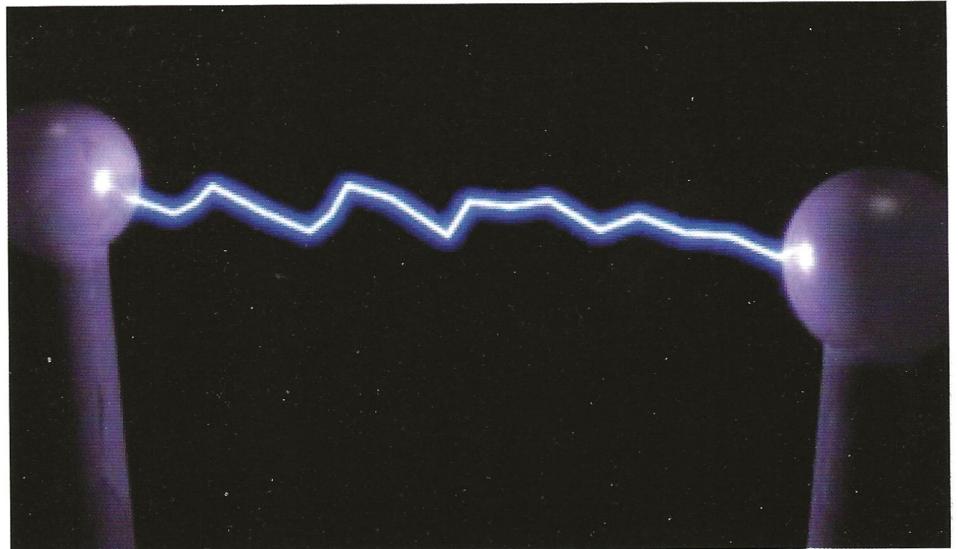


**GÉRARD VELLEAUD**  
 Professeur émérite à l'Université Blaise Pascal de Clermont-Ferrand.  
 Membre du LAEPT (Laboratoire Arc Electrique et Plasmas Thermiques)

## Historique.

L'arc électrique est défini comme étant une décharge électrique autoentretenue, dont l'intensité est supérieure à un ampère.

Bien que son origine soit la même que celle de la foudre ce n'est qu'en 1813 que le physicien Humphrey Davy fit éclater pour la première fois une décharge entre deux conducteurs. La colonne ayant une forme courbée il lui donna le nom d'arc.



## L'arc électrique.

L'arc est une décharge électrique autoentretenue à fort courant entre deux électrodes qui sont :

- l'anode
- la cathode

La zone située entre ces deux électrodes est appelée colonne d'arc.

## Conditions d'existence

Pour que cette décharge ait lieu il faut appliquer entre ces deux électrodes

une d.d.p. (différence de potentiel) suffisante : la tension disruptive.

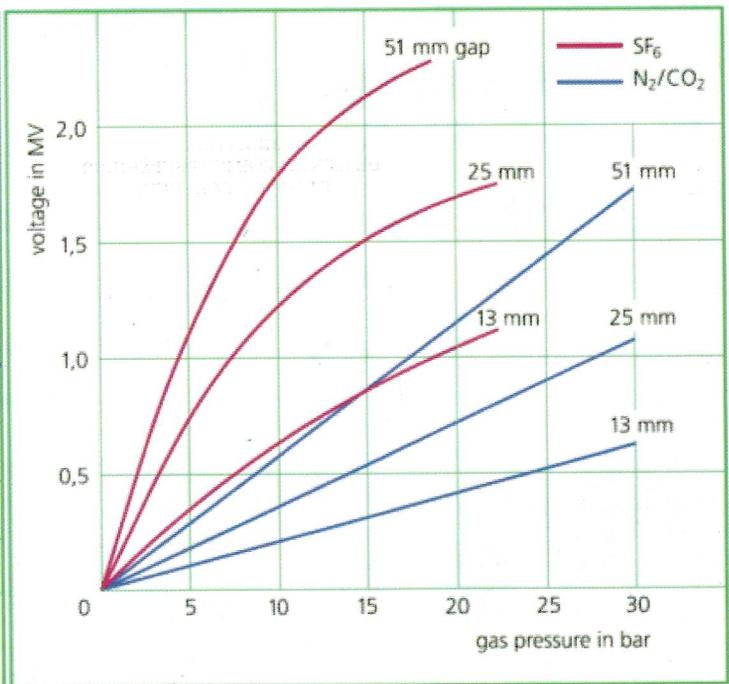
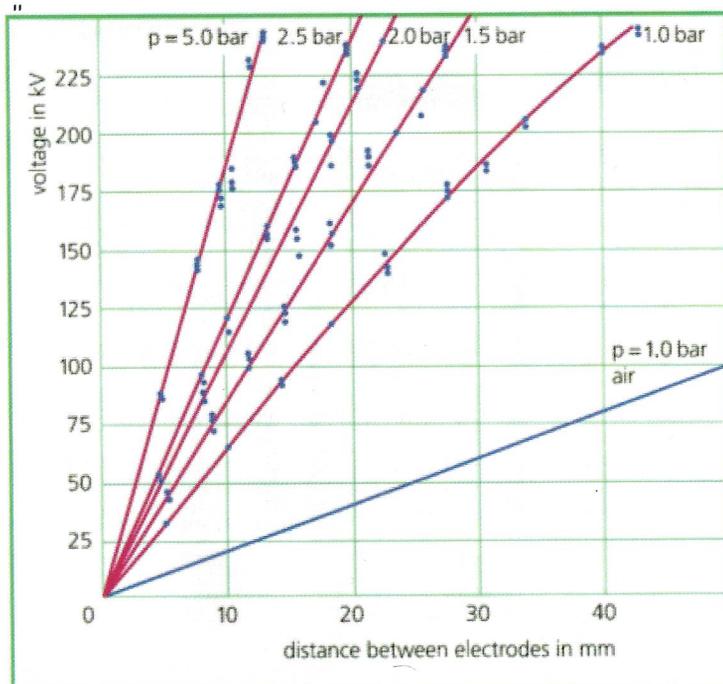
Cette tension dépend de plusieurs facteurs (illustrés par les courbes de PACHEN ci-dessous) :

- la nature du gaz, en rouge SF<sub>6</sub> en bleu N<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub>
- les courbes sont données pour la température ambiante
- la pression

- la distance inter-électrodes.

