



**4D-3D**

# De la Source RF à la chambre à plasma

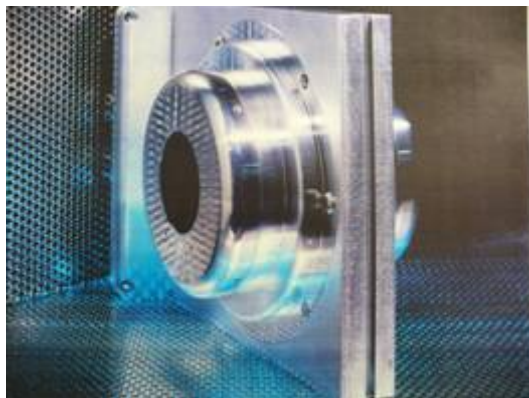


Les « radiofréquences » définissent une large gamme de fréquences, qui sont généralement utilisées pour les télécommunications. Dans cette gamme certaines fréquences normalisées sont utilisées comme support pour des transferts d'énergie:

→ pour l'obtention d'un plasma au sein d'un réacteur:



→ pour l'accélération du faisceau d'ions dans un implanteur de type Linac,



→ pour l'excitation de transducteurs piézo sur un bac à ultrason pour nettoyage de pièces



Générateur Ultrasonic KAIJO

Fréquence 950KHz pour une puissance de 600W



Bac ultrasons

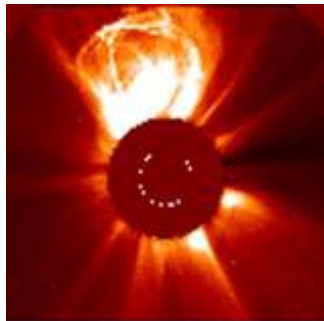
→ pour l'excitation de chambre de pulvérisation (industrie production CD ROM , etc..)



Un plasma est un état dilué de la matière, analogue à un gaz, mais constitué de particules chargées, électrons et ions, en proportion telle que le milieu soit globalement neutre. Il peut donc être considéré comme le quatrième état de la matière.

Les plasmas peuvent être soit naturels (aurores boréales, étoile, éclairs...) ou soit artificiels, créés par un champ électrique et/ou magnétique (plasma basse pression, réacteur à fusion nucléaire...)

**Couronne solaire**



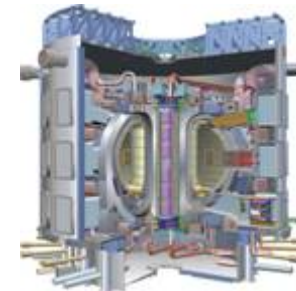
**Plasma basse pression**



**Aurores Boréales**



**Fusion nucléaire**



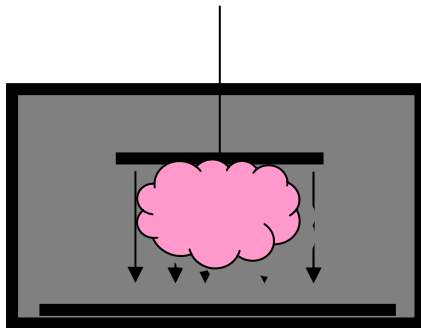
L'industrie microélectronique et l'industrie des traitements de surface utilisent massivement les plasmas : Les plasmas sont générés au sein d'un réacteur dans lequel un vide plus ou moins poussé existe. De multiples plasmas existent et sont mis en œuvre en fonction du process final désiré.

→ pour l'obtention d'un plasma en vue de faire un dépôt,

→ pour l'obtention d'un plasma en vue de graver plus ou moins profondément un substrat ,ou éventuellement le retrait d'un masque.

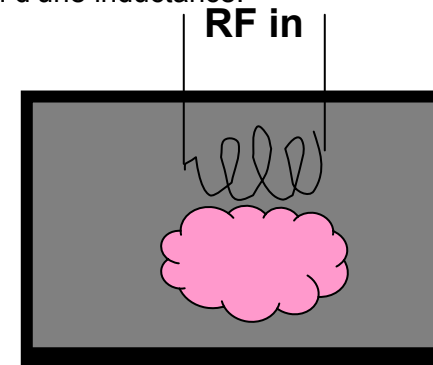
Le plasma est un gaz ionisé, électriquement neutre, hautement ionisé, formé d'atomes potentiellement instables. L'ionisation du gaz est réalisé par apport d'énergie couplée grâce à des électrodes ou applicateurs au sein même du réacteur.

