

Plasmas & Arcs électriques : Application au WAAM

La Fabrication Additive par arcs électriques

Stéphane Pellerin

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

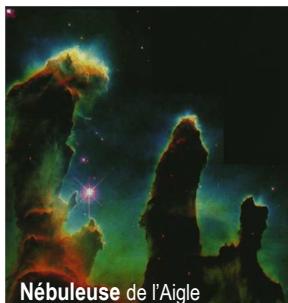


Sommaire

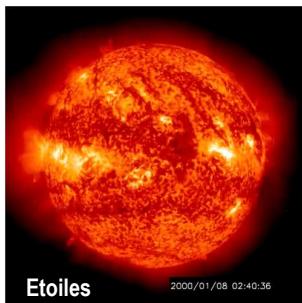
- **Les plasmas dans la nature**
- **Des arcs et décharges, aux Plasmas**
- **Qu'est ce qu'un plasma**
- **Propriétés des plasmas**
 - Effets collectifs
 - Longueur de Debye
 - Densités et Températures
 - Plasmas froides et Plasmas thermiques
 - Processus Fondamentaux
 - Notions d'équilibre
 - Compositions, 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...



Nébuleuse de l'Aigle



Etoiles



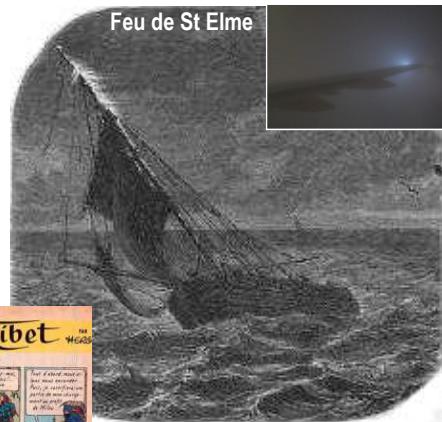
Comète Hale-Bopp



Foudre et TLE



Aurore Polaire



Feu de St Elme



Arc dans les nuées volcaniques



99% de l'Univers...



Des arcs...

1800: La Pile Volta



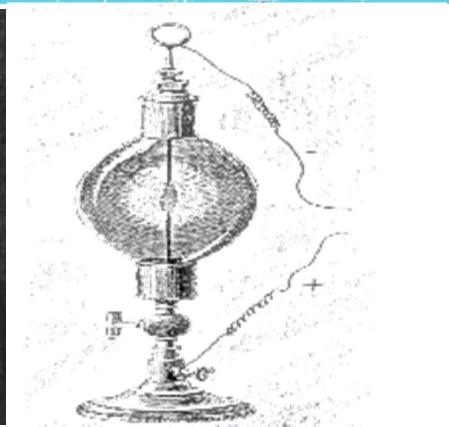
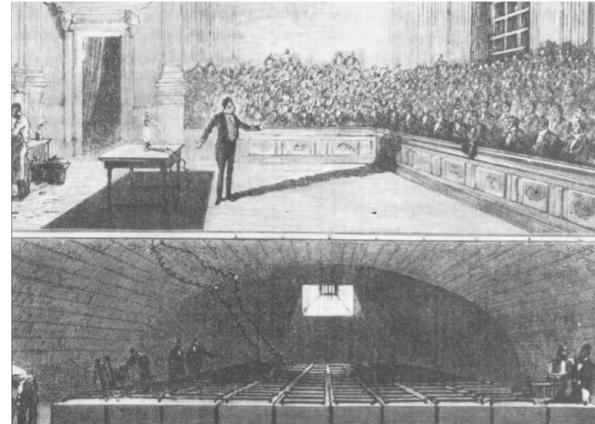
réalisée par l'empilement de disques de cuivre et de zinc séparés par du drap imbibé d'acide sulfurique dilué



Alessandro Volta (1745-1827)



Humphrey Davy (1778-1829)



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





Des arcs...

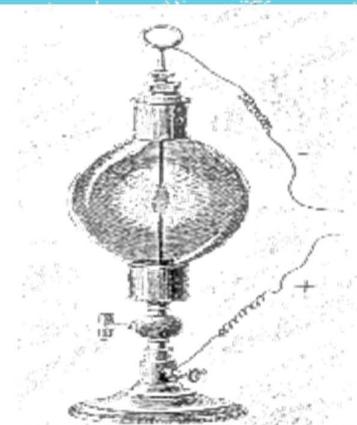
1800: La Pile Volta



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

...

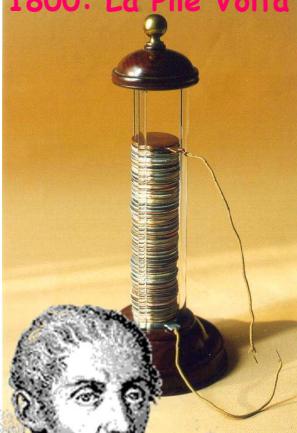


Des arcs...

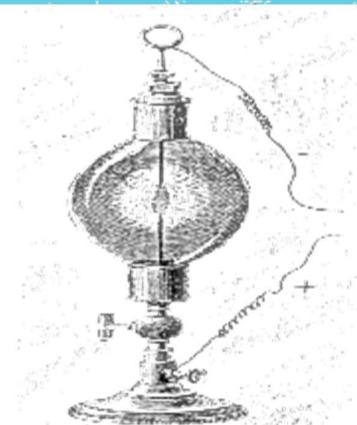
1800: La Pile Volta



Alessandro Volta (1745-1827)



Humphrey Davy (1778-1829)



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

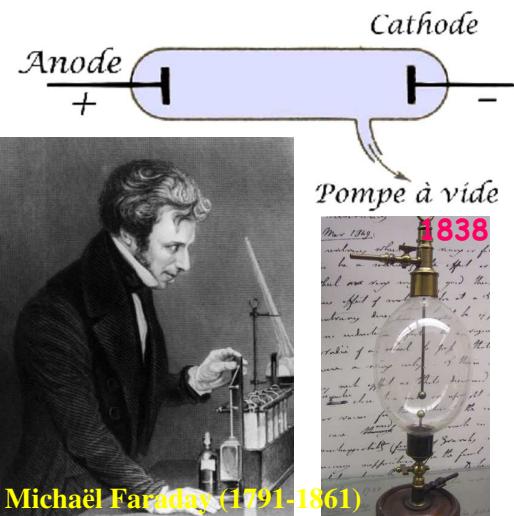
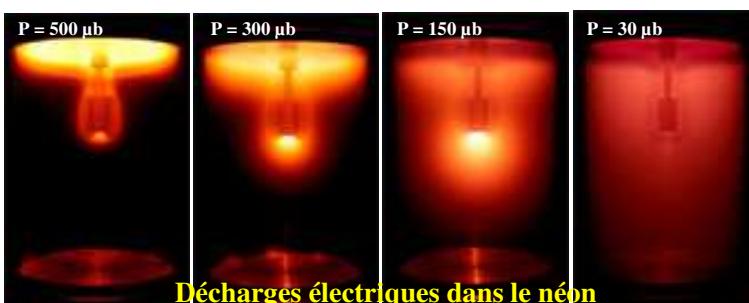
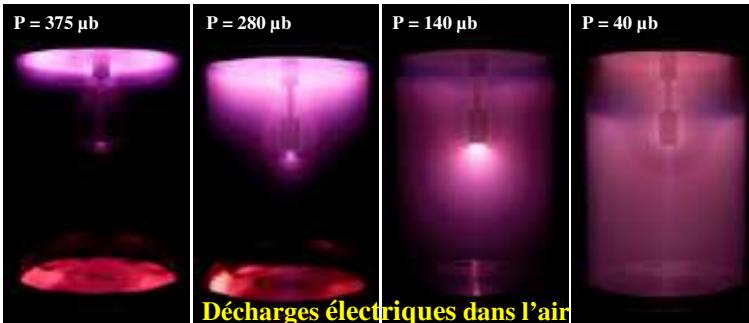
Dès 1880, les 3 propriétés fondamentales de l'arc électrique donnaient lieu à des applications:

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



Des arcs et décharges...

Les décharges électriques dans les gaz

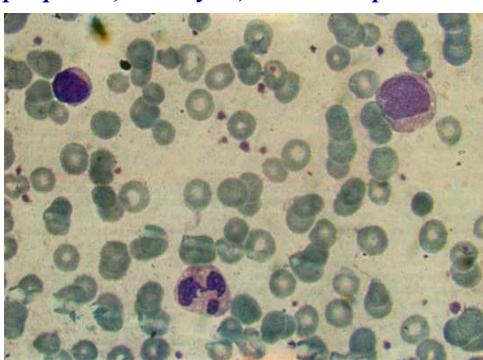


« La luminosité d'un gaz fortement raréfié et excité par une décharge électrique représente un 4^{eme} état de la matière »

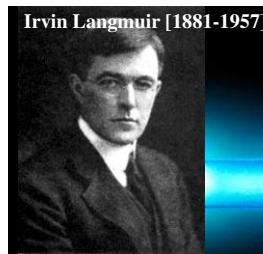


Des arcs et décharges... aux « plasmas » !

¶ 1855: "Partie liquide du sang, au sein de laquelle les éléments figurés (hématoctyes, 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."

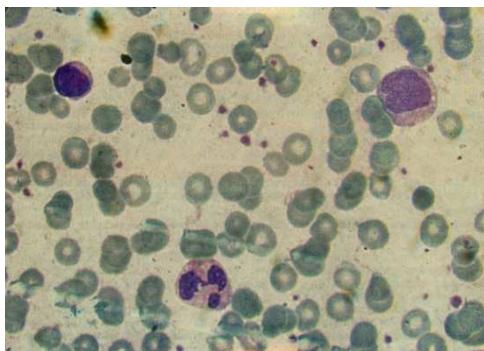


¶ 1928: Plasma Electrique = "Substance malléable, conductrice de l'électricité, qui existe entre l'électrode et la paroi des décharges électriques."



