

# Plasmas & Arcs électriques : Application au WAAM

La Fabrication Additive par arcs électriques

Stéphane Pellerin

GREMI, UMR7344 CNRS Université d'Orléans, Orléans - Bourges, France

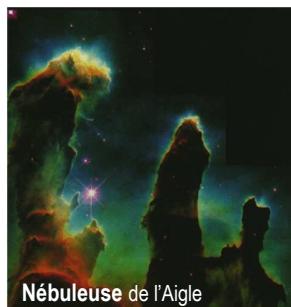


## Sommaire

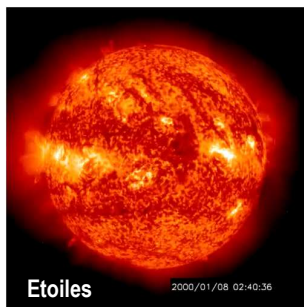
- Les plasmas dans la nature
- Des arcs et décharges, aux Plasmas
- Qu'est ce qu'un plasma
- Propriétés des plasmas
  - Effets collectifs
  - Longueur de Debye
  - Densités et Températures
  - Plasmas froides et Plasmas thermiques
  - Processus Fondamentaux
  - Notions d'équilibre
  - Compositions, Propriétés thermodynamiques, Coefficients de transport, Rayonnement
- Décharges et Arcs
- Arcs électriques...
  - ... et application au Soudage
- WAAM: Wire Arc Additive Manufacturing
- En guise de conclusion



# Les plasmas dans la nature...



Nébuluse de l'Aigle



Etoiles



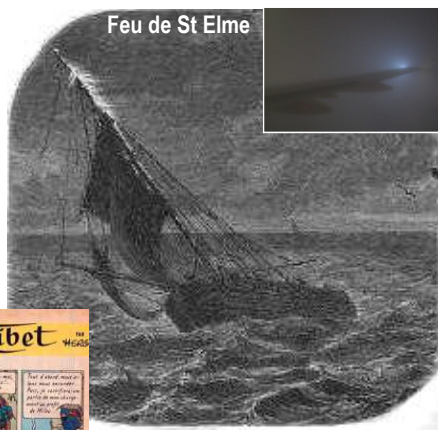
Comète Hale-Bopp



Foudre et TLE



Aurore Polaire



Feu de St Elme



Arc dans les nuées volcaniques

**99% de l'Univers...**



Réseau  
Plasmas  
Froids

GREMI

ANF Fab3D Métallique, Bourges, 2025

3



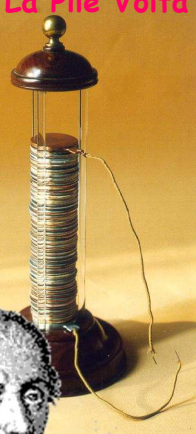
## Des arcs...

**1800: La Pile Volta**

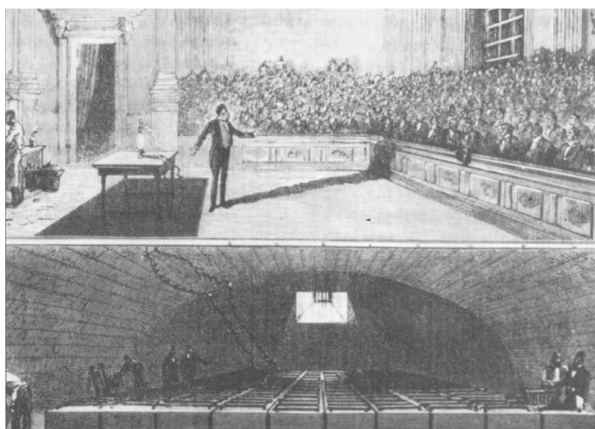
*réalisée par l'empilement  
de disques de cuivre et de  
zinc séparés par du drap  
imbibé d'acide sulfurique  
dilué*



Alessandro Volta (1745-1827)



Humphrey Davy (1778-1829)



**Œuf électrique (1813):  
Arc électrique entre 2  
électrodes au charbon**



Réseau  
Plasmas  
Froids

GREMI

ANF Fab3D Métallique, Bourges, 2025

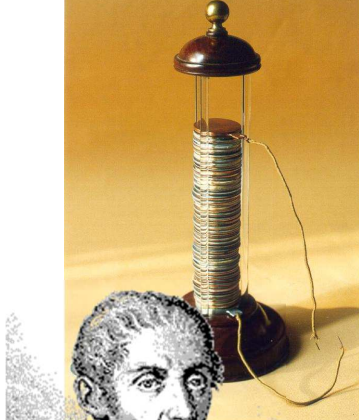
4





## Des arcs...

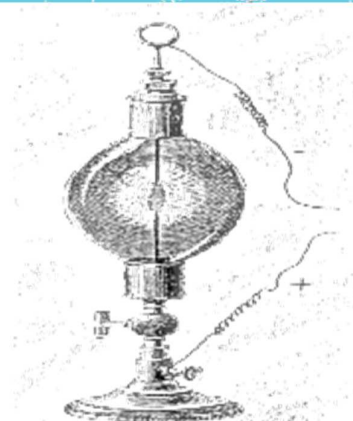
1800: La Pile Volta



Alessandro Volta (1745-1827)



Humphrey Davy (1778-1829)



Œuf électrique (1813):  
Arc électrique entre 2  
électrodes au charbon



Léon Foucault (1819-1868)



1844: Eclairage de la Place de la Concorde par  
des lampes à arc



Réseau  
Plasmas  
Froids

GREMI

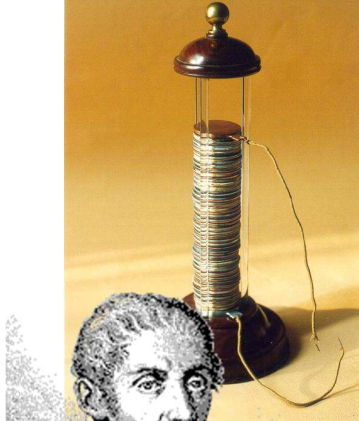
ANF Fab3D Métallique, Bourges, 2025

5



## Des arcs...

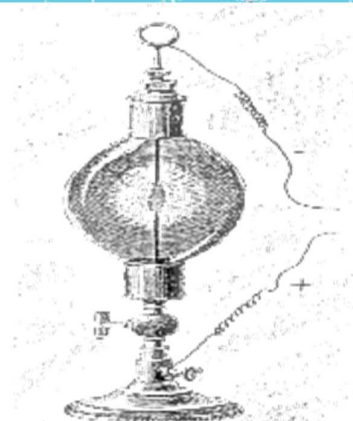
1800: La Pile Volta



Alessandro Volta (1745-1827)



Humphrey Davy (1778-1829)



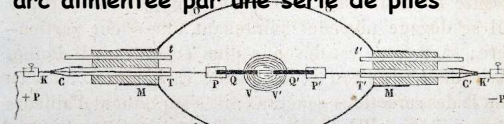
Œuf électrique (1813):  
Arc électrique entre 2  
électrodes au charbon



Marcelin Berthelot (1827-1907)

1844: Eclairage de la Place de la Concorde par  
des lampes à arc

1862: Synthèse de l'acétylène, par passage de  $H_2$   
entre électrodes en carbone d'une lampe à  
arc alimentée par une série de piles



Réseau  
Plasmas  
Froids

GREMI

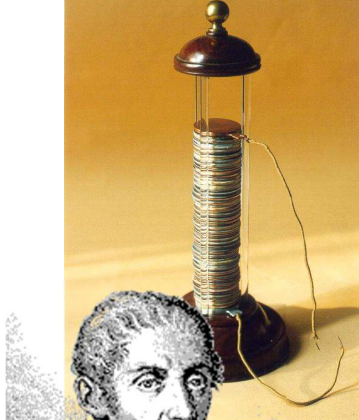
ANF Fab3D Métallique, Bourges, 2025

6



## Des arcs...

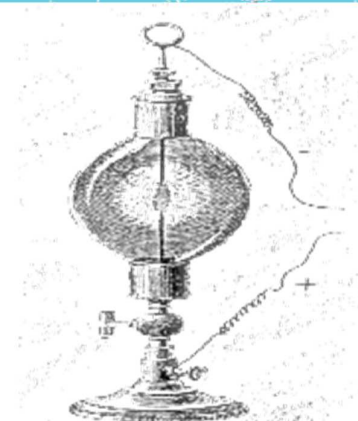
1800: La Pile Volta



Alessandro Volta (1745-1827)



Humphrey Davy (1778-1829)



Œuf électrique (1813):  
Arc électrique entre 2  
électrodes au charbon

1844: Eclairage de la Place de la Concorde par des lampes à arc

1862: Synthèse de l'acétylène, par passage de  $H_2$  entre électrodes en carbone d'une lampe à arc alimentée par une série de piles

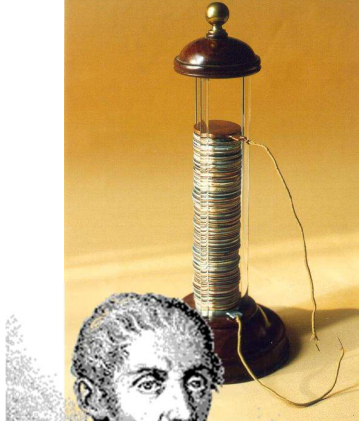
1880: Louis Clerc remplace la flamme de chalumeau par le plasma d'arc électrique, pour le soudage

...



## Des arcs...

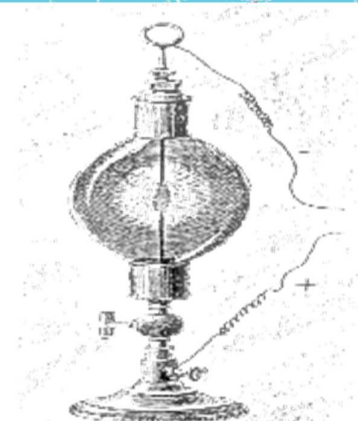
1800: La Pile Volta



Alessandro Volta (1745-1827)



Humphrey Davy (1778-1829)



Œuf électrique (1813):  
Arc électrique entre 2  
électrodes au charbon

Dès 1880, les 3 propriétés fondamentales de l'arc électrique donnaient lieu à des applications:

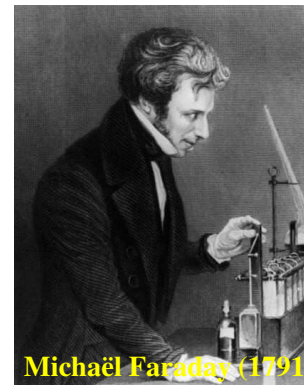
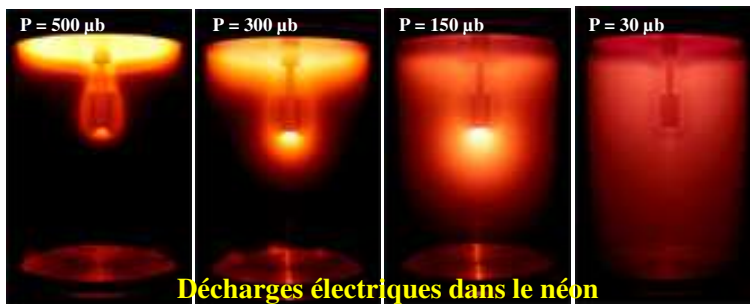
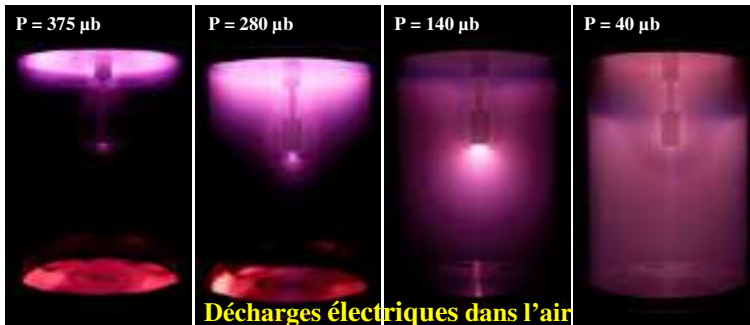
- Favoriser les réactions chimiques
- Flux radiatif intense
- Flux thermique élevé





# Des arcs et décharges...

## Les décharges électriques dans les gaz

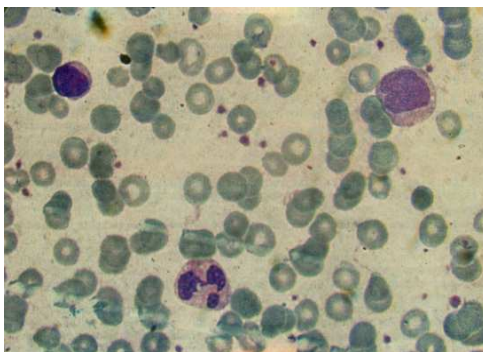


« La luminosité d'un gaz fortement raréfié et excité par une décharge électrique représente un 4<sup>ème</sup> état de la matière »



# Des arcs et décharges... aux « plasmas » !

☞ 1855: "Partie liquide du sang, au sein de laquelle les éléments figurés (hématies, plaquettes, leucocytes) sont en suspension."



" I.LANGMUIR et L.TONKS, chimistes américains de General Electric, observent le mouvement d'oscillation collective d'un nuage d'électrons pendant une décharge dans le mercure à basse pression. Ce nuage brillant et ondulant leur fait penser au plasma sanguin."

