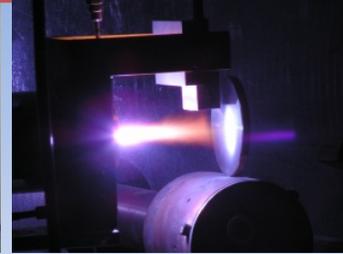


# L'arc électrique :

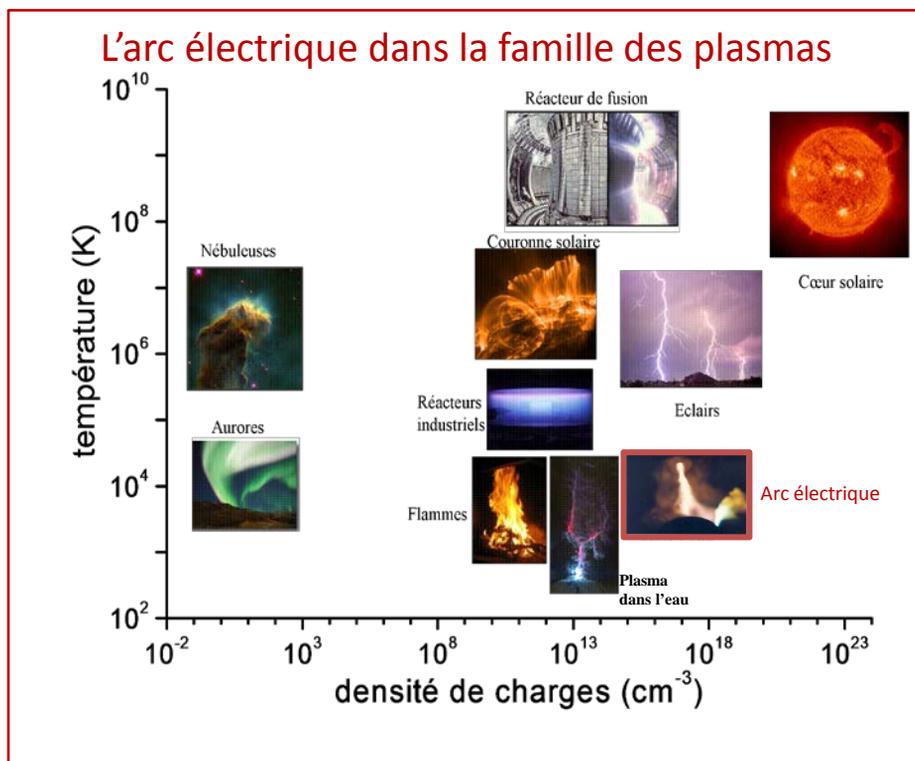


# jouer avec le feu



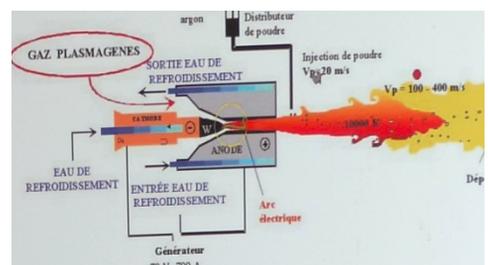
"Vers 1923, Irving LANGMUIR et Levy TONKS, deux chimistes américains de General Electric, observent le mouvement d'oscillation collective d'un nuage d'électrons pendant une décharge dans le mercure à basse pression.

*Ce nuage brillant et ondulant leur fait penser au plasma sanguin."*

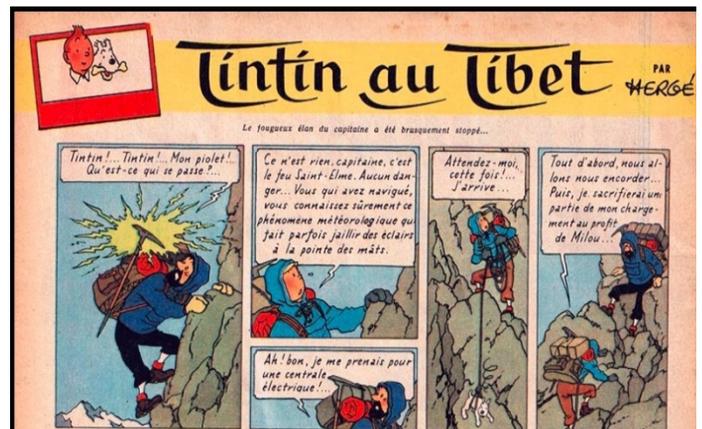


## Plan de l'exposition

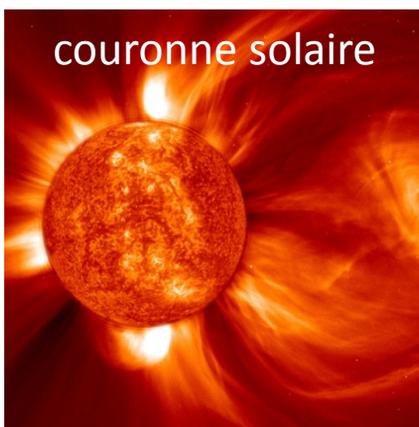
1. Le plasma dans la nature
2. Les décharges électriques provoquées :
  - Machine de Wimshurst
  - Bobine de Ruhmkorff
3. Les applications du plasma :
  - Son et Lumière
  - Chimie
  - Métallurgie
  - Gaz de synthèse
  - Santé
4. Le plasma dans l'imaginaire



# Le Plasma dans la nature



Phénomènes d'origine électrique associés à des effets lumineux



Chez soi, quand on se peigne, qu'on enlève un pull, on provoque des étincelles = micro-plasmas à 12 000°C

# L'arc chantant et la TSF (télégraphie sans fil)

William DUDELL (1<sup>er</sup> juillet 1872 – 4 novembre 1917) , en étudiant le bruit parasite de l'éclairage électrique de Londres, réalise un circuit résonnant en utilisant une lampe à arc au carbone. L'arc de DUDELL oscille aux fréquences audio, ce qui lui valut le surnom d'« arc chantant ».

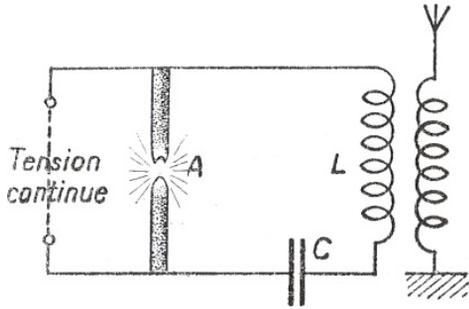
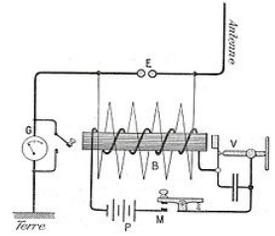


Schéma de l'émetteur à arc type POULSEN .



Station radiotélégraphique. Émetteur à étincelles à bobine d'induction de Ruhmkorff supplanté par le système POULSEN

Valdemar POULSEN (23 novembre 1869– 23 juillet 1942), élève l'efficacité et la fréquence.

L'émetteur à arc de POULSEN, breveté en 1903, génère des fréquences jusqu'à 200 kHz.

En Europe, la technologie de POULSEN rencontre des difficultés à s'implanter, alors qu'aux États-Unis le système POULSEN de radiotélégraphie, largement répandu, est adopté par L'US Navy.

L'émetteur à arc de POULSEN est le système de radio mobile le plus important durant une dizaine d'années, jusqu'à l'apparition des tubes électroniques à vide.