De même, on distingue aussi principalement deux principes de couplage de l'énergie au plasma dans la chambre, qui sont liés au type de plasma et de process recherché



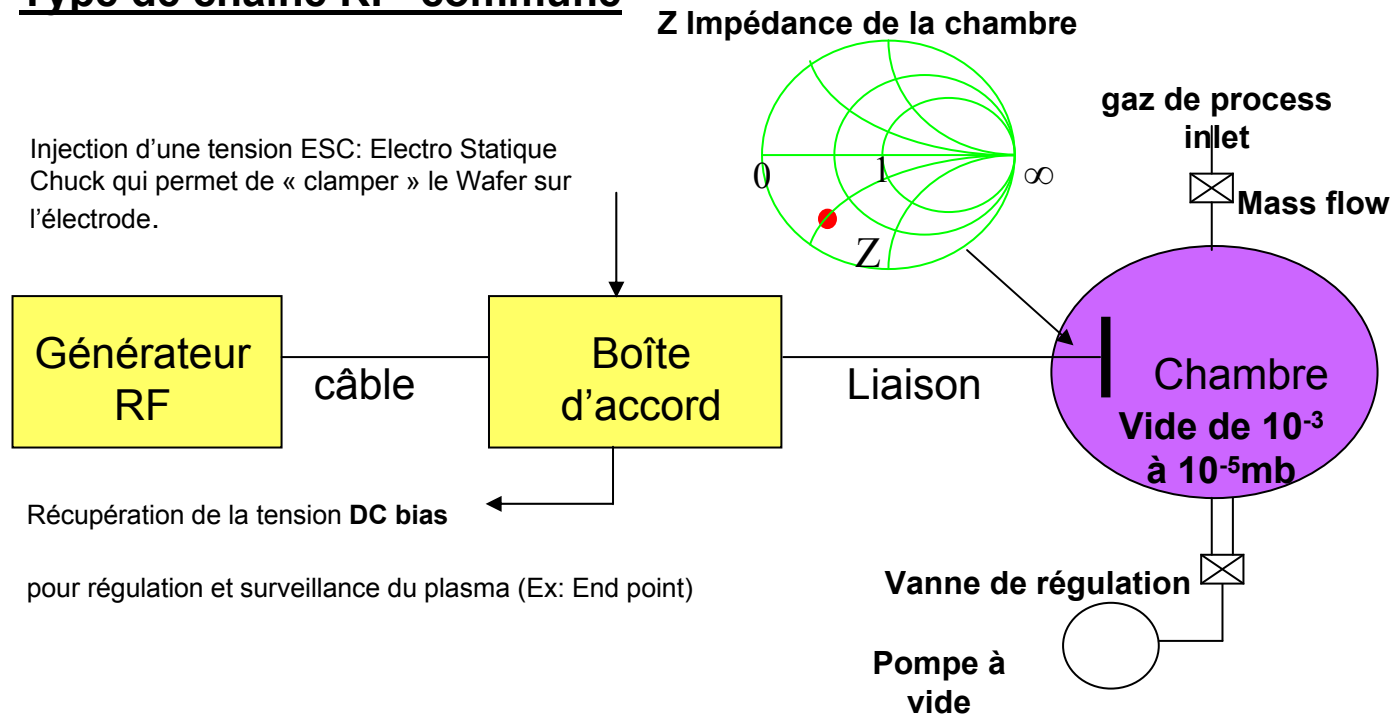
→ **Les systèmes couplés capacitivement**, dans lesquels la puissance RF (radio fréquence) est appliquée dans la chambre au moyen d'une électrode, l'enveloppe de la chambre jouant le rôle de l'électrode opposée.