Irvin Langmuir [1881-1957]



Lewi Tonks [1897-1971]

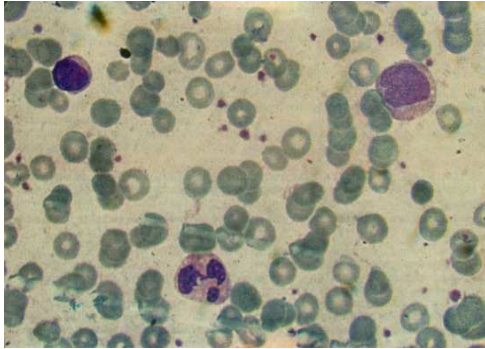


☞ 1928: Plasma Electrique = "Substance malléable, conductrice de l'électricité, qui existe entre l'électrode et la paroi des décharges électriques."



# Des arcs et décharges... aux « plasmas » !

☞ 1855: "Partie liquide du sang, au sein de laquelle les éléments figurés (hématies, plaquettes, leucocytes) sont en suspension."

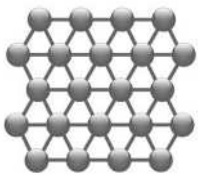


## Définitions

- ☞ **Plasma électrique:** "Substance malléable, conductrice de l'électricité, qui existe entre l'électrode et la paroi des décharges électriques." (1928)
- ☞ **Plasma:** "Etat dilué de la matière analogue à un gaz porté à haute température, formé d'un ensemble d'électrons et d'ions en équilibre avec des molécules ou des atomes dont le nombre est d'autant plus faible que la température est élevée".

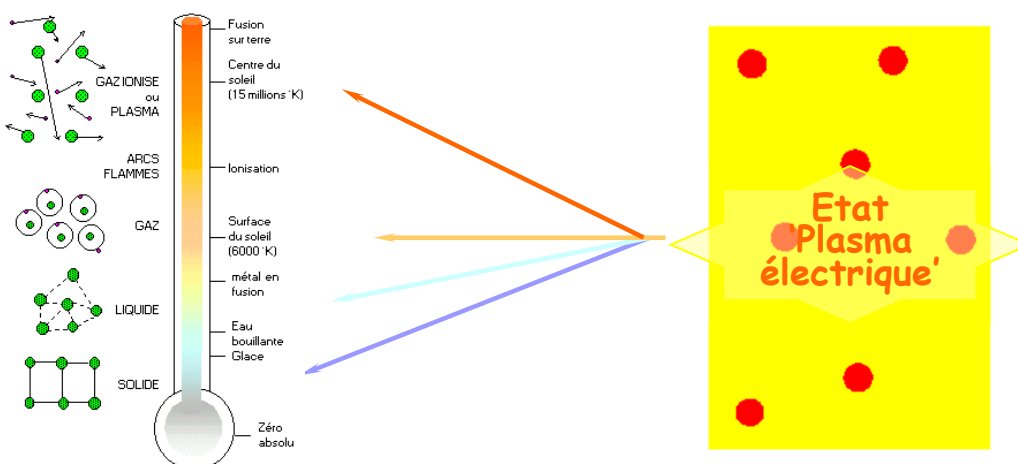


## Qu'est ce qu'un plasma ?



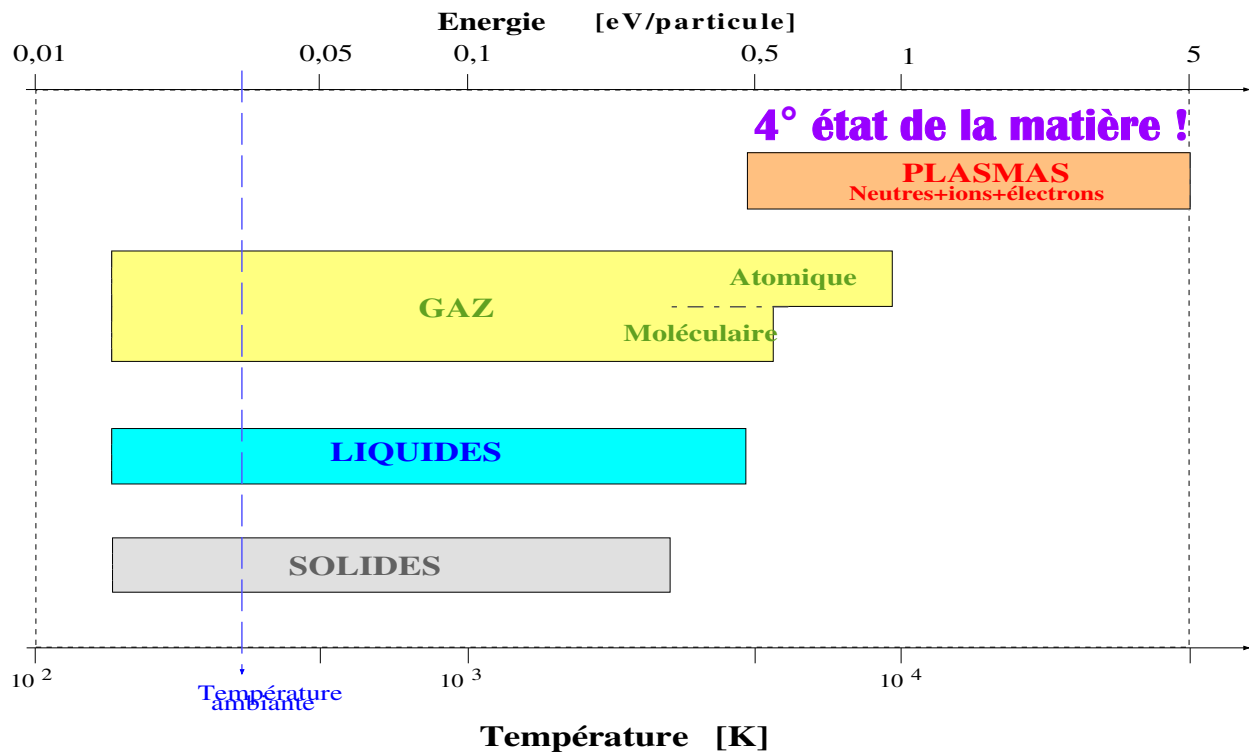
Solid

➔ Energy    ● Molecule    ● Excited molecule    ● Particle    ● Free-electron    ● Ions





# Qu'est ce qu'un plasma ?



GREMI

ANF Fab3D Métallique, Bourges, 2025

13



## Propriétés des plasmas

### Des effets collectifs

**GAZ**

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma = \pi r^2 \\ v = n \sigma \bar{v} = 1/\tau \\ \lambda = \tau \bar{v} = 1/(n\sigma) \end{array} \right.$$

atomes, molécules

- neutre
- isolant électrique
- mouvement aléatoire

**PLASMA**

$$\sum_i Z_i e n_i = 0$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_{\alpha\beta} = \sigma_{\alpha\beta}(v, \epsilon) \\ k_{\alpha\beta} = \langle \sigma_{\alpha\beta} v_{\alpha\beta} \rangle \end{array} \right.$$

**Effet d'écran**  
Longueur de Debye

atomes, molécules, radicaux  
ions, électrons  
lumière

- macroscopiquement neutre
- conducteur de l'électricité
- effets collectifs, longue portée



GREMI

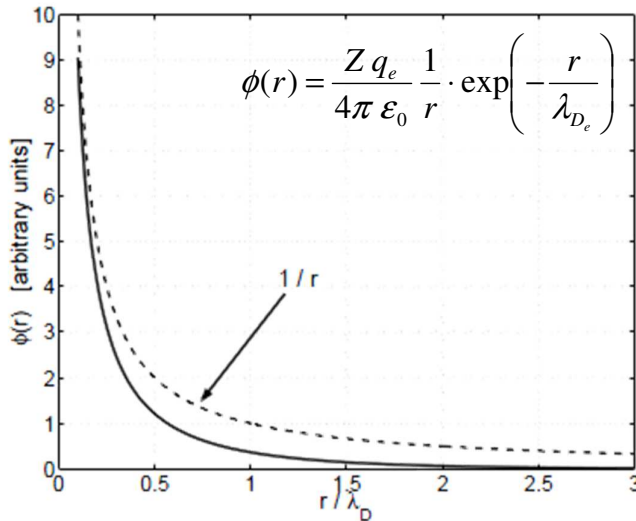
ANF Fab3D Métallique, Bourges, 2025

14



$$F \sim 1/r^2$$

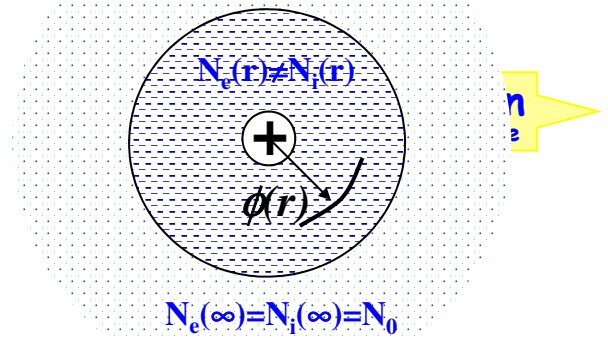
$$\lambda_{D_e} = \sqrt{\frac{\epsilon_0 \cdot k_B T_e}{n_e \cdot q_e^2}} \quad (\text{cas d'un plasma une fois ionisé})$$



Plasma une fois ionisé

Accumulation d' $e^-$  autour d'une charge  $+Z \cdot q_e$

↪ Ecrantage du potentiel créée



↪ *effets collectifs, longue portée*



↪ *effets collectifs, longue portée*

**Effet d'écran**  
↪ Longueur de Debye

$$\lambda_{D_e} = \sqrt{\frac{\epsilon_0 \cdot k_B T_e}{n_e \cdot q_e^2}} \quad (\text{cas d'un plasma une fois ionisé})$$

**Pour avoir un plasma:**

- Dimensions du plasma plus grande que la longueur de Debye

$$L_{\text{Plasma}} \gg \lambda_D$$

- Grand nb de particules dans la sphère de Debye pour l'«écrantage»

$$N_D = \frac{4}{3} \pi \lambda_D^3 n_e \gg 1$$

+ collisions ion-neutre minoritaires

$$\omega_{\text{collision}} \cdot \tau_{\text{ion-neutre}} > 1$$

+ fréquence de collisions électrons-neutre  $\ll$  fréquence plasma





# Propriétés des plasmas

## Densités et Températures

**Plasma** = contient un grand nombre d' « espèces » neutres ou chargées

⇒ Il est caractérisé par

↳ **Densité de particules neutres**  $n_n(r)$

↳ **Densité des particules chargées**: électrons  $n_e(r)$ , et ions  $n_i(r)$

avec (quasi-neutralité):  $n_e(r) = n_i(r) = n(r) \sim$  **densité plasma**  
et **distance inter-électronique**  $d_e = n_e^{-1/3}$

→ **degré d'ionisation**:  $\alpha = \frac{n_e}{n_e + n_0}$

↳ **Distributions en énergie**

des espèces neutres  $f_n(E)$ ,  
des électrons  $f_e(E)$ ,  
ou des ions  $f_i(E)$