## AMORÇAGE DE L'ARC.

Pour amorcer cette décharge il faut produire des électrons libres (e<sup>-</sup> primaires ou germes). Sous l'action du champ électrique crée entre les électrodes ils se déplacent une vitesse liée à la valeur E/p, p étant la pression. Ils vont acquérir une énergie suffisante pour ioniser les atomes de gaz voisins,



ce qui va se traduire par l'apparition de nouveaux  $e^-$  qui à leur tour sont accélérés et vont ioniser d'autres atomes.

Nous sommes en présence d'un phénomène d'avalanche, qui provoque une augmentation rapide du courant.

On peut modifier les caractéristiques de cette décharge en jouant sur la pression, la température et la nature du gaz.

### AMORÇAGE PAR CONTACT.

On sépare deux contacts parcourus par un courant. Au départ le contact entre les deux électrodes ne se fait que sur une surface réduite ce qui provoque une forte concentration des lignes de courant.

Cette surface étant très faible (quelques micromètres ?) la résistance électrique est très importante et la dissipation thermique par effet joule élevée.

Cela se traduit par une croissance rapide de la température locale, le point de fusion du métal est atteint : il y a formation d'un pont fondu métallique et émission thermo-ionique.

L'allongement du pont entraîne sa rupture qui s'accompagne d'explosions, de projection de gouttelettes et de vapeurs métalliques, qui ionisées vont provoquer la naissance d'un arc électrique.

### AMORÇAGE PAR FUSION D'UN FIL CONDUCTEUR.

## Différence de potentiel et courant d'arc

La figure suivante (en bas de page) donne l'allure de ces deux grandeurs

## Etude des électrodes

### LA CATHODE.

La cathode est un centre émissif d'électrons, accélérés par le champ électrique. L'observation de sa surface fait apparaître des taches. Il s'agit de zones formées d'un grand nombre de centres émissifs distincts.

Leur surface est de l'ordre de  $10^{-7} \text{ m}^2$  et leur durée de vie est inférieure à une microseconde.

Plusieurs mécanismes sont responsables de l'émission électronique. De l'effet conjugué de la température et du champ électrique résulte un nombre d' $e^-$  ayant une énergie supérieure au niveau de Fermi capables de franchir la barrière de potentiel.

La densité de courant,  $J_c$ , émis est donnée par la loi de Murphy-Christov

$$J_c = e \int_{w_0}^{\infty} D(W)N'(W) dW$$

Où  $D(W)$  représente la probabilité de traverser la barrière de potentiel pour un  $e^-$  d'énergie  $W$ . C'est une fonction du champ électrique  $E$ .

$N(W)dW$  : nombre d' $e^-$  franchissant la barrière de potentiel par unité de surface et par seconde, et ayant une énergie comprise entre  $W$  et  $W+dW$ .

Les électrons émis par la cathode atteignent la colonne avec une énergie supérieure au seuil d'ionisation de la

vapeur métallique. Ceci produit une accumulation d'ions positifs situés à faible distance de l'électrode.

L'augmentation locale de la température provoque la création d'un bain liquide à partir duquel s'effectue la perte de matière, soit par éjection axiale de gouttelettes à l'extinction du site, soit par éjection radiale sous l'influence de la pression à la surface de l'électrode.

### L'ANODE

L'anode est un collecteur d'électrons. A la pression atmosphérique il y a toujours une tache appelée spot anodique. Elle est unique, circulaire, due à l'échauffement très intense à la surface de l'électrode.

Pour la densité de courant on trouve des valeurs pouvant atteindre  $9.10^9 \text{ A.m}^{-2}$ .

### LA COLONNE D'ARC

Elle assure le passage du courant entre les deux électrodes par l'intermédiaire d'un plasma constitué d'un mélange d' $e^-$ , d'ions, de molécules, provenant du gaz ambiant et des vapeurs métalliques issues des électrodes.

Il est caractérisé par son degré d'ionisation :

$\alpha = Ne/(Ne + N)$  où  $Ne$  est la densité d' $e^-$ ,  $N$  la densité des particules neutres.

Si  $\alpha < 10^{-4}$  le plasma est faiblement ionisé : on dit que l'on est en présence d'un plasma froid.

Si  $\alpha$  est  $> 10^{-4}$  le plasma est fortement ionisé, c'est un plasma chaud.

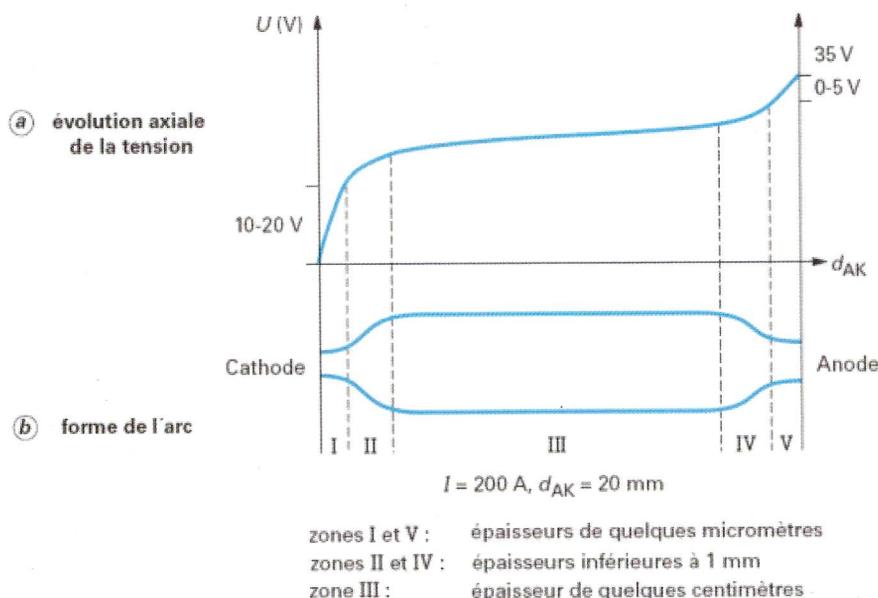
Dans les plasmas froids la température est de l'ordre de  $10^4 \text{ K}$ .