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

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

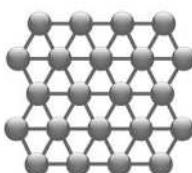


Définitions

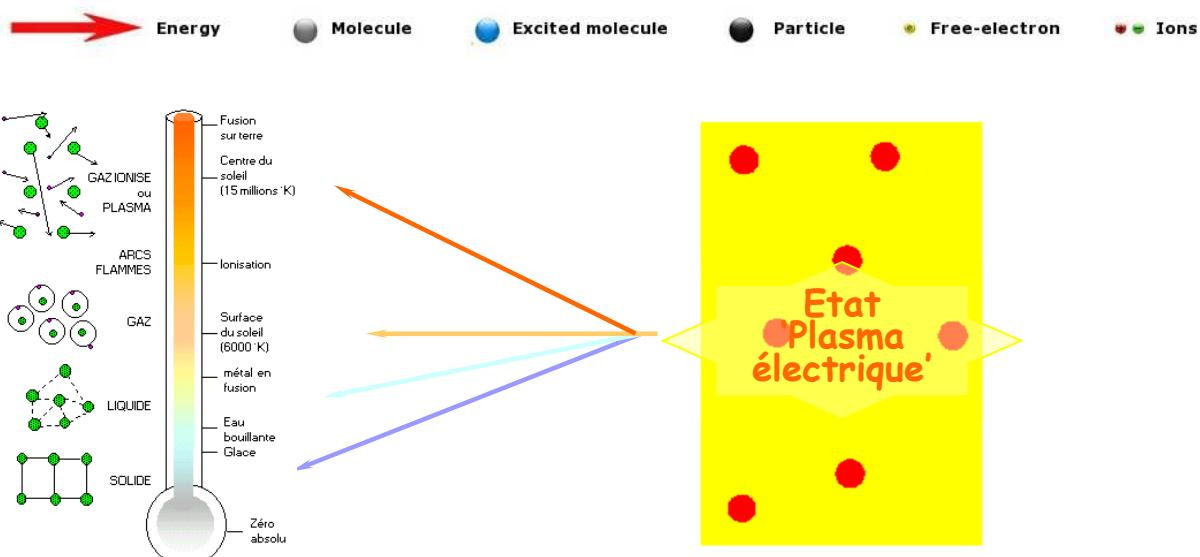
- ↳ **Plasma électrique:** "Substance malléable, conductrice de l'électricité, qui existe entre l'électrode et la paroi des décharges électriques." (1928)
- ↳ **Plasma:** "Etat dilué de la matière analogue à un gaz porté à haute température, formé d'un ensemble d'électrons et d'ions en équilibre avec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



Qu'est ce qu'un plasma ?

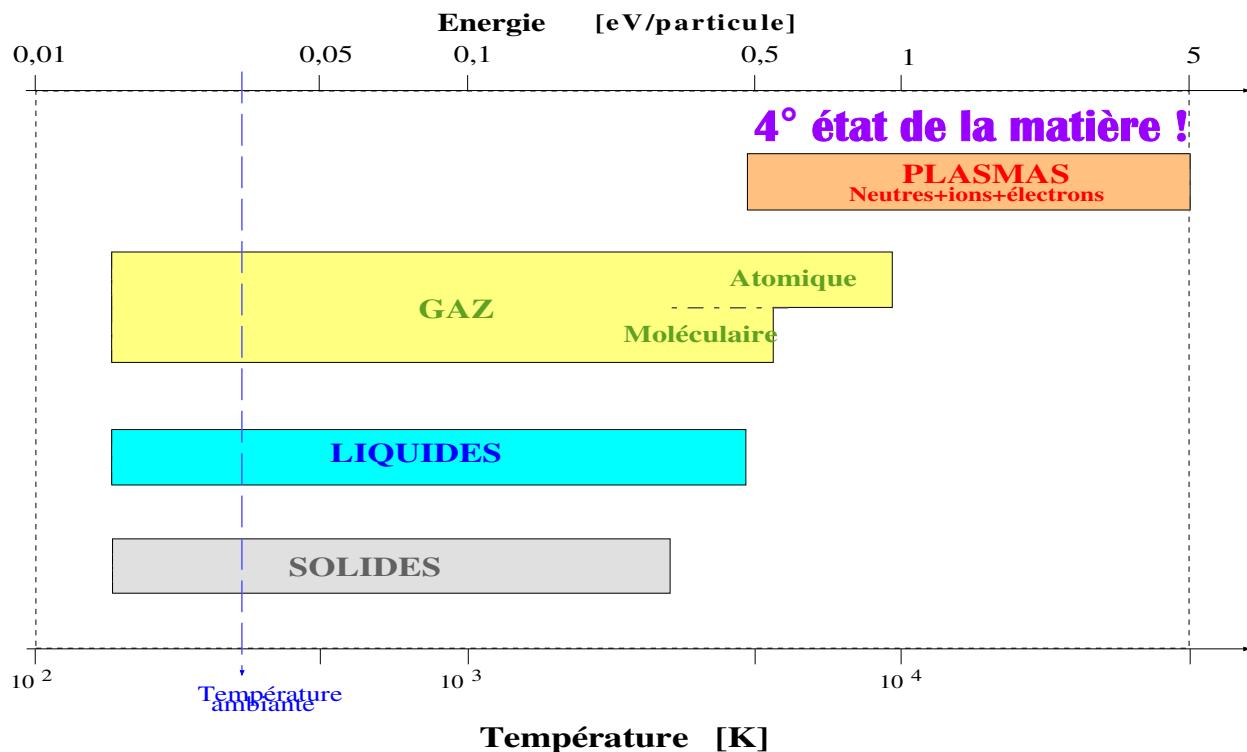


Solid





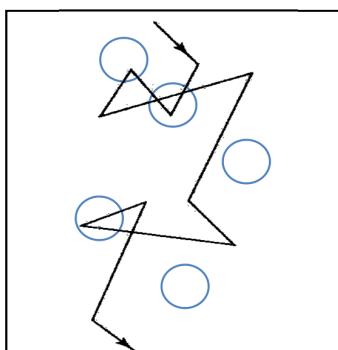
Qu'est ce qu'un plasma ?



Propriétés des plasmas

Des effets collectifs

GAZ

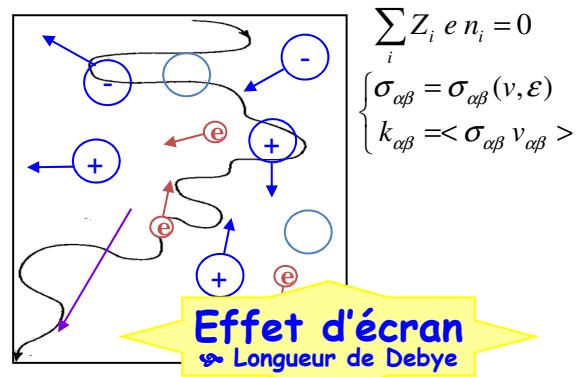


$$\begin{cases} \sigma = \pi r^2 \\ v = n\sigma \bar{v} = 1/\tau \\ \lambda = \tau \bar{v} = 1/(n\sigma) \end{cases}$$

atomes, molécules

- ↳ neutre
- ↳ isolant électrique
- ↳ mouvement aléatoire

PLASMA



atomes, molécules, radicaux
ions, électrons
lumière

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

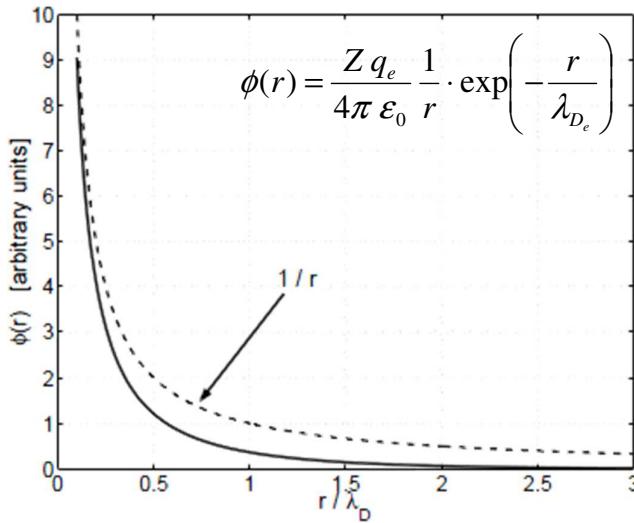


Propriétés des plasmas

Longueur de Debye

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

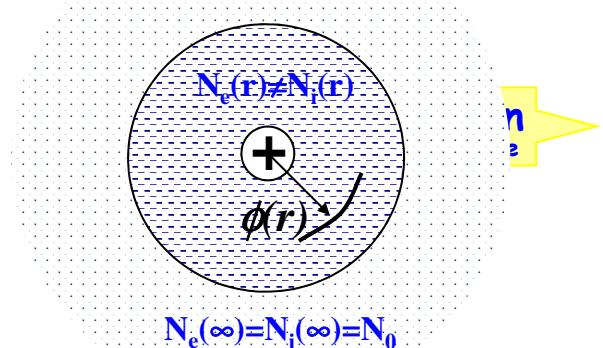
$$\lambda_{D_e} = \sqrt{\frac{\epsilon_0 \cdot k_B T_e}{n_e \cdot q_e^2}} \quad (\text{cas d'un plasma une fois ionisé})$$