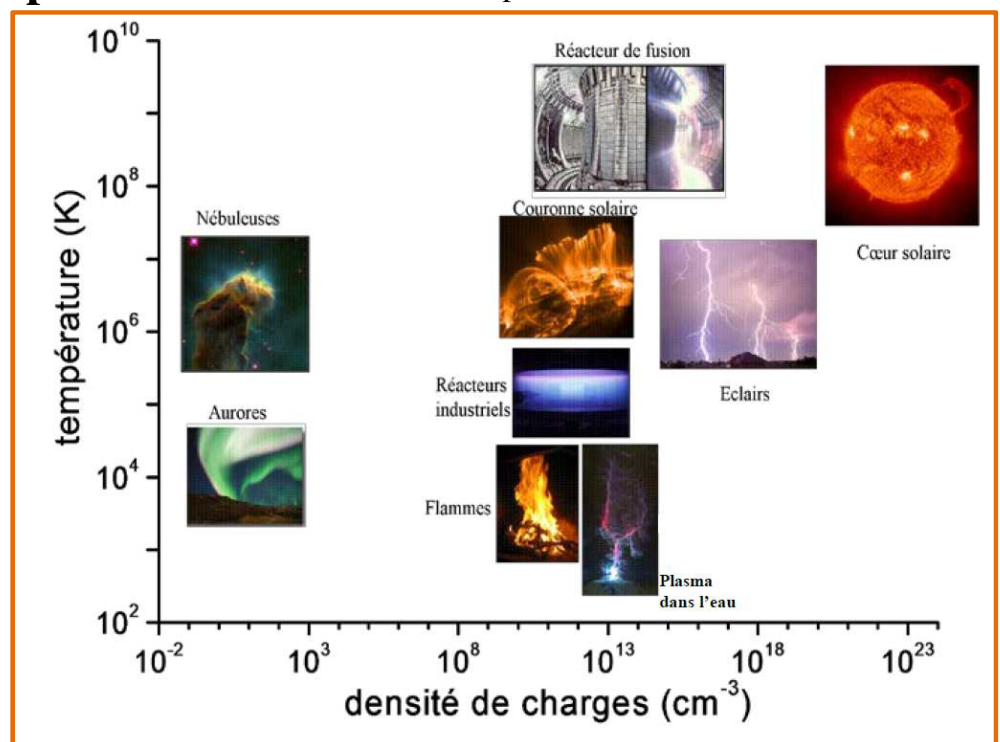
⇒ **Températures**  $T_j(r)$



# Propriétés des plasmas

## Densités et Températures

**Classification des plasmas** en fonction de leur température et leur densité

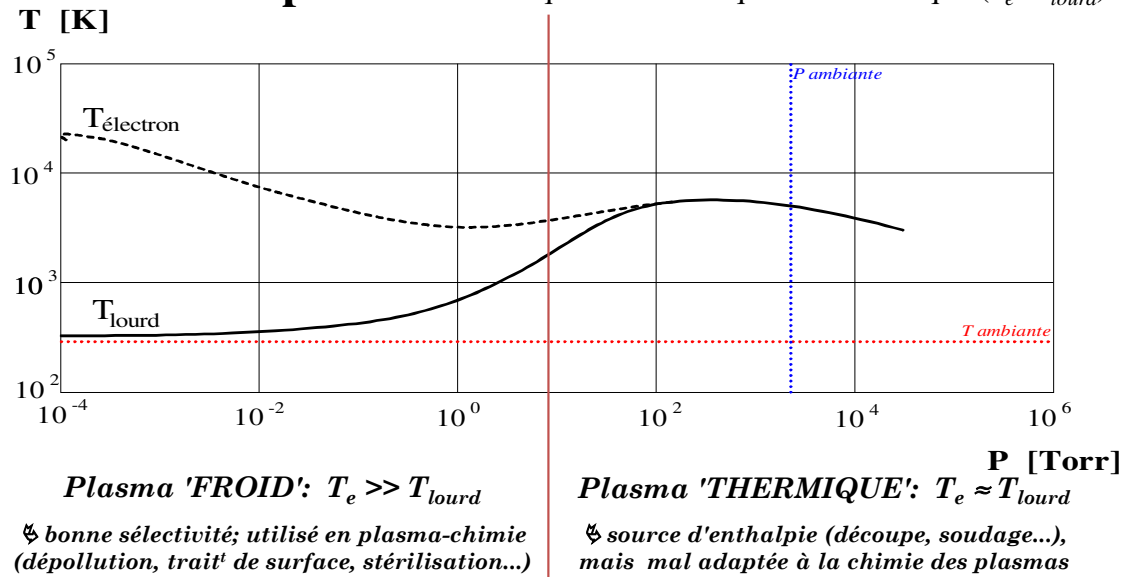




# Propriétés des plasmas

## Plasma Froid & Plasma Thermique

**Classification des plasmas** selon qu'ils sont en équilibre thermique ( $T_e = T_{lourd}$ ) ou non!



- $\alpha=1$  : plasmas chauds totalement ionisés
- $10^{-4} < \alpha < 10^{-2}$  : plasmas thermiques fortement ionisés
- $\alpha < 10^{-4}$  : plasmas froids faiblement ionisés et en fort déséquilibre thermique
- $\alpha \approx 10^{-5}$  : gaz ionisé



GREMI

ANF Fab3D Métallique, Bourges, 2025

19

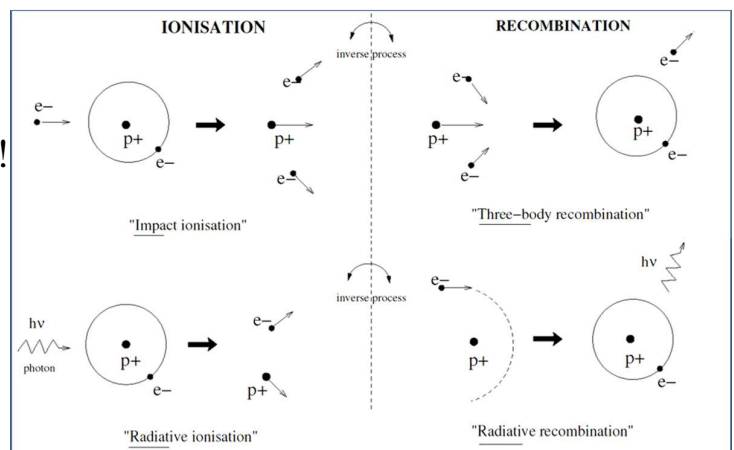


# Propriétés des plasmas

## Processus fondamentaux

### Les processus fondamentaux

- ↳ L'ionisation des atomes est une condition nécessaire pour obtenir un plasma
- ↳ Les mécanismes d'**ionisation/recombinaison** sont nombreux, mais les plus importants sont:
  - l'ionisation/Recombinaison radiatives,
  - l'ionisation par impact électronique/Recombinaison à 3 corps!



- ↳ Viennent s'y ajouter les mécanismes de peuplement/dépeuplement des niveaux excités des particules



GREMI

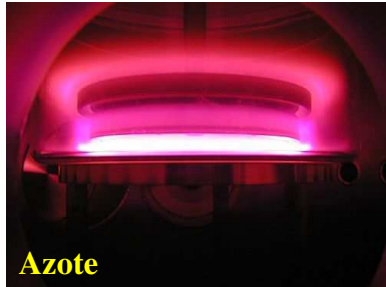
ANF Fab3D Métallique, Bourges, 2025

20

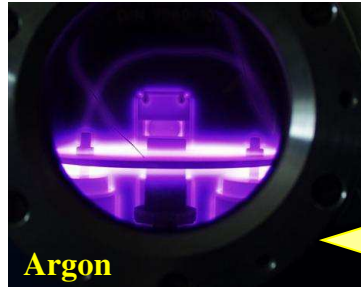


### Les processus fondamentaux

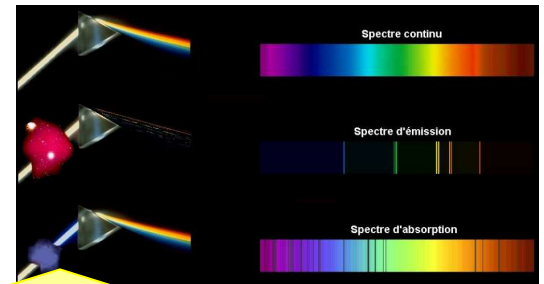
#### ↳ Des processus radiatifs



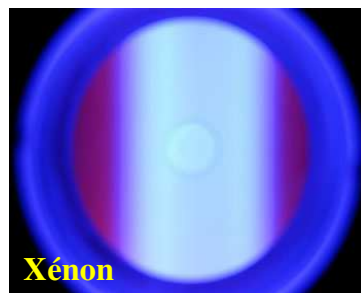
Azote



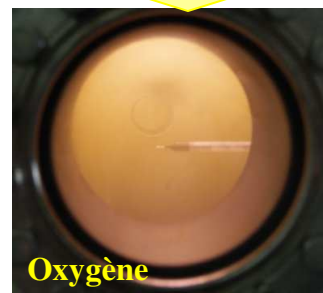
Argon



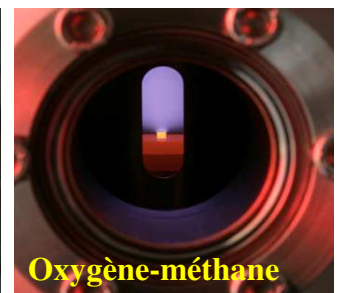
**La Spectroscopie**  
un moyen efficace  
d'analyse



Xénon



Oxygène



Oxygène-méthane



- ↳ Dans un plasma en équilibre thermodynamique complet (ETC), tout mécanisme est exactement compensé par son opposé: c'est le Principe « de microréversibilité »

Alors des lois d'équilibre satisfaites simultanément:

- **Electro-neutralité** du plasma
- **Loi de Dalton**, sur les pressions partielles
- **Distribution maxwellienne** des vitesses
- **Loi de Saha**, de répartition en densité des états d'ionisation d'une espèce donnée
- **Loi de Boltzmann** de répartition en densité des états excités d'une particule d'état d'ionisation donné
- **Loi de Planck**, de distribution du rayonnement

- ↳  $T$ ,  $N$  et  $P$  permettent de caractériser totalement le plasma

- ↳ Equilibre thermodynamique local (ETL), si perte radiative locale d'énergie faible p.r. à énergie totale, et temps de relaxation courts

- ↳ on peut définir des valeurs locales de  $T_e(r)$ ,  $N(r)$  et  $P(r)$

Les phénomènes collisionnels assurent la thermalisation  
haute  $N_e$  et/ou basse  $T_e$



**ETC / ETL**

(Aurore boréale, Plasma de labo)

Tous les phénomènes sont à prendre en compte  
 $N_e$  intermédiaire



**Collisionnel-Radiatif**

**Coronal**

(couronne solaire, tokamak)



basse  $N_e$  et/ou haute  $T_e$

**Ionisations par impact et Recombinaisons radiatives prédominantes**

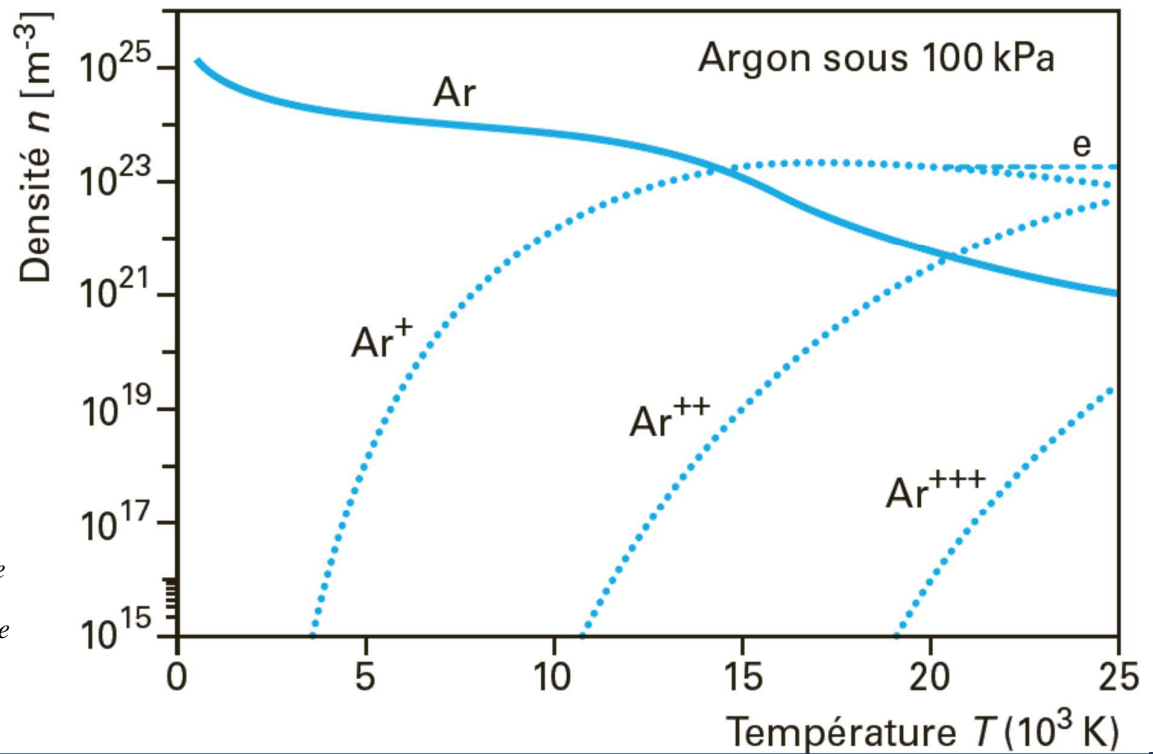




# Propriétés des plasmas

## Composition des plasmas en ETL

ETL → Composition d'équilibre



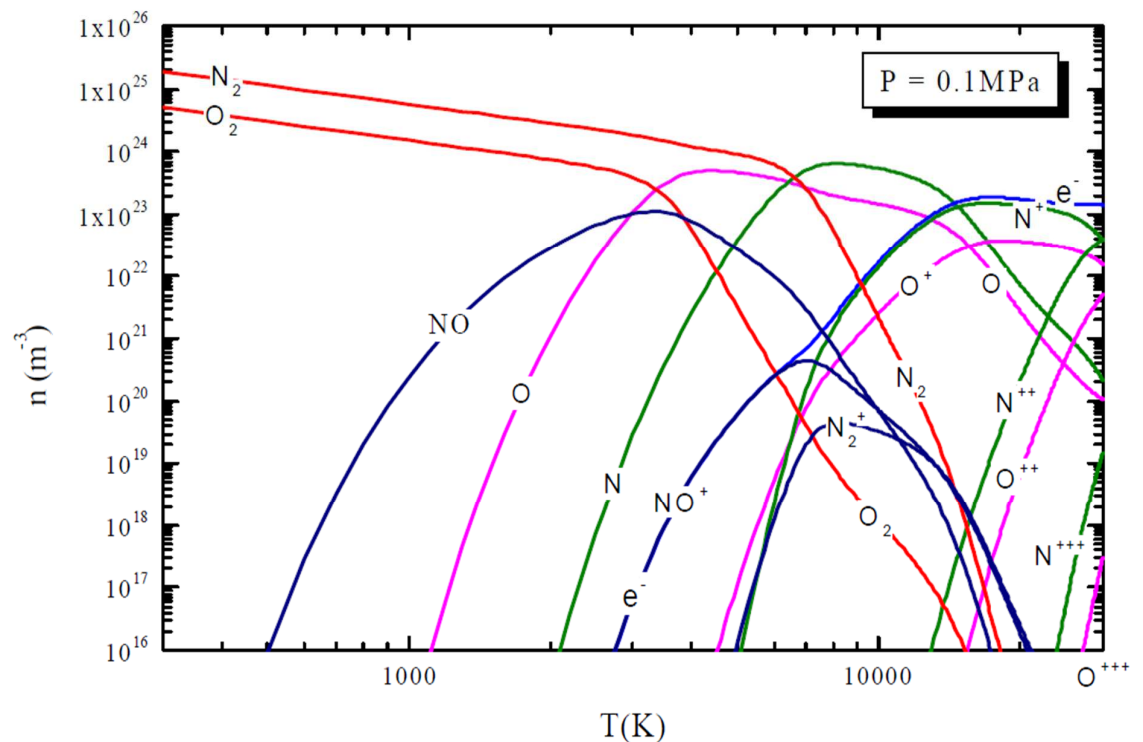
Composition d'équilibre  
d'un plasma d'argon  
à pression atmosphérique