**Les systèmes à couplage inductif ICP** dans lesquels l'énergie est transmise au plasma au moyen d'une inductance.



Le plasma est par définition une charge peu stable, qui influe de façon importante sur les circuits électriques standards qui le pilotent. Dans tous ces cas, le réacteur est excité depuis un source d'énergie (le générateur RF), la puissance est transmise à la chambre plus ou moins directement via un système d'adaptation appelé « match box » ou boîte d'accord qui permet de conserver stable la charge vue par le générateur et ce quelque soit la valeur du plasma et de cette façon réguler et maîtriser la puissance transmise au plasma. Les plasmas peuvent être obtenus à partir de générateurs à courants continus par exemple pour des application de dépôts (pulvérisation cathodique) ou Radio Fréquence (RF) et plus particulièrement à  $F=13,56$  MHz pour une majorité des bâtis de gravure (Etch) et de dépôt PECVD (Plasma enhanced Chemical Vapor deposition)

## Type de chaîne RF commune



Les sources d'énergie (les générateurs RF) sont étudiées de façon à permettre l'allumage et le maintien des plasmas continuellement variables :

- Permettre l'allumage d'un plasma dans des conditions de charge difficiles.
- Elle doivent être capables de réagir instantanément et de façon appropriées aux modifications de caractéristiques du plasma de façon à maintenir stable la puissance transmise tout au long du process.
- La stabilité de puissance est extrêmement importante vis à vis de la reproductibilité et des caractéristiques finales du process.
- En fonction des applications finales, visées des sources continues DC ou alternatives AC sont choisis et plus particulièrement des sources RF hautes fréquences, couramment utilisées dans les process de dépôt et gravure.
- Le plasma est donc considéré comme une charge par la source de puissance et principalement caractérisé par son impédance. Celle-ci dépend d'innombrables paramètres tels que la constitution du réacteur, les formes et dimensions des électrodes, la pression interne et la nature des gaz, mais aussi le niveau puissance issue de la source. Le plasma est un élément non linéaire dont la valeur « résistive » dépendra de la puissance d'attaque.

Tous ces facteurs impliquent la mise en œuvre de 2 éléments principaux de la source de puissance .

- Le générateur : qui doit être le plus reproductible et précis possible en terme de puissance délivrée.
- La boîte d'accord est communément appelée RF Match ou Matching box. Qui est en quelque sorte un transformateur d'impédance variable et agile automatique, maintenant le système dans une configuration RF « optimale ». Le générateur est donc chargé de façon optimale sous 50 ohms et le réfléchi est minimum.



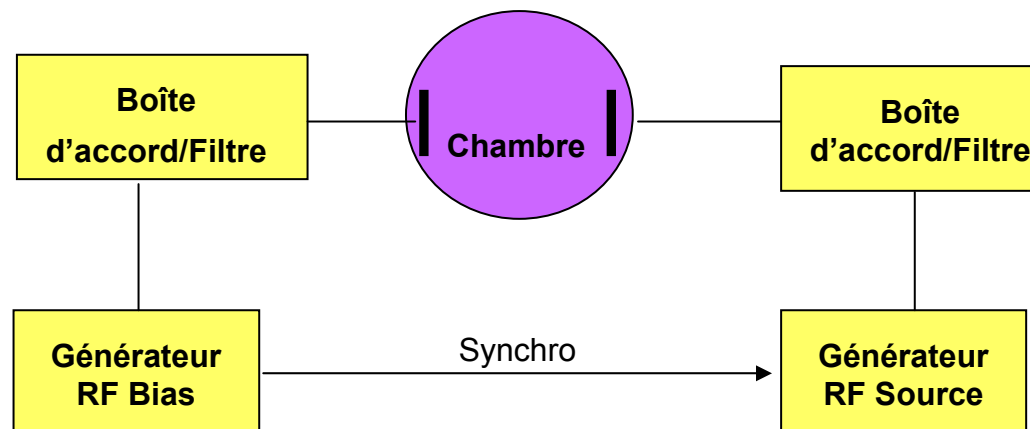
Bien que la plupart des plasmas simples soient générés à partir d'une seule source d'énergie, certaines nécessitent des systèmes d'obtention de plasma à partir de plusieurs sources de puissance. Le choix de la technique est dictée par le process et la nature du plasma recherchée.

→ Par exemple lorsque l'on veut maîtriser très précisément le flux ionique sur un Wafer (plaquette de silicium, base de la fabrication des puces électroniques), on a recourt à une seconde source de puissance généralement plus faible en niveau, communément appelée Bias.

