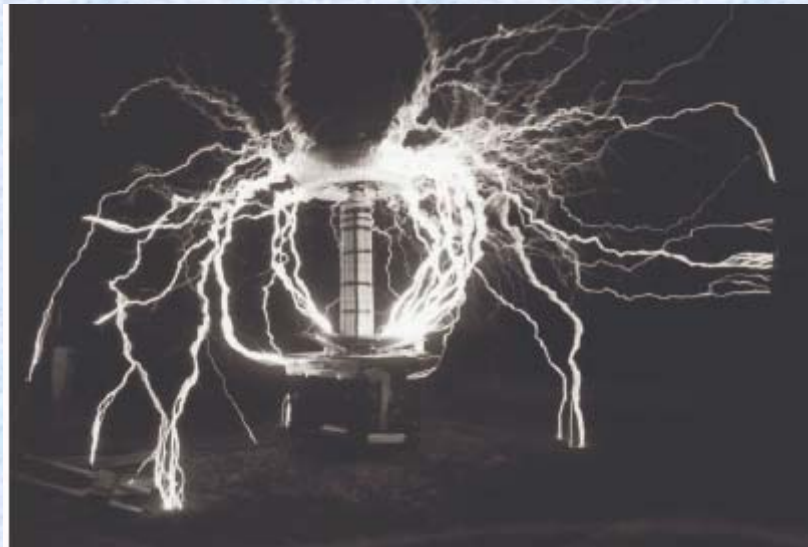
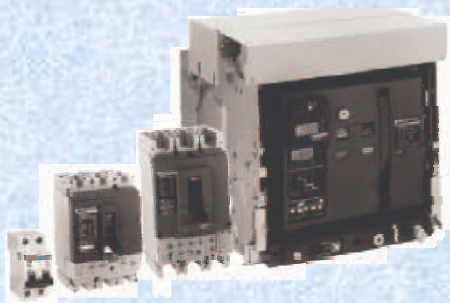


Propriétés des appareils de coupure



***Yann Cressault : Laboratoire LAPLACE
Master M1 SYGELEC***

Définition des plasmas thermiques

- ➡ Les **plasmas thermiques** sont classifiés comme des plasmas chauds par la communauté des plasmas dis « hors équilibre » et comme plasma froids par la communauté des plasmas de fusion.
- ➡ Leurs particules présentent une fonction de distribution Maxwellienne. Elles présentent donc une vitesse d'agitation thermique proportionnelle à leur température mais possèdent aussi une vitesse de dérive qui est bien plus petite que leur vitesse d'agitation thermique.
- ➡ En première approximation, les **plasmas thermiques** ont une **même température** pour les **particules lourdes et les électrons**. Cela implique l'état d' «**Équilibre Thermodynamique Local** » (E.TL.). Cette température se situe à des valeurs autour de **10000K** voir quelques dizaines de milliers de kelvins.
- ➡ L'égalité des températures entre **lourds et électrons** est essentiellement assurée par les **collisions élastiques lourds – électrons**. Ainsi, la densité des électrons est relativement importante (autour de 10^{23} m^{-3}) dans les plasmas thermiques. La pression est elle aussi relativement élevée (autour de la pression atmosphérique)

Rappels sur les plasmas thermiques

Le plasma est un milieu gazeux globalement neutre composé de molécules, d'atomes neutres, d'ions et d'électrons.

Types de plasmas

Les plasmas « chauds »

- $T \sim$ qqes millions de degrés, $E \sim \text{keV}$
- réacteurs nucléaires, études de fusions et/ou de fissions
- mécanismes magnétiques importants, Tokamaks

Les plasmas « froids »

- plasmas hors équilibre thermique
- ***plasmas thermiques ($E \sim \text{eV}$)***

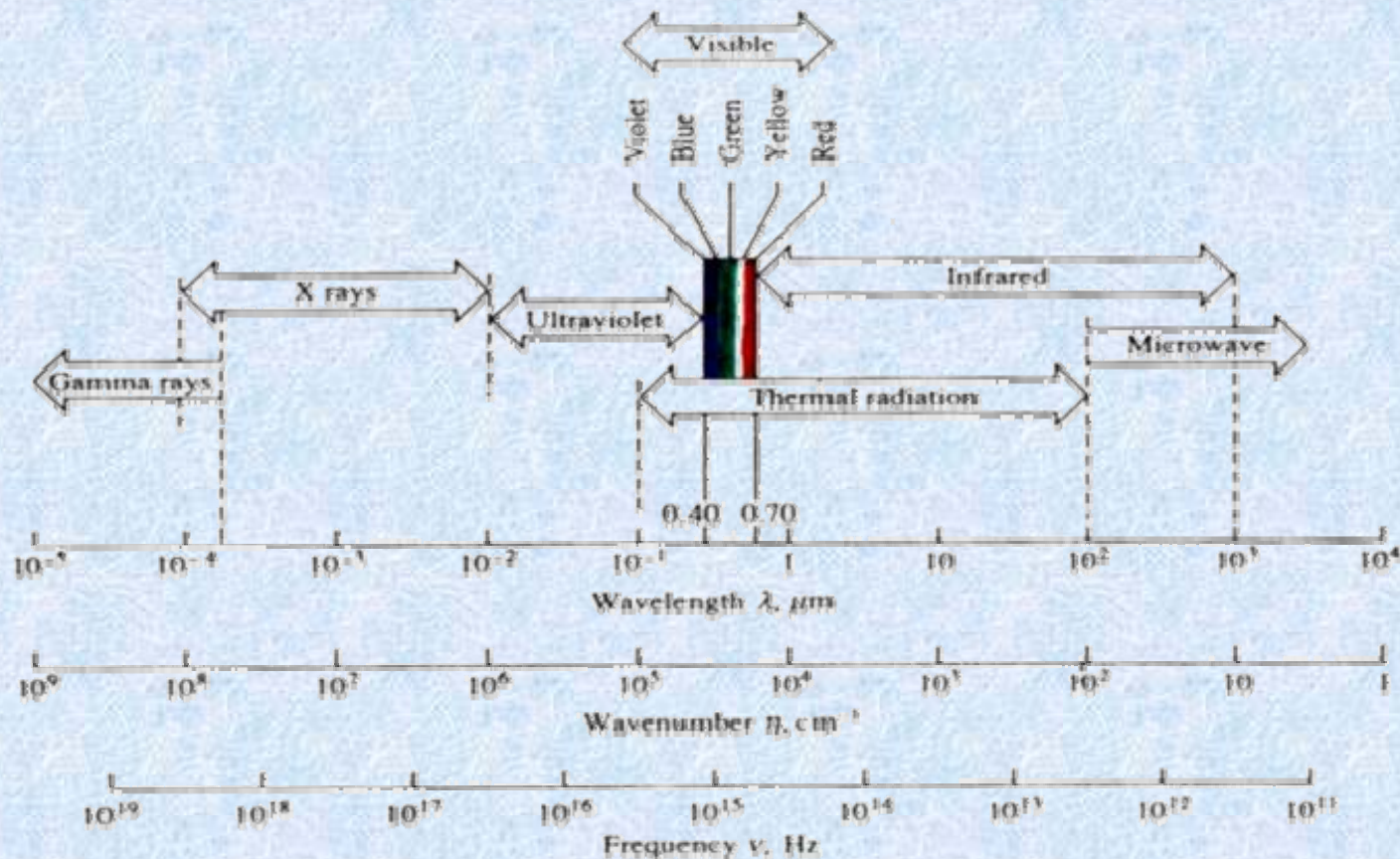
Rappels sur les plasmas thermiques

Equilibre thermodynamique local

micro-réversibilité des processus

distribution maxwellienne des vitesses

T (300K - 50000K), **P** (10^4 Pa - 10^6 Pa), **λ** (10^{-2} μm - 10^2 μm)



Rappels sur les plasmas thermiques

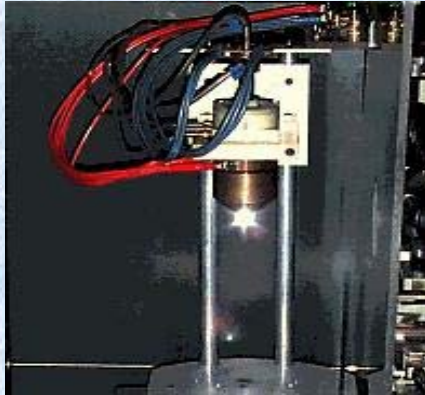
Applications industrielles

- Soudure
- Découpe
- Projection
- Traitement de déchets
- Médical (prothèses)
- Synthèses de poudres
- Pétrochimie

Procédés thermiques

- arcs libres
- **arcs transférés**
- **arcs stabilisés par parois**
- lampes à arc
- **torches de découpe**
- **torches de projection**
- torches à excitation RF
- **disjoncteurs** BT, MT, HT