Plasma une fois ionisé

Accumulation d'e⁻ autour d'une charge +Z.q_e

⇒ Ecrantage du potentiel créé



⇒ effets collectifs, longue portée



Propriétés des plasmas

Longueur de Debye

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

$$\rightarrow \text{degré d'ionisation: } \alpha = \frac{n_e}{n_e + n_0}$$

↪ **Distributions en énergie**

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

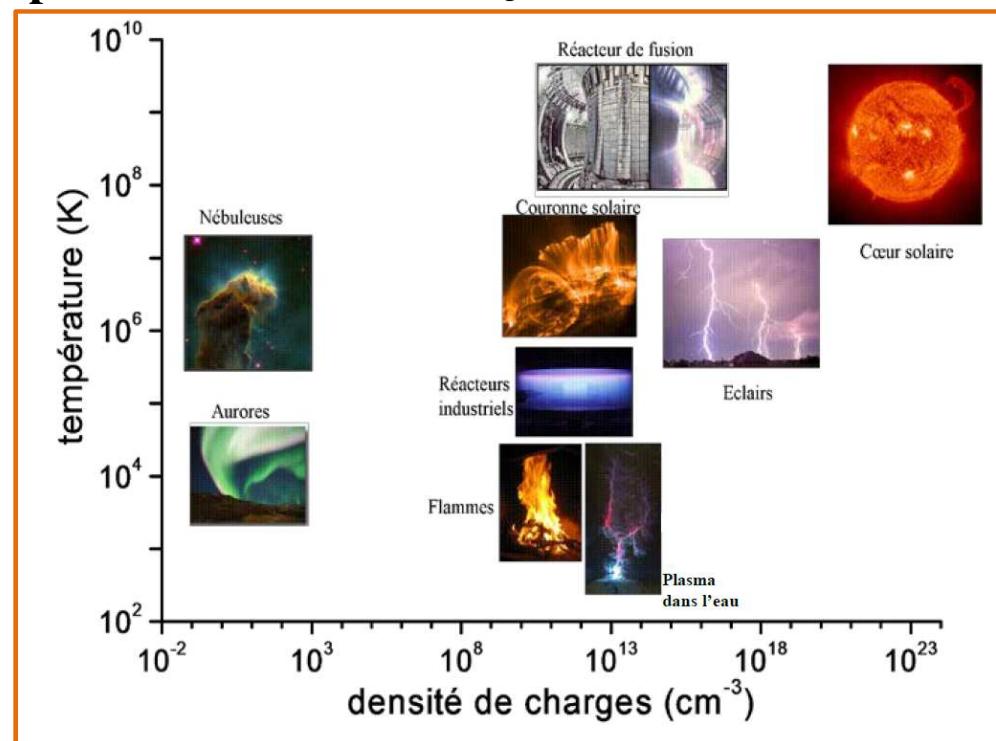
⇒ **Températures** $T_j(r)$



Propriétés des plasmas

Densités et Températures

Classification des plasmas en fonction de leur température et leur densité

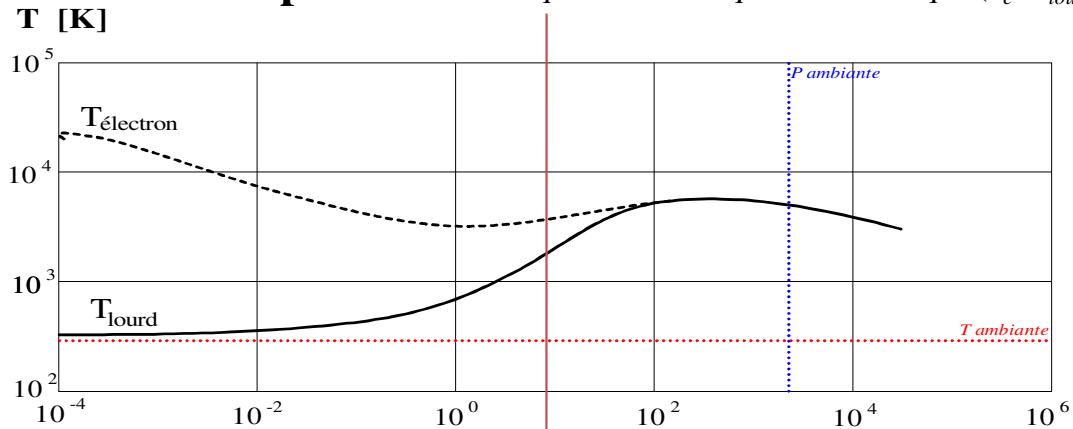




Propriétés des plasmas

Plasma Froid & Plasma Thermique

Classification des plasmas



Plasma 'FROID': $T_e > T_{lourd}$

↳ bonne sélectivité; utilisé en plasma-chimie (dépollution, trait^t de surface, stérilisation...)

Plasma 'THERMIQUE': $T_e \approx T_{lourd}$

↳ source d'enthalpie (découpe, soudage...), mais mal adaptée à la chimie des plasmas

- $\alpha=1$: 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

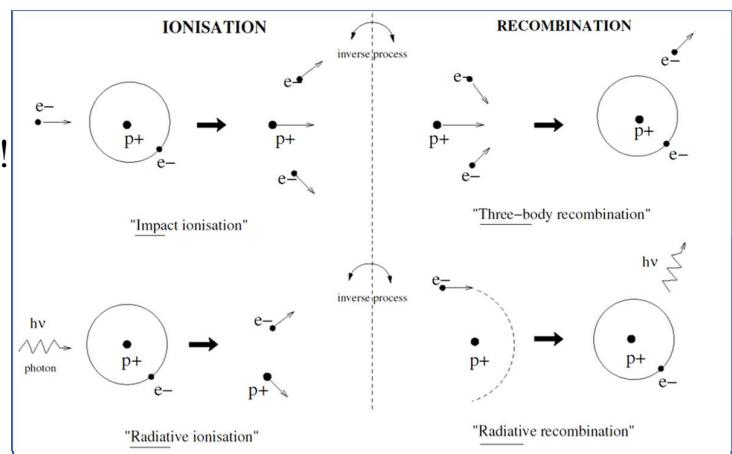


Propriétés des plasmas

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 électro-nique/Recombinaison à 3 corps!



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

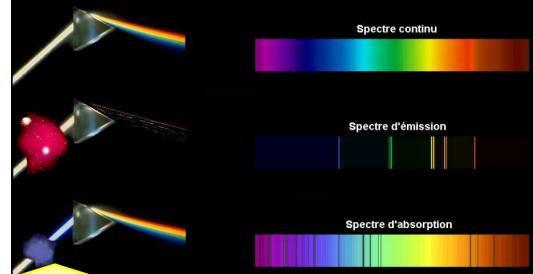
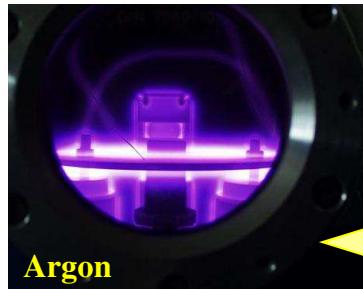
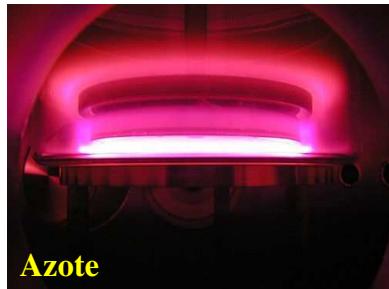


Propriétés des plasmas

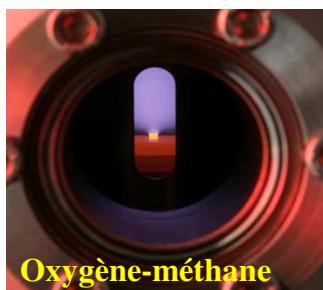
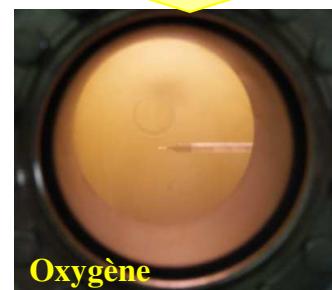
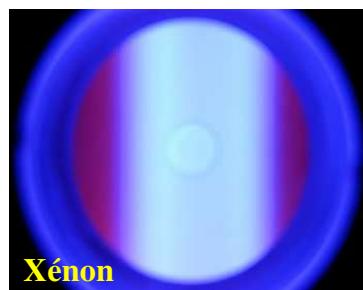
Processus fondamentaux

Les processus fondamentaux

→ Des processus radiatifs



La Spectroscopie
un moyen efficace
d'analyse



Propriétés des plasmas

Notions d'équilibres

↪ 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 Recombinations radiatives prédominantes