→ La voie source dans ce cas à plus haute puissance entretient le plasma et confère à celui-ci sa densité et sa température.

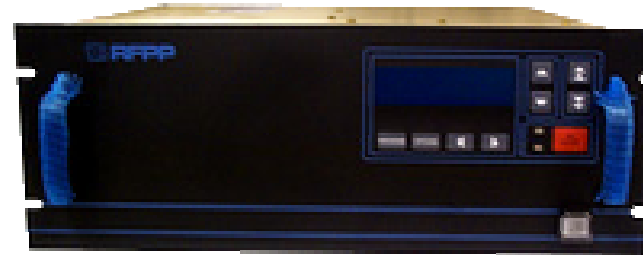
→ Dans ces applications, les sources de puissance peuvent avoir des fréquences de travail identiques synchronisées en phase et fréquences ou éloignées l'une de l'autre.

→ La mise en place de ces structures obéit aux règles de découplage avec des filtres de part et d'autres des voies de façon à limiter les possibilités d'interaction d'un générateur sur l'autre.



### Générateur LF 10 Advanced Energy

**Fréquence Variable en 50KHz et 460KHz  
pour une puissance délivrée de 1000 Watts**



Un second moyen de réaliser le transfert optimum d'énergie est de syntoniser la fréquence dans une bande donnée afin de rechercher le point où la charge présentée au générateur est la meilleure, c'est le rôle que remplissent les générateurs à basses fréquences de type variable.

Un algorithme interne au générateur permet de rechercher le minimum de puissance réfléchi correspondant au transfert optimum d'énergie. Dans cette configuration les boîtes d'accord sont fixes et n'autorisent qu'un éventuel préaccord manuel.



### Générateur HFV8000 Advanced Energy

**Fréquence Variable en 1,78MHz et 2,17MHz  
pour une puissance délivrée de 8000 Watts**



4D-3D

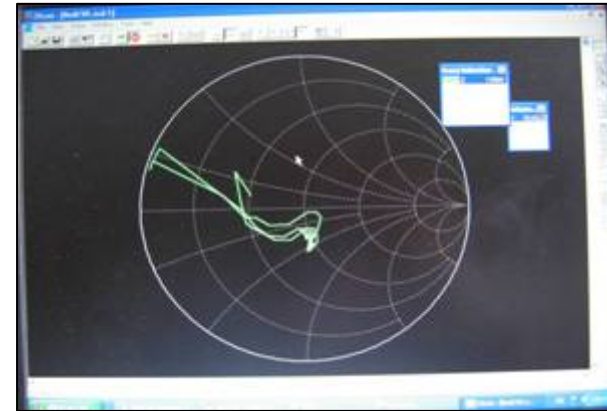
### Les moyens de contrôles RF permettent de :

- Visualiser en temps réel le tracé d'accord sur une boîte d'accord
- Visualiser et enregistrer les zones d'accord des matchs
- Caractériser un réacteur et son process associé
- Mener à bien des diagnostics sur les équipements

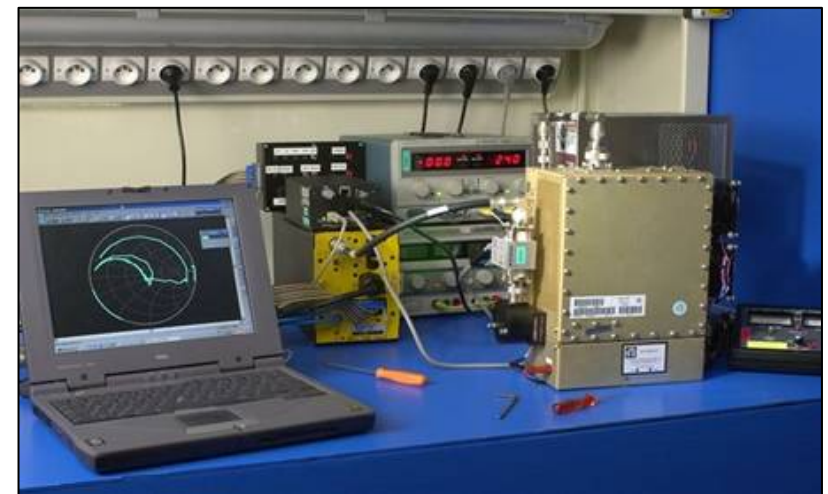
### Le test d'un match en atelier doit permettre de simuler l'ensemble du contexte machine :

- Un générateur et une charge de simulation plasma est le matériel minimum requis
- Il faut y adjoindre un système de mesure avec sonde RF permettant de s'assurer du comportement de la boîte d'accord en dynamique jusqu'à des puissances RF de 10KW.
- Et bien entendu tous les boîtiers de pilotage permettant de simuler les commandes et interfaces machines.
- Pour cela, on utilise l'abaque de Smith ...