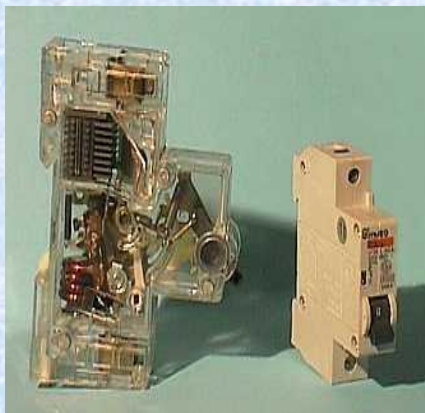
Rappels sur les plasmas thermiques



Les torches de projection



Les torches de découpe

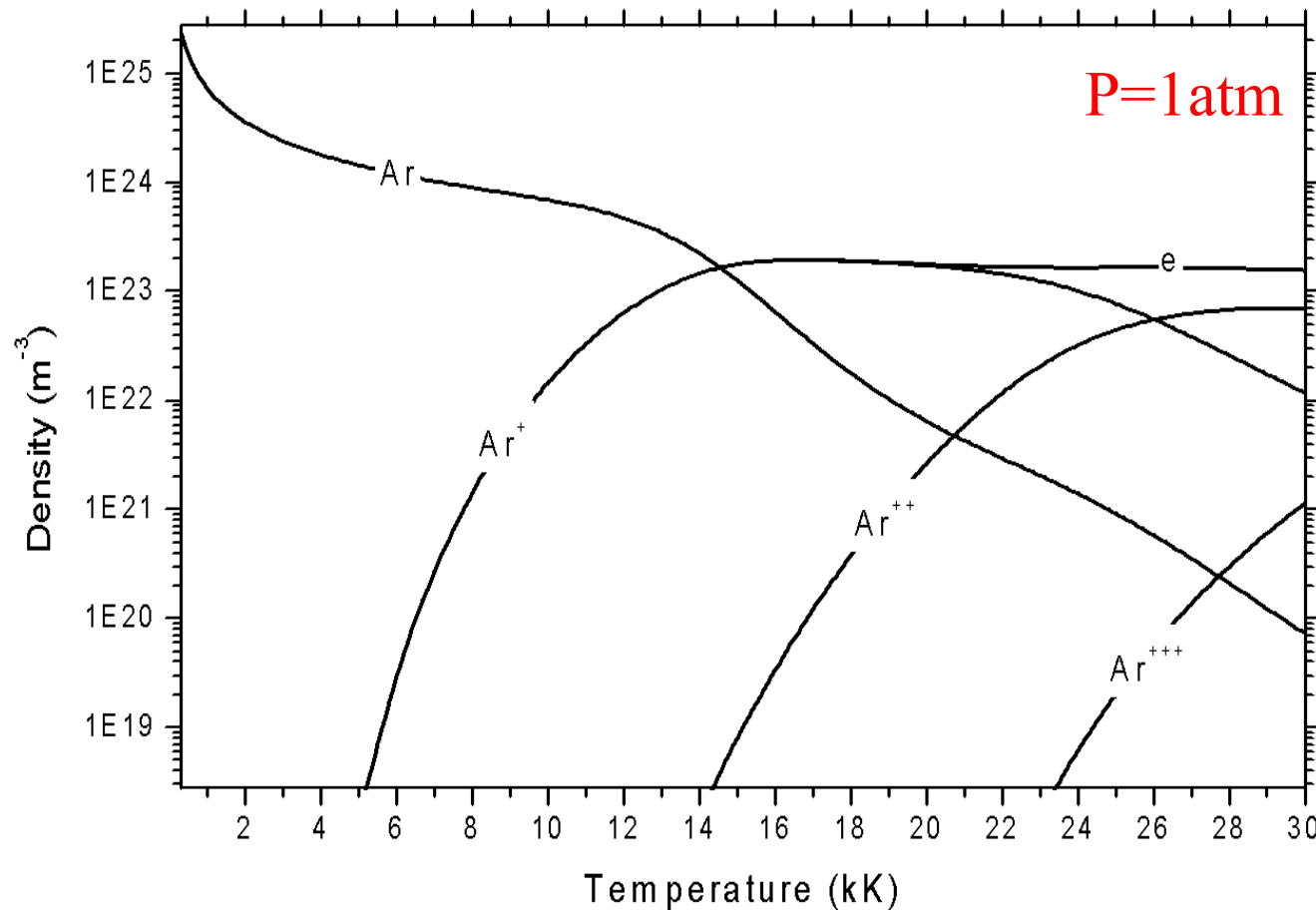


Les disjoncteurs basse tension



Les disjoncteurs haute tension

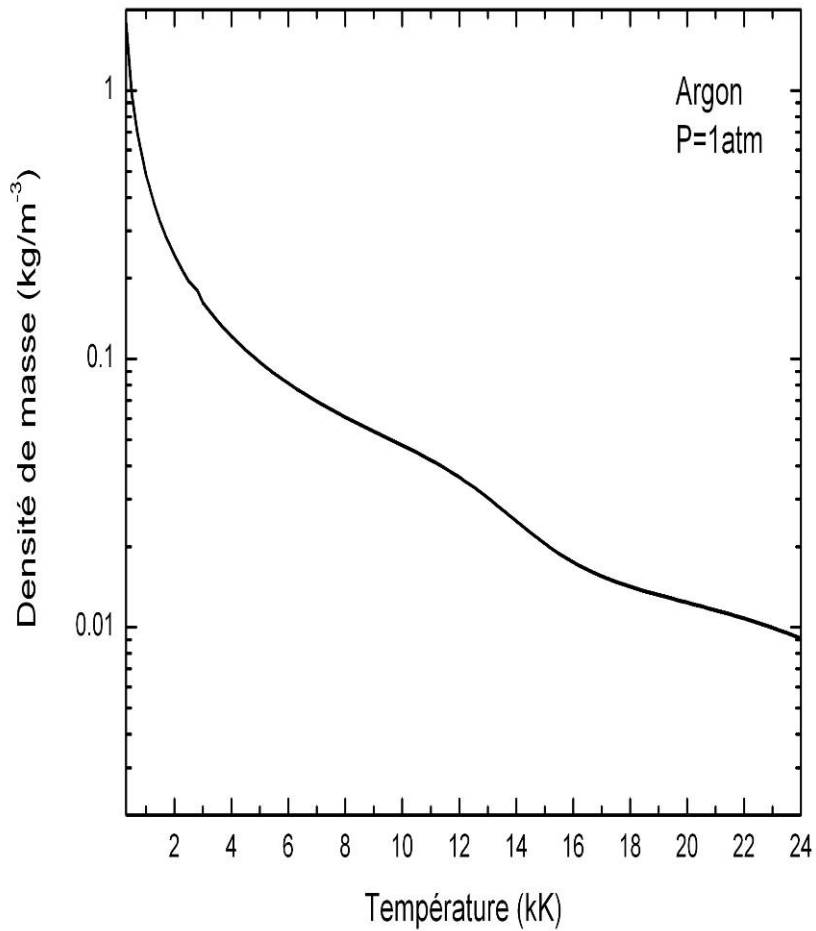
Composition d'un plasma thermique d'argon : Quelles espèces à quelle température??