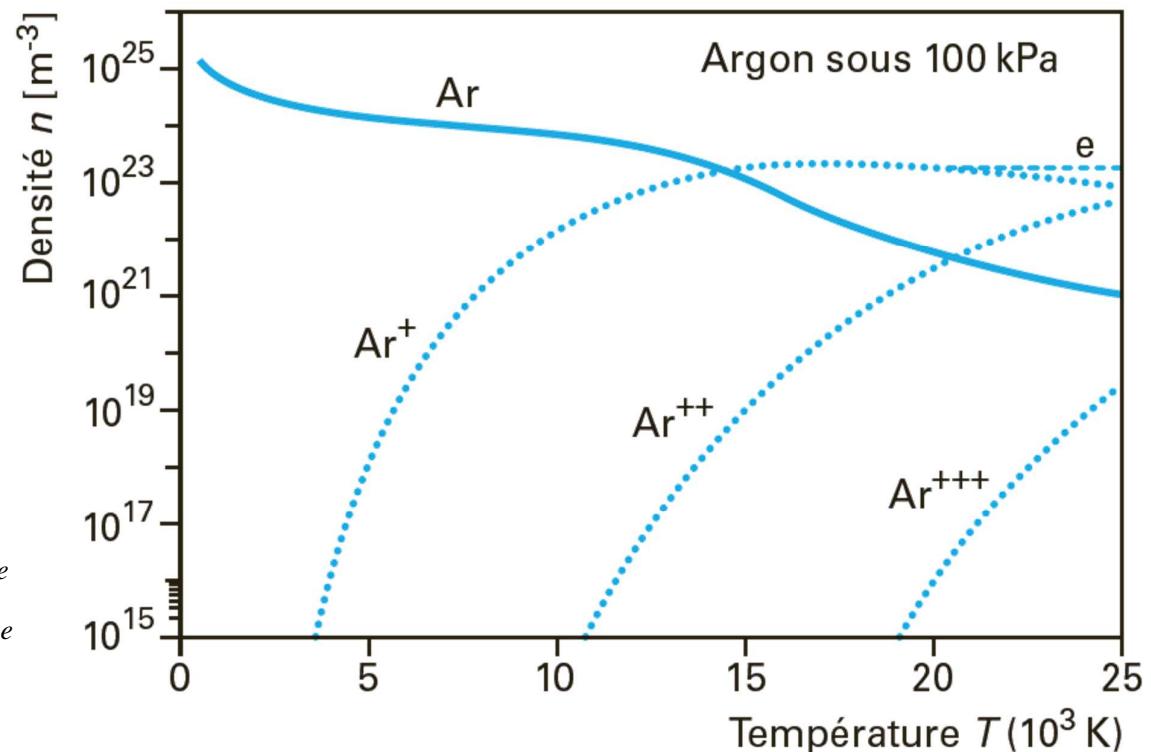


Propriétés des plasmas

Composition des plasmas en ETL

ETL → Composition d'équilibre

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

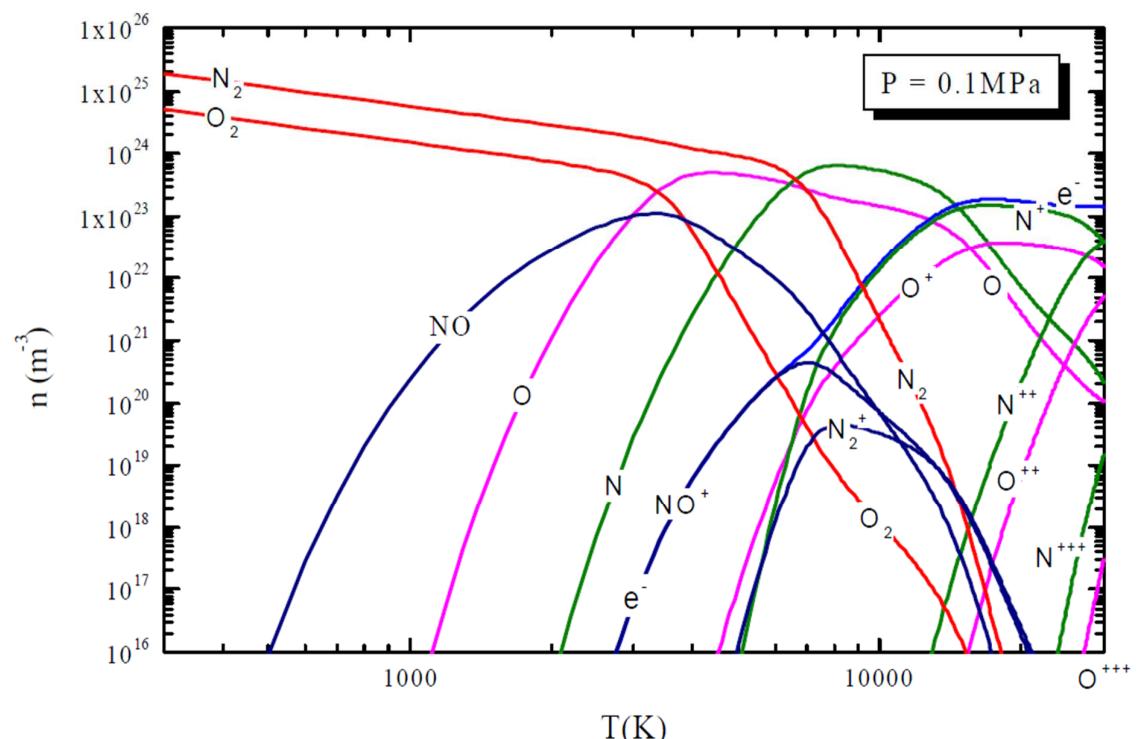


Propriétés des plasmas

Composition des plasmas en ETL

ETL → Composition d'équilibre

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

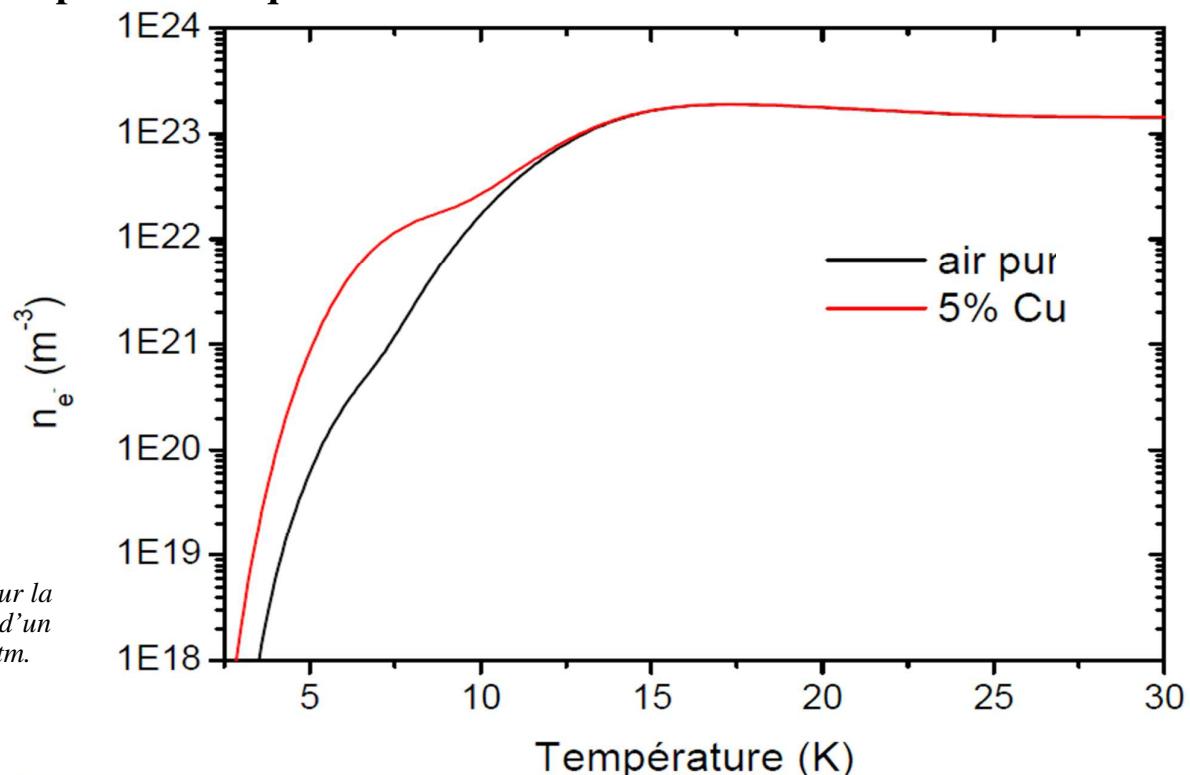




Propriétés des plasmas

Composition des plasmas en ETL

ETL → Composition d'équilibre



GRENI

ANF Fab3D Métallique, Bourges, 2025

25



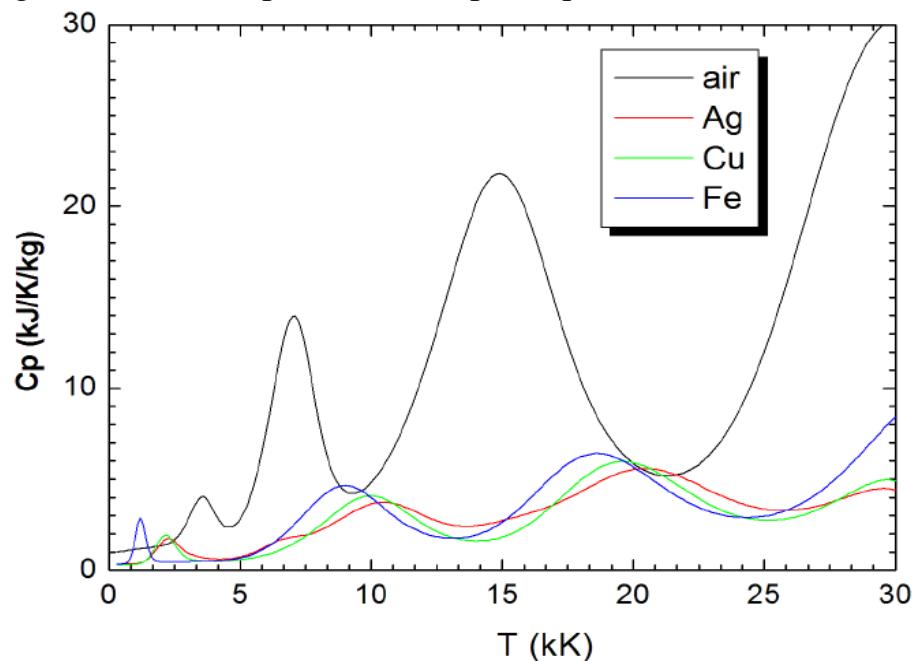
Propriétés des plasmas

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



GRENI

ANF Fab3D Métallique, Bourges, 2025

26



Propriétés des plasmas

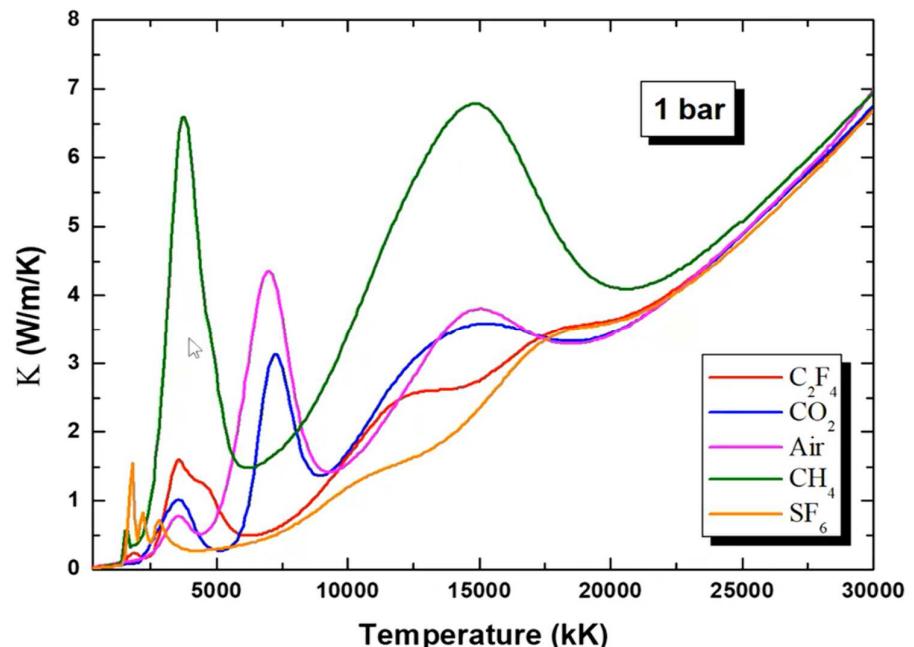
Coefficients de transport

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

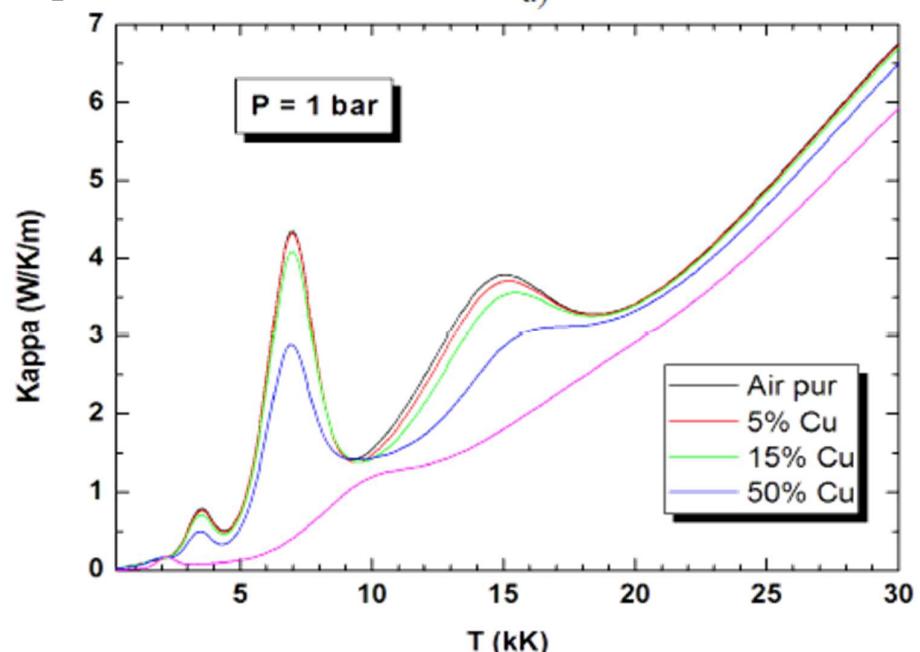
Coefficients de transport

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





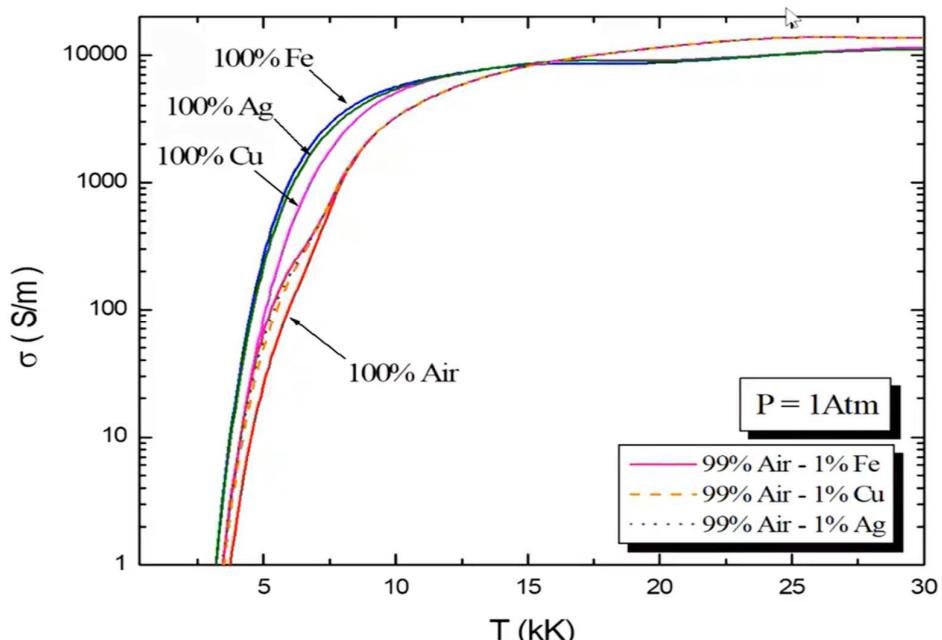
Propriétés des plasmas

Coefficients de transport

ETL + composition

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

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



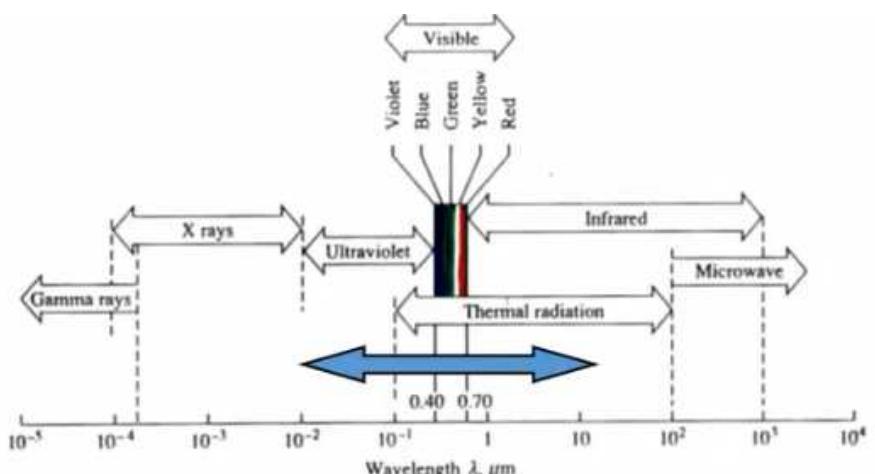
Propriétés des plasmas

Rayonnement

Rayonnement:

Spectre très étendu de l'IR (peu) jusqu'au 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