Les ions et les neutres sont appelés particules lourdes. Du fait de leur faible masse les électrons se déplacent plus vite que les particules lourdes et ont de nombreuses collisions avec ces dernières auxquelles ils vont transférer une partie de leur énergie.

Les particules lourdes vont se trouver à l'état excité pendant 1 à 2 $\mu\text{s}$ , puis se désexciter à un niveau inférieur en émettant des photons.

Le mélange n'est qualifié de plasma que si les charges positives et négatives s'équilibrent.

Le plasma est donc électriquement neutre, à l'échelle macroscopique.



De par la présence de charges libres le plasma est conducteur. L'énergie fournie aux différentes particules par le champ électrique est absorbée par celles-ci sous forme d'énergie cinétique. Les échanges énergétiques entre les électrons et les particules lourdes ont lieu sous forme de chocs.

- les chocs élastiques, avec conservation de l'énergie cinétique et de la quantité de mouvement. Il faut des milliers de chocs pour que les électrons perdent leur énergie.

- les collisions inélastiques. Une partie de l'énergie cinétique est transformée en énergie interne.

Ces chocs sont caractérisés par le libre parcours moyen des particules.

Celui-ci qui dépend de la densité des particules est, dans les plasmas thermiques de l'ordre de quelques micromètres.

## Etude thermodynamique de la colonne

### EQUILIBRE THERMODYNAMIQUE

Les échanges énergétiques ont lieu principalement par chocs élastiques entre les électrons et les particules lourdes.

A l'équilibre les paramètres du plasma sont fixes. Tout processus direct est compensé par un processus inverse

- à chaque ionisation correspond une recombinaison

- à chaque excitation correspond une désexcitation

- à chaque émission photonique correspond une absorption photonique.

Il en résulte que les températures des ions, des électrons, des neutres sont égales.

L'ensemble de ces propriétés est défini par les lois de Maxwell, Boltzmann et Saha.

### LES COEFFICIENTS DE TRANSPORT.

L'écart à l'équilibre d'un plasma se définit par ses coefficients de transport qui caractérisent le transfert d'une propriété physique à travers le milieu.

Sont ainsi définies :

- la diffusion liée au transport de masse
- la viscosité qui traduit le transport de la quantité de mouvement

- les conductivités thermiques et électriques relatives au transport d'énergie thermique et de charges électriques.

Ces coefficients sont calculés à partir de l'équation de Boltzmann.

La conductivité thermique s'écrit :

$$\lambda = \lambda_{tr} + \lambda_T + \lambda_{int} \text{ où :}$$

$\lambda_{tr}$  représente la conductivité thermique de translation,  $\lambda_T$  de réaction,  $\lambda_{int}$  interne.

$\lambda$  est le coefficient de viscosité et  $\lambda$  la conductivité électrique.

### MODÈLES MACROSCOPIQUES

Ces modèles utilisent les grandeurs macroscopiques courant, tension, pour définir l'évolution de l'arc. Ils ne font pas intervenir les processus intervenant dans l'arc.

Ils résultent des équations de conservation de l'énergie.

Les plus connus sont les modèles de Cassie et de Mayr. Ils sont du type conductance et reposent sur une relation du type

$$G = I/U = f(H)$$

G est la conductance de la colonne par unité de longueur, H l'enthalpie par unité de volume. La variation temporelle d'enthalpie est égale à la différence entre la puissance fournie et les pertes par conduction, convection et radiation dans la colonne.

Les résultats obtenus à l'aide de ces deux modèles sont assez éloignés de l'expérience mais néanmoins encore très utilisés, car les modèles plus proches de la réalité physique sont d'une telle complexité qu'ils sont inutilisables dans le cas des appareils de coupure.

### EXTINCTION DE L'ARC

On admet que l'arc est éteint lorsque le courant s'annule. Cette annulation peut être obtenue, soit en annulant la tension, soit en étirant la colonne.

En réalité bien que le champ électrique soit nul entre les électrodes le plasma subsiste un certain temps qui dépend de la vitesse de recombinaison électrons-ions et du refroidissement du gaz. Il faut récupérer la rigidité diélectrique du gaz.

La durée de cette phase très complexe varie de  $10^{-12}$  s à  $10^{-6}$  s.

### ARC DANS LE VIDE

Le vide étant un diélectrique parfait l'absence de particule dans l'espace inter-électrodes interdit a priori l'existence d'un arc.

En réalité lors de la séparation des contacts métalliques dans une ampoule à vide un arc apparaît dans l'atmosphère constituée par les vapeurs métalliques émises par les électrodes. Le plasma diffuse dans la chambre de coupure.

## L'arc électrique et ses applications

Les applications sont de deux types :

- Tout d'abord la protection des hommes et des systèmes à l'aide d'appareils de coupure, soit par fusibles, soit par contacteurs disjoncteurs.

- Les applications industrielles telles que les fours à arc, le soudage, les lampes et les torches à arc très utilisées dans le domaine de la chimie et la dépollution entre autres.

### LES APPAREILS DE COUPURE

L'interrupteur idéal doit pouvoir passer instantanément de l'état conducteur (conductance infinie) à l'état isolant (conductance nulle). Un tel interrupteur n'existe pas.

Cependant l'arc de par sa faible inertie et son aptitude à passer très vite de l'état conducteur à l'état isolant permet de s'approcher de cette coupure idéale.

Le problème de la coupure réside dans la vitesse à laquelle l'arc se désionise et perd sa conductance afin de redevenir isolant.

Lorsque le courant décroît à l'approche du zéro la puissance fournie à l'arc devient inférieure à celle qu'il cède au milieu environnant. Par conséquent le plasma se refroidit ce qui favorise la recombinaison ions-électrons.

Les différents appareils de coupure devront prendre en compte cette propriété. On favorise le refroidissement de l'arc soit par allongement de la colonne soit en améliorant les échanges avec son environnement.