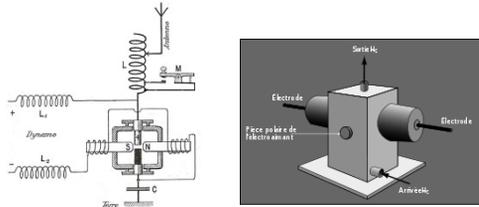
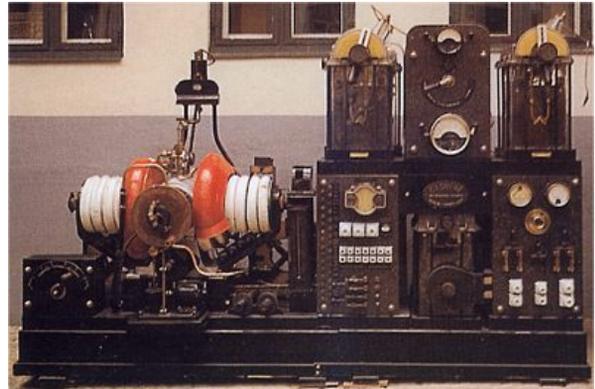


Schéma simplifié d'un émetteur à arc radiotélégraphique (POULSEN)



Émetteur à arc

[http://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89metteur\\_%C3%A0\\_arc](http://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89metteur_%C3%A0_arc)



Frederick Collins, inventeur du dispositif de radiotéléphonie sans fil (1904).

[http://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89metteur\\_%C3%A0\\_arc](http://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89metteur_%C3%A0_arc)

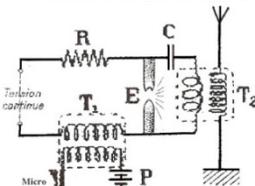
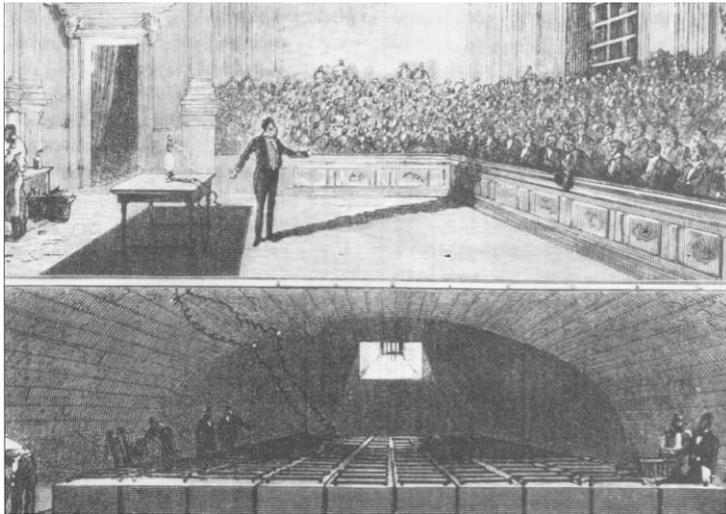


Schéma de l'émetteur à arc radiotéléphonique



Station Titanic radiotélégraphique type Marconi (étincelle) [http://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89metteur\\_%C3%A0\\_%C3%A9tincelles](http://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89metteur_%C3%A0_%C3%A9tincelles)

# Les lampes à arc électrique



En 1809, Sir Humphry Davy, « obtint un arc de 8 cm de long, après avoir amené en contact deux baguettes de carbone reliées aux deux pôles d'une batterie d'éléments Volta en sous-sol; entre les deux baguettes se produisit une flamme qui s'incurva en forme d'arc de cercle sous l'effet du courant d'air chaud ascendant, c'est pourquoi il donna à cette flamme le nom d'arc électrique, nom qui fut conservé depuis. »



Œuf de Davy  
- collection Montefiore -  
Maison de la Science

## Les développements

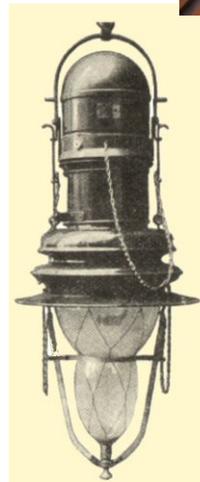


Lampes à arc de la première génération (tiges de carbone se faisant face)  
Le principal avantage de l'arc électrique réside dans sa lumière brillante et très intense

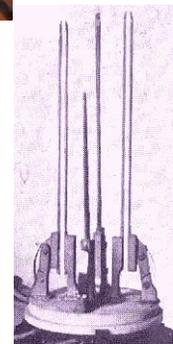
Détail des arcs : positif au-dessus et négatif en -dessous.



Régulateur "Serrin" constitué d'un mouvement d'horlogerie permettant mécaniquement le rapprochement des deux charbons.



La lampe telle qu'elle était utilisée pour l'éclairage public à Londres



Paul Nicolaïewitch JABLOCHKOFF a l'idée de placer les électrodes, non plus en regard mais côte à côte, verticalement et d'utiliser le courant alternatif pour obtenir une usure égale des électrodes.

Heinrich GEISSLER, (1815, 1879), étudie les décharges électriques dans le vide. Selon la nature des gaz employés et du vide plus ou moins poussé dans le tube les effets lumineux varient.



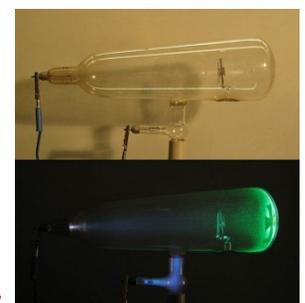
Tube de Geissler  
monté sur une Bobine de Ruhmkorff



Tube de Geissler en fonctionnement.

Vers 1923, Irving LANGMUIR et Levy TONKS, deux chimistes américains de General Electric, observent le mouvement d'oscillation collective d'un nuage ondulant d'électrons pendant une décharge dans le mercure à basse pression qui leur fait penser au plasma sanguin.

En 1869, William CROOKES met au point, par un vide plus poussé, le tube dit tube de CROOKES, avec lequel en 1895, Wilhelm RÖNTGEN met en évidence les rayons X.



Tube de CROOKES

# Aujourd'hui les lampes à décharge

Une lampe à décharge est constituée d'un tube ou d'une ampoule en verre remplie de gaz ou de vapeur métallique, sous haute ou basse pression, au travers duquel on fait passer un courant. La couleur de la lumière émise par ces lampes dépend du gaz utilisé.

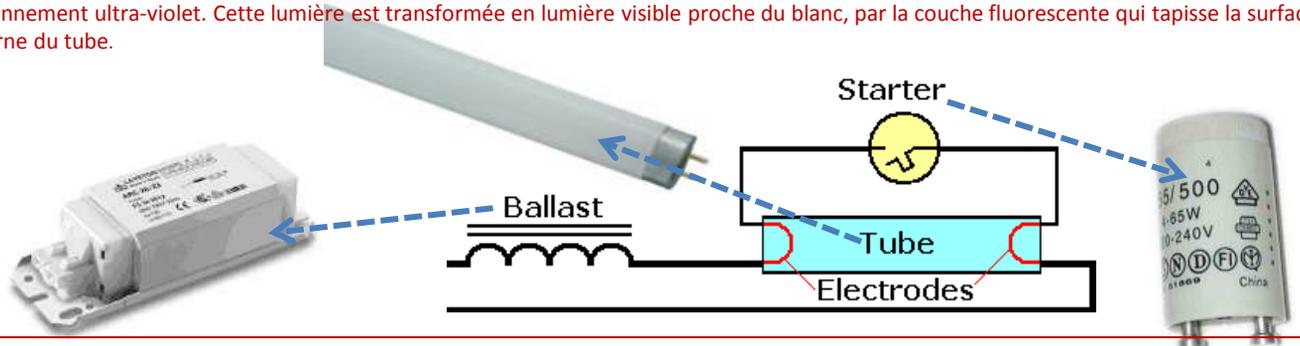
## Lampes à décharge basse pression.

Lampes à vapeur de sodium basse pression émettent jusqu'à 200 lumens/watt en lumière jaune monochromatique.