Propriétés des plasmas

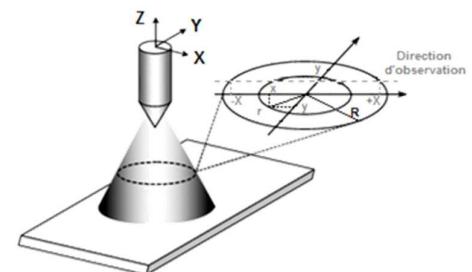
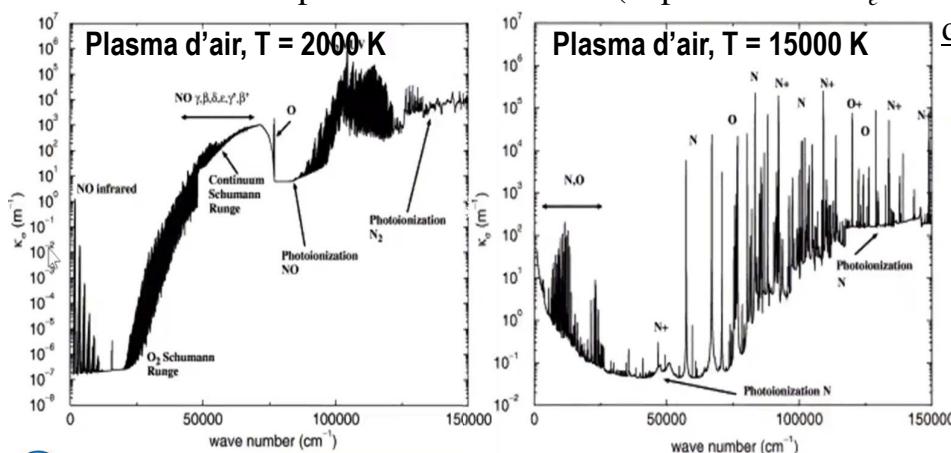
Rayonnement

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

- 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



ANF Fab3D Métallique, Bourges, 2025

31



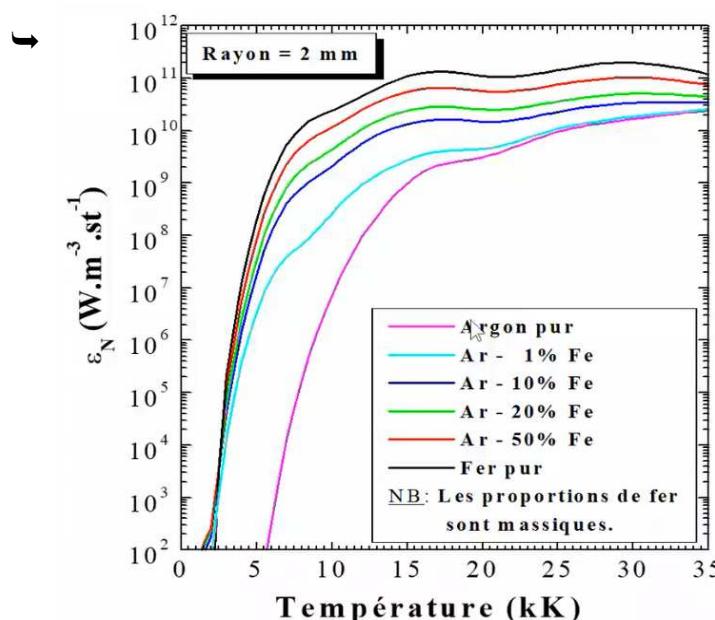
Propriétés des plasmas

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



valeur de T , il faut évaluer la ; les mécanismes d'émission et compris les élargissements et de T_e)... en tenant compte des distributions radiales de T_e et N_e et des inhomogénéités.

Effet des vapeurs métalliques



ANF Fab3D Métallique, Bourges, 2025

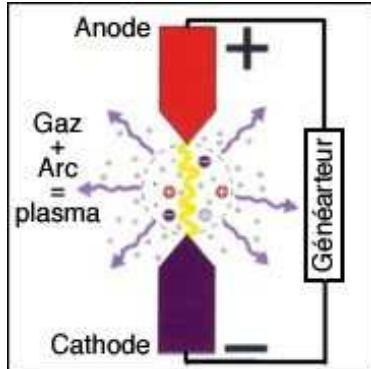
32



Pour obtenir un plasma...

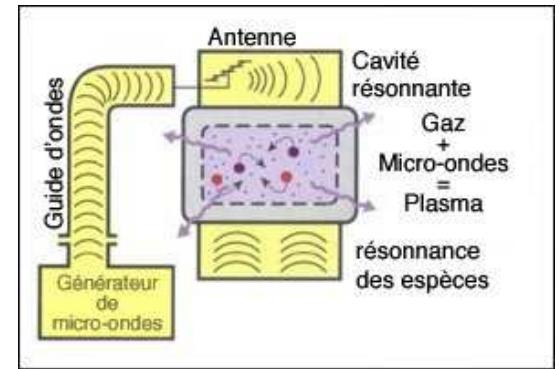
**IL FAUT FOURNIR DE L'ENERGIE A UN GAZ
pour engendrer des collisions
et
arracher des électrons des atomes**

Existences d'électrodes,
Champ électrique important



1 électron,
et c'est l'Avalanche!

Absences d'électrodes,
Champ e.-m. variable (BF, RF, 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



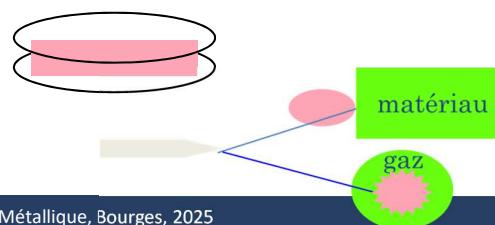
- Arcs électriques



- Torches



- Antennes



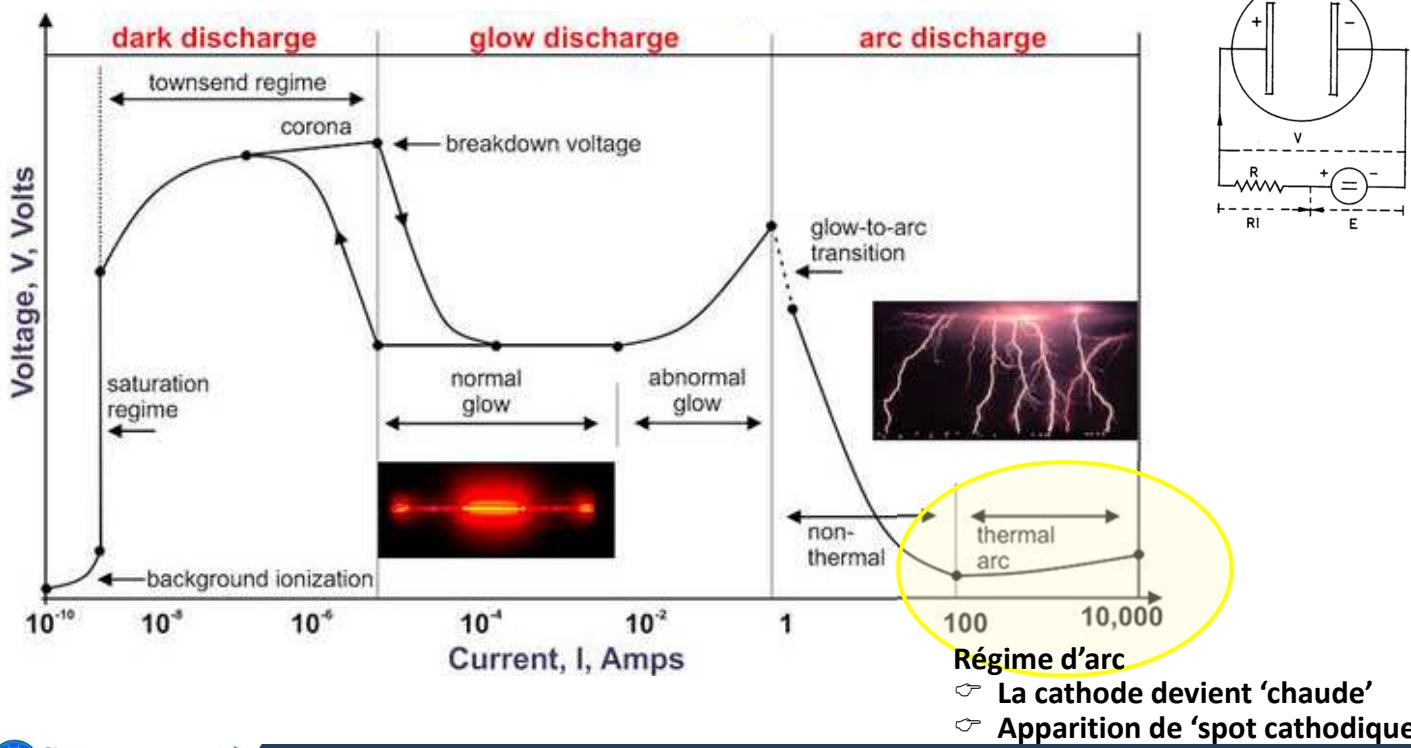
- Lasers



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

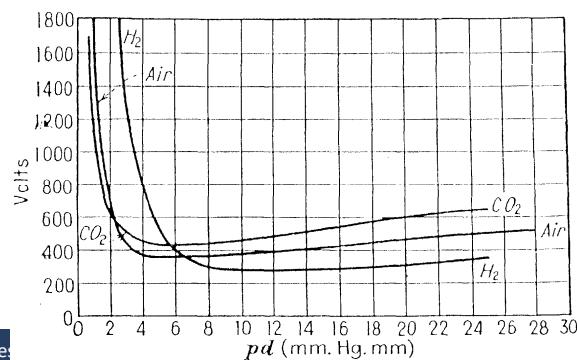
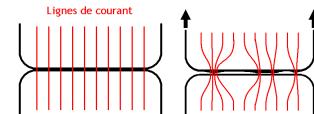
Définitions