# Propriétés des plasmas

## Composition des plasmas en ETL

ETL → Composition d'équilibre



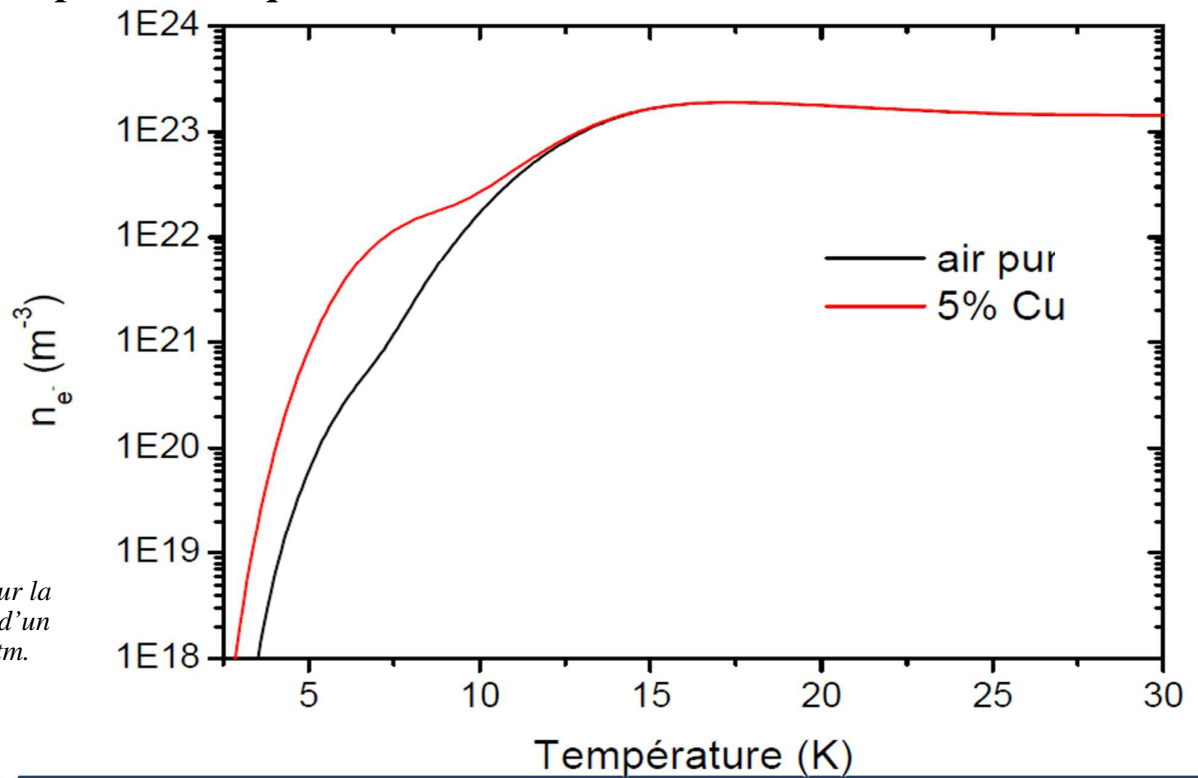
Composition d'équilibre  
d'un plasma d'air  
à pression atmosphérique



# Propriétés des plasmas

## Composition des plasmas en ETL

ETL → Composition d'équilibre



*Influence du cuivre sur la densité électronique d'un plasma d'air à P atm.*

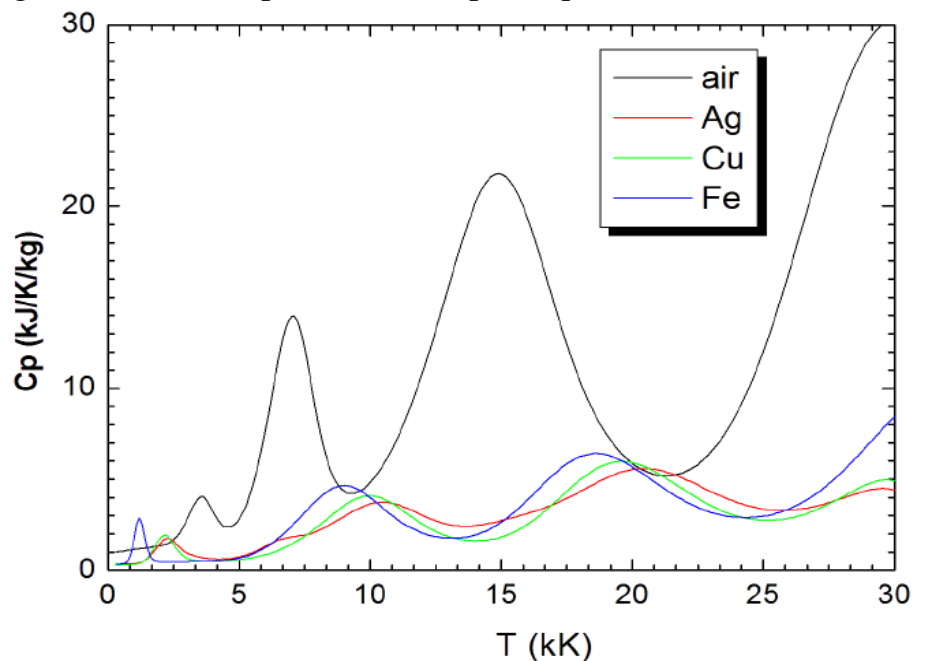


# Propriétés des plasmas

## Propriétés thermodynamiques

ETL + composition (& fonction de partition)

→ **Propriétés thermodynamiques du plasma:** densité de masse, enthalpie, énergie interne, entropie, chaleurs spécifiques, etc.



*Chaleur spécifique à pression constante d'un plasma d'air sous 1 atm*



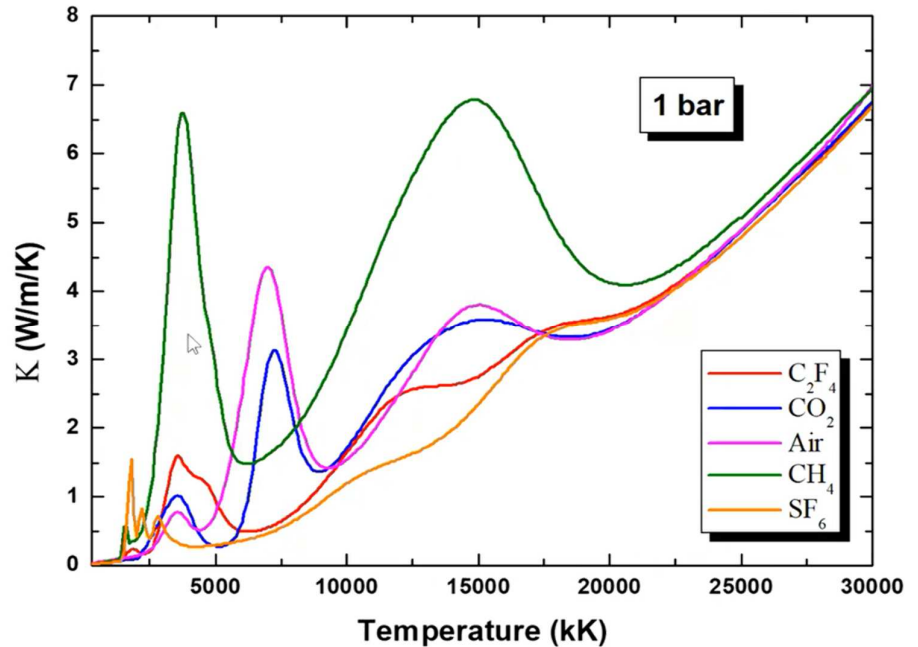
# Propriétés des plasmas

## Coefficients de transport

ETL + composition

+ prise en compte des transports, essentiellement collisionnels, et des anisotropies

→ **Coef. de transport**: diffusion, viscosité, conductivités élect. et therm.



Conductivités thermiques  
de différents plasmas à  
pression atmosphérique



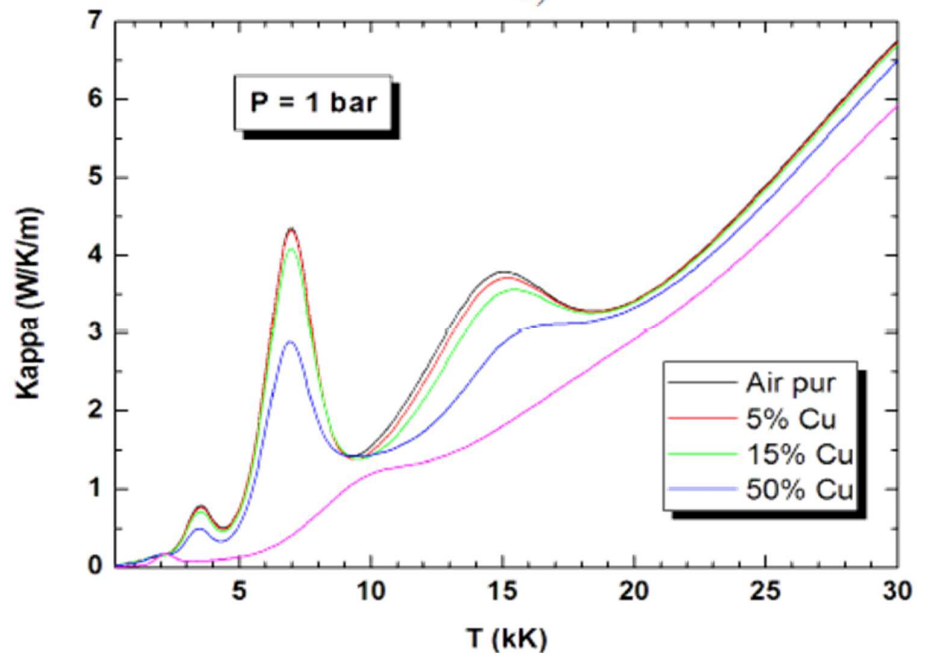
# Propriétés des plasmas

## Coefficients de transport

ETL + composition

+ prise en compte des transports, essentiellement collisionnel, et des anisotropies

→ **Coef. de transport**: diffusion, viscosité, conductivités élect. et therm.



Conductivités thermiques  
de plasmas Air+Cu à  
pression atmosphérique





# Propriétés des plasmas

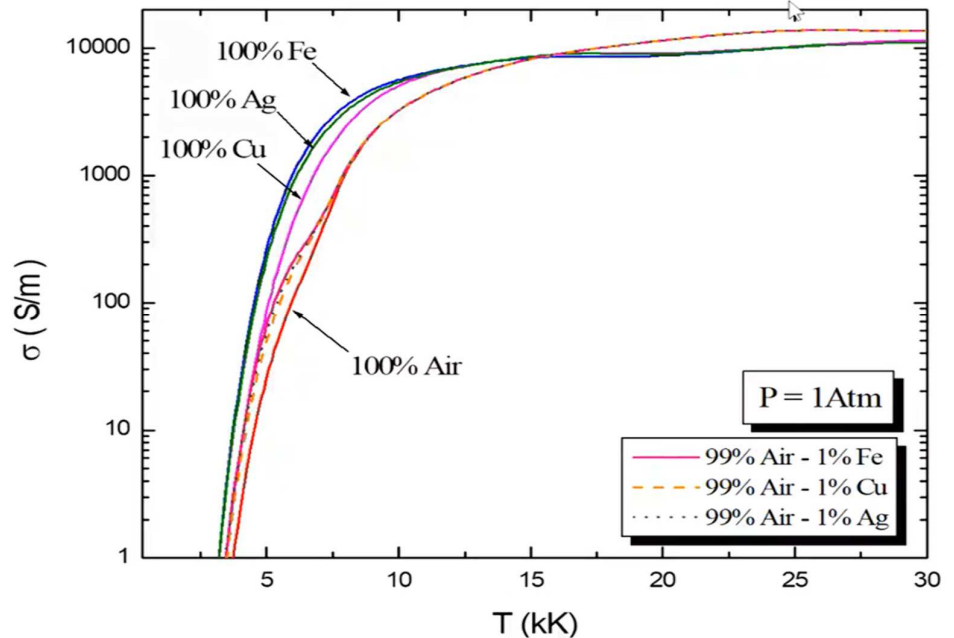
## Coefficients de transport

ETL + composition

+ prise en compte des transports, essentiellement collisionnel, et des anisotropies

→ **Coef. de transport**: diffusion, viscosité, conductivités élect. et therm.