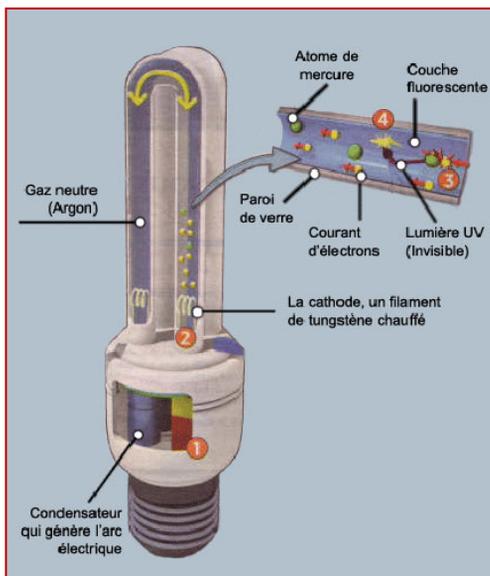
Tubes fluorescents : émettent jusqu'à 100 lumens/watt. Les tubes fluorescents faussement appelés lampes néon

### Principe de fonctionnement

Le tube est rempli de gaz rare (argon, néon...) et de vapeurs de mercure. Les atomes de mercure libèrent ensuite cette énergie sous forme de rayonnement ultra-violet. Cette lumière est transformée en lumière visible proche du blanc, par la couche fluorescente qui tapisse la surface interne du tube.



Le starter est un petit tube rempli de gaz, muni d'un contact (bilame). Lors de la mise sous tension, il s'amorce. L'arc électrique produit chauffe le bilame qui se déforme : le contact se ferme et l'arc électrique disparaît. Cette phase permet le préchauffage des électrodes du tube. Au bout d'une seconde environ, le bilame a refroidi et le contact s'ouvre, coupant ainsi le circuit. Le ballast magnétique crée alors une surtension qui amorce le tube. La tension aux bornes du tube diminue et rend impossible l'amorçage du starter jusqu'à la prochaine mise sous tension.



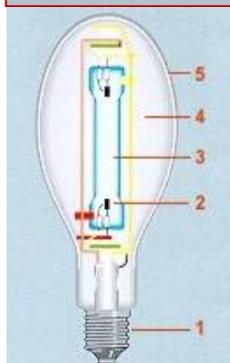
## Lampe fluorescente compacte

- 1 - L'ampoule fluo compacte est un tube fluorescent en version miniature. La base de l'ampoule abrite des composants électroniques qui assurent un éclairage continu.
- 2 - À la cathode du tube, un filament produit des électrons.
- 3 - Les électrons excitent des atomes de mercure dans le tube, qui émettent des rayons ultraviolets (UV).
- 4 - Les UV heurtent une couche fluorescente en surface du tube Celle-ci réagit aux UV en émettant une lumière visible blanche.

## Lampes à décharge haute pression ou HID High intensity discharge

Les lampes aux halogénures métalliques, émettent 100 lumens/watt en lumière presque blanche.

Les lampes à vapeur de sodium haute pression émettent jusqu'à 150 lumens/watt. Les lampes à vapeur de mercure ont été remplacées par des lampes à vapeur de sodium haute pression et, parfois, par des lampes aux halogénures métalliques.



1. Socle.
2. Électrodes.
3. Tube à décharge.
4. Ampoule.
5. Revêtement fluorescent (éventuel).



Lampe à décharge au xénon de 15 kW

# Les réacteurs chimiques à arc électrique



1809, le premier réacteur chimique l'œuf de Davy aussi appelé œuf de Berthelot.

## La fixation de l'azote atmosphérique

En 1898, Sir William CROOKES, président de l'Association Britannique pour l'avancement des Sciences, ouvrit le congrès à Bristol en alertant la communauté scientifique :

« si de nouvelles sources d'azote n'étaient pas rapidement découvertes, le retour aux famines du Moyen-Âge étaient inéluctables ».

Le problème de l'approvisionnement en azote posé par CROOKES conduisit à de nombreuses tentatives de mise en œuvre industrielle dont certaines visaient aussi l'indépendance des approvisionnements en explosifs pour le développement des armes automatiques et de l'artillerie. Ce furent :

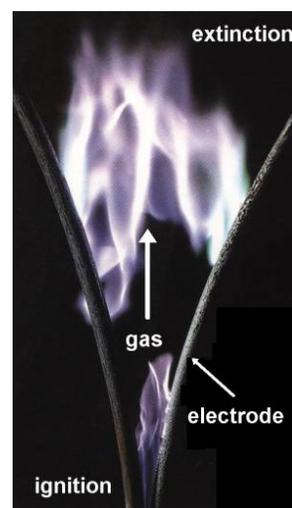
- la synthèse directe des oxydes d'azote par action de l'arc électrique sur l'air,
- à partir de 1898 la voie cyanamide calcique, puis vers 1905 la voie du nitrure d'aluminium (SERPEK).

L'air est constitué de  $O_2 + 4 N_2$  qui donne NO vers 3000 °C dans l'arc électrique NO s'oxyde en  $NO_2$  au cours du refroidissement

- A- arc hélicoïdal
- B- électrode tube
- F- eau de refroidissement
- R- réchauffage de l'air entrant

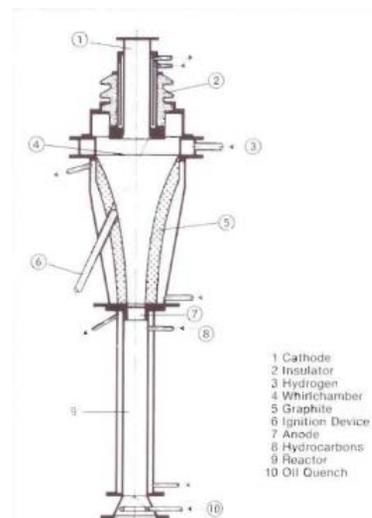
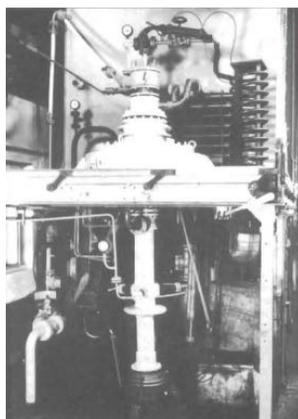
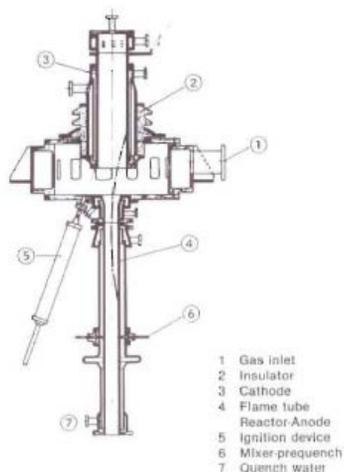
- a - Schéma du réacteur
- b- Vue de coupe des entrées d'air tangentielles

Réacteur SCHONHERR de la BASF  
( Badische Anilin und Soda Fabrik)



Procédé Harry et G. PAULING (1902)  
« GLIDARC »

## Synthèse de l'acétylène



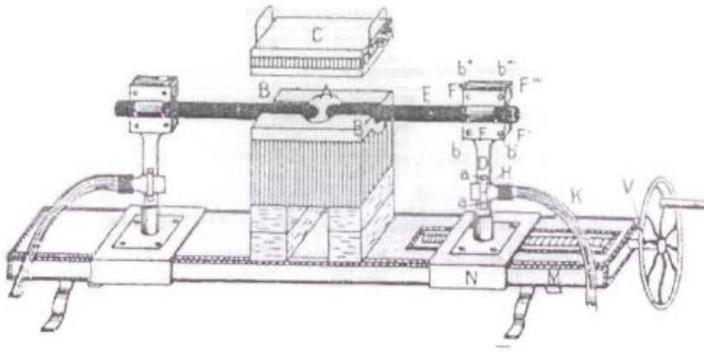
Réacteurs HÜELS « Arc process » 19 unités de 8,3MW en production à MARL (Allemagne)

L'arc électrique : jouer avec le feu

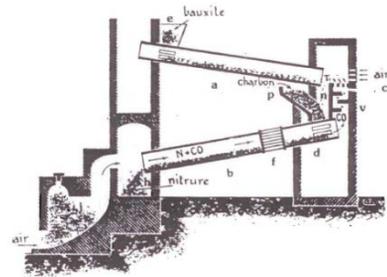
# Les fours à arc électrique

## Les grandes synthèses

En juin 1872, **Henri MOISSAN (1852-1907)** met en marche son premier four électrique. Avec celui-ci de 1894 à 1895, il synthétise bore, uranium, manganèse, chrome, tungstène, vanadium, titane et molybdène et carbure de calcium  $\text{CaC}_2$ . Le carbure de calcium s'hydrolyse pour former de l'acétylène. Il fixe également l'azote de l'air pour former la cyanamide calcique  $\text{CaC}_2 + \text{N}_2 \rightarrow \text{CaCN}_2 + \text{C}$  qui reste un engrais agricole exceptionnel.