Définitions

- « Arc électrique: "Un arc est une décharge auto-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]

Armorçage d'un arc

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



37



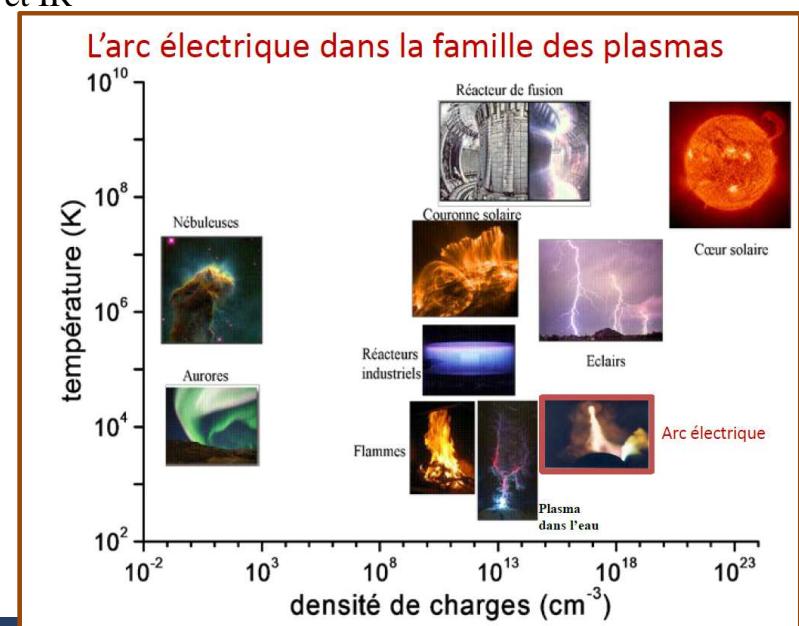
L'arc électrique

Caractéristiques

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

→ **plasmas thermiques**, caractérisés par:

- Forte densité de puissance (→ 100 kW.cm⁻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 m.s⁻¹)
- Milieu **chimiquement réactif**

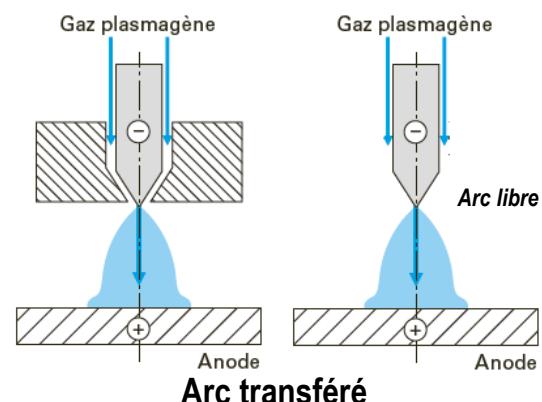
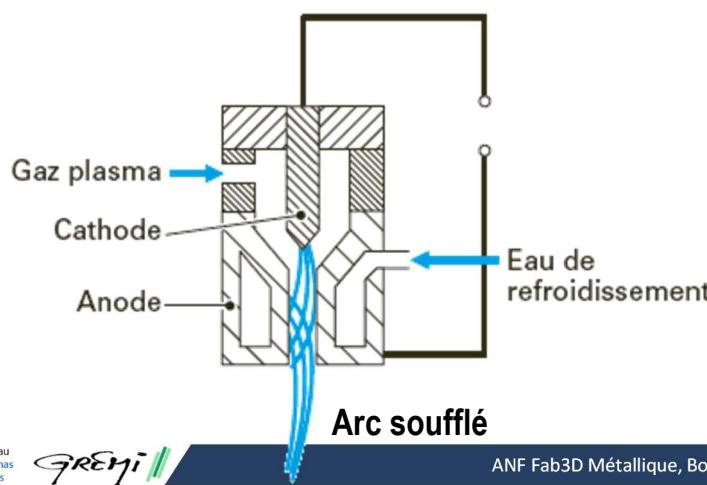




Les arcs électriques à pression atmosphérique sont établis entre deux électrodes;

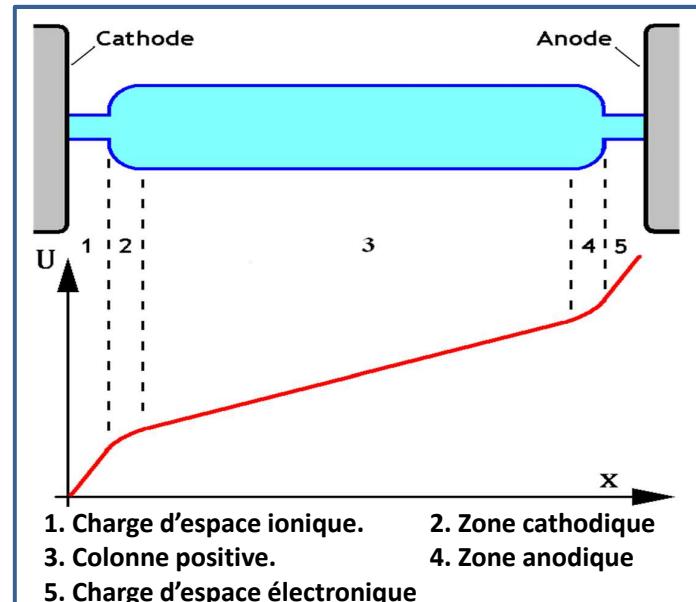
→ **plasmas thermiques**, caractérisés par:

- Forte densité de puissance (→ 100 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 MV.m^{-1} dans la gaine
- Très forts gradients de température



- Transition entre le contact solide ($\sigma \approx 6 \cdot 10^7 \text{ S.m}^{-1}$ 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 MV.m^{-1} dans la gaine
 j de 10^6 à 10^8 A.m^{-2}
 Flux de chaleur de 10^7 à 10^9 W.m^{-2}

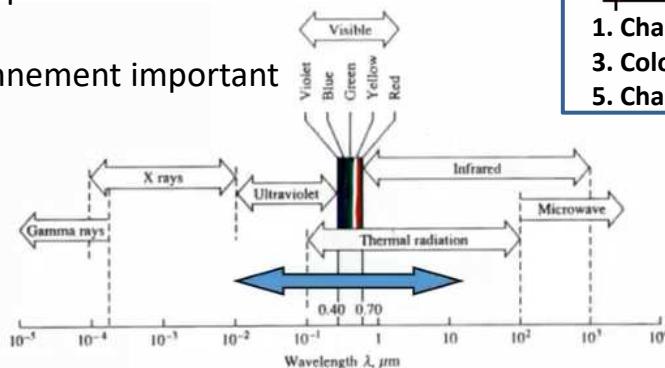
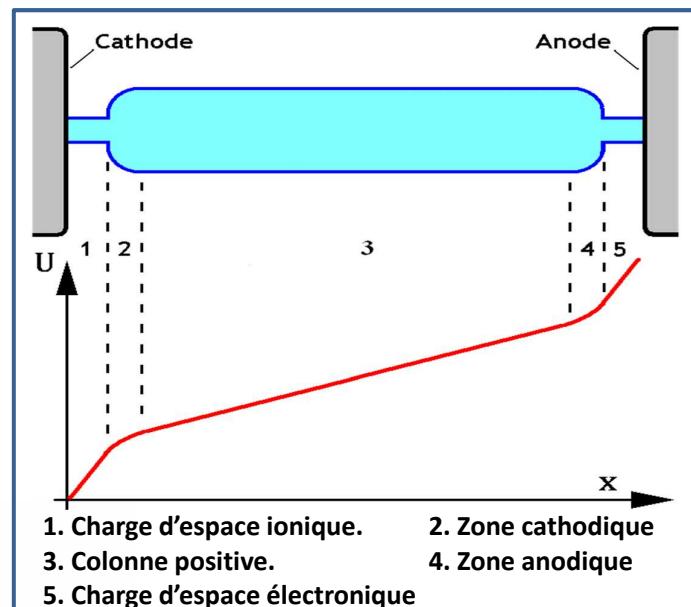


L'arc électrique

Répartition de potentiel entre les électrodes

Colonne d'arc:

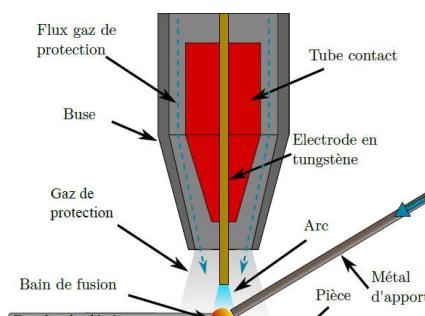
- Macroscopiquement neutre,
- Répartition du potentiel linéaire / champ électrique constant et faible
- $\alpha > 1\%$, $N_e > 10^{22} \text{ m}^{-3}$
- Plasma thermique avec $T_e \approx \text{kK}$
- ETL en première approximation, *mais en toute rigueur* $T_e \geq T_g \dots$
- Réactivité du plasma \rightarrow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



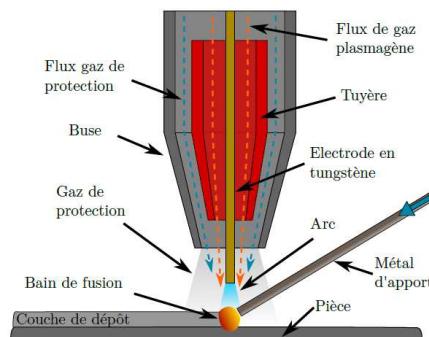
L'arc électrique

Application: le soudage à l'arc

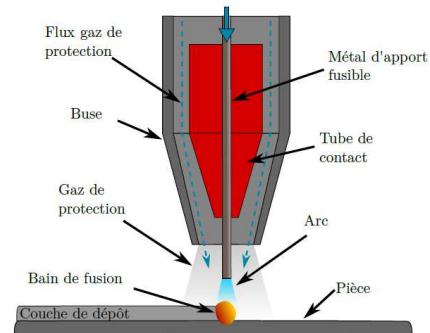
Soudage à l'arc: procédé pour lequel la fusion de la matière est assurée par l'apport de chaleur localisé, générée par un arc électrique se créant entre la pièce à souder et une électrode.