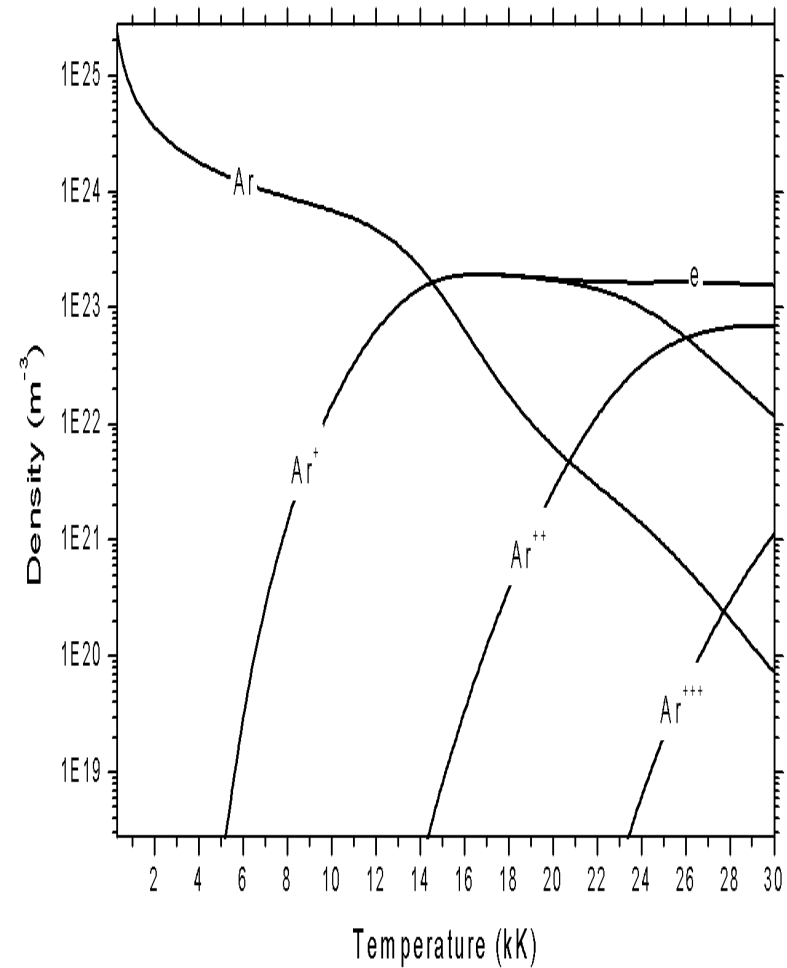
→
Energie injectée dans le plasma

Propriétés des plasmas thermiques : Densité de masse

Densité de masse

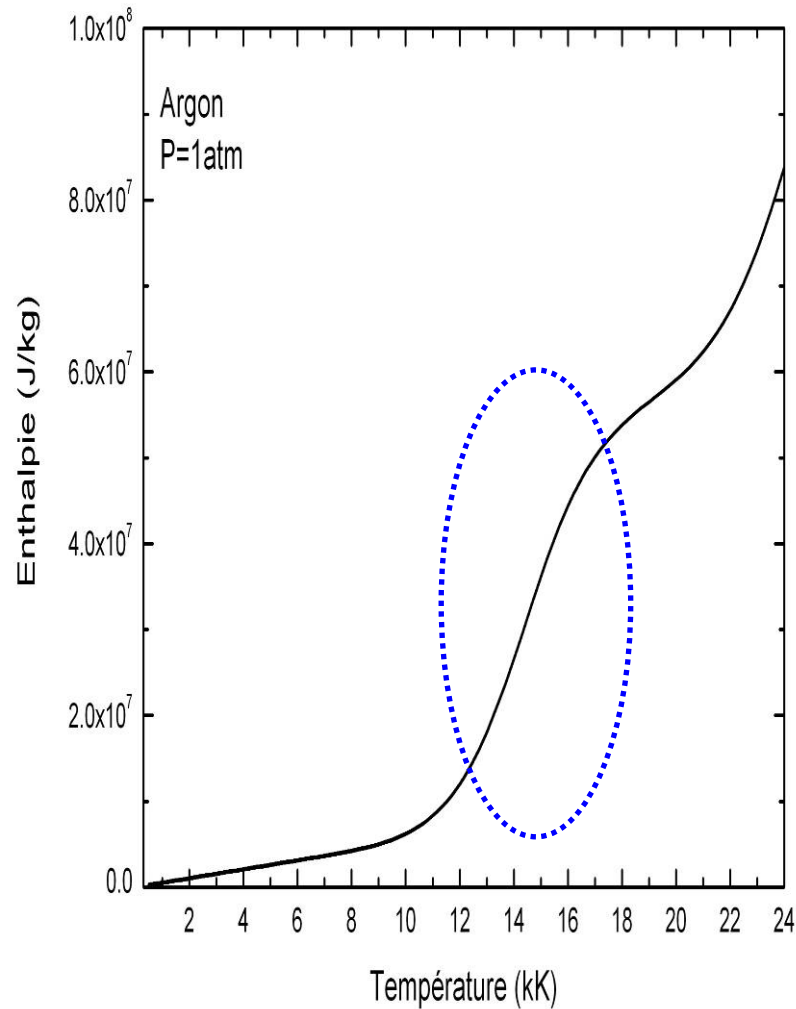


Composition

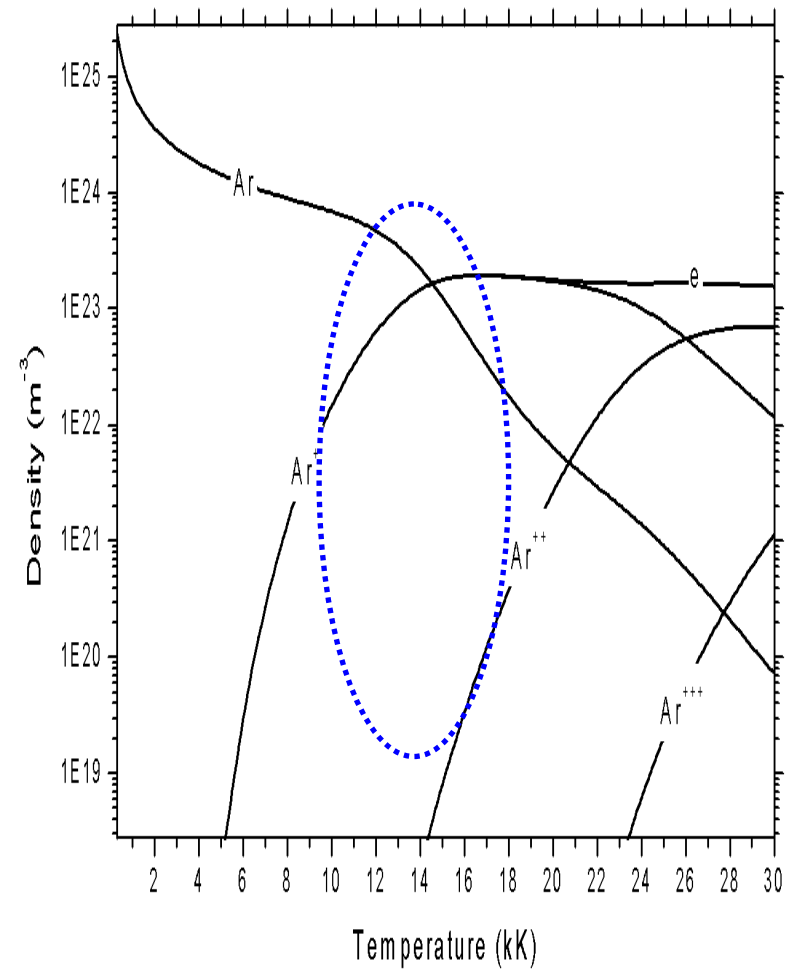


Propriétés des plasmas thermiques : Enthalpie

Enthalpie



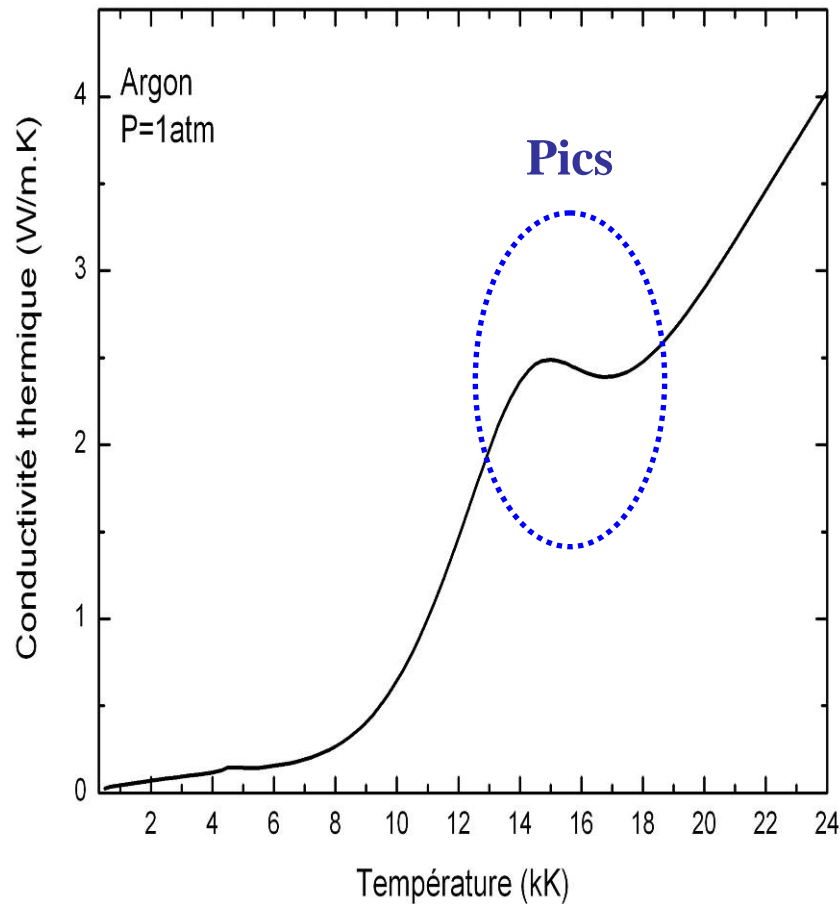
Composition



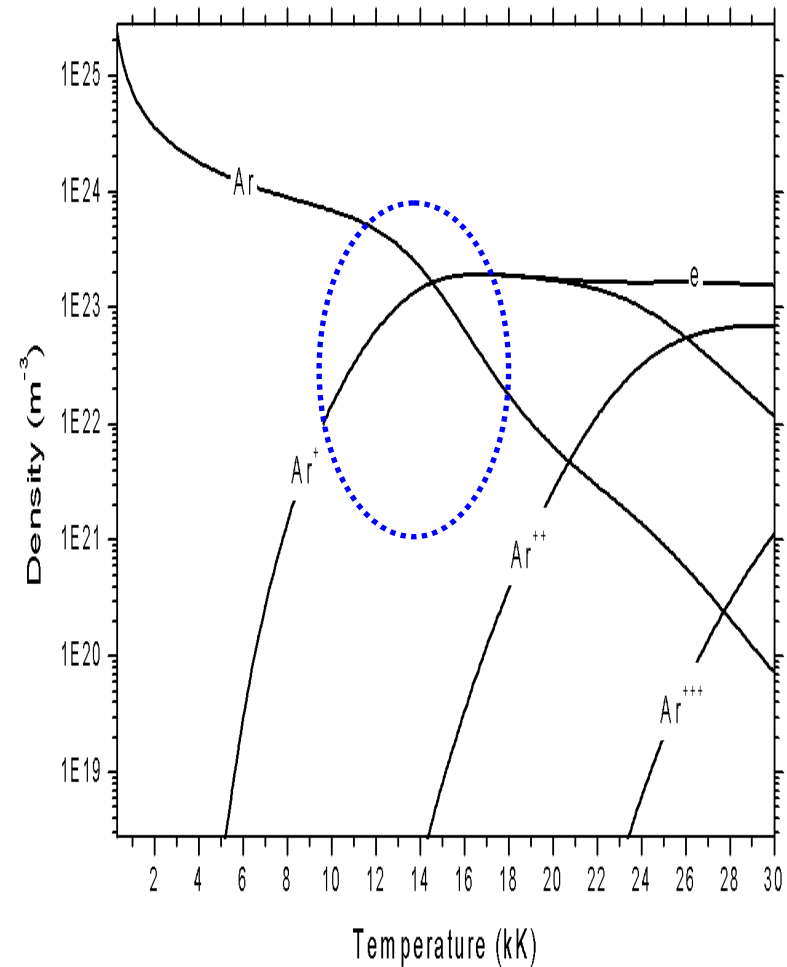
L'enthalpie est l'image de l'énergie emmagasinée dans le plasma