Conductivité électrique  
d'un plasma d'air +  
vapeurs métalliques



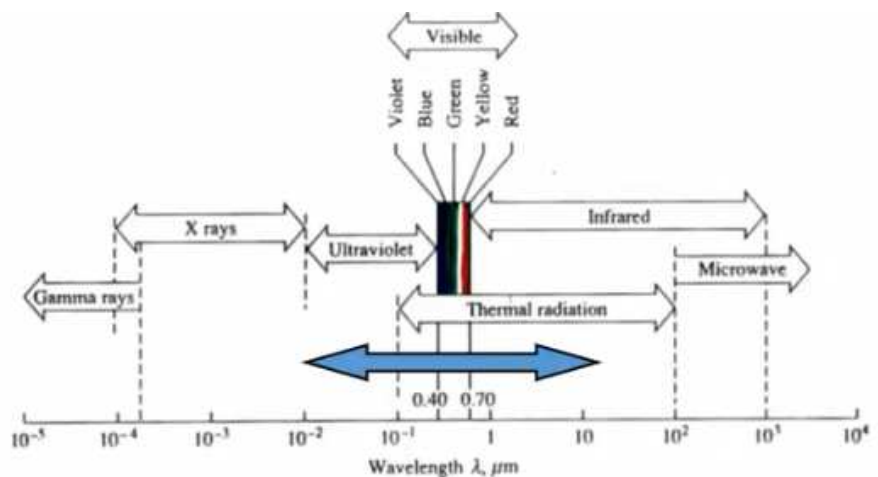
# Propriétés des plasmas

## Rayonnement

**Rayonnement:**

Spectre très étendu de l'IR (peu) jusque dans l'UV

Nombreux mécanismes à l'origine du rayonnement du plasma, ce qui donne des relations entre les propriétés du plasma et l'intensité du rayonnement



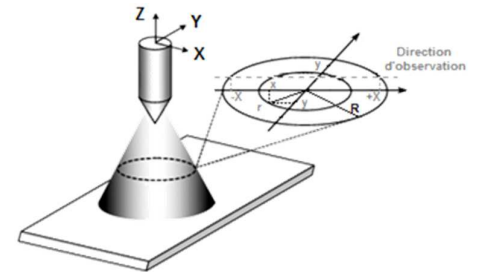
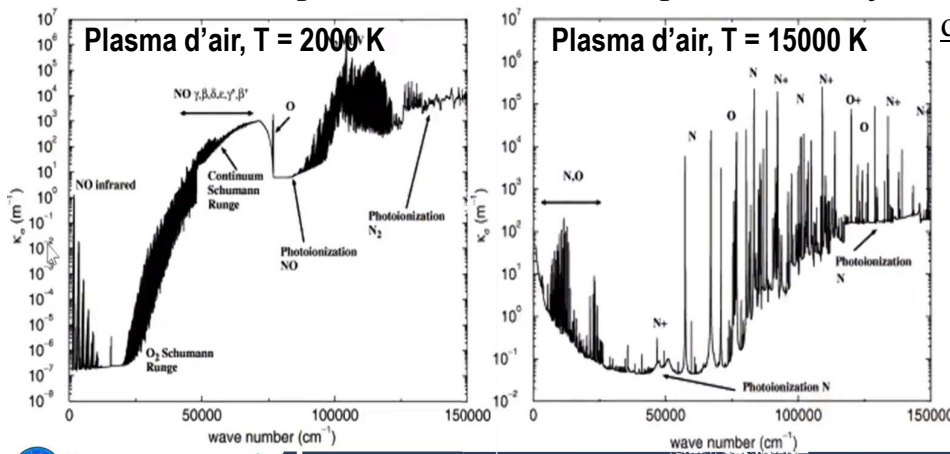


### Rayonnement:

Spectre très étendu de l'IR (peu) jusque dans l'UV

Nombreux mécanismes à l'origine du rayonnement du plasma, ce qui donne des relations entre les propriétés du plasma et l'intensité du rayonnement

→ En chaque point du plasma, pour chaque valeur de  $T$ , il faut évaluer la répartition spectrale et tenir compte de tous les mécanismes d'émission et d'absorption (continuum, raies, bandes), y compris les élargissements et déplacement des raies (dépendant de  $N_e$  et de  $T_e$ )... en tenant compte des distributions radiales de  $T_e$  et  $N_e$



GREMI

ANF Fab3D Métallique, Bourges, 2025

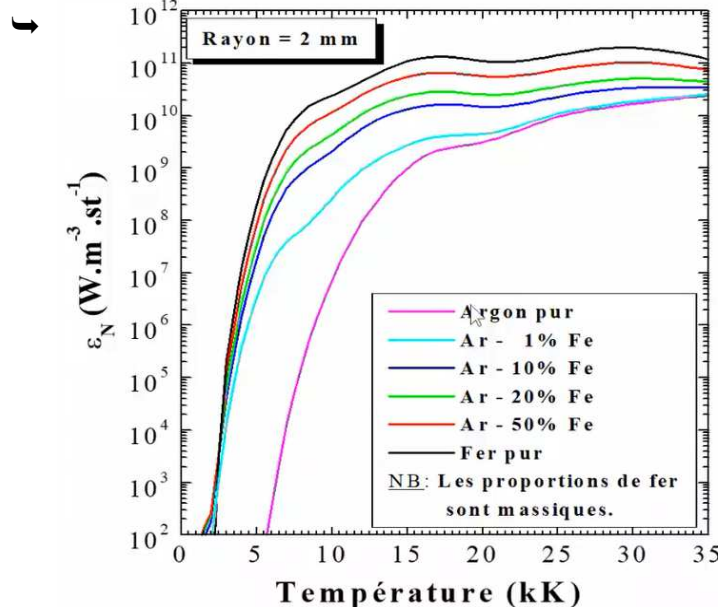
31



### Rayonnement:

Spectre très étendu de l'IR (peu) jusque dans l'UV

Nombreux mécanismes à l'origine du rayonnement du plasma, ce qui donne des relations entre les propriétés du plasma et l'intensité du rayonnement



En chaque point du plasma, pour chaque valeur de  $T$ , il faut évaluer la répartition spectrale et tenir compte de tous les mécanismes d'émission et d'absorption (continuum, raies, bandes), y compris les élargissements et déplacement des raies (dépendant de  $N_e$  et de  $T_e$ )... en tenant compte des distributions radiales de  $T_e$  et  $N_e$  et des inhomogénéités.

Effet des vapeurs métalliques



GREMI

ANF Fab3D Métallique, Bourges, 2025

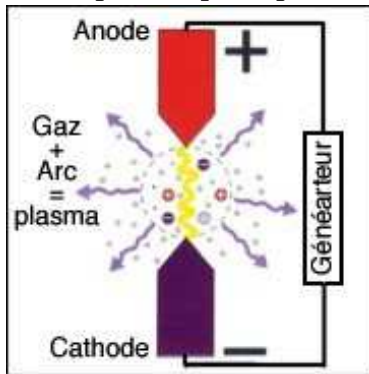
32



# Pour obtenir un plasma...

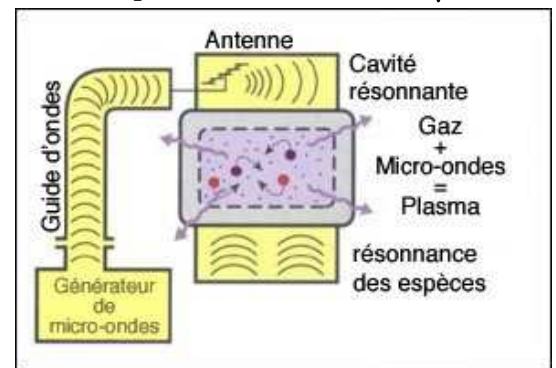
**IL FAUT FOURNIR DE L'ENERGIE A UN GAZ**  
pour engendrer des collisions  
et  
arracher des électrons des atomes

Existences d'électrodes,  
Champ électrique important



*1 électron,  
et c'est l'Avalanche!*

Absences d'électrodes,  
Champ e.-m. variable (BF, RF,  $\mu$ onde)



# Pour obtenir un plasma...

## Exemple de sources

**IL FAUT FOURNIR DE L'ENERGIE A UN GAZ**  
pour engendrer des collisions  
et  
arracher des électrons des atomes

### Exemples de source

- Décharges électriques



- Arcs électriques



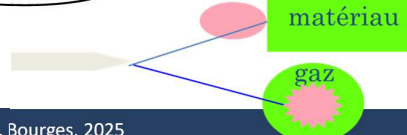
- Torches



- Antennes



- Lasers



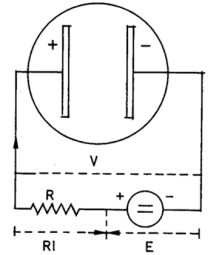
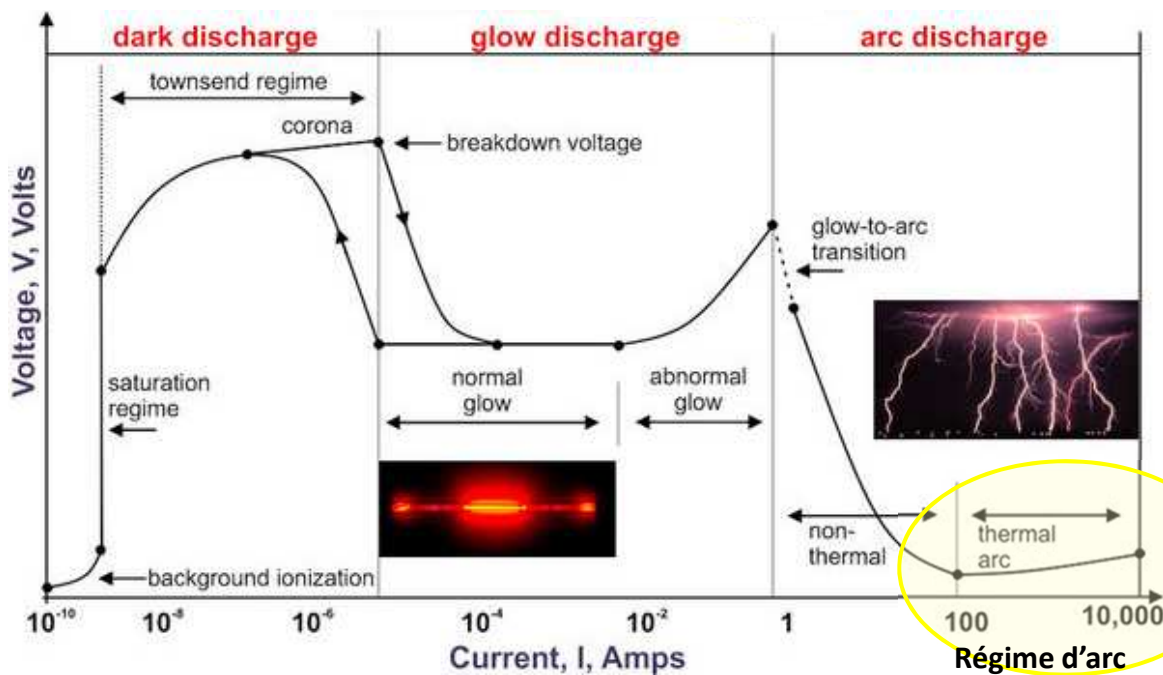




# Pour obtenir un plasma...

## Les différents régimes de décharges

Caractéristique courant-tension des décharges: de la décharge non-autonome jusqu'à l'arc



### Régime d'arc

- ☞ La cathode devient 'chaude'
- ☞ Apparition de 'spot cathodique'



# L'arc électrique

## Définitions

### Définitions

- ☞ Arc électrique: "Un arc est une décharge auto-entretenues, ayant une faible chute de tension et capable de supporter de forts courants". [Cobine, 1941]
- ☞ Arc électrique: "Un arc est une décharge dans laquelle le gaz est approximativement en équilibre thermique, et dont la chute cathodique est faible, d'environ 10V". [Maecker, 1963]



# L'arc électrique

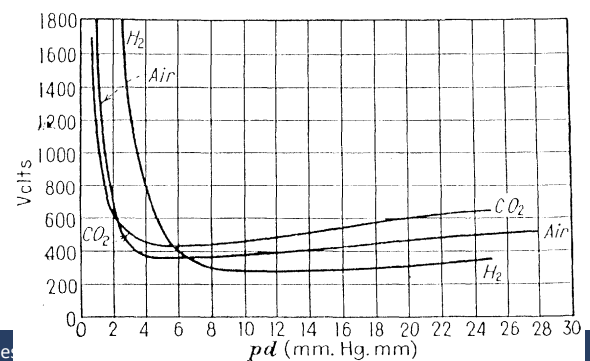
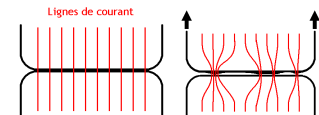
## Définitions

### Définitions

- ↪ Arc électrique: "Un arc est une décharge auto-entretenu, ayant une faible chute de tension et capable de supporter de forts courants". [Cobine, 1941]
- ↪ Arc électrique: "Un arc est une décharge dans laquelle le gaz est approximativement en équilibre thermique, et dont la chute cathodique est faible, d'environ 10V". [Maecker, 1963]

### Armorçage d'un arc

- Par contact → séparation de contact / 'Pont fondu'  
→ fil fusible
- Par surtension → Courbe de Paschen  $V_s(p \cdot d_{elec})$

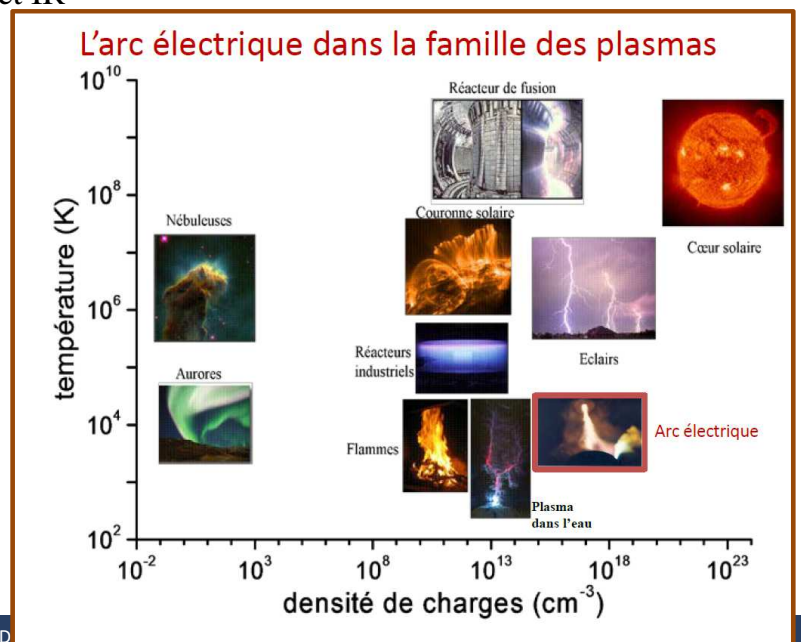


# L'arc électrique

## Caractéristiques

Les arcs électriques à pression atmosphérique sont établis entre deux électrodes;

