

Cinétique chimique : plus la pression augmente plus le temps d'équilibre chimique diminue : pas en équilibre chimique

Température de vaporisation augmente si la pression augmente:

la vaporisation émet une molécule de gaz qui contribue à la pression

si on augmente la pression le changement compensateur est que la température de vaporisation augmente

Réactions chimiques se décalent vers les hautes températures

Par exemple la dissociation d'une molécule émet deux molécules qui contribue à la pression

si on augmente la pression le changement compensateur est que pour la température de dissociation augmente