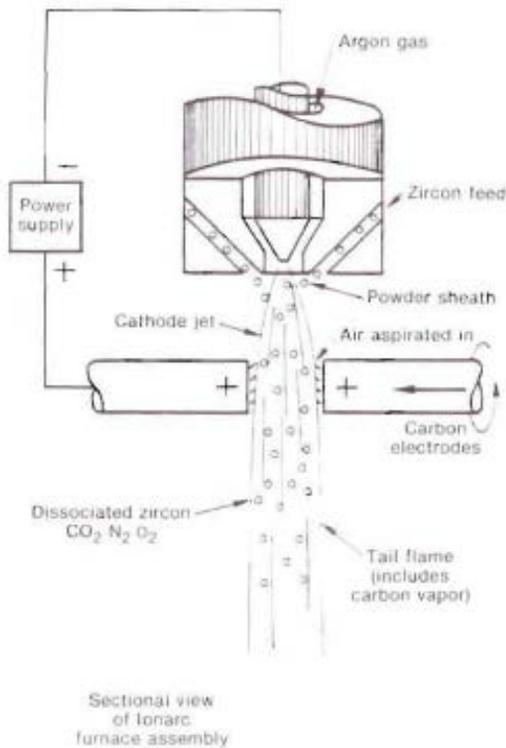
Le four électrique de MOISSAN



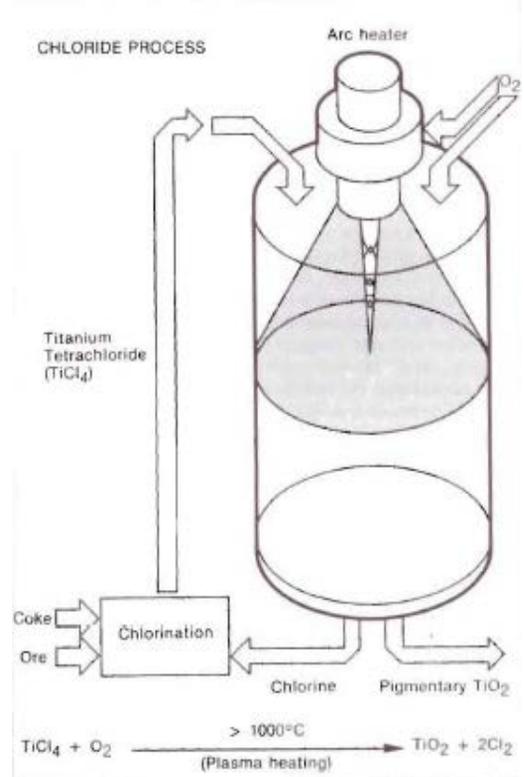
Procédé SERPEK de production du nitrure d'aluminium 1870 à 1909 (Arc électrique en f)  
 $\text{Al}_2\text{O}_3 + 2 \text{C} + \text{N}_2 \rightarrow 2 \text{AlN} + 3 \text{CO}$   
 En présence d'eau, ce nitrure s'hydrolyse pour former le gaz ammoniac.

## Quelques procédés actuels

La plupart des carbures, comme le silicium métallurgique sont obtenus en réacteurs à arc électrique.



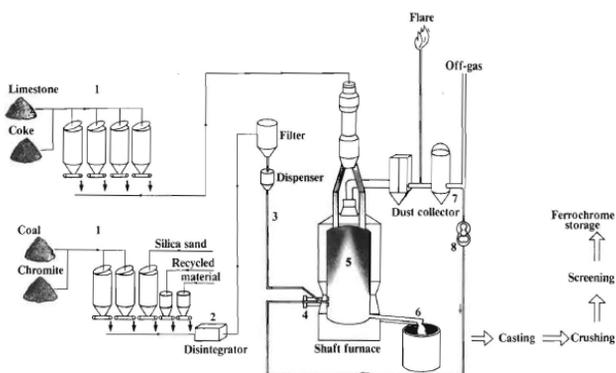
Le procédés IONARC  
 Traitement des sable de zircon  $\text{ZrO}_2 \cdot \text{SiO}_2$  pour extraire  $\text{ZrO}_2$



Procédé TIOXIDE  
 pour la production de pigments d'oxydes de titane  $\text{TiO}_2$

# Les projets d'unités métallurgiques

Les grands projets vont faire florès au cours des années 1970, ainsi Westinghouse, SKF, Voest Alpine, Krupp, Noranda, Daïdo Steel, etc. testent et proposent aux investisseurs des solutions qui restent actuelles.



Le procédé Swedechrome de SKF. A gauche le schéma des flux, a droite l'unité de Malmö en 1987.