## Les moyens d'investigation

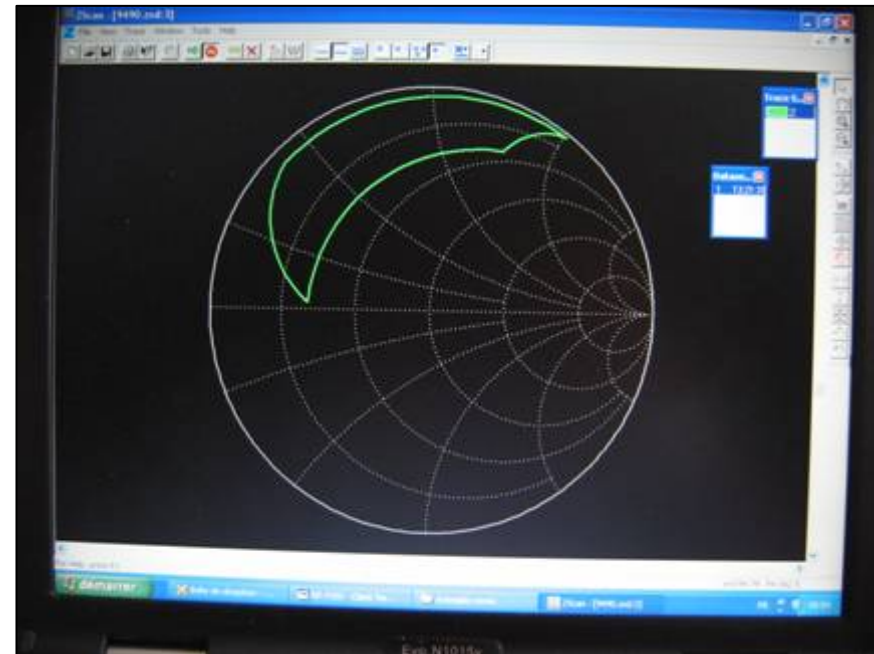
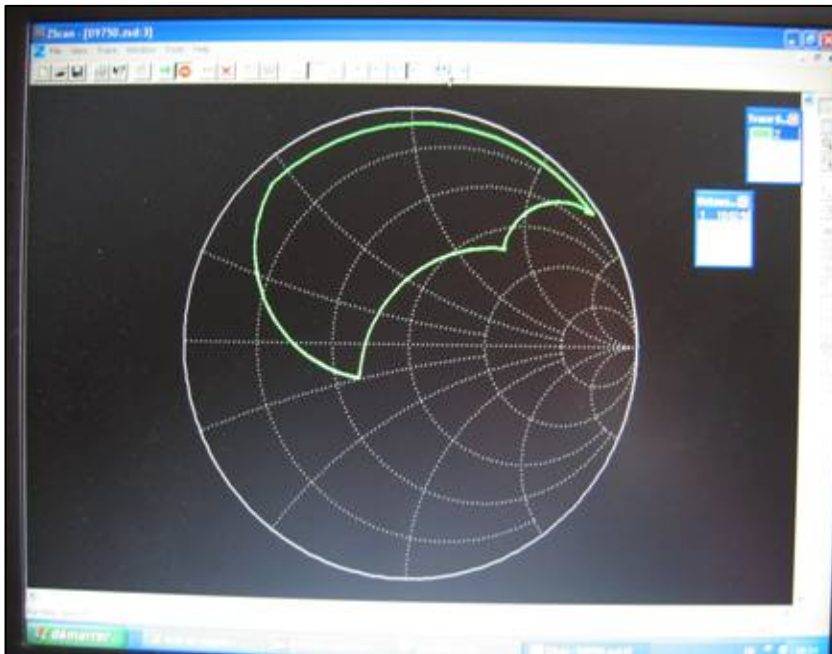


### Une match défectueuse avec accord final non centré (généralant du réfléchi)



### Utilisation de l'abaque de Smith pour visualiser les zones d'impédances couvertes par les matchs

Chaque boîte d'accord ayant ses propres spécifications, l'unique moyen de la caractériser est d'en mesurer la zone de couverture, les analyseurs RF avec visualisation de l'impédance sur Abaque de Smith sont indispensables.