Propriétés des plasmas thermiques : Conductivité thermique

Conductivité thermique



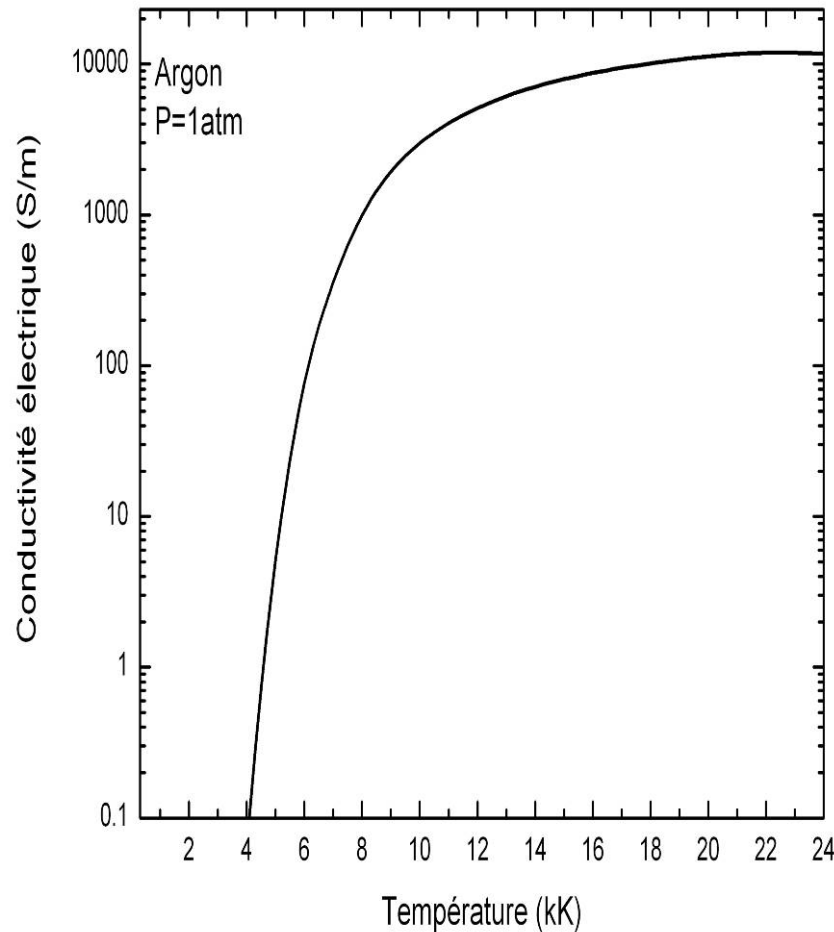
Composition



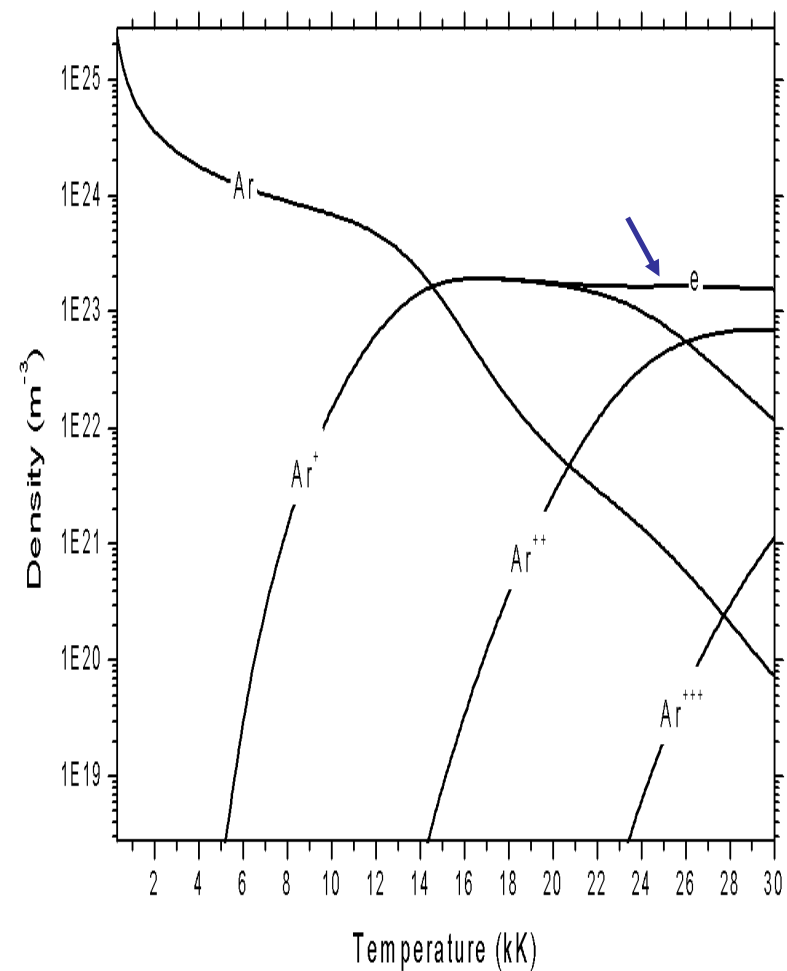
La conductivité thermique est l'image de la capacité du plasma à conduire la chaleur

Propriétés des plasmas thermiques : Conductivité électrique

Conductivité électrique

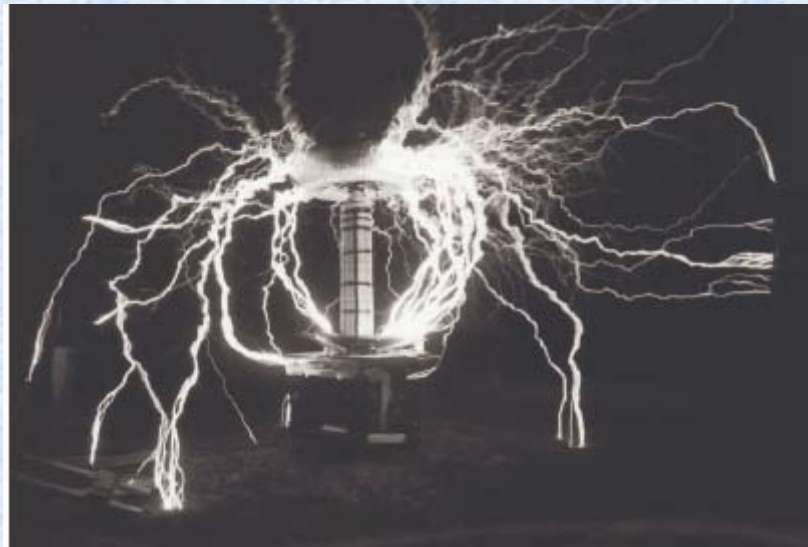
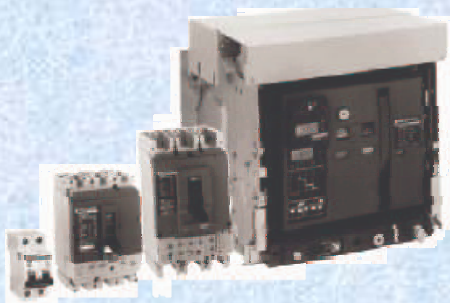


Composition



La conductivité électrique est directement dépendante de la densité électronique

Propriétés des appareils de coupure



***Yann Cressault : Laboratoire LAPLACE
Master M1 SYGELEC***

Les appareils de connexion

Les sources d'énergie des installations électriques sont généralement des générateurs de type alternateurs et transformateurs



transformateur



alternateur

L'impédance interne de ces générateurs ont 2 effets :

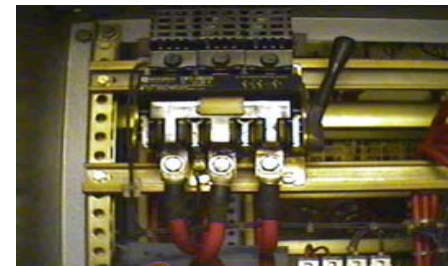
- **En régime normal** : chute de la tension à vide (tension nominale U_n et courant nominal I_n)
- **En court-circuit** : limiter le courant à une valeur multiple de I_n
exemple : $U_{cc} = 5\%$ alors $I_{cc} = I_n / 5\% = 20 I_n$
- ▶ **Conséquences** : échauffement, efforts électrodynamiques, ...
- ▶ **Solutions** : prévoir des dispositifs de protection capables de couper les courants

Les appareils de connexion

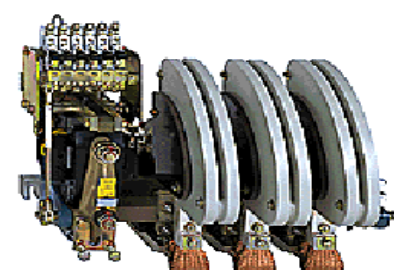
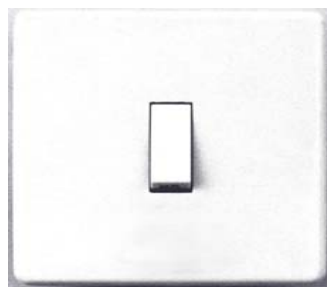


La coupure du courant (présumé à l'ouverture) est spécifique selon l'appareil qui modifie le courant pendant la coupure. Les appareils de connexion sont destinés à établir ou interrompre le courant dans un circuit électrique.

➤ Les sectionneurs : ils doivent être manoeuvrés hors charge. Leur fonction exige des distances d'ouverture de contact satisfaisant à des conditions déterminées. Ils réalisent une séparation visible entre la partie amont sous tension et la partie aval d'un circuit.



➤ Les interrupteurs / contacteurs : Ils coupent des courants nominaux (10 à 100A), de façon répétitive, et parfois à effectuer un grand nombre de manœuvres. Ils peuvent manoeuvrés sous les charges normalement prévues en service. Les contacteurs sont commandés autrement qu'à la main en général par électroaimant) et peuvent être manoeuvrés dans les mêmes conditions électriques que les interrupteurs.



Les appareils de connexion

➤ Les fusibles : ils peuvent éliminer un courant très intense en une seule fois. Ils ouvrent automatiquement le circuit, par fusion, en cas de surintensité se prolongeant au-delà d'une durée déterminée.