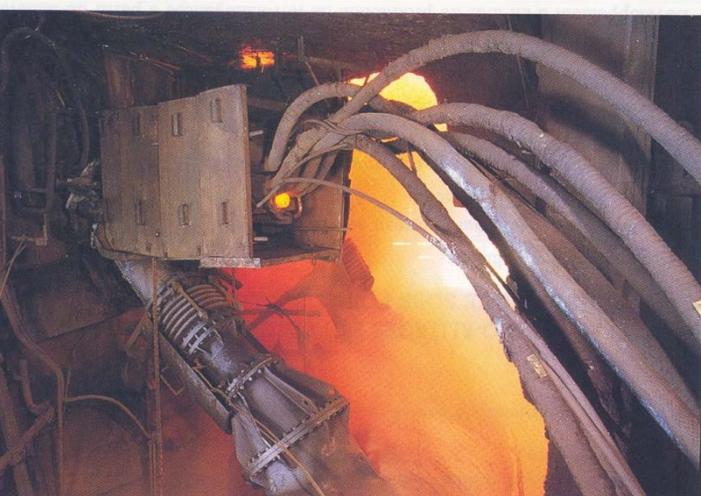
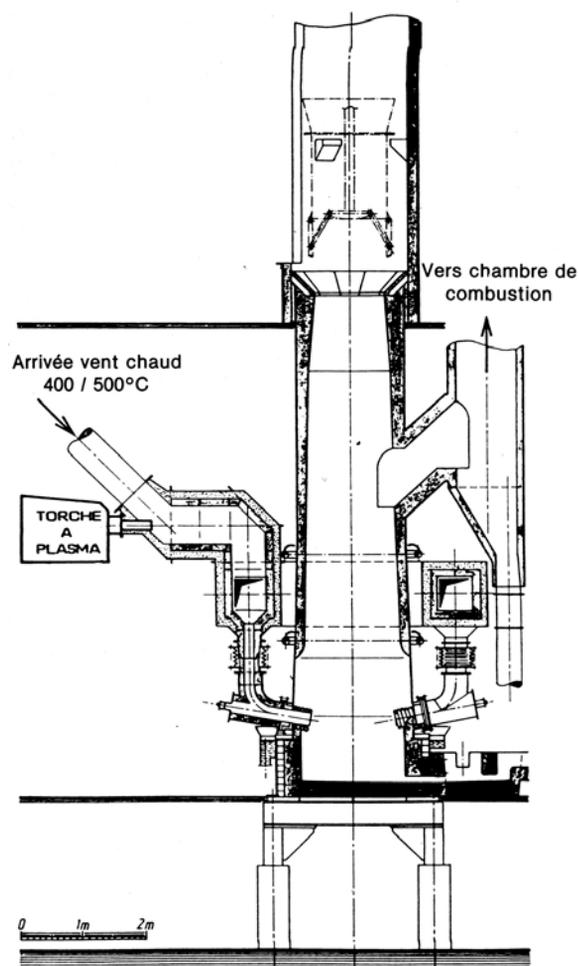
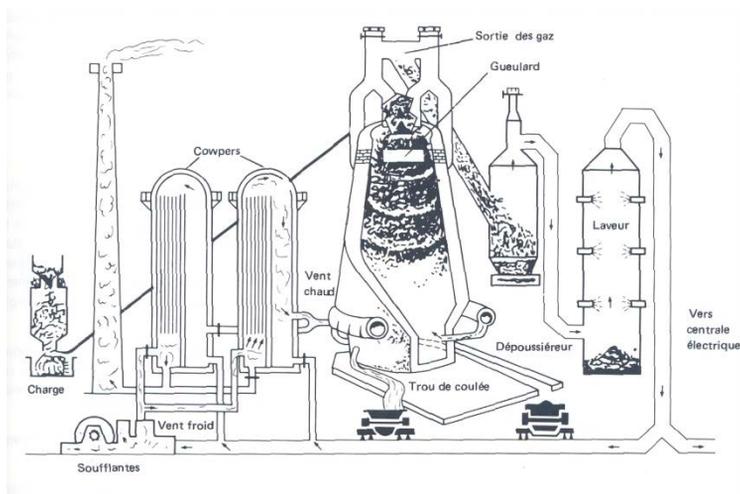
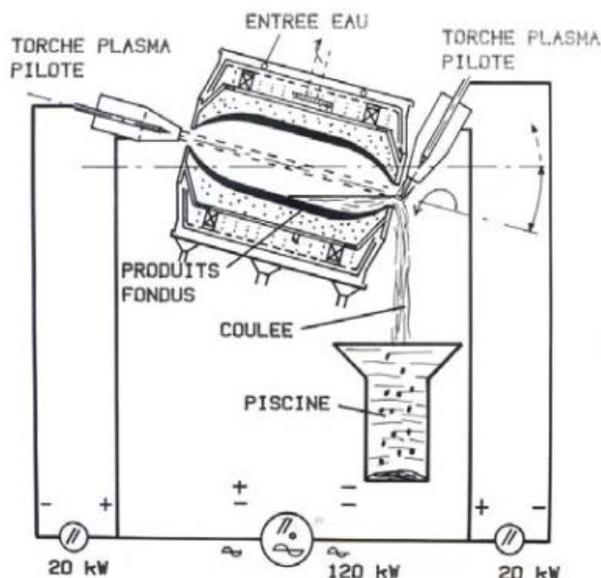
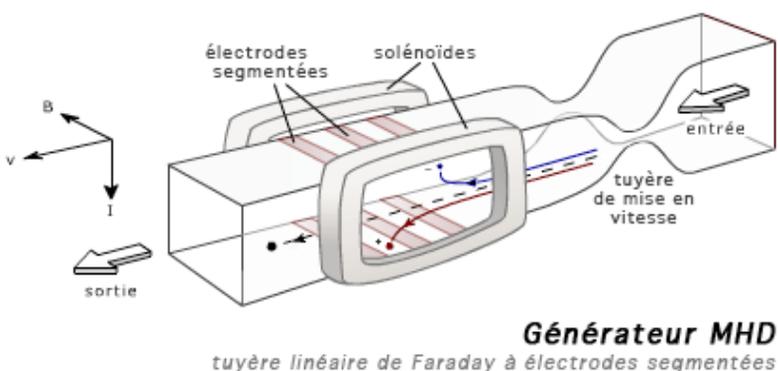


Schéma de principe des hauts fourneaux en métallurgie du ferromanganèse. En 1986, sur le site de Boulogne-Outreau (62) neuf torches de 2MW (comme celle ci-dessus) réchauffaient les vents chauds.

Cubillot ou bas fourneau de refusion de ferrailles à l'usine Peugeot - Citroën de Sept-Fons (03)

# Le tournant énergétique et industriel des années 1975 et 1976

Le coût de l'énergie décroît avec la chute des cours du pétrole et l'implantation de centrales nucléaires. Partout dans le monde, les filières MHD (Magnéto HydroDynamique) sont abandonnées. En France, EDF planifie une production d'électricité à 80% d'origine nucléaire. La sidérurgie lorraine est délaissée, l'industrie sidérurgique se concentre dans les ports de Fos et Dunkerque.

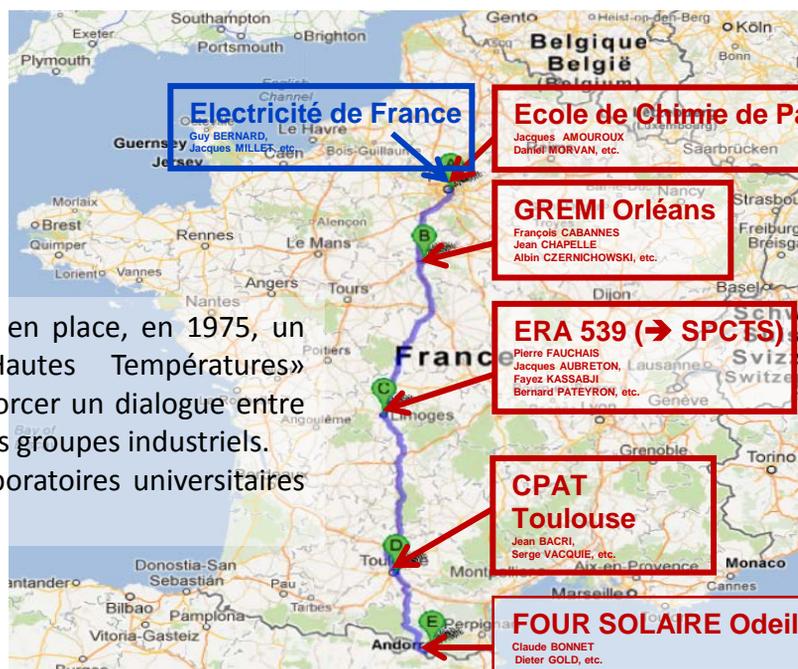


## Schéma de principe d'un générateur Magnéto HydroDynamique de type Faraday.

=> rendre conducteurs à hautes températures les gaz de combustion en les ensemençant avec des carbonates de métaux alcalins et le faire débiter sous un fort champ magnétique dans un réacteur

**Le réacteur plasma rotatif** développé en collaboration par le CNRS (Foex, Delmas à Odeillo) et le CEA (Yerouchalmi),

EDF met en place, en 1975, un club «Hautes Températures» pour amorcer un dialogue entre les grands groupes industriels et les laboratoires universitaires ou CNRS

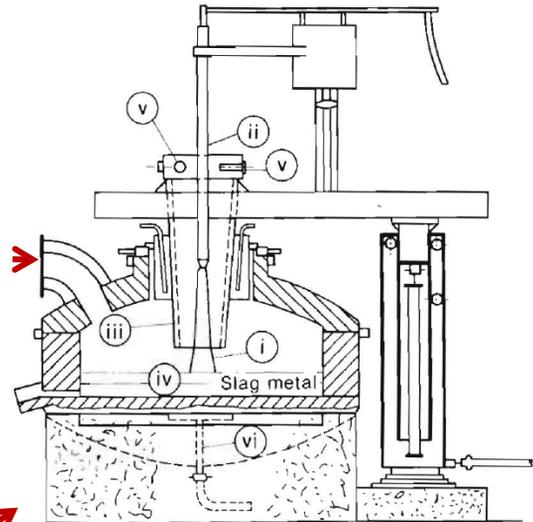


Photographie d'une coulée d'alumine électrofondue.