- plasmas thermiques, caractérisés par:
  - Forte densité de puissance (→ 100 kW.cm<sup>-2</sup>)
  - Température élevée (3000 K à 30000 K), identique pour toutes les espèces
  - Rayonnement important: UV, Vis et IR
  - Intensité de courant élevée
  - vitesse importante (> 100 m.s<sup>-1</sup>)
  - Milieu chimiquement réactif

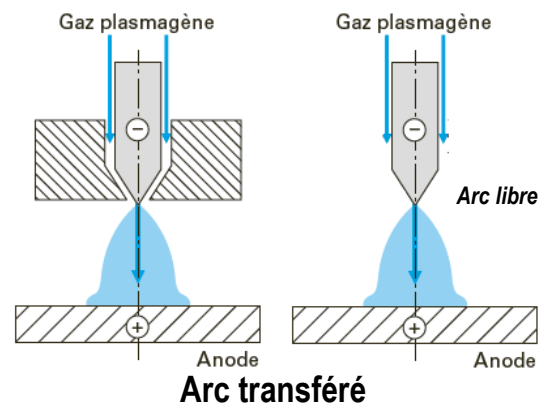
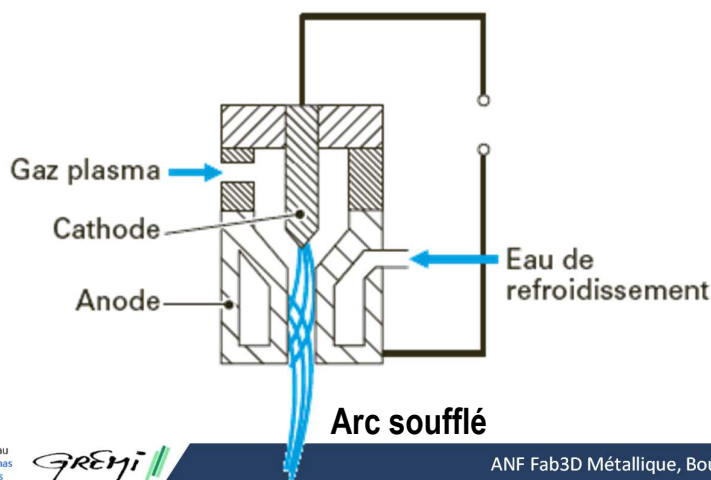




Les **arcs électriques** à pression atmosphérique sont **établis entre deux électrodes**;

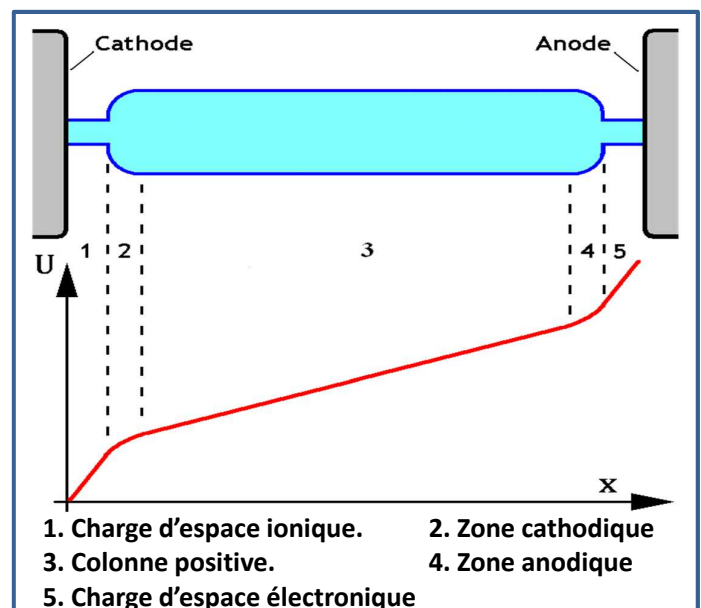
→ **plasmas thermiques**, caractérisés par:

- Forte densité de puissance (→  $100 \text{ kW.cm}^{-2}$ )
- **Température** élevée (3000 K à 30000 K), identique pour toutes les espèces
- **Rayonnement** important: UV, Vis et IR
- **Intensité** de courant élevée
- **vitesse** importante ( $> 100 \text{ m.s}^{-1}$ )
- Milieu **chimiquement réactif**



**Zones cathodique** → émission des  $e^-$   
**et anodique** → absorption des  $e^-$

- Transitions entre les électrodes et la colonne d'arc
- Possèdent des charges d'espace positive et négative
- Champs électriques importants, de l'ordre de  $10 \text{ MV.m}^{-1}$  dans la gaine
- Très forts gradients de température



- Transition entre le contact solide ( $\sigma \approx 6.10^7 \text{ S.m}^{-1}$  pour Cu) et le plasma ( $\sigma \approx 10^4 \text{ S.m}^{-1}$ )  
 → phénomènes électriques et thermiques extrêmes sur des distances très courtes:  
 E de l'ordre de  $10 \text{ MV.m}^{-1}$  dans la gaine  
 j de  $10^6$  à  $10^8 \text{ A.m}^{-2}$   
 Flux de chaleur de  $10^7$  à  $10^9 \text{ W.m}^{-2}$



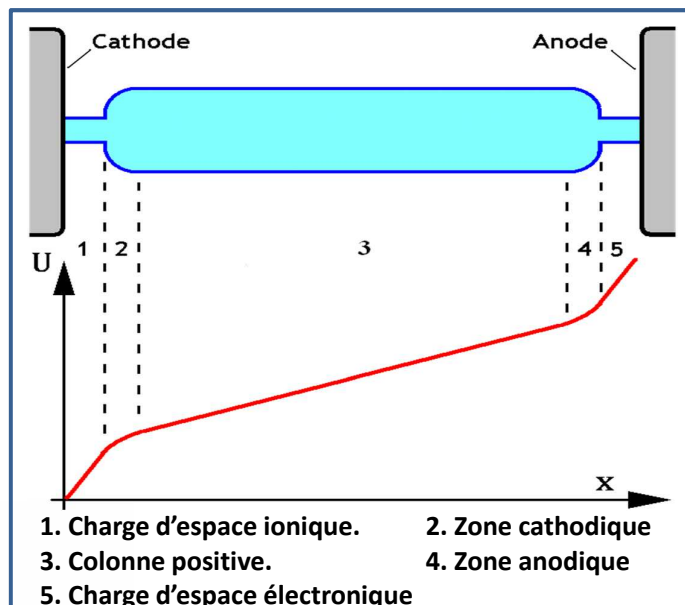
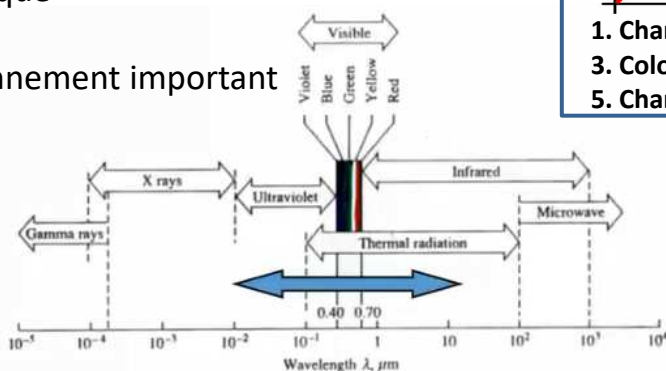


# L'arc électrique

## Répartition de potentiel entre les électrodes

### Colonne d'arc:

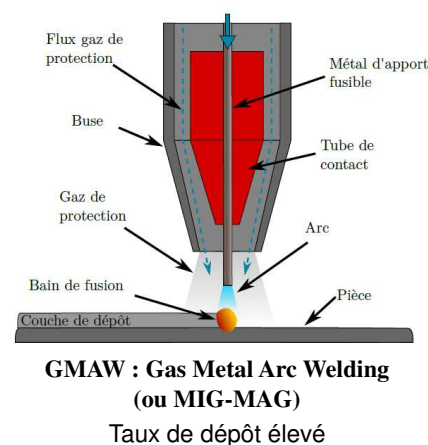
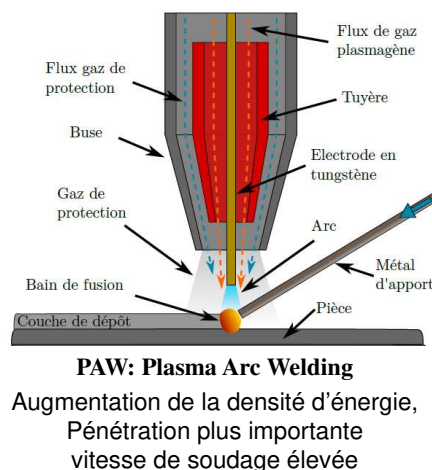
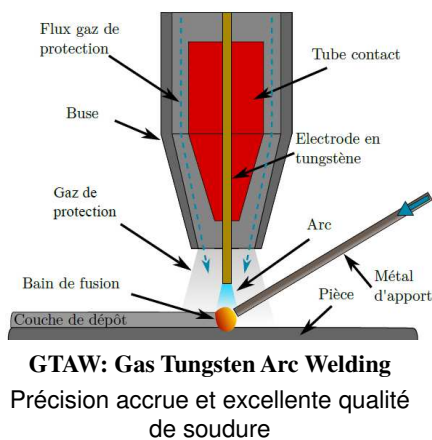
- Macroscopiquement neutre,
- Répartition du potentiel linéaire / champ électrique constant et faible
- $\alpha > 1\%$ ,  $N_e > 10^{22} \text{ m}^{-3}$
- Plasma thermique avec  $T_e \approx \text{kK}$
- ETL en première approximation, *mais en toute rigueur*  $T_e \geq T_g \dots$
- Réactivité du plasma  $\rightarrow$  cinétique chimique
- Rayonnement important



# L'arc électrique

## Application: le soudage à l'arc

**Soudage à l'arc:** procédé pour lequel la fusion de la matière est assurée par l'apport de chaleur localisé, générée par un arc électrique se créant entre la pièce à souder et une électrode.

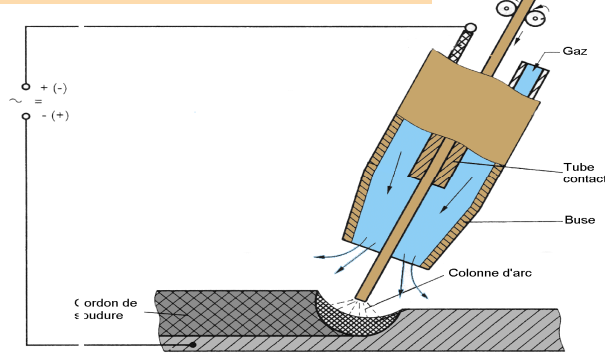




# L'arc électrique

## Application: le soudage GMAW

### Schéma de la torche de soudure



### Paramètres de soudage

- ✓ Le débit de gaz
  - ✓ La polarisation de l'arc
  - ✓ La dimension de l'électrode
  - ✓ La distance tube contact-cathode
  - ✓ La composition de l'électrode
  - ✓ Le mélange gazeux utilisé
  - ✓ L'intensité de courant :  $I \div 100 \dots 450 \text{ A}$
  - ✓ La vitesse d'avance du fil :  $V_f \div 1 \dots 20 \text{ m/mn}$
  - ✓ La tension d'arc :  $U \div 20 \dots 50 \text{ V}$
  - ✓ La longueur libre du fil
  - ✓ La vitesse de déplacement
- Répartition de chaleur entre électrode et pièce  
 ↳ pénétration
- Stabilité de l'arc, pénétration  
 Quantité de chaleur générée  
 ↳ propriétés métallurgiques
- Q<sub>de</sub> de matière déposée par unité de temps  
 ↳ taux de fusion de fil
- Longueur de l'arc et forme du bain de fusion  
 ↳ taux de dépôt
- Apport de chaleur par unité de longueur  
 ↳ largeur du bain & pénétration
- ↳ largeur, hauteur et pénétration



GREMI

ANF Fab3D Métallique, Bourges, 2025

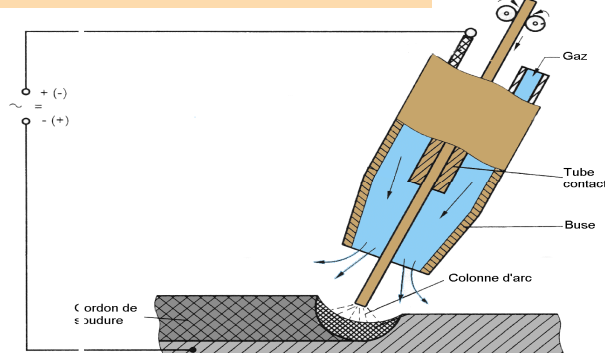
43



# L'arc électrique

## Application: le soudage GMAW

### Schéma de la torche de soudure



### Paramètres de soudage

- ✓ Le débit de gaz
- ✓ La polarisation de l'arc
- ✓ La dimension de l'électrode
- ✓ La distance tube contact-cathode
- ✓ La composition de l'électrode
- ✓ Le mélange gazeux utilisé
- ✓ L'intensité de courant :  $I \div 100 \dots 450 \text{ A}$
- ✓ La vitesse d'avance du fil :  $V_f \div 1 \dots 20 \text{ m/mn}$
- ✓ La tension d'arc :  $U \div 20 \dots 50 \text{ V}$
- ✓ La longueur libre du fil
- ✓ La vitesse de déplacement