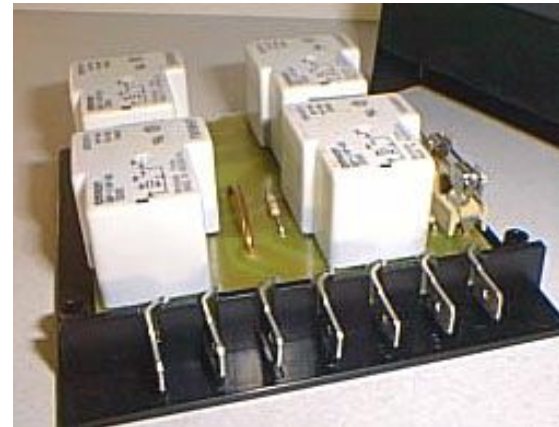
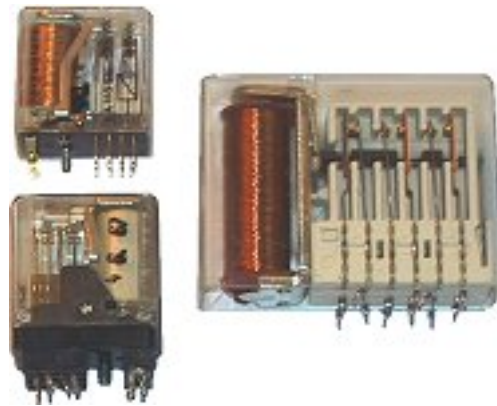


➤ Les disjoncteurs : ils doivent éliminer des courants occasionnels très intenses pour quelques manœuvres seulement. Ils peuvent être manœuvrés sous les charges normalement prévues en service et ouvrent le circuit en cas de surintensité, comme les coupe-circuit. Ils sont munis de déclencheurs qui provoquent l'ouverture en cas de surcharge ou de court-circuit.



Les appareils de connexion

➤ Les relais : ils coupent des courant plus faibles (1A) mais les manœuvres se chiffrent en dizaines de millions. Ils agissent sous l'effet d'une grandeur électrique influant sur leur circuit d'entrée : présence ou absence de tension ou courant, franchissement d'un seuil prédéterminé.



➤ Les auxiliaires de commande : ils agissent au dépassement d'un seuil d'une grandeur non électrique et délivrent un ordre de commande soit volontaire, soit automatique.

Choisir suivant : son *pouvoir*

➤ Le Pouvoir de coupure (PdC) : C'est le facteur de performances d'un appareil de connexion. Il correspond à *la plus grande intensité de courant de court-circuit (présumé) que l'appareil sait interrompre sous une tension donnée*, dans des conditions prescrites d'emploi et de comportement (sans usure exagérée des contacts, ni émission excessive de flammes). Le pouvoir de coupure doit être au moins égal au courant de court-circuit présumé au point d'installation ($PdC < I_{cc}$). Il dépend de la tension du réseau et se réfère toujours au courant de court-circuit c.à.d. au courant circulant dans le circuit de charge lorsque le disjoncteur y est remplacé par un pont de résistance quasi nulle. Plus cette tension est faible, plus le pouvoir de coupure est grand. Si un appareil de connexion ne possède pas un pouvoir de coupure au moins égal au courant de court circuit présumé en son point d'installation, il doit être associé à un autre dispositif de coupure situé en amont, ayant le pouvoir de coupure nécessaire.

➤ Le Pouvoir de fermeture (PdF) : C'est la *valeur maximale du courant que l'appareil est capable d'établir sous une tension donnée sans soudure des contacts*. Il dépend de la cadence à laquelle s'effectuent les manœuvres. La défaillance en fermeture est le plus souvent la soudure des contacts : défaut critique ayant des conséquences graves. Le pouvoir de fermeture de chaque disjoncteur ou interrupteur prévu pour être fermé, si nécessaire, sur court-circuit, doit au moins être égal à la valeur maximale du courant de court-circuit à l'endroit où il est installé.

Conclusions : deux principales grandeurs fonctionnelles pour les appareils de connexion

TENSIONS et **COURANTS**

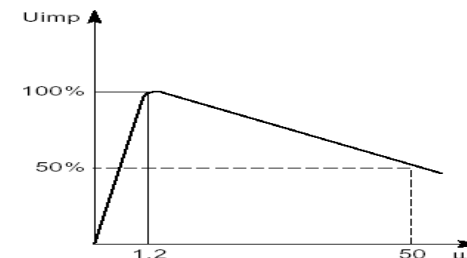
Choisir suivant : la tension

➤ Tension assignée d'emploi / tension assignée d'isolement

La **tension d'emploi** (U_e) détermine les valeurs de tension d'essai et indique la **tension d'utilisation optimale** de l'appareil (tension à laquelle se rapporte les performances de l'appareil). Plusieurs tensions assignées d'emploi peuvent être attribuées à un même appareil. La **tension d'isolement** (U_i) est la tension à laquelle se rapporte les tensions d'essais diélectrique et les lignes de fuite. C'est la valeur de la **tension maximale** appliquée à l'appareil. Ces tensions sont de l'ordre de la **centaine de Volts**. Notons qu'un disjoncteur peut avoir plusieurs tensions nominales; chacune d'elle correspondant à un pouvoir de coupure différent.

➤ Tension assignée de tenue aux chocs électriques

Toute installation électrique peut être soumise à des surtensions occasionnelles d'origine très diverses. L'étude de ces surtensions (origine, valeur, localisation...) et des règles à appliquer pour s'en protéger, est connue sous l'appellation «coordination de l'isolement». La protection contre les surtensions est considérée comme réalisée lorsque les matériels supportent sans dommage les deux types de tests : diélectriques à 50 Hz, **tests de tenue aux ondes de tension de choc de valeur U_{imp}** (imp comme impulsion) variable selon le lieu d'installation. La tension est alors la valeur de crête d'une onde de tension, de forme et de polarité que l'appareil peut supporter sans claquage (quelques kV). Pour un disjoncteur, c'est la valeur crête de la tension de tenue à l'onde de choc 1,2/50 μ s (protection contre les surtensions d'origine atmosphérique ou de manoeuvre) qu'il peut supporter sans dommage.



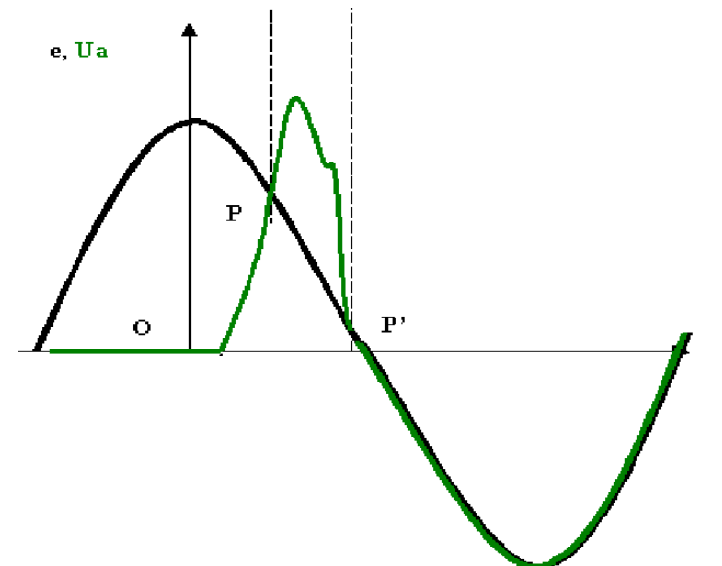
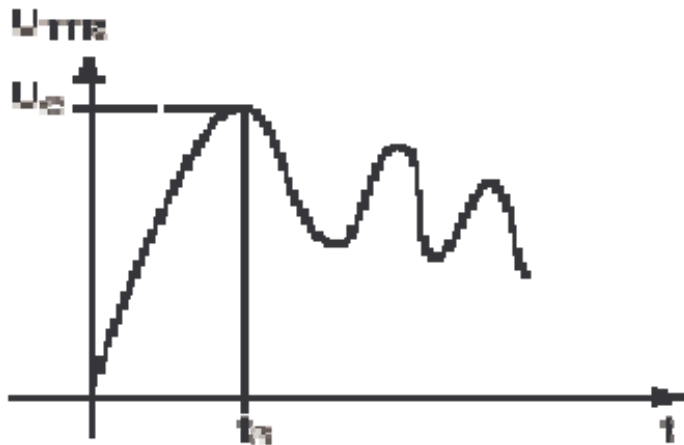
Choisir suivant : *la tension*

➤ Tension de rétablissement (TR)

Problème critique de la coupure. **Tenue de la tension qui apparaît aux bornes des contacts quand le courant s'annule.** Cette tension finit par rejoindre la tension à vide de la source (réseau). Elle comporte en réalité deux composantes transitoires : l'une à la fréquence du réseau et l'autre à haute fréquence TTR.

➤ Tension transitoire de rétablissement (TTR)

Tension transitoire de rétablissement de fréquence élevée devant la fréquence du réseau. Elle a souvent la forme d'une oscillation sinusoïdale amortie et accompagnée d'une surtension.



Choisir suivant : *le courant*



Connaître la valeur du courant à interrompre ne suffit pas pour concevoir un dispositif de coupure approprié. La coupure est fonction de plusieurs paramètres liés aux générateurs, lignes et récepteurs qui définissent plusieurs types de courant à couper.

➤ **Le courant Nominal** : C'est le courant maximum que peut supporter le transformateur sous tension et puissance nominale (service ininterrompu sans échauffement). Ce type de courant peut être coupé par des disjoncteurs et peut assurer également la commande des circuits et récepteurs.

➤ **Le courant de Court-Circuit** : Un **court-circuit** est une connexion accidentelle ou intentionnelle par une résistance ou une impédance relativement faible, de deux ou plusieurs points d'un circuit se trouvant normalement à des tensions différentes. Sur ce défaut, le courant qui apparaît n'est pas systématiquement égale à $20I_n$ du générateur, il dépend des caractéristiques du générateur ($3\% < U_{cc} < 7\%$ par ex) et peut être plus petit ou plus grand selon les longueurs, selon les lignes en amont ou le nombre de générateurs couplés.