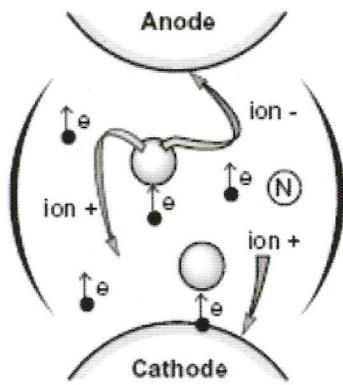
Cependant à partir du moment où l'appareil devient isolant la tension à ses bornes tend vers la valeur de la f.e.m. du réseau sur lequel il est branché. Le régime transitoire qui caractérise cette transition est lié aux caractéristiques du circuit. Il correspond à la tension transitoire de rétablissement, T.T.R., dont les variations peuvent atteindre plusieurs kV par microseconde.

Les trois figures ci-contre représentent respectivement la composition du plasma constituant la colonne d'arc puis l'évolution de la tension aux bornes des électrodes en fonction de la distance anode cathode. On notera qu'au moment de la séparation des contacts il faut fournir au dispositif une tension minimale de 30 V dans le cas du cuivre. Cette valeur correspond à la somme des chutes de tension à l'anode et à la cathode. Elle varie en fonction des matériaux constituant ces deux électrodes.

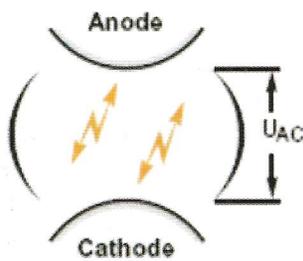
Il correspond au courant présumé, c'est-à-dire à celui qui traverserait la charge en l'absence de dispositif de protection.

Il est qualifié de symétrique lorsque sa variation est sinusoïdale et asymétrique lorsqu'elle est affectée par un changement de régime lié à la modification des paramètres de la charge.

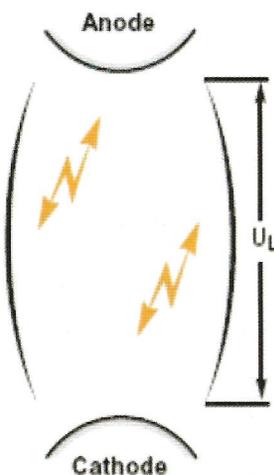
Dans les deux cas le courant réel, appelé courant d'arc,  $I_c$ , atteint sa valeur maximale lorsque la tension d'arc rejoint celle du réseau. Cette phase, appelée phase de parc, a une durée très faible liée à la valeur de la tension et du courant au moment de l'ouverture des contacts. On peut remarquer qu'au début de cette phase la tension est très



a : composition de la colonne d'arc.



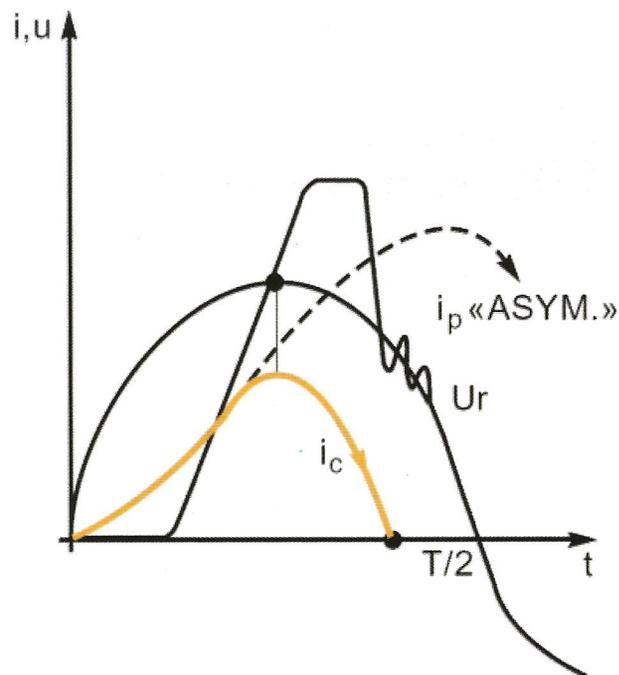
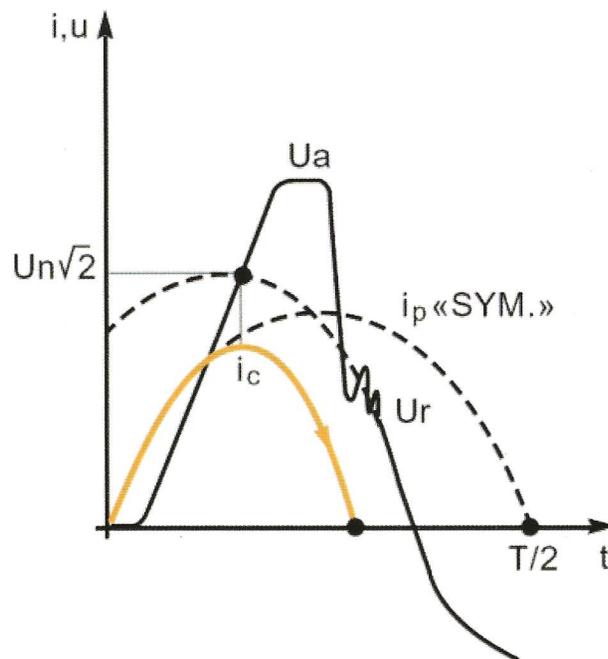
$U_{AC} \approx 30 \text{ V}$  à la séparation des contacts.



$U_L \approx 70 \text{ V/cm}$  après allongement de l'arc.

$$U_a = U_{AC} + U_L$$

b : tension de l'arc.