### Modes de transfert du métal dans l'arc



GREMI

ANF Fab3D Métallique, Bourges, 2025

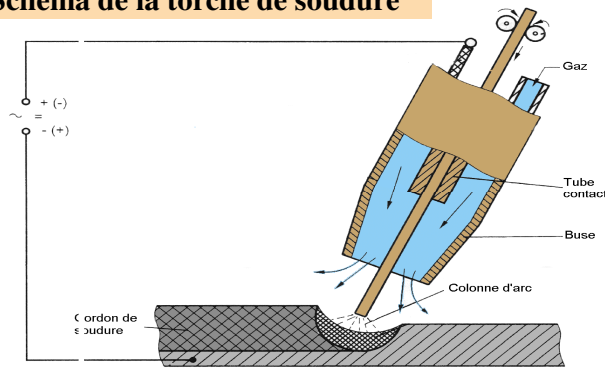
44



# L'arc électrique

## Application: le soudage GMAW

### Schéma de la torche de soudage

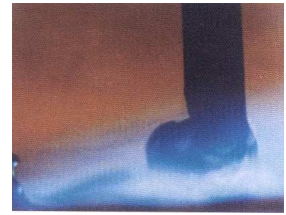
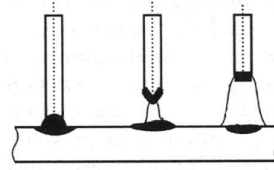


### Paramètres de soudage

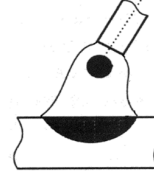
- ✓ Le débit de gaz
- ✓ La polarisation de l'arc
- ✓ La dimension de l'électrode
- ✓ La distance tube contact-cathode
- ✓ La composition de l'électrode
- ✓ Le mélange gazeux utilisé
- ✓ L'intensité de courant :  $I \div 100 \dots 450 \text{ A}$
- ✓ La vitesse d'avance du fil :  $V_f \div 1 \dots 20 \text{ m/mm}$
- ✓ La tension d'arc :  $U \div 20 \dots 50 \text{ V}$
- ✓ La longueur libre du fil
- ✓ La vitesse de déplacement

### Modes de transfert du métal dans l'arc

#### „Courts-circuits”



#### „Transfert Globulaire”

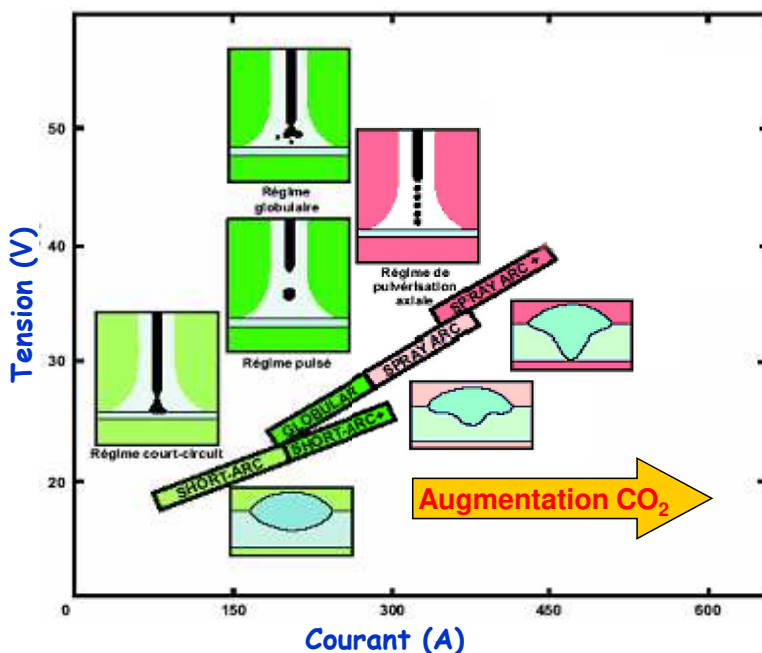


#### „Pulvérisation axiale”



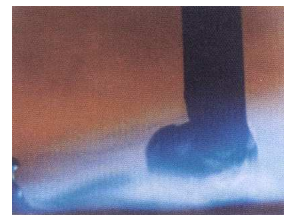
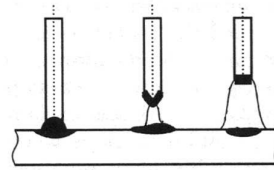
# L'arc électrique

## Application: le soudage GMAW

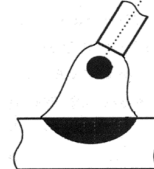


### Modes de transfert du métal dans l'arc

#### „Courts-circuits”



#### „Transfert Globulaire”



#### „Pulvérisation axiale”







# L'arc électrique

## Application: le soudage GMAW

### Interaction arc-métal

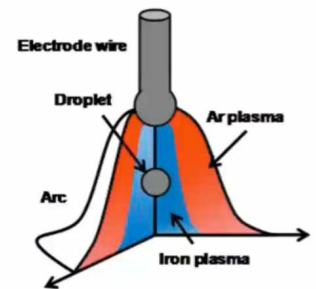
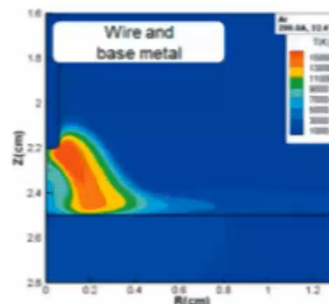
Bilan d'énergie à la cathode, prenant en compte

- l'émission des  $e^-$
- les pertes par rayonnement
- + le flux de chaleur transmis du plasma à la cathode par conduction,
- + la neutralisation des ions

Bilan d'énergie à l'anode, prenant en compte

- les pertes par rayonnement
- le flux de chaleur transmis du plasma à la cathode par conduction,
- + l'absorption des  $e^-$

Ecoulement du métal en fusion est un élément important du transfert de chaleur lors du soudage, et modifie localement les propriétés de l'arc



GREMI

ANF Fab3D Métallique, Bourges, 2025

47

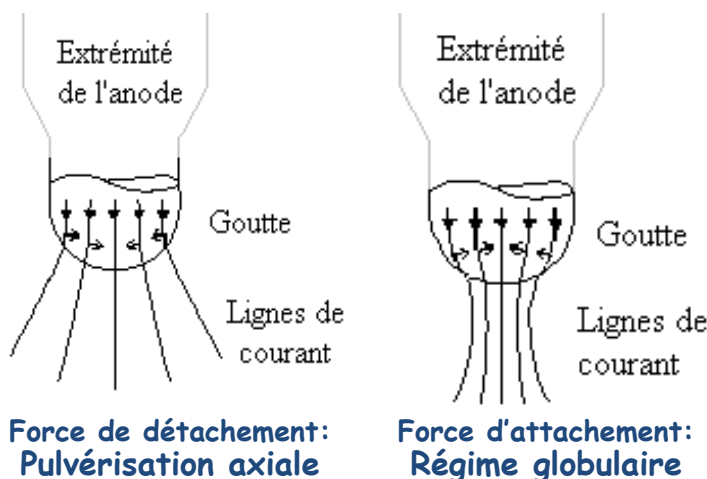


# L'arc électrique

## Application: le soudage GMAW

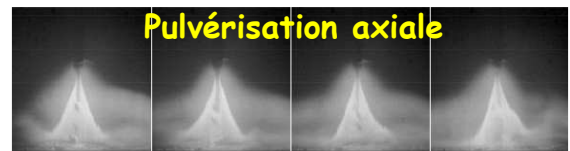
### Interaction arc-fil

- Géométrie des lignes de courant
- ... et Effet sur le transfert de métal dans l'arc



S.Zielinska, Thèse (2005)

**Pulvérisation axiale**



**Régime globulaire**



GREMI



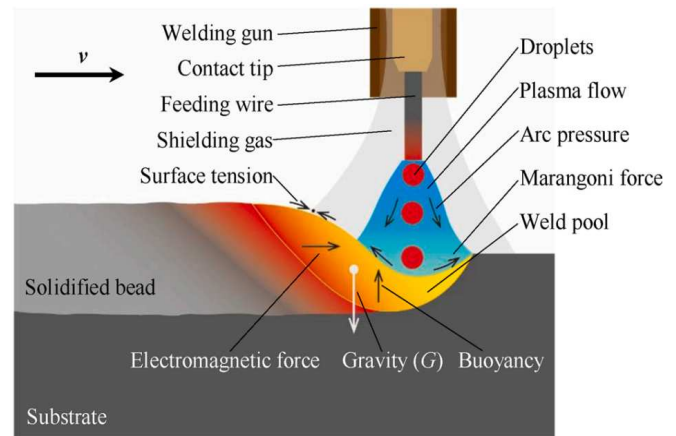


# L'arc électrique

## Application: le soudage GMAW

### Le bain de soudage

- surface déformable, soumise à:
  - Pression de l'arc
  - Impact des gouttes
  - Forces motrices de convection dans le bain de fusion
  - Force électromagnétique ~ Interaction entre l'arc électrique et l'écoulement du fluide ;
  - Force de flottabilité ~ gradient thermique dans le bain de fusion
  - Force de tension superficielle, induite par l'effet Marangoni ~ gradients de tension superficielle résultant des gradients thermiques.
  - Force de traînée de l'arc ~ écoulement de plasma d'arc près de la surface libre



→ **Effet de l'arc sur la structure 'métallique' de la soudure !**

→ **Une difficulté: connaissance des propriétés des métaux liquides à haute T (→3000°C):** tension de surface, viscosité, densité, conductivité thermique



# Le WAAM

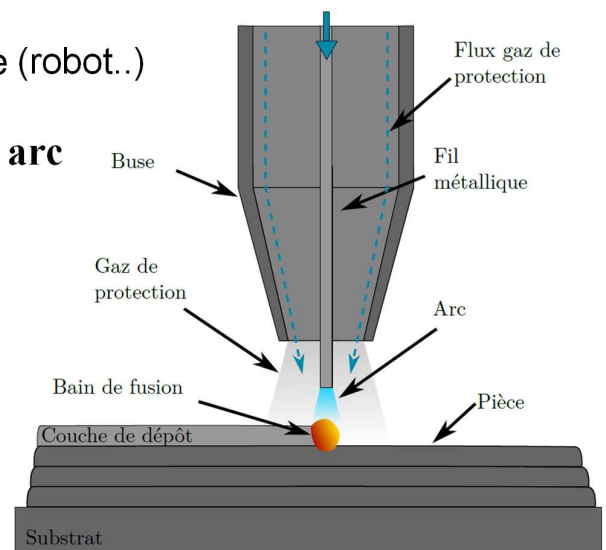
## Wire Arc Additive Manufacturing

### ■ Principe du procédé WAAM

Dépôt couche par couche de métal fondu à partir d'un fil métallique:

- Fusion du fil par arc électrique (GMAW ou TIG)
- Formation d'un cordon qui se superpose aux couches précédentes
- Répétition du processus couche par couche jusqu'à obtenir la géométrie finale
- Contrôle automatique du mouv<sup>t</sup> de la torche (robot..)

→ **Extension des procédés de soudage par arc**





### ■ Principe du procédé WAAM

Dépôt couche par couche de métal fondu à partir d'un fil métallique:

- Fusion du fil par arc électrique (GMAW ou TIG)
- Formation d'un cordon qui se superpose aux couches précédentes
- Répétition du processus couche par couche jusqu'à obtenir la géométrie finale
- Contrôle automatique du mouvement de la torche (robot..)

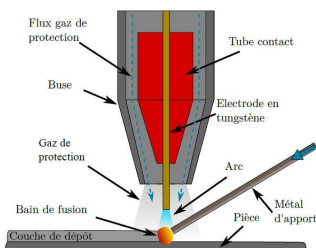
→ **Extension des procédés de soudage par arc**



Fabrication de **pièces métalliques de grande taille, à faible coût, avec des vitesses de dépôt élevées.**