➤ **Le courant de Surcharge** : Ce courant est une **surintensité** anormale se produisant dans un circuit en l'absence de défaut d'isolement électrique et provoquant un **échauffement thermique**. Il peut dépasser la valeur nominale et devenir inacceptable après un temps t . Il existe si la somme des puissances du récepteur en fonctionnement dépasse les prévisions du concepteur. Il peut être coupé par des disjoncteurs.

➤ **Le courant Présumé** : C'est le courant caractéristique du circuit non influencé par l'appareil. Un même courant présumé peut être **établi** dans le circuit de diverses façons selon les conditions.

Choisir suivant : *le courant*



Un court-circuit dégage une énergie thermique considérable qui peut être calculée par l'intégrale de Joule. La charge thermique supportée par l'appareil est définie par des courants caractéristiques.

➤ Le courant thermique conventionnel assigné I_{th} : Valeur efficace du courant maximal que peut supporter l'appareil, en respectant les limites d'échauffement imposées. Par exemple, valeur du courant qu'un contacteur en position fermée peut supporter pendant 8 heures sans que l'échauffement de la bobine ne dépasse 90°C. $I_{th} > I_e$

➤ Le courant d'emploi assigné I_e : Valeurs efficace indiquée par le constructeur selon la tension d'emploi (U_e), la fréquence et le service assigné. Elle tient compte de la durée du cycle. Manœuvres répétitives. Les valeurs préférentielles sont : 25 A, 40 A, 63 A, 80 A, 100 A, 125 A.

➤ Le courant ininterrompu : Pour des disjoncteurs ou des sectionneurs à cycle de fonctionnement très long. Les manœuvres sont très espacées entraînant une dégradation progressive des contacts par pollution superficielle.

➤ Le courant de surintensité : C'est le courant supérieur au courant d'emploi assigné (I_e).

Les appareils de connexion

Fonctions des principaux constituants

Fonctions élémentaires		Commande Fermeture et coupure en service normal		Sectionnement Séparation électrique de la source	Protection Des personnes, matériels et biens Coupure automatique en cas de défaut <i><u>Tensions - Courants</u></i>			
Mode d'actionnement		manuel	auto	manuel	automatique			
Nature du défaut					surcharge	Court-circuit	Courant à la terre	Excès de tension /Courant de choc
Constituants distribution	Sectionneur			●				
	Fusible-sectionneur			●	●	●		
	Interrupteur	●		○				
	Fusible-interrupteur	●		○	●	●		
	Coupe-circuit à fusible				●	●		
	Disjoncteur manuel	●		○	●	●	●	●
	Disjoncteur motorisé		●	○	●	●	●	●
Constituants commande	Contacteur		●					
	Discontacteur		●		●	●		
	Relais de tout ou rien		●					
	Relais de mesure		●					
	Auxiliaires de commande manuels	●						
	Auxiliaires de commande automatiques		●					

● Fonction pleinement remplie /

○ Fonction remplie sous reserves

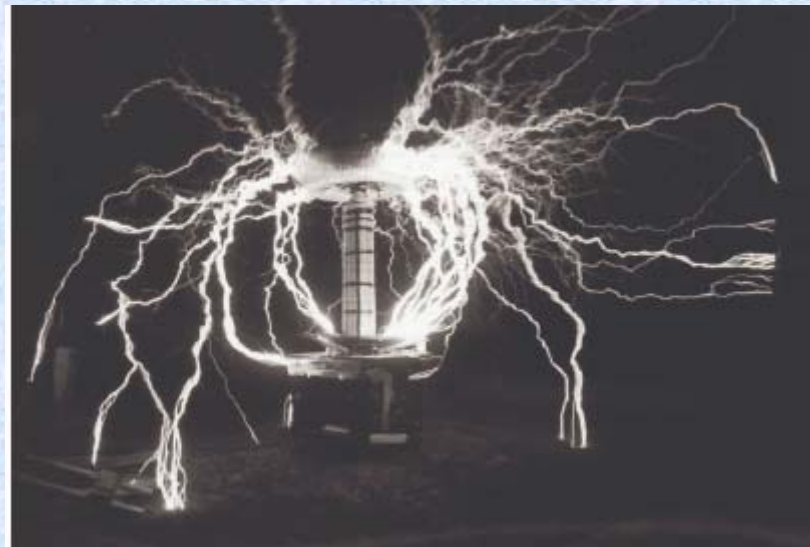
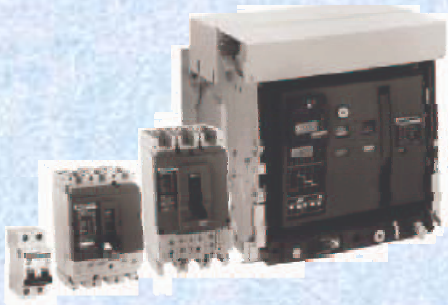
Les appareils de connexion

Fonctions principales des appareils de coupure

Fonctions principales	Classes d'appareils	Caractéristiques fonctionnelles normalisées						
		À la fermeture		À la coupure				
		Tenue aux courants nominaux	Tenue aux surintensités brèves	Pouvoir de coupure	normal	Surcharge	Court-circuit	CC + limitation
Séparation	Sectionneurs	•	•					
Commande	Interrupteurs	•	•	•	•	•		
	Contacteurs	•	•	•	•	•		
Protection	Disjoncteurs	•	•	•	•	•	•	
	Disjoncteurs sélectifs	•	•	•	•	•	•	
	Disjoncteurs limiteurs	•	•	•	•	•		•

Comment couper le courant ?

La coupure du courant sans arc électrique

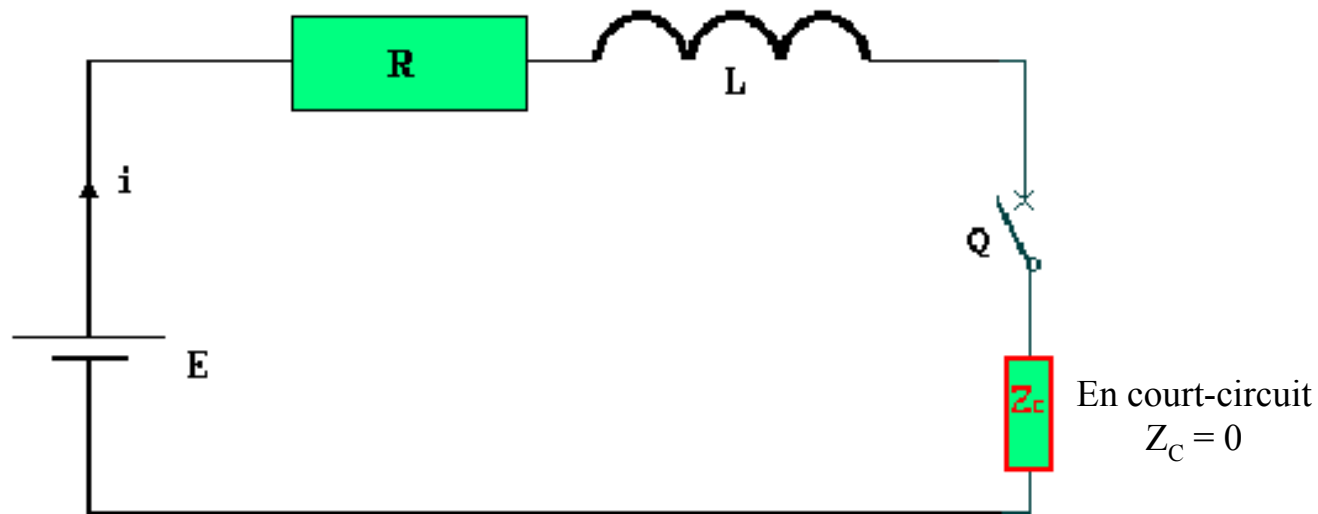


Comment couper le courant ?

Couper avec un *Interrupteur*



Pour couper un courant électrique, il suffit que la résistance de l'interrupteur, initialement nulle, devienne infinie (interrupteur idéal). Il suffirait donc dans un circuit alternatif d'atteindre le passage naturel du courant par zéro pour faire évoluer rapidement l'appareil de l'état conducteur à l'état d'isolant.



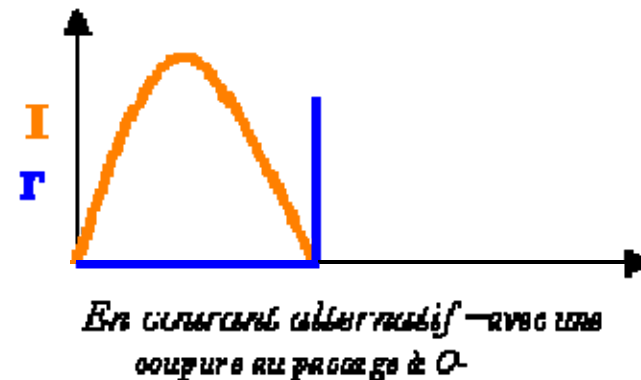
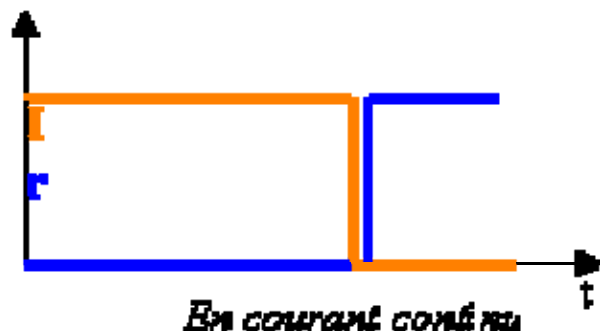
Énergie de coupure (en CC) : $\int ri^2 dt = \int (E - Ri) \cdot i \cdot dt + \int Li \cdot di$

Comment couper le courant ?