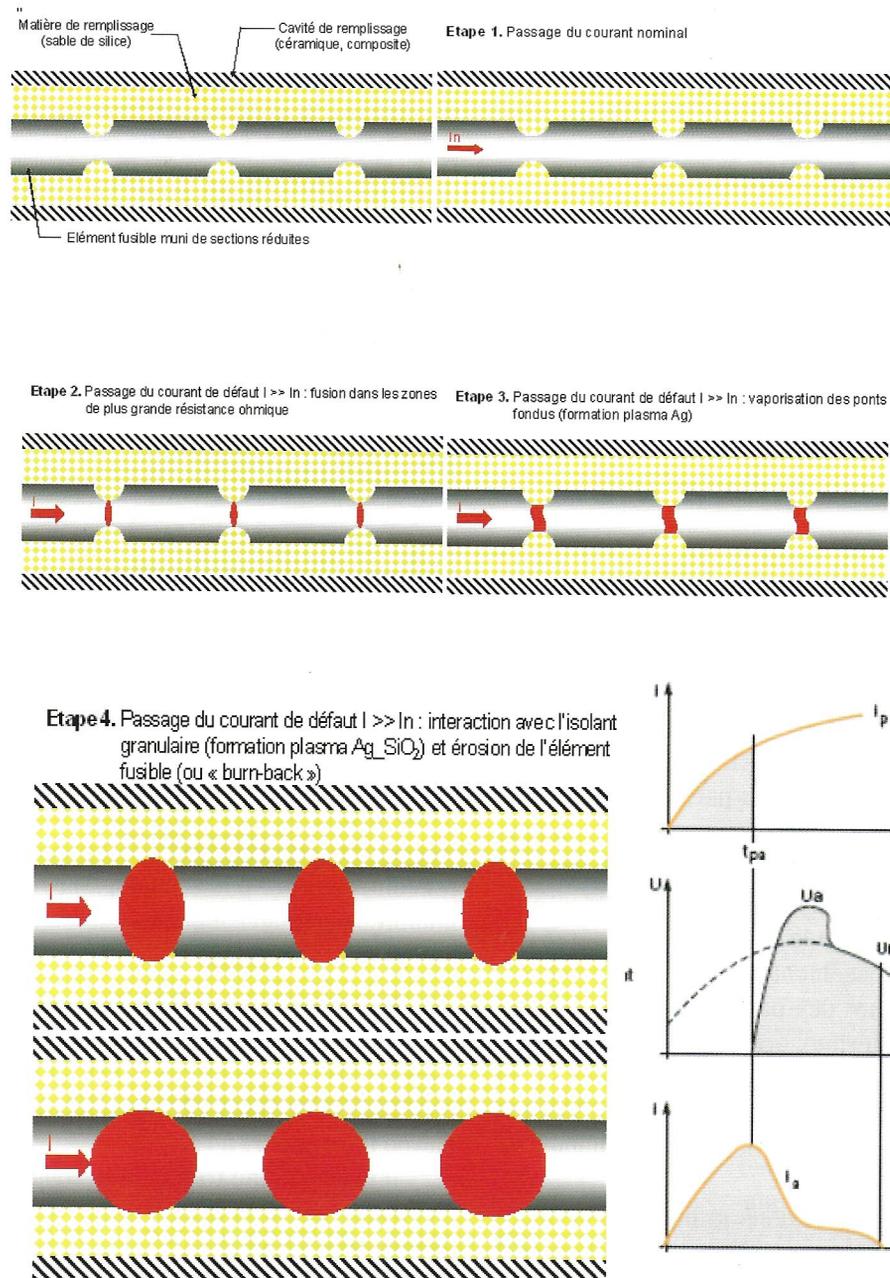
*l'arc électrique, son phénomène physique (a) et sa tension caractéristique ou tension d'arc  $U_a$  (b).*

faible, les contacts étant en appui l'un sur l'autre. Ensuite, avec l'apparition du pont fondu qui s'accompagne de l'émission thermo-ionique, elle croît très vite. Lorsqu'on atteint la vaporisation des éléments métalliques, et que le plasma apparaît on entre dans la phase d'arc ce qui explique le changement de pente du courant  $I_c$ . On est en régime d'arc. La tension d'arc augmente avec l'allongement de la colonne pour atteindre des valeurs très supérieures à celle du réseau. La différence correspond à la d.d.p. aux bornes de la composante inductive de la charge, qui se comporte en générateur.

Au fur et à mesure que l'intensité du courant diminue la tension  $U_a$  marque un palier puis diminue à son tour pour retrouver la valeur du réseau qui correspond à l'annulation du courant d'arc. C'est alors qu'apparaît la T.T.R. qui se traduit par des oscillations dont la fréquence et l'amplitude sont fonction des valeurs de la charge.

### LES FUSIBLES EN MOYENNE TENSION.

Ils reprennent le principe de l'amorçage de l'arc par fil conducteur.



Les trois courbes sur la page ci-contre représentent respectivement les variations du courant présumé  $I_p$  (courant circulant dans le circuit de charge dépourvu de fusible, sous la tension nominale) ; la tension aux bornes du fusible  $U$  ainsi que le courant  $I$  circulant dans le fusible.

La première phase dite de pré arc part de l'application du courant de défaut jusqu'à la création de l'arc au niveau des sections réduites du ruban d'argent constituant le fusible.

Le régime d'arc, qui apparaît à la fin du régime de parc, correspond à une augmentation très rapide de la tension qui passe par son maximum avant de décroître pour tendre vers la tension du réseau. Il convient de noter la décroissance continue du courant d'arc liée à l'augmentation très forte de l'impédance équivalente du fusible.

Pendant cette dernière phase, en effet, l'arc provoque une érosion de l'élément fusible (burn-back) qui interagit avec l'isolant granulaire l'entourant. Ce dernier, de par la très forte chaleur qui apparaît, fond et s'amalgame avec l'argent en fusion pour créer un mélange solide argent silice appelé fulgurite.

Actuellement de nombreuses études sont, à la demande

des industriels, menées sur ces deux phases de pré-arc et de burn-back. L'objectif est de mettre au point des modèles permettant de mieux appréhender les phénomènes physiques et d'améliorer les produits utilisés que ce soit au niveau domestique ou industriel.

A cette fin on utilise les équations classiques qui seront définies ultérieurement dans la partie disjoncteur. Néanmoins il convient de prendre en compte les spécificités propres à la conception de ces fusibles, différentes de celles rencontrées dans les disjoncteurs.

### LES DISJONCTEURS

Les arcs dans les disjoncteurs font partie des arcs à haute pression de type libre.

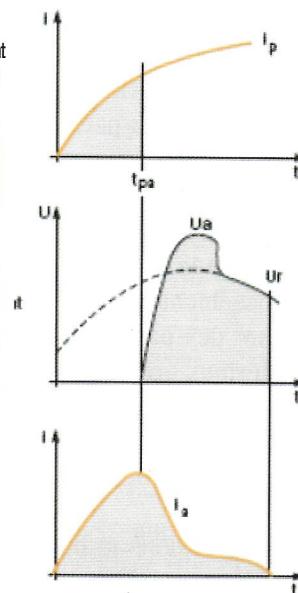
Le mouvement de la colonne est engendré par les forces électromagnétiques de Laplace ou par des variations brutales de masse volumique.