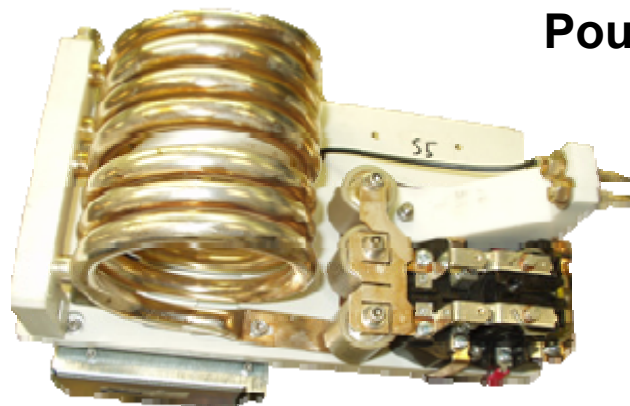
Deux zones de match bien différentes mais pourtant sur des matériels de constitution physique quasi identiques

---

Pourquoi autant de boites d'accord?



Bias Match CVD



Minimatch LAM Research

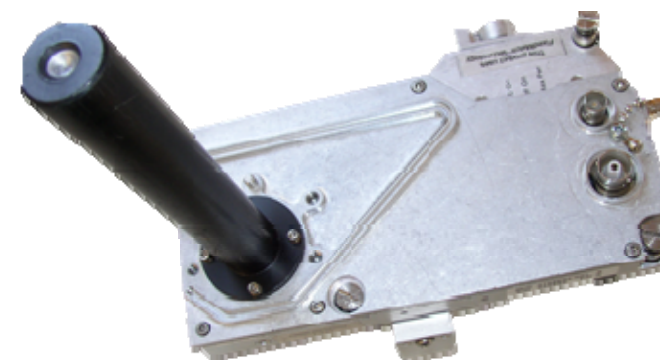


Match CVD P5000

A chaque process et plasma son type de boites d'accord (ou match)



Match Dôme AE pour Applied Materials DPS



MFA Centura Applied Mat



4D-3D

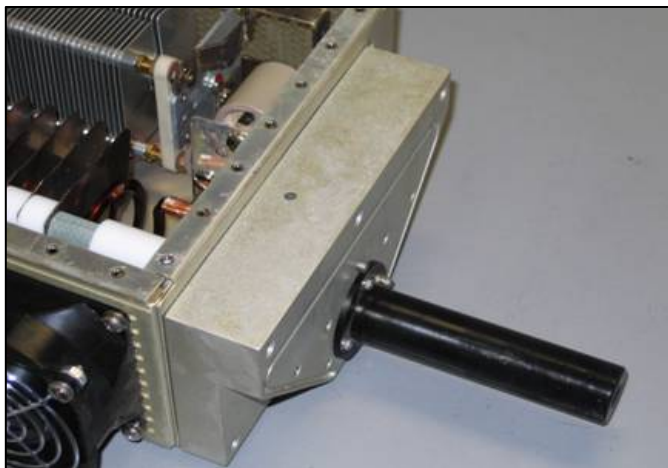
## CEM et Sécurité du personnel

Les valeurs usuelles d'impédance des plasmas sont très souvent génératrices de courants RF très importants de l'ordre d'une centaine d'ampères, et éventuellement plus pendant les phase transitoires.

Un soin tout particulier doit être apporté aux liaisons entre la boîte d'accord et le réacteur, comme l'état et la fiabilité des contacts, la présence et l'état des joints et ressorts CEM (compatibilité électromagnétique), les altérations des traitements de surface sous peine de :

- Perte de puissance transmise au réacteur d'où un process final dégradé
- Altération physique des conducteurs pouvant entraîner des pièces de liaison brûlées
- De perturbations électromagnétiques pouvant créer des interactions avec d'autres matériels et des arrêts machine.