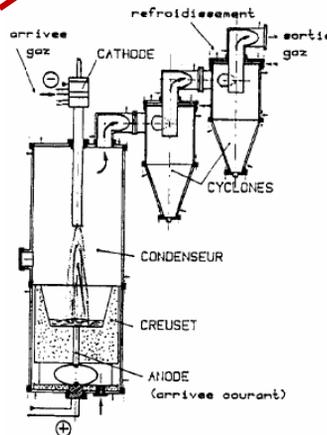
# L'ERA 539 du CNRS (SPCTS UMR7315)



Le premier réacteur conçu sur une idée de Bethlehem Steel (USA) : le film ruisselant, modifié avec l'innovation de la cathode plongeante (1978).



Le réacteur de la société d'ingénierie Davy McKee reprend en 1986 les principales caractéristiques des deux réacteurs à électrodes plongeantes conçues à Limoges



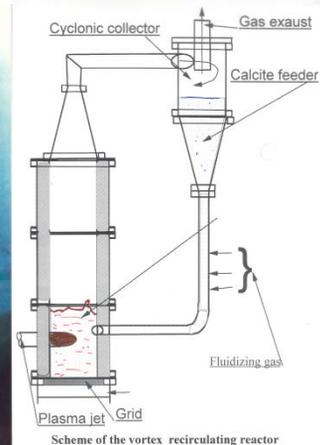
## Schéma du réacteur plasma de métallurgie extractive et métallurgie d'affinage 800 kW (1981)

1981-1985 Métallurgie et affinage des ferrochrome et ferromanganèse

1981-1982 Génération d'aérosols métalliques

1985-1890 Métallurgie de l'aluminium par la voie carbure, synthèse du nitrure d'aluminium

1991\_1996 Purification du silicium métallurgique



## Réacteur en lit fluide chauffé par plasma

1985 à 1988 - Synthèse de céramiques

1985 à 1988 - Destruction de rejets industriels fluorés

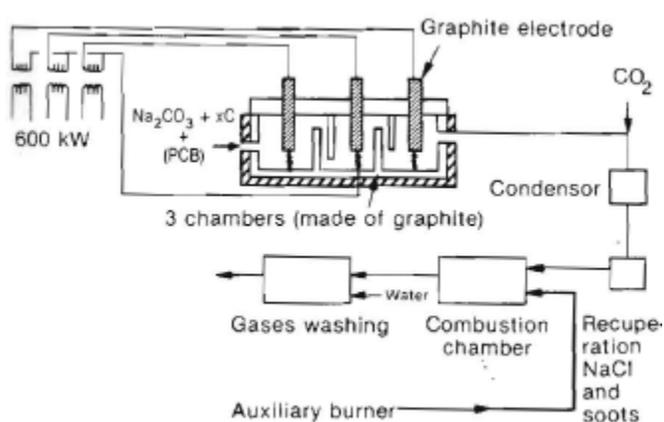


Schémas des arcs transférés obtenu à partir de la torche PEC (Plasma Energy Corporation) en régime anodique (gauche) et régime erratique (droite)

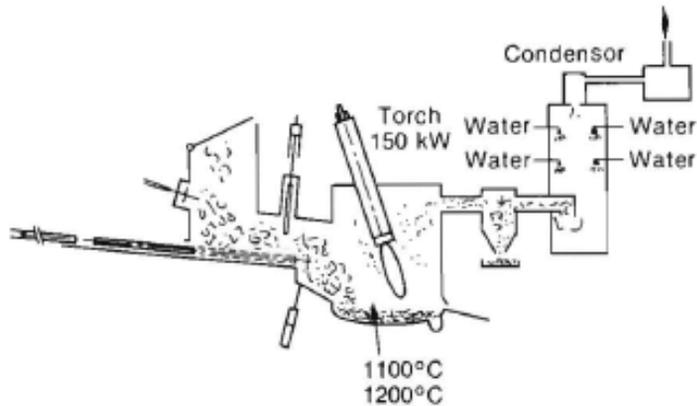
# Les procédés de destruction de déchets

Les sinistres de Seveso (10/07/1976) puis Bhopal (3/12/1984) rappellent que l'industrie doit détruire ou traiter ses déchets et rejets afin de les rendre inoffensifs. Des stocks importants d'armements chimiques sont également en attente de destruction.

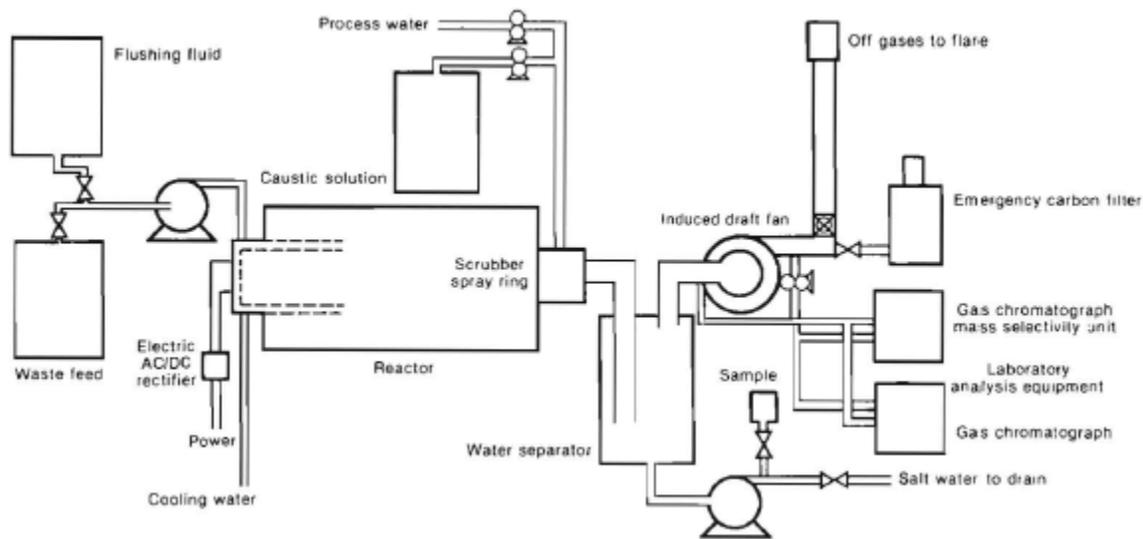
En raison de leurs hautes densités énergétiques les réacteurs plasma sont aptes à ces traitements.