GTAW: Gas Tungsten Arc Welding
Précision accrue et excellente qualité de soudure



PAW: Plasma Arc Welding
Augmentation de la densité d'énergie,
Pénétration plus importante
vitesse de soudage élevée



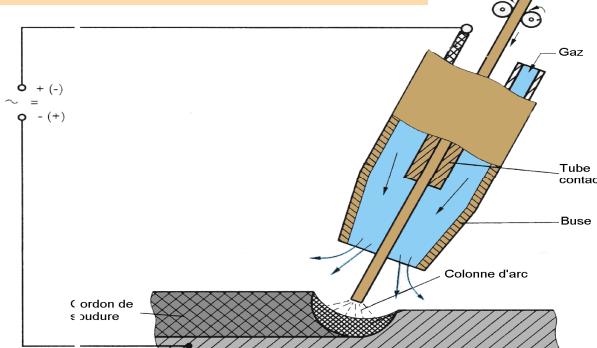
**GMAW : Gas Metal Arc Welding
(ou MIG-MAG)**
Taux de dépôt élevé



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
- ✓ La vitesse d'avance du fil
- ✓ La tension d'arc
- ✓ La longueur libre du fil
- ✓ La vitesse de déplacement

$$\begin{aligned} &: I \div 100 \dots 450 \text{ A} \\ &: V_f \div 1 \dots 20 \text{ m/mn} \\ &: U \div 20 \dots 50 \text{ V} \end{aligned}$$

→ Répartition de chaleur entre électrode et pièce
↳ pénétration

→ Stabilité de l'arc, pénétration
→ Quantité de chaleur générée
→ Propriétés métallurgiques
→ Quantité de matière déposée par unité de temps
→ Taux de fusion
→ Longueur de l'arc et forme du bain de fusion
→ Taux de dépôt
→ Largeur du bain & pénétration
↳ largeur du bain, hauteur et pénétration

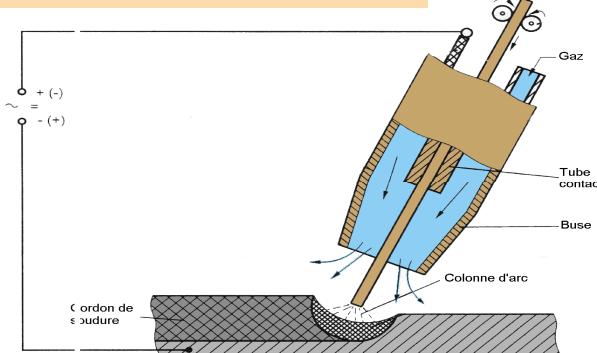
→ Apport de chaleur par unité de longueur
↳ largeur, hauteur et pénétration



L'arc électrique

Application: le soudage GMAW

Schéma de la torche de soudure



Modes de transfert du métal dans l'arc



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
- ✓ La vitesse d'avance du fil
- ✓ La tension d'arc
- ✓ La longueur libre du fil
- ✓ La vitesse de déplacement

$$\begin{aligned} &: I \div 100 \dots 450 \text{ A} \\ &: V_f \div 1 \dots 20 \text{ m/mn} \\ &: U \div 20 \dots 50 \text{ V} \end{aligned}$$

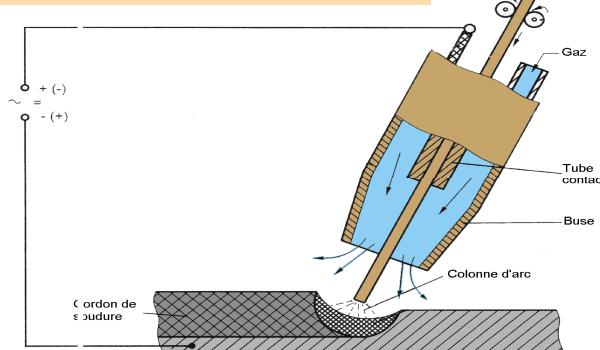
Transfert par courts circuits



L'arc électrique

Application: le soudage GMAW

Schéma de la torche de soudure

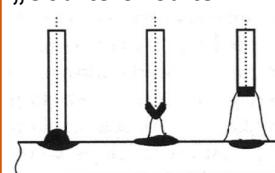


Paramètres de soudage

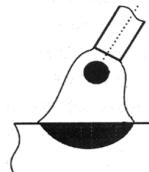
- ✓ Le débit de gaz
- ✓ La polarisation de l'arc
- ✓ La dimension de l'électrode
- ✓ La distance tube contact-cathode
- ✓ La composition de l'électrode
- ✓ Le mélange gazeux utilisé
- ✓ L'intensité de courant : $I \div 100 \dots 450 \text{ A}$
- ✓ La vitesse d'avance du fil : $V_f \div 1 \dots 20 \text{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

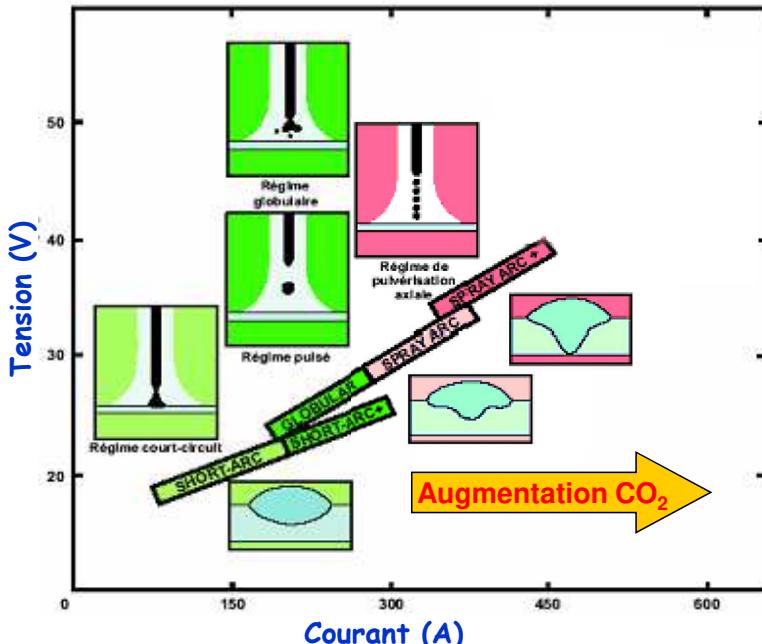


„Pulvérisation axiale“



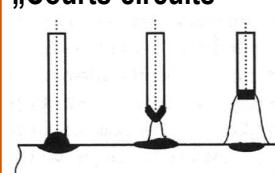
L'arc électrique

Application: le soudage GMAW

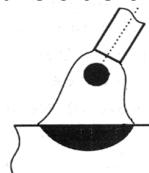


Modes de transfert du métal dans l'arc

„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

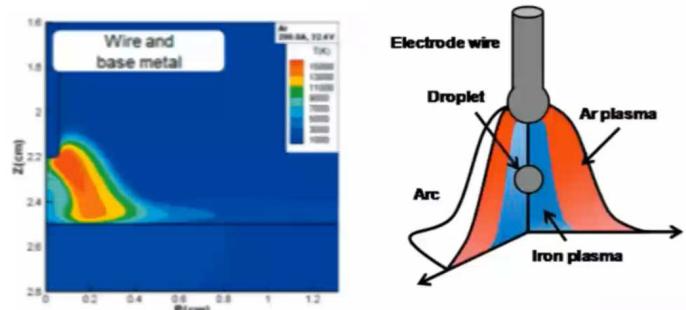
- les pertes par rayonnement
- le flux de chaleur transmis du plasma à la cathode par conduction,
- + l'absorption des e^-

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



ANF Fab3D Métallique, Bourges, 2025

47

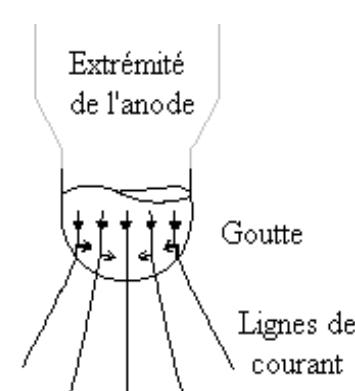


L'arc électrique

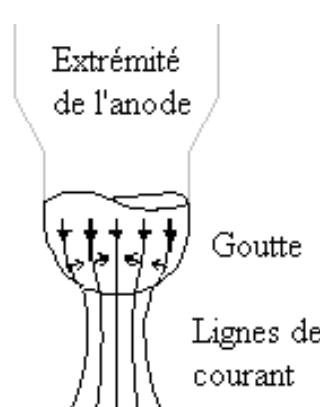
Application: le soudage GMAW

Interaction arc-fil

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

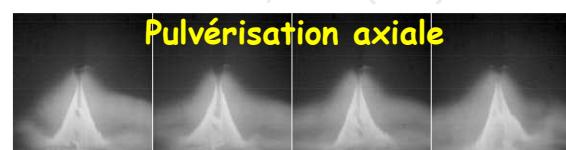


Force de détachement:
Pulvérisation axiale



Force d'attachement:
Régime globulaire

S.Zielinska, Thèse (2005)



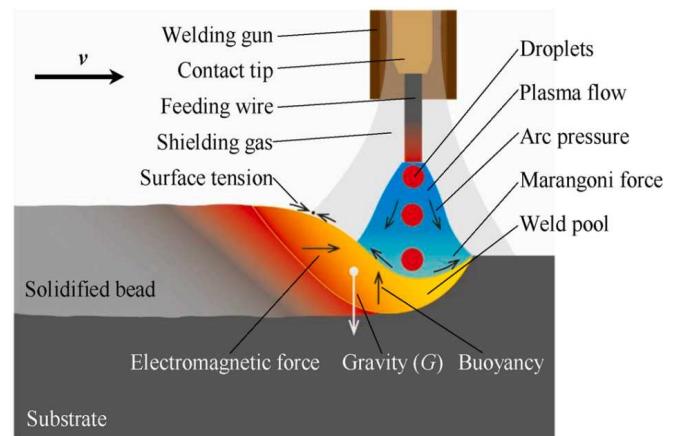


L'arc électrique

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 ($\rightarrow 3000^{\circ}\text{C}$): tension de surface, viscosité, densité, conductivité thermique**



Le WAAM

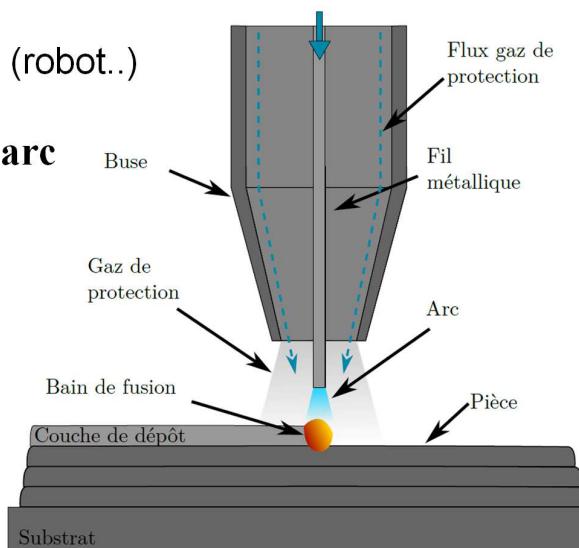
Wire Arc Additive Manufacturing

▪ 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^t de la torche (robot..)