La coupure dans l'air qui est la plus ancienne est utilisée dans les basses tensions jusqu'à 15 kV.

Au-delà de cette valeur le gaz utilisé est l'hexafluorure de soufre SF<sub>6</sub>.

Les boîtiers doivent prendre en compte les facteurs suivants :

- forces et chocs mécaniques des parties mobiles,
- forces électromagnétiques générées par le courant de court-circuit engendrant l'ouverture des contacts,
- chaleur développée par l'arc susceptible de détériorer le boîtier,
- élévation de la pression simultanée à l'élévation de la pression.



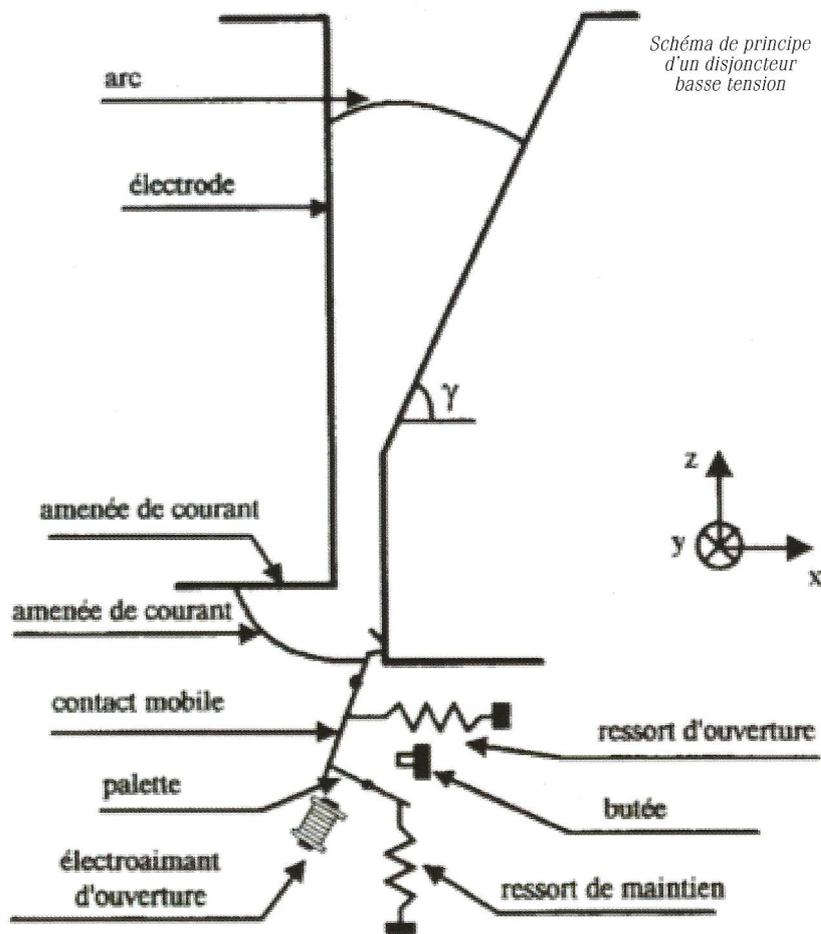


Schéma de principe d'un disjoncteur basse tension

### PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

Lorsque le courant de défaut atteint une valeur, supérieure au seuil d'ouverture du disjoncteur, l'induction magnétique créée par l'électroaimant d'ouverture est suffisante pour attirer la palette ce qui provoque la rotation du contact mobile et donc l'ouverture du disjoncteur.

Dans un premier temps il y a, entre les deux contacts, apparition d'un pont fondu accompagnée d'une émission thermo-ionique et naissance d'un plasma d'arc qui va constituer la colonne d'arc.

Sous l'influence de l'induction magnétique, créée par les amenées de courant et la partie inférieure du dispositif, la colonne d'arc va être propulsée dans la partie supérieure du disjoncteur appelée chambre de coupure. Pendant cette phase elle s'allonge, ablate les parois, la pression pouvant atteindre plusieurs dizaines de bars et la température dépasser 10000 K. Il en résulte une modification rapide de la conductance du plasma ce qui se traduit par une forte augmentation de la tension d'arc.

L'objectif est de faire en sorte que cette tension atteigne le plus rapidement possible la f.e.m. (force électro-motrice) de la source afin d'annuler le courant pour que la coupure du circuit soit effective.

Pour réduire la durée de cette phase plusieurs techniques sont utilisées. On peut par exemple augmenter le refroidissement de la colonne en favorisant son allongement. Pour ce faire on agit sur la géométrie de la chambre de coupure et sur la forme de électrodes. On peut également introduire, dans la partie supérieure de la chambre de coupure, des éléments métalliques appelés séparateurs qui vont absorber une part importante de l'énergie de la colonne et accélérer son refroidissement. On joue également sur la nature des parois en les recouvrant de matériaux organiques. L'ablation de ces parois va modifier la composition du plasma, donc la valeur des coefficients de transport, et par là même sa conductance.

De plus dans la partie supérieure de la chambre on introduit des lumières d'échappement qui limitent la

surpression interne et évitent les risques d'explosion du disjoncteur.

Tous ces procédés vont avoir une influence très forte sur l'allure de la colonne et sur sa dynamique.

Actuellement de nombreuses études sont menées pour mieux appréhender les différents mécanismes qui régissent cette coupure.

Pour ce faire on utilise des modèles mathématiques basés sur les équations caractéristiques du fonctionnement du disjoncteur qui sont :

les équations de conservation de la masse et de la quantité de mouvement, la conservation de l'énergie, les équations électriques et magnétiques.

Ces équations font intervenir, entre autres, la viscosité, la conductivité thermique, la conductivité électrique, la pression, la température, le vecteur quantité de mouvement, le courant d'arc. De plus il convient d'introduire le flux de chaleur, les pertes par rayonnement et par effet Joule ainsi que les valeurs des champs électrique et magnétique.

Cela correspond à un ensemble d'équations dont la résolution ne peut être que numérique.