Procédé Pyral Electric ( 1.3 kWh/kg)

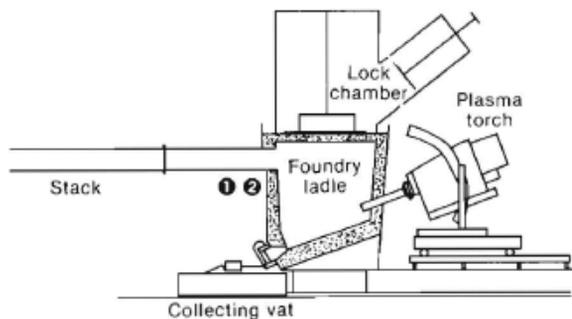


Procédé Canada Résorption Ltd



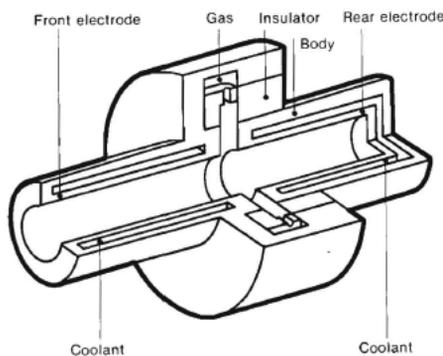
Procédé WestingHouse

## Déchets bio contaminés

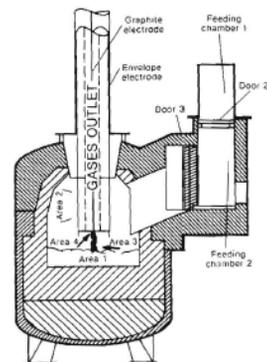


1 Chemical analysis sampling - 2 Bacteriological sampling

Projet Aérospatiale



Torche plasma vortex



Area 1 : molten metals 1650°C  
Area 2 : furnace 1650°C  $t_s = 1.77$  s  
Area 3 : gas envelope # 8100°C  
Area 4 : electric arc 6100°C  $t_s = 3$  ms  
N<sub>2</sub> gas, noise 50 dB — Height 8 m

Procédé ArcTechnology

# La vitrification de l'amiante et des cendres d'ordures ménagères

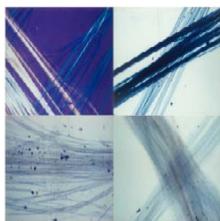


L'amiante est une roche métamorphique fibreuse utilisée dans le BTP pour sa résistance chimique, thermique, aux micro-organismes et à l'usure.

L'amiante a été largement utilisé jusque dans les années 90, en tresses, en feuilles ou en plaques, incorporé dans des liants divers (béton) pour des applications dans le bâtiment.

**L'amiante est une fibre cancérogène.**

La dangerosité des fibres d'amiante a rendu obligatoire le défilocage depuis 1992.

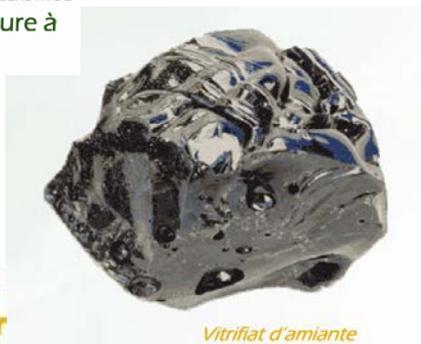


Fibre d'amiante



Ligne de traitement des fumées (INERTAM)

Le vitrifiat est un produit inerte et non dangereux avec une stabilité physico-chimique supérieure à 200 000 ans.



Vitrifiat d'amiante

Le vitrifiat est valorisé comme remblai routier sans aucun risque de pollution future.



Pavés béton comportant des inclusions de vitrifiat



Déchets amiantés



Coulée de vitrifiat



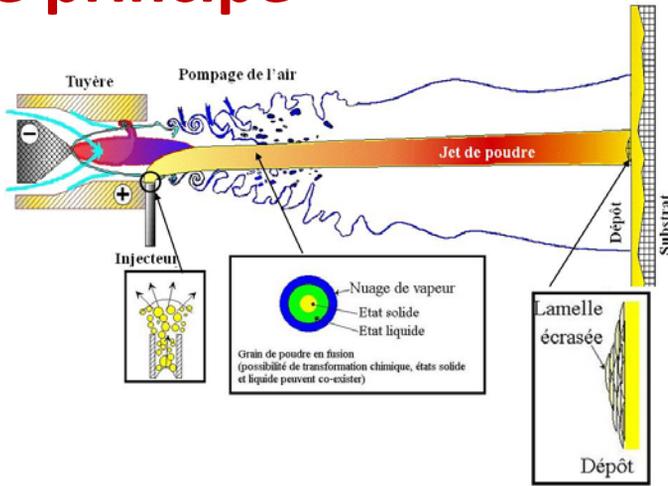
Coulée de vitrifiat

**Sont vitrifiées de même les cendres d'Inclénation d'ordures ménagères qui concentrent les polluants (métaux lourds, dioxines, furanes) très toxiques.**

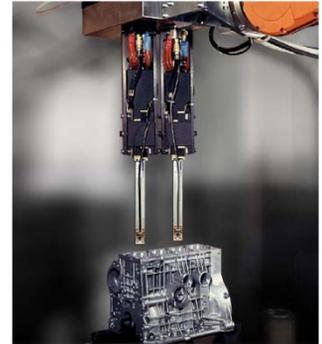
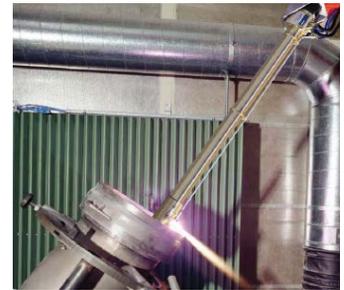
# La projection par plasma d'arc

réaliser des revêtements pour améliorer  
les propriétés d'usure des matériaux

## Le principe



Température du plasma: ~ 10 000 °C  
Vitesse du plasma: ~ 7200 km/h  
Vitesse d'impact des particules : ~ 360 km/h



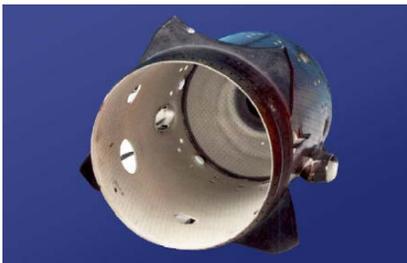
## Les applications(\*)



Revêtement réfractaire  
sur aubes de turbine



Prothèses de hanche



Dépôt interne dans  
une chambre de  
combustion



Bobine pour industrie  
du textile



Cylindre pour industrie  
du papier

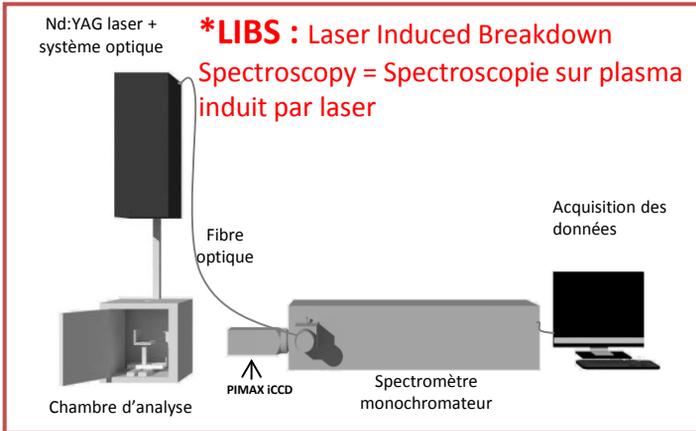
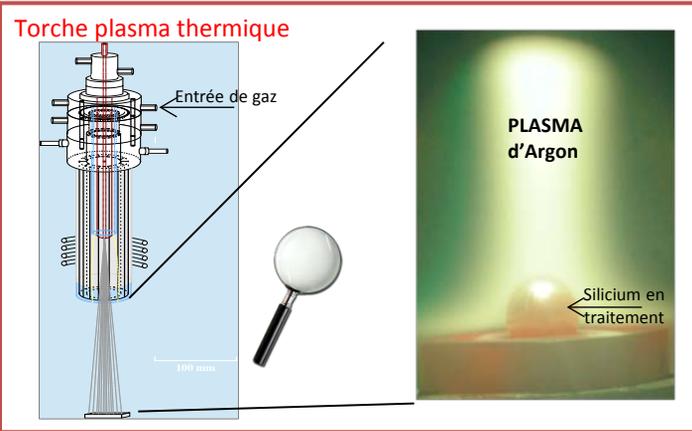
(\*) source : [www.sulzer.com](http://www.sulzer.com)

# les applications du plasma

## Purification du silicium pour photovoltaïques



### Analyse par LIBS\* du silicium



### Principe et résultats

**Silicium** : base pour la fabrication de cellules solaires

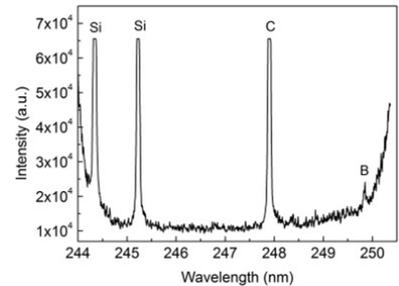
+ **Plasma** : fusion et purification du silicium.