### ■ Des technologies basées sur celles du soudage

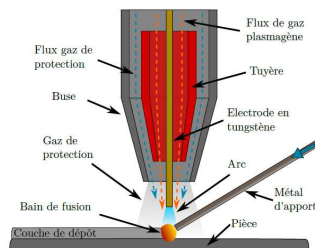


**GTAW**

Précision

Qualité de surface élevée

Titane, superalliage

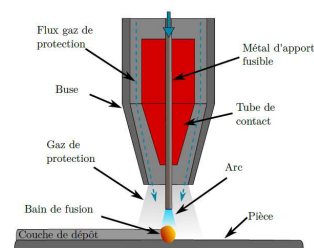


**PAW**

Densité d'énergie élevée

Meilleure pénétration

Matériaux difficiles à souder



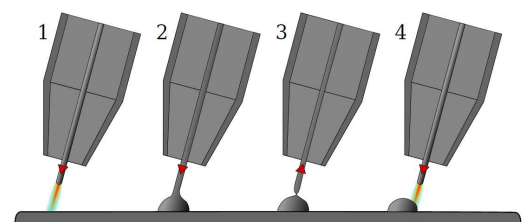
**GMAW**

Approvisionnement colinéaire

Taux de dépôt élevé

Coût relativement faible

Acier, Alu, Titane



**CMT: Cold Metal Transfer**

Stabilité de l'arc

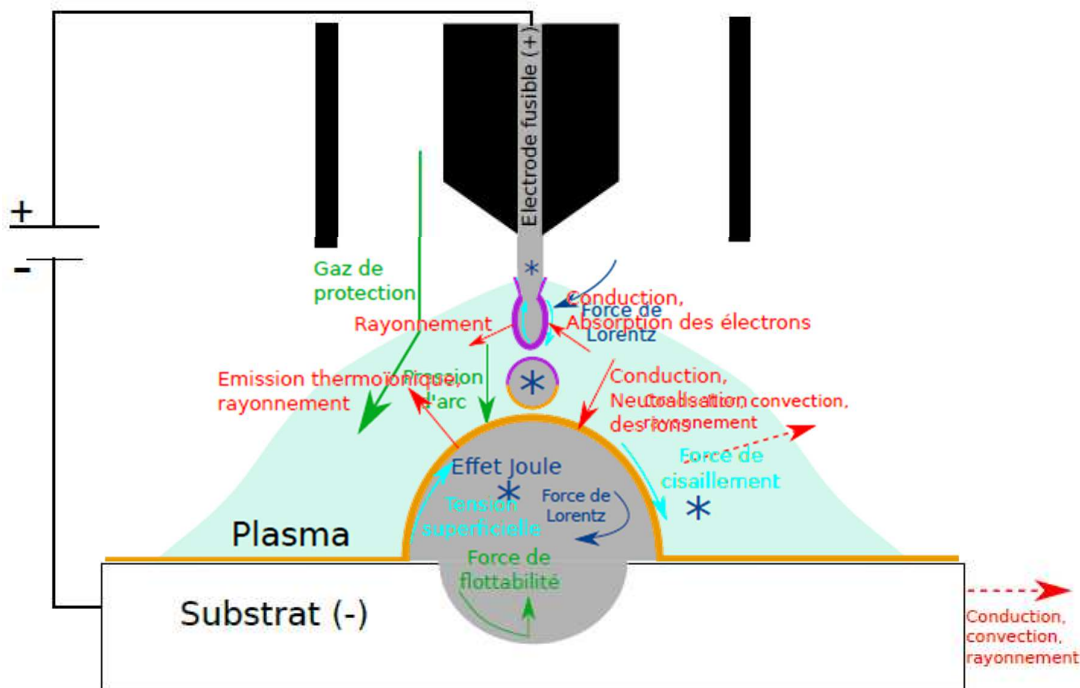
Faible apport de chaleur

### Contrôle du Procédé WAAM:

Une augmentation de  $I_{arc}$  (et de vitesse d'avance du fil), combinée à une diminution de la vitesse de déplacement permet d'augmenter la hauteur et la largeur du cordon.



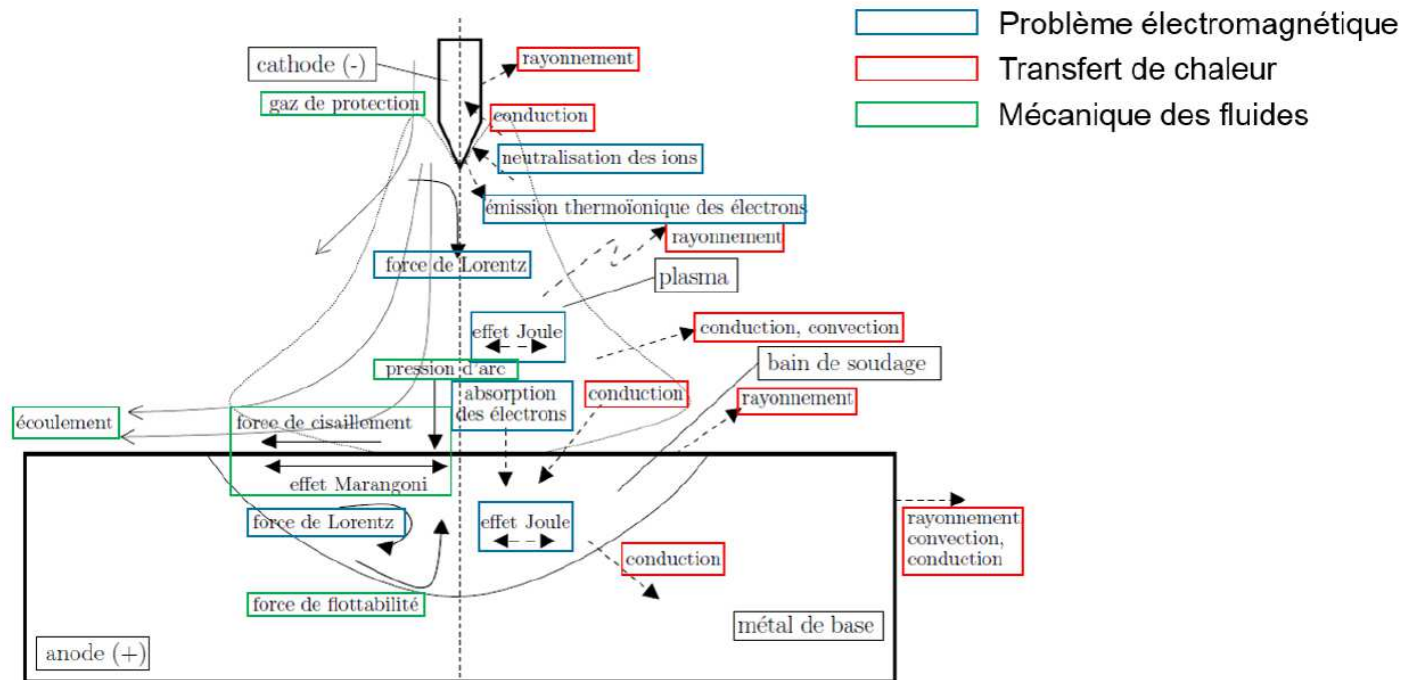
### un problème multiphysique



Cas du GMAW → fil anode



### un problème multiphysique



Cas du GTAW → fil cathode



### un problème multiphysique

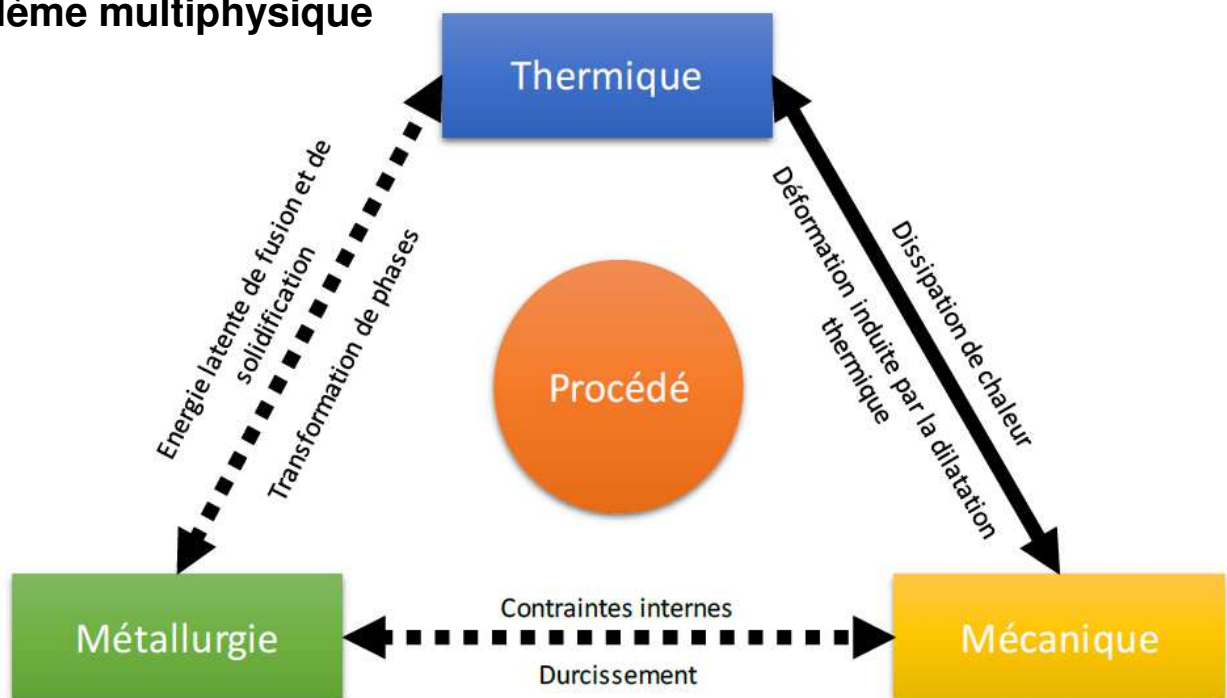


Diagramme d'interactions entre le problème mécanique, métallurgique et thermique au cours du procédé de fabrication additive métallique



### AVANTAGES

- Taux de dépôt élevé, meilleure rentabilité
- Coût réduit, tant équip<sup>ts</sup> que matériaux
- Grandes dimensions
- Grande flexibilité de conception
- Large disponibilité des matériaux
- Possibilité de fabrication hybride
- Possibilité de combiner des matériaux
- Réduction des déchets
- Rechargement possible

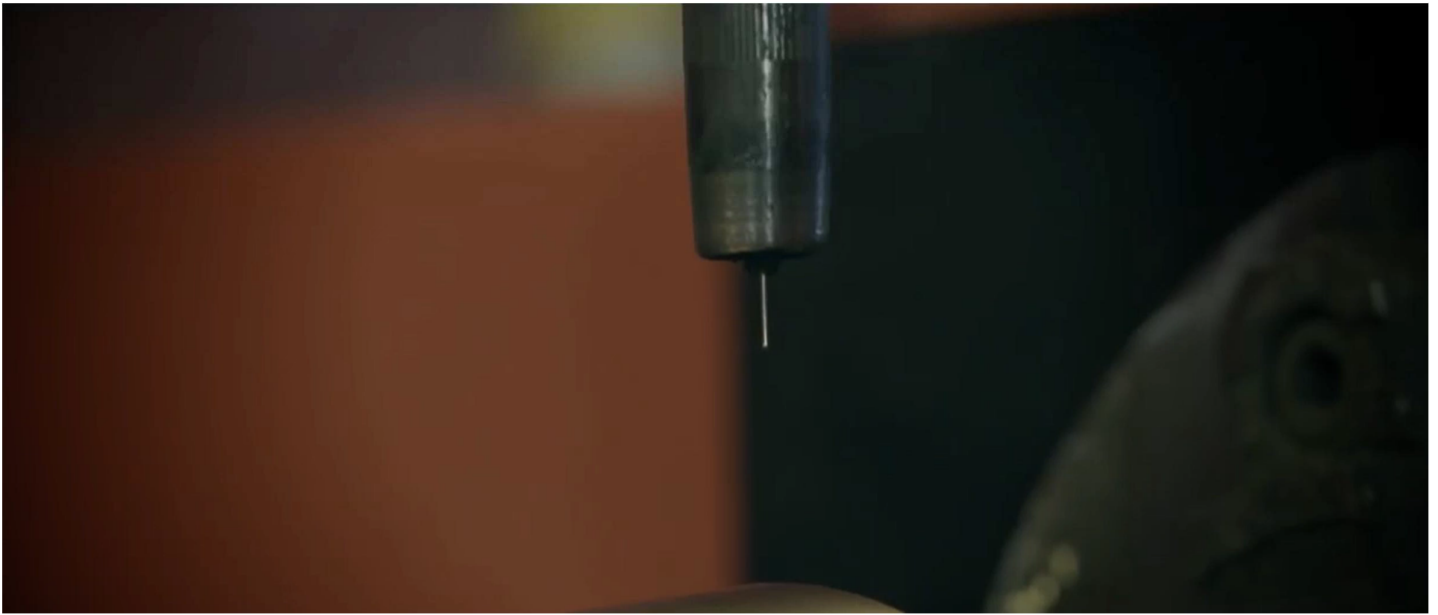
### LIMITES

- Résolution limitée
- Contraintes résiduelles et traitements post-fabrication
- Nécessite d'opérations de finitions
- Anisotropies des propriétés
- Contrôle des températures inter-passe

### PROBLEMATIQUES ACTUELLES

- Optimisation topologique et stratégie de dépôt
- Contrôle en temps réel
- Développement de nouveaux matériaux





WAAM (Wire Arc Additive Manufacturing) → technologie clé dans l'industrie manufacturière, avec des perspectives prometteuses pour l'avenir.



# Merci pour votre attention !

### Références

- <https://hitopindustrial.com/fr/soudage-tig-vs-soudage-mig/>
- « Arc électrique », Serges Vacquié, Technique de l'Ingénieur, 2015
- « Arc Électrique et Application au WAAM », cours d'Ingenierie, 2025
- « Propriétés physiques du plasma MIG-MAG », S.Zielinska, Thèse 2005
- « L'arc électrique : historique et état de l'art », Alain Gleizes, séminaire AAE, 2023
- « Etude du soudage MIG-MAG en polarité directe », Quentin Castillon, Thèse 2026
- « Caractérisation expérimentale d'un arc impulsif », Pascal L. Ratovoson, Thèse 2015
- « Plasmas thermiques : aspects fondamentaux », Pierre Fauchais, Technique de l'Ingénieur, 2005
- « Modélisation magnéto-thermohydraulique de procédés de fabrication additive arc-fil (WAAM) », Stephen Cadiou, Thèse 2019
- « Contribution à l'étude des phénomènes liés aux effets anodiques et cathodiques en soudage MIG-MAG », F.Valensi, Thèse 2007
- « Development in plasma arc welding process: A review », A. Sahoo & S. Tripathy, Materials Today: Proceedings 41 (2021) 363–368
- « Génération de trajectoires adaptatives pour pièces coques et pièces épaisses réalisées en fabrication additive par soudage à l'arc », A.Giordano, These 2024
- « Procédé de fabrication additive par dépôt de fil fondu: modèle, méthodes et stratégies pour la correction de défaut de pièce mécanique », Valentine Cazaubon, These 2021
- « Comprehensive review of WAAM: Hard.syst., phys. process, monitoring, property characterization, app. and future prospects », Yan Li et al, Results in Engineering, 23, 2022