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

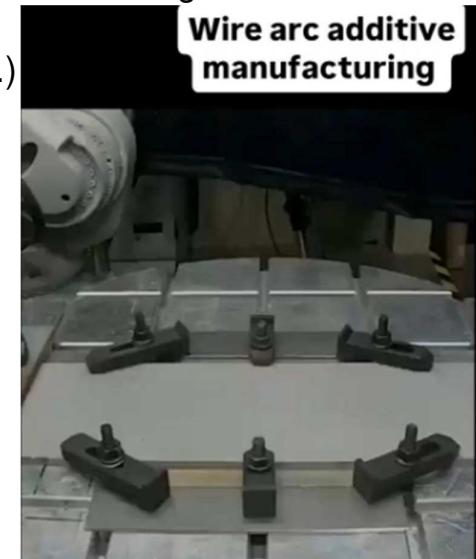




▪ Principe du procédé WAAM

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 mouv^t de la torche (robot..)



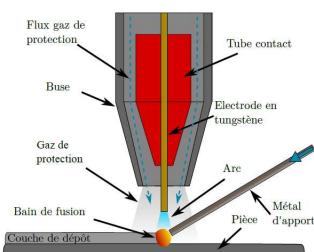
→ Extension des procédés de soudage par arc



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



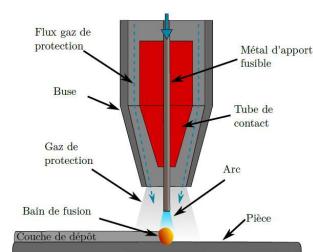
▪ Des technologies basées sur celles du soudage



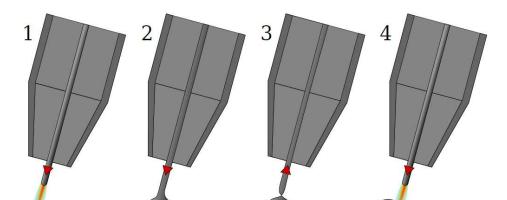
GTAW
Précision
Qualité de surface élevée
Titane, superalliage



PAW
Densité d'énergie élevée
Meilleure pénétration
Matériaux difficiles à souder



GMAW
Approvisionnement colinéaire
Taux de dépôt élevé
Coût relativement faible
Acier, Alu, Titane



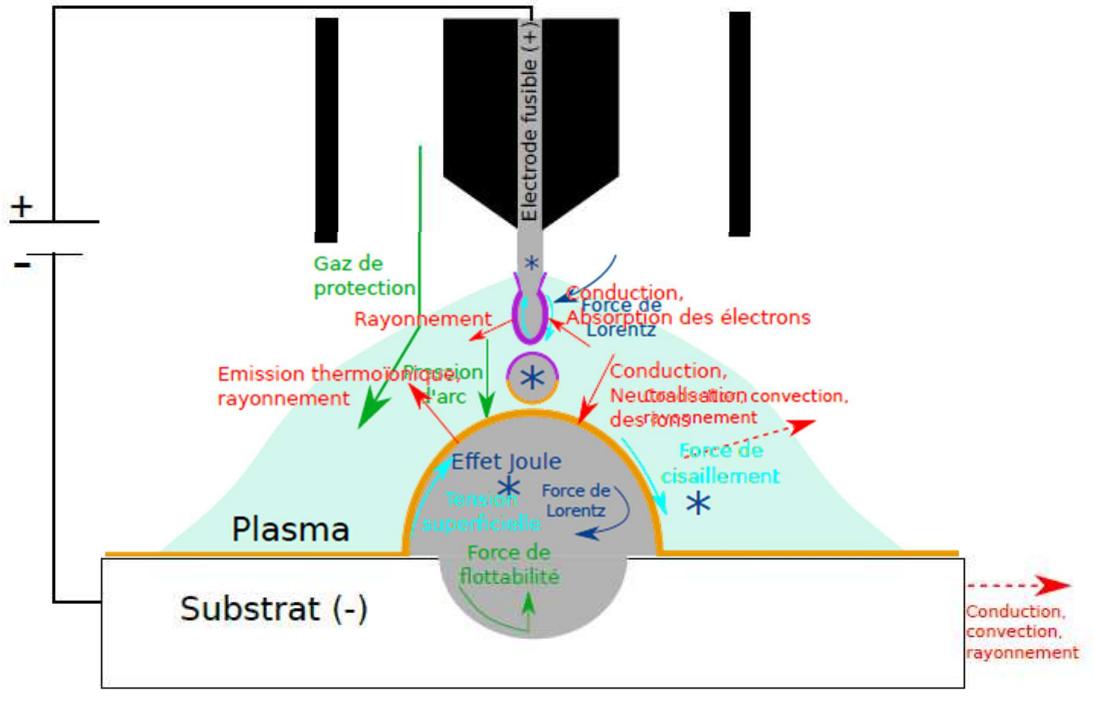
CMT: Cold Metal Transfert
Stabilité de l'arc
Faible apport de chaleur

Contrôle du Procédé WAAM:

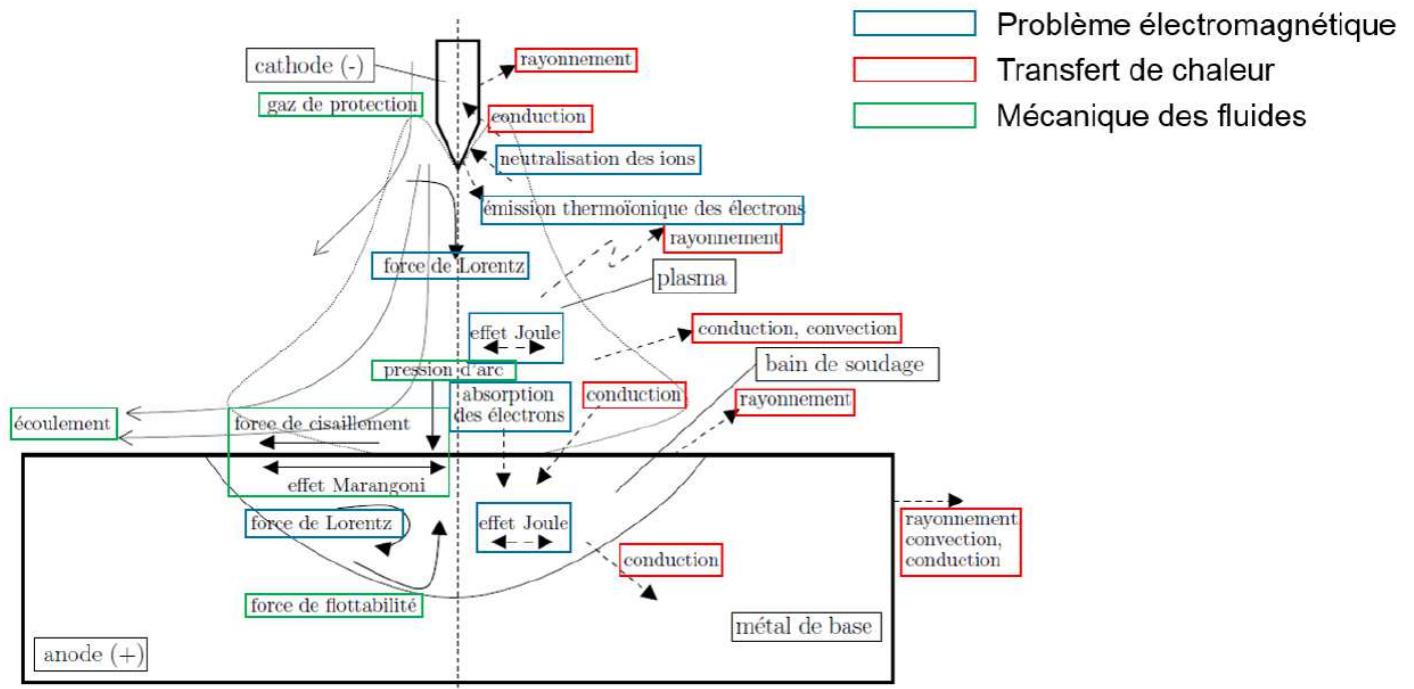
Une augmentation de I_{arc} (et de vitesse d'avance du fil), combinée à une diminution de la vitesse de déplacement permet d'augmenter la hauteur et la largeur du cordon.



un problème multiphysique



un problème multiphysique





un problème multiphysique

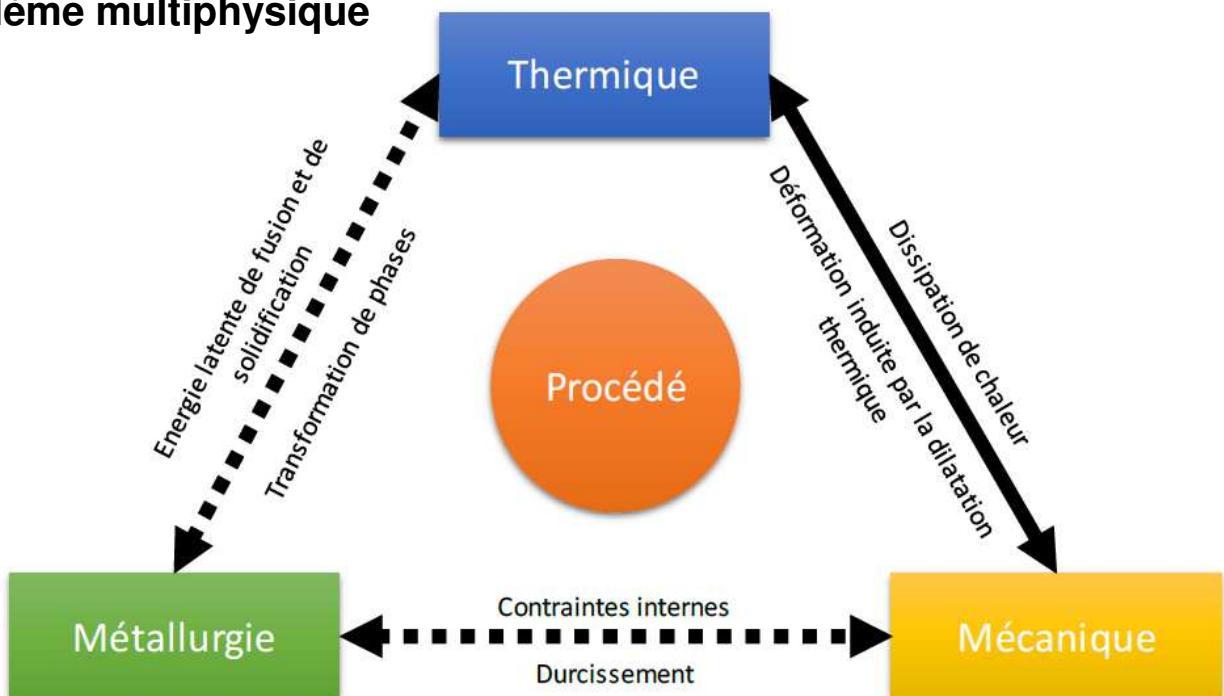


Diagramme d’interactions entre le problème mécanique, métallurgique et thermique au cours du procédé de fabrication additive métallique



AVANTAGES

- Taux de dépôt élevé, meilleure rentabilité
- Coût réduit, tant équip^{ts} 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