Il convient de souligner la difficulté d'exploitation de ces modèles. En effet comme nous l'avons souligné les résultats sont tributaires des valeurs numériques des différents paramètres introduits ; par exemple les coefficients de transport, la section de la colonne, la distribution de la température et de la pression dans la chambre de coupure.

Or ces valeurs varient très rapidement (rappelons qu'une bonne protection se traduit par une coupure dont la durée est de quelques millisecondes). Leur variation instantanée n'est pas connue de manière précise, et les valeurs utilisées très approximatives ; d'où les difficultés rencontrées et par conséquent les nombreuses études en cours.

### LA COUPURE EN MOYENNE TENSION

A température ambiante l'hexafluorure de soufre SF6 est un gaz incolore et inodore de densité très élevée par rapport à l'air.

Il possède une très grande rigidité électrique liée à la grande taille de sa molécule.

Dans le cas d'une distribution

cylindrique de ce gaz la création de l'arc fait apparaître une zone cylindrique de très faible dimension appelée noyau de l'arc. La température de ce noyau est très élevée, alors que celle de son entourage, appelée gaine, est très faible et indépendante du courant d'arc. Elle est inférieure à 3000 K ce qui la rend isolante.

Lors de la décroissance du courant on constate une forte diminution de la température et de la dimension du noyau qui disparaît avec le passage au zéro de ce courant.

On travaille à une pression d'environ 3 bars et de plus on fait tourner l'arc dans la chambre de coupure. Cette technique est dite de l'arc tournant.

### LA COUPURE DANS LE VIDE

Actuellement de nombreuses études sont faites sur l'arc dans le vide en vue de remplacer la coupure dans le SF6. Cette technique, bien que datant des années 1920, pose de nombreux problèmes.

atmosphériques. Lorsque le courant décroît la pression baisse et les vapeurs migrent en dehors de la zone d'arc.

En dessous d'une certaine intensité on passe d'un régime de type concentré à un régime de type diffus. La rigidité diélectrique se rétablit d'autant plus vite que la pression résiduelle disparaît.

La difficulté provient du fait qu'il faut passer le plus vite possible du régime concentré au régime diffus. La valeur du courant qui permet cette transition est liée à la nature des électrodes et à la géométrie du dispositif.

### LES TORCHES À ARC

Les torches à arc encore appelées plasmatrans permettent d'obtenir localement de très hautes températures, à des prix faibles, d'où de nombreuses applications dans l'industrie.

Le principe de ces torches est de créer un plasma d'arc, mobile, dans un gaz plasmagène.

Les gaz plasmagènes ont pour propriétés d'avoir un potentiel d'ionisation élevé et une grande mobilité électronique. Ce sont pour l'essentiel des gaz inertes. On trouve le dioxyde d'azote  $\text{NO}_2$ , le dioxyde de carbone  $\text{CO}_2$ , l'hélium He, le néon Ne, le krypton Kr, le mono-oxyde de carbone CO et l'hydrogène  $\text{H}_2$ .

On distingue deux familles de torches :

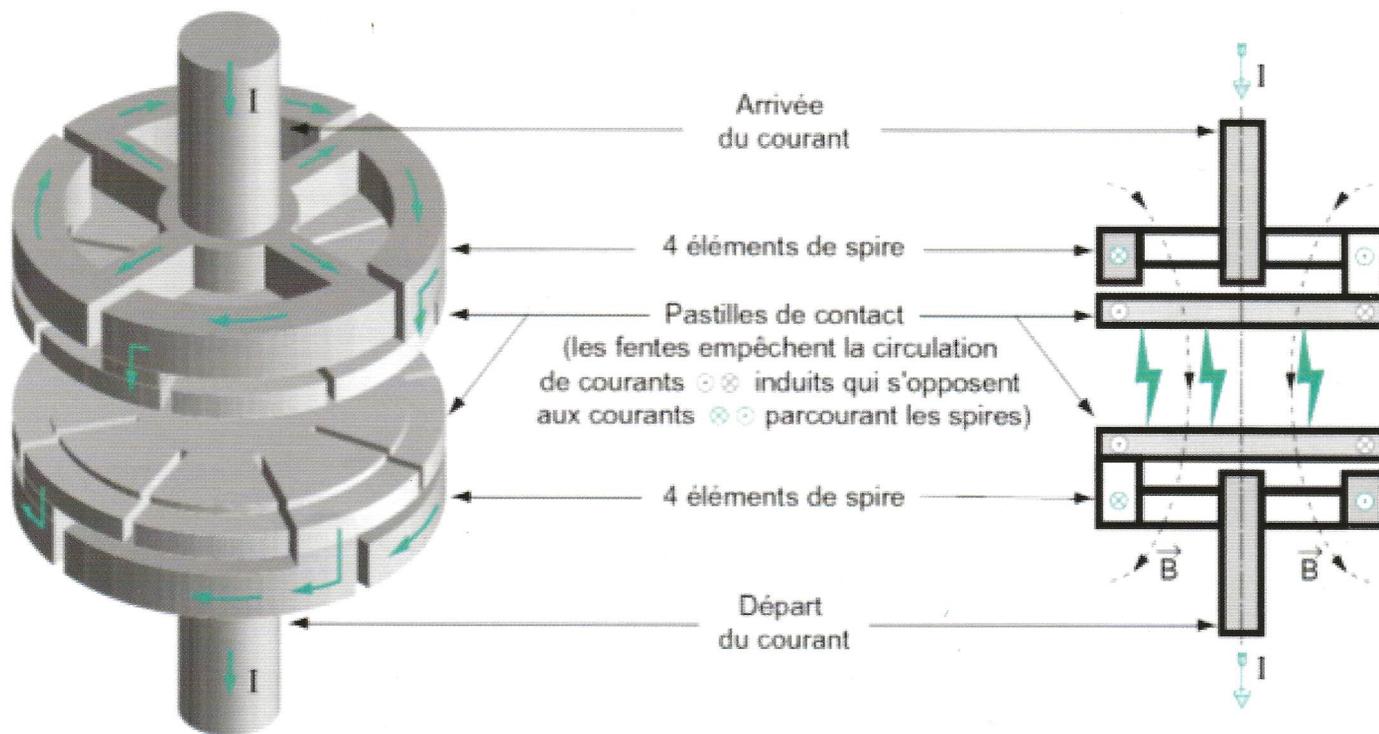
- les torches à cathode chaude,
- les torches à cathode froide.