Couper avec un *Interrupteur*

L'Interrupteur Idéal

- doit **assurer une coupure quasi-instantanée** ($t=0$) avec une énergie dissipée nulle entre ses pôles.
- doit **absorber toute l'énergie électromagnétique** accumulée dans le circuit avant la coupure ($1/2 * L_i^2$). Il passe alors de l'état de conducteur ($R=0$) à l'état d'isolant (R infinie).
- doit **supporter la surtension** ($L di/dt$) qui apparaît à ses bornes. Elle aurait une valeur infinie si le passage isolant-conducteur se faisait en un temps infiniment petit (\Rightarrow claquage diélectrique).
- doit **supporter la tension transitoire de rétablissement** qui dépend des caractéristiques du réseau et dont la vitesse de croissance (dv/dt) peut être considérable (de l'ordre du kV/ms). Pour éviter l'échec de la coupure, l'interrupteur idéal doit pouvoir supporter plusieurs kV moins d'une micro seconde après la transition conducteur-isolant.

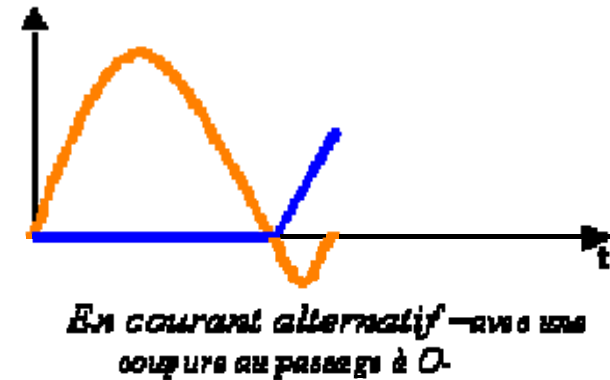
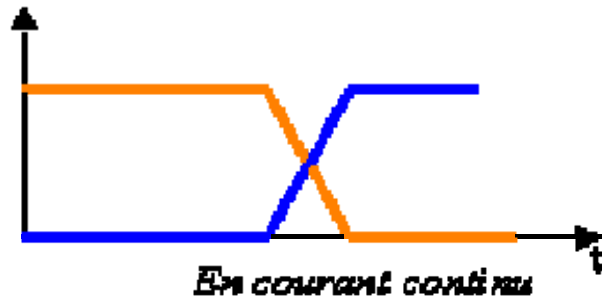


Comment couper le courant ?

Couper avec un *Interrupteur*

L'Interrupteur Réel

En réalité, au moment de la coupure, la résistance r des pôles du disjoncteur (interrupteur) va passer d'une valeur presque nulle à une valeur très élevée.



Même avec une coupure infiniment rapide, l'énergie électromagnétique $\frac{1}{2}Li^2$ initialement contenue dans le circuit va devoir être dépensée entre les contacts. Dès les premiers instants de l'écartement des pôles, la densité de courant $J=I/S$ augmente car S (surface des contacts) diminue. Il va donc y avoir échauffement local, ionisation du fluide isolant en abaissant sa rigidité électrique.

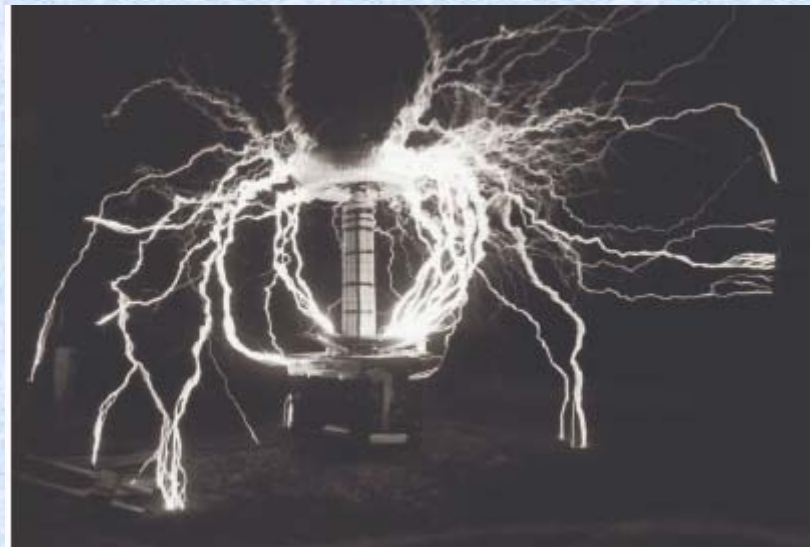
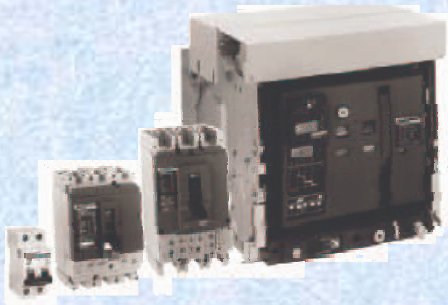
⇒ Apparition d'un arc électrique avec ses effets positifs/négatifs



L'arc électrique permettra de dissiper l'énergie électromagnétique du circuit électrique et de limiter les surtensions. Cependant, il retardera aussi la coupure totale du courant.

Comment couper le courant ?

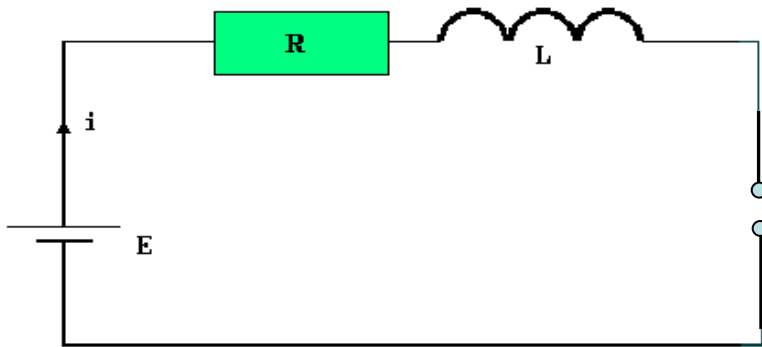
La coupure du courant avec arc électrique



Comment couper le courant ?

Couper avec un *Arc*

Interrupteur



Fermeture du circuit : Le courant établi à la fermeture peut être calculé par la loi d'ohm.

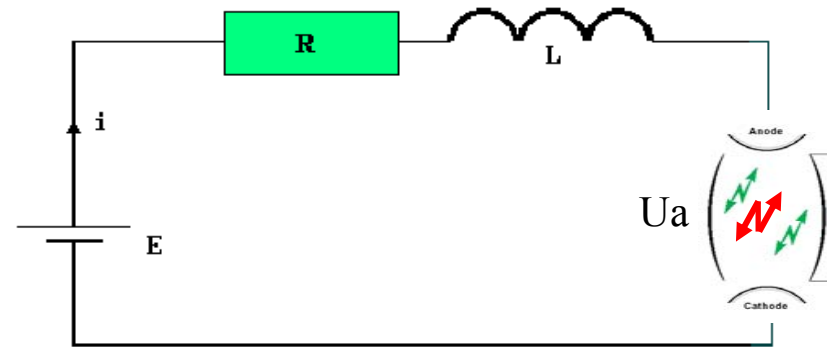
Quelle est la relation du circuit ?

Après un régime transitoire ($L di/dt$), le courant devient stable en régime établi et s'annule pour $e=0$ ou R infinie.

$$e - Ri = 0$$

Inconvénient : trop contraignant en exploitation.

Arc électrique



Ouverture du circuit : Le courant sera forcé vers zéro ou passera par zéro. Ce sont les conditions d'extinction de l'arc qui permettront la coupure du courant.

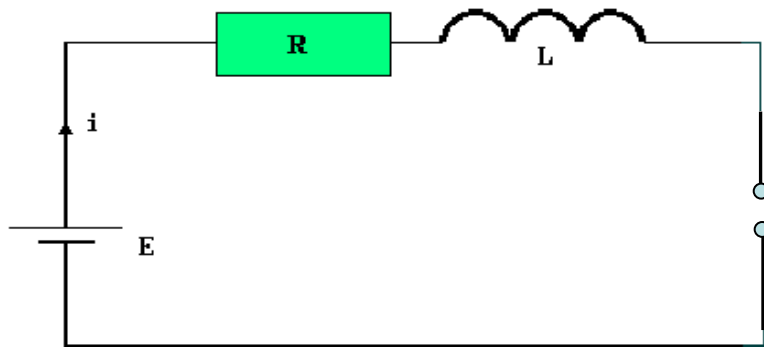
Quelle est la relation du circuit ?

Avantage : permet de dissiper l'énergie par rayonnement et chaleur. Utilisation des propriétés de l'arc et de son extinction.

Comment couper le courant ?

Couper avec un *Arc*

Interrupteur



Fermeture du circuit : Le courant établi à la fermeture peut être calculé par la loi d'ohm.

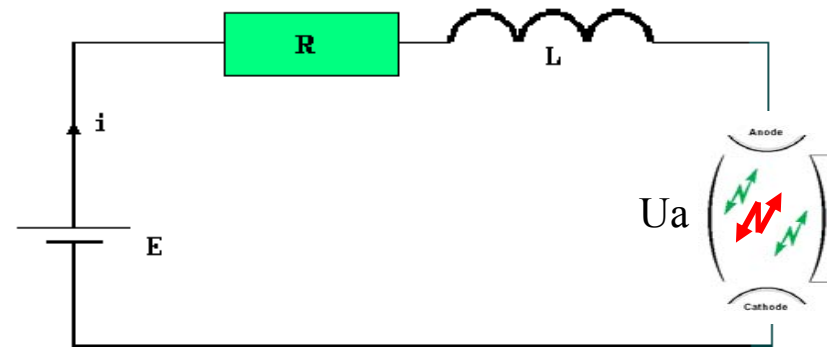
$$e - Ri - Ldi / dt = 0$$

Après un régime transitoire (Ldi/dt), le courant devient stable en régime établi et s'annule pour $e=0$ ou R infinie.

$$e - Ri = 0$$

Inconvénient : trop contraignant en exploitation.