Le plasma : milieu physique complexe "4<sup>ème</sup> état de la matière" à température très élevée : 10000 C° (surface solaire)



La **LIBS**, une technique d'analyse multi-élémentaire, rapide et sensible, permettant la mesure d'impuretés sur le silicium destiné à l'industrie photovoltaïque

Par exemple dans ce spectre, on peut distinguer le pic du bore (B) et celui du carbone (C) à des concentrations très faibles (de l'ordre du ppm massique)



La forte croissance du marché photovoltaïque est limitée par la disponibilité de rejets de silicium de semi-conducteur.

Le procédé de purification de silicium métallurgique par torche plasma thermique, contrôlé par LIBS permettra d'alimenter le marché en silicium de qualité photovoltaïque.

Rafik BENRABBAH<sup>(1)\*</sup>, Daniel MORVAN<sup>(1)</sup>, Malek BENMANSOUR<sup>(2)</sup>, Jean Paul GARANDET<sup>(2)</sup> Bernard PATEYRON<sup>(3)</sup>.

<sup>1</sup>Laboratoire Génie des Procédés Plasma et Traitement de Surfaces, 11 Rue Pierre et Marie Curie 75005 Paris

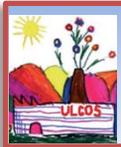
<sup>2</sup>CEA/INES- DRT-LITEN-DTS -LMPS, 50 Av. Du Lac Léman, 73377 Le Bourget du Lac, France

<sup>3</sup>Centre Européen de la Céramique 12, rue Atlantis 87068 LIMOGES Rafik-benrabbah@etu.chimie-paristech.fr/ 01.44.27.68.30



L'arc électrique : jouer avec le feu





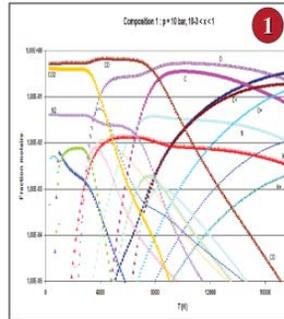
# Projet métallurgique ULCOS

(Ultra Low CO<sub>2</sub> Steelmaking 13 pays 48 partenaires)

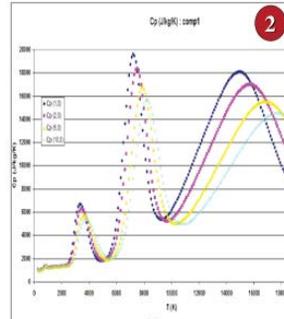
## But : réduire la production de CO<sub>2</sub> en sidérurgie

### Evaluation théorique

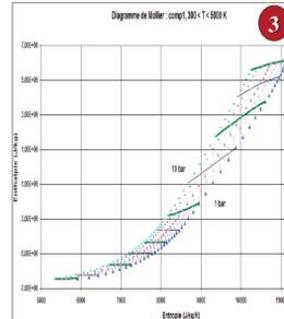
Détermination de la composition et des propriétés thermodynamiques et de transport des gaz produits par le plasma



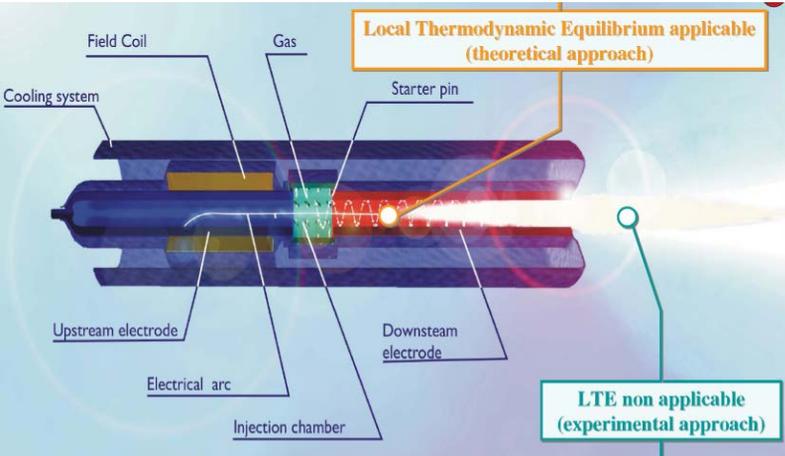
No CO<sub>2</sub> above 4,000 K  
CO stable from 1,000 K to 10,000 K



CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>O dissociation below 4000K, CO stable up to 7,000 K

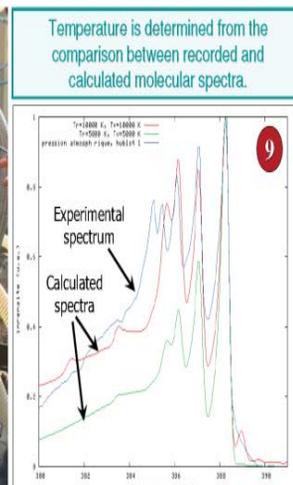
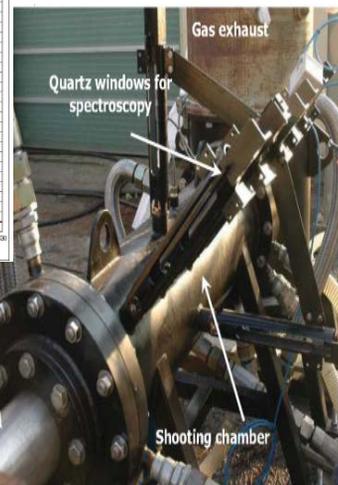
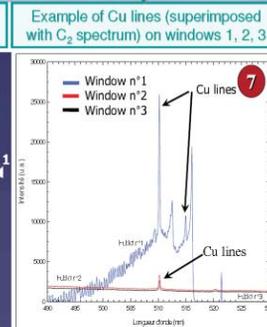
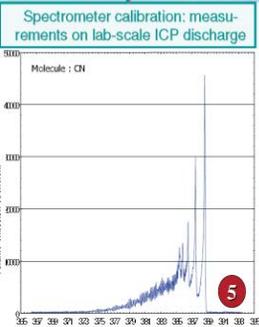


Enthalpy inside the torch from 1 to 10 bar for a given gas composition



### Validation expérimentale

Démontrer que la torche plasma peut travailler dans les conditions et avec les gaz du haut fourneau



### Evaluation des coûts de l'installation



## L'arc électrique : jouer avec le feu



## UTILISATIONS

- Ateliers
- Chaudronneries
- Construction (chantiers navals...)



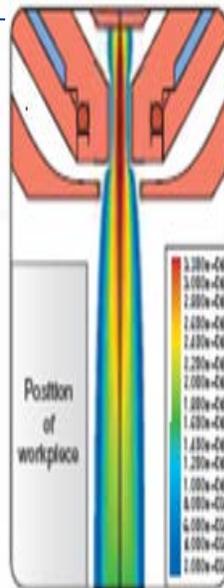
## AVANTAGES

- Polyvalent : coupage & marquage multi-matériaux (acier doux, acier inox, aluminium)
- Faible coût d'investissement



## PRINCIPE

"Flamme" supersonique de 30 000 °C et de 2 millimètres de diamètre



Calcul par ordinateur de la température de l'arc électrique : de 2000 °C à 32 000°C

- Augmenter la durée de vie des électrodes
- Haute qualité de coupe (coupe carrée sans scories)
- Haute productivité
- Contrôle total des paramètres du procédé