On utilise parfois une autre classification :

- les torches à arc transféré
- les torches à arc non transféré.

### LES DISPOSITIFS À CATHODES CHAUDES.

La cathode est placée dans un porte cathode qui est refroidi par eau. La cathode peut avoir plusieurs formes. En général son extrémité est très étroite afin que la surface d'accrochage



contacts créant un champ magnétique axial.

### CONCEPTION DES ÉLECTRODES DANS UNE CARTOUCHE À VIDE.

En effet la vaporisation des électrodes se traduit à l'intérieur de l'ampoule par l'apparition d'une pression voisine des valeurs

Cependant il convient de respecter la compatibilité entre les matériaux utilisés pour les électrodes et le gaz afin d'éviter les phénomènes d'oxydo-réduction qui entraînent une usure prématurée de ces électrodes.

de l'arc soit la plus faible possible (mais suffisante pour éviter sa destruction), ce qui permet d'avoir une température élevée. Selon les intensités rencontrées on choisit le tungstène thorié, le graphite, le cuivre ou le fer.

### LES DISPOSITIFS À CATHODE FROIDE

Leur surface est plus importante ce qui fait que l'arc possède de multiples points d'accrochage.

Ce type de cathode est constitué d'un cylindre de cuivre à l'intérieur duquel l'arc va se fixer.

De plus il aura tendance à tourner sur lui-même à l'intérieur de ce cylindre.

### LES ANODES.

Elles sont indépendantes du type de cathodes utilisées. Deux formes sont retenues selon l'utilisation souhaitée :

- une tuyère cylindrique refroidie par eau pour une torche à arc non transféré
- l'objet sur lequel l'arc sera transféré.

- stabilisation par parois. On réalise un rétrécissement de l'anode ou de la chambre à l'aide de plaques refroidies par eau. L'arc va se confiner au centre de l'étranglement créé et se stabiliser.

- stabilisation par champ magnétique. On crée autour de la torche un champ magnétique tournant à l'aide de bobines ou d'aimants permanents ce qui oblige le pied d'arc à se déplacer et l'arc à tourner à des vitesses élevées.

- la stabilisation par eau. Cette méthode consiste à créer un plasma plongé à l'intérieur d'un vortex d'eau. Cela permet d'obtenir une bonne constriction du plasma ce qui réduit l'usure des électrodes. Cependant sa mise en œuvre est complexe.

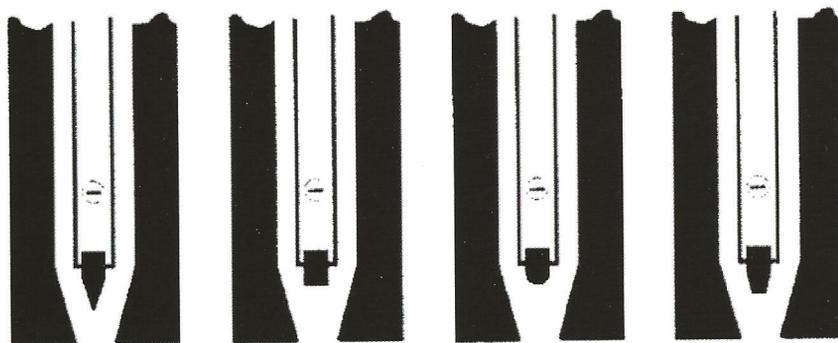
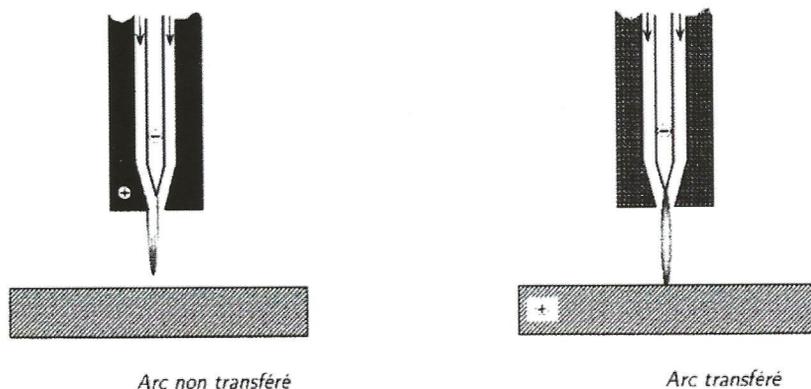
Les travaux portent entre autres sur le comportement des électrodes, la distribution du plasma dans la chambre et sa dynamique.

## CONCLUSION

L'arc électrique est un phénomène très complexe qui fait intervenir toutes les branches de la physique : la thermique, l'électricité, l'électrotechnique, la mécanique classique, la mécanique des fluides, la physique des matériaux, l'atomistique, la physico-chimie et la chimie. Il convient de noter, de par la complexité des modèles mis au point, la part de plus en plus importante des techniques de calcul.

D'autre part la demande de plus en plus forte de dispositifs de sécurité très performants, de concepts énergétiques à forts rendements, fait que les appareillages basés sur les propriétés de l'arc électrique sont de plus en plus recherchés par le monde industriel.

Ceci ouvre de nombreuses perspectives ce qui se traduit entre autres par une dynamique très forte des activités de recherche dans ce domaine.



*Différentes formes de cathodes insérées dans un porte-cathode*

### STABILISATION DES PLASMAS.

On peut stabiliser l'arc en augmentant la tension mais cela ne permet de le faire que dans une zone définie. Aussi utilise-t-on les procédés suivants :

- stabilisation par gaz. L'injection de gaz froids va forcer le plasma à se resserrer sur lui-même. De plus la technique dite par vortex oblige l'arc à tourner sur lui-même ce qui réduit l'usure de la cathode,

Les torches à plasma, de par leur rendement énergétique élevé, sont très prisées au niveau industriel. Elles offrent de nouvelles perspectives d'où les nombreuses études dont elles font l'objet. Le but est de mieux maîtriser la connaissance des phénomènes physiques caractéristiques du fonctionnement afin d'améliorer les performances et les modalités d'utilisation.