**→ De même en atelier les raccordements respectant les règles de base de la C.E.M.**



**Besoin d'un raccordement RF sécurisé et fiable**



**Création de l'outil de connexion spécifique**



A hautes fréquences, 2 effets indésirables interviennent :

- L'effet de peau
- La puissance réfléchiée

### L'effet de peau :

A haute fréquence, le courant qui circule en surface des matériaux est appelé « l'effet de peau ».

- Cet effet impact directement la valeur de la puissance transmise au plasma.
- La puissance perdue est dissipée sous forme de chaleur dans les conducteurs
- Impact sur la durée de vie des matériels et câbles, (pièces brûlées)
- En final un process altéré par manque de puissance
- Le problème n'est pas forcément visible car la puissance perdue est absorbée par la liaison et la puissance réfléchiée reste faible.

L'évolution de l'épaisseur de la peau dans laquelle circule le courant RF est d'autant plus fine que la fréquence est élevée.

Son calcul est obtenu à partir de la résistivité du matériau par l'équation suivante :

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\pi f \mu_0 \mu_r}}$$

Avec

$\delta$  : profondeur de l'effet de peau (m)

f : Fréquence (Hz)

$\mu_r$  : Perméabilité relative (ex:  $\mu_r$  du Cuivre = 0,999991) (voir nota)

$\mu_0$  : Perméabilité absolue =  $4 \pi \cdot 10^{-7}$

$\rho$  : Résistivité du matériau ( $\Omega \cdot m$ )

Il donc très important de comprendre qu'une surface oxydée aura un impact direct sur le niveau de puissance transmise puis que le courant RF circulera dans un matériaux de plus forte résistivité.

C'est la raison pour laquelle l'argent (le meilleur conducteur) est rencontré largement en temps que traitement de surface sur les designs RF

## La puissance réfléchie

La puissance réfléchie est en quelque sorte la puissance qui ne sera pas transmise au plasma, car la charge représentée par l'ensemble câbles + match + plasma, n'est pas celle qu'attend le générateur.

Elle sera donc directement proportionnelle à la valeur de l'impédance de cet ensemble, chaque élément pouvant intervenir plus ou moins fortement vis-à-vis de l'ensemble de la chaîne.

Elle peut être exprimée de plusieurs façons, la plus simple restant le niveau de puissance réfléchie (reflected) par rapport à la puissance incidente (Forward). D'autres termes usuels décrivent les mêmes phénomènes liés au comportement des ondes sur les lignes RF, le Taux d'onde stationnaire, VSWR (Voltage Standing Wave Ratio) et le coefficient de réflexion  $\rho$  (rhô) sont d'autres formes d'expression de la désadaptation du charge sur un générateur.

$$\rho = \frac{(VSWR - 1)}{(VSWR + 1)}$$

$$VSWR = \frac{(1 + \rho)}{(1 - \rho)}$$

$\rho$	VSWR	Prefl/PFwd
0	1	0%
0,05	1,11	0,25%
0,15	1,22	1%
0,2	1,5	4%
0,25	1,67	6,25%
0,3	1,86	9%
0,35	2,08	12,25%
0,4	2,33	16%
0,45	2,64	20,25%
0,5	3	25%
1	$\infty$	100%

- Bien que les techniques RF soient issues de celles de l'électronique générale, la théorie et les outils mis en œuvre sont bien particuliers. Le domaine des puissances élevées est aussi une contrainte supplémentaire, les composants mis en œuvre doivent répondre aussi bien en fréquence qu'en puissance deux critères pas toujours compatibles en fiabilité et performance, ce qui limite les possibilités de choix par exemple de secondes sources pour la maintenance.
- De même l'absence de formation purement scolaire sur les techniques RF propres au plasma est un frein supplémentaire à la bonne maîtrise des utilisateurs confrontés à des problèmes.
- Avec le développement des énergies renouvelables notamment du solaire, les sources RF de puissance seront de plus en plus répandues, des études avancées sont en cours aussi pour des applications plasma dans les bandes de fréquences Micro Ondes.
- L'avenir des sources RF ne peut être que florissant ... Les plasmas sont partout ...