Arc électrique



Ouverture du circuit : Le courant sera forcé vers zéro ou passera par zéro. Ce sont les conditions d'extinction de l'arc qui permettront la coupure du courant.

$$e - Ri - Ldi / dt - \underline{U_a} = 0$$

Avantage : permet de dissiper l'énergie par rayonnement et chaleur. Utilisation des propriétés de l'arc et de son extinction.

Comment couper le courant ?

*Comment créer cet **arc** ?*

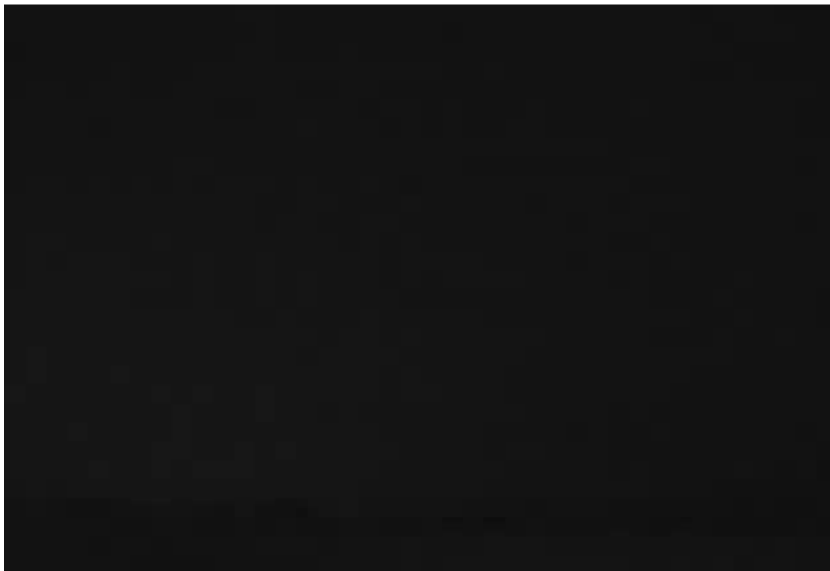
→ En appliquant une différence de potentiel DDP suffisante entre les électrodes pour provoquer un claquage électrique.

*Comment éteindre l'**arc** ?*

→ En utilisant des appareils de coupure rapides, adaptés aux conditions de fonctionnement (courant / tension) et protégeant les installations ou les êtres humains.

Arcs électriques : quelques exemples

Manifestation naturelle



Etude expérimentale



Arcs électriques : quelques exemples

Etude expérimentale

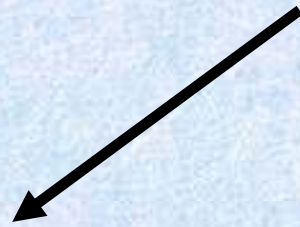


Etude expérimentale

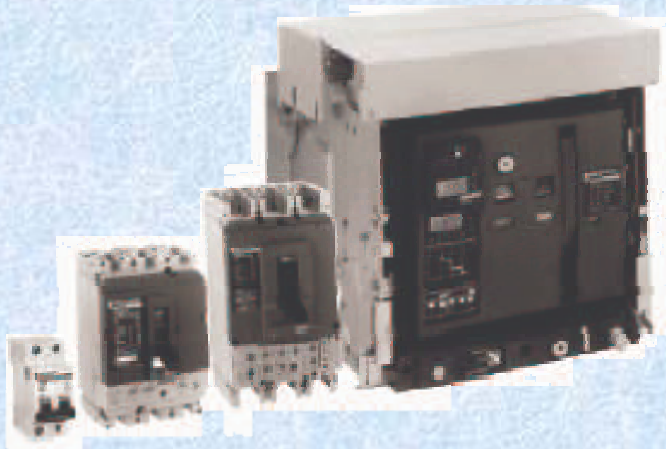


Un appareil de coupure

Les disjoncteurs



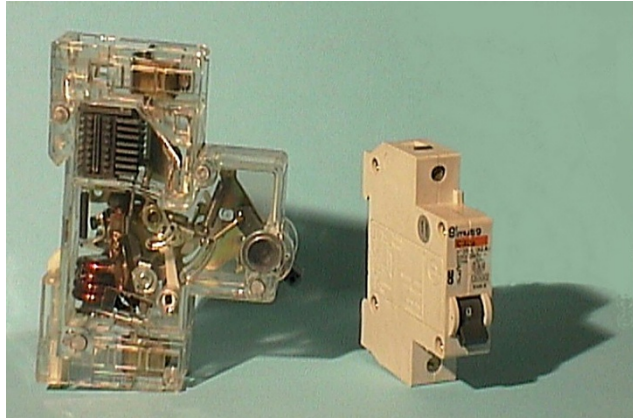
basse tension



haute tension



Généralités sur les disjoncteurs



Un disjoncteur est un appareil qui peut ouvrir et fermer un circuit de façon non automatique et qui peut ouvrir un circuit automatiquement lors d'une surcharge prédéterminée sans dommages à lui-même s'il est utilisé à l'intérieur de ses spécifications.

C'est un appareil mécanique de connexion capable

- d'établir un courant dans un circuit électrique
- de supporter un courant dans un circuit électrique
- d'interrompre un circuit quelque soit le courant qui le traverse jusqu'à son pouvoir de coupure ultime

Il est caractérisé essentiellement par

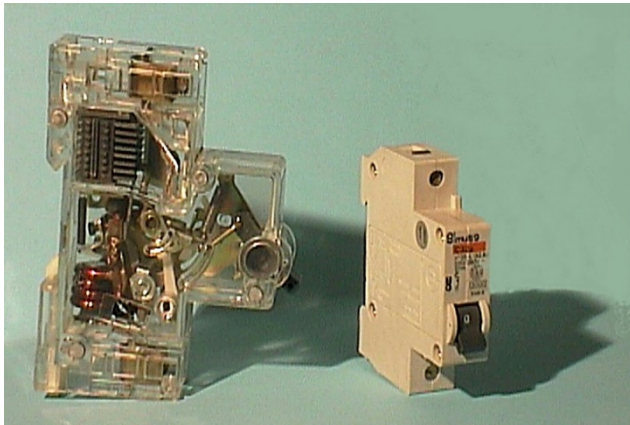
- son intensité nominale
- sa tension nominale
- son nombre de pôles
- son pouvoir de coupure
- le type de déclencheur utilisé
- sa courbe de déclenchement



Il existe plusieurs sortes de disjoncteurs pour application dans les réseaux de transport et de distribution et on les classe par le moyen utilisé pour éteindre l'arc : à huile, à air, au SF6...

Généralités sur les disjoncteurs

basse tension



Courant instantané : $I < 10 \text{ kA}$

Tension : $U < 1 \text{ kV}$

Temps de vie de l'arc : $\mu\text{s} < t < \text{ms}$

Températures : $300\text{K} < T < 30000\text{K}$

Pression : $0.1 < P(\text{bar}) < 10$

haute tension



Courant instantané : $I > 10 \text{ kA}$

Tension : $10\text{kV} < U < 800 \text{ kV}$

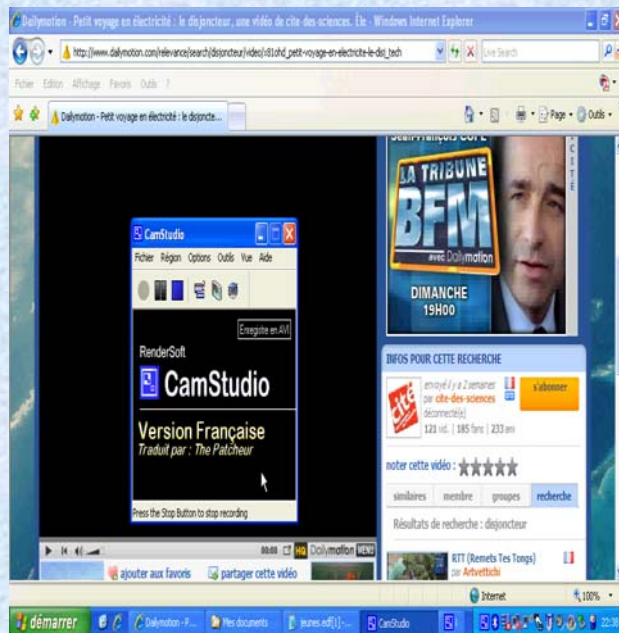
Temps de vie de l'arc : $\mu\text{s} < t < \text{ms}$

Températures : $300\text{K} < T < 50000\text{K}$

Pression : $0.1 < P(\text{bar}) < 100$

Les disjoncteurs basse tension

Les disjoncteurs



Basse Tension

Le disjoncteur basse tension

Son But

➤ Il protège l'installation



- **contre les surcharges** (action du déclencheur thermique).
L'échauffement, fonction de l'intensité, provoque le déclenchement grâce à un élément « thermo-mécanique » : le bilame
- **contre les courts-circuits** (action du déclencheur magnétique).
A partir d'une certaine intensité (supérieure au courant de surcharge), le déclenchement est assuré quasi instantanément par un circuit magnétique qui actionne un noyau.

➤ Avantages

- possède un avantage marquant sur les fusibles car il ouvre les trois phases simultanément comparativement au fusible qui opère sur une seule phase.
- n'est pas détruit après opération et peut être remis en circuit manuellement. Grand intérêt pour la protection des circuits industriels

➤ Inconvénients

- il est plus coûteux que le fusible et doit être justifié.
- de géométrie relativement complexe
- nombreux phénomènes physiques et électriques au sein du dispositif

Le disjoncteur basse tension

Ses fonctions

➤ Fermer le circuit



Par action sur le mécanisme, dès que le moindre contact est établi, le ou les récepteurs sont alimentés en courant. A la mise sous tension certains absorbent des courants bien supérieurs à I_n pendant qqes secondes. Pour que ces surintensités ne donnent pas lieu à des phénomènes néfastes pour la zone de contact (*érosion due aux électrodes*), l'accostage doit être brusque notamment à forts courants ($>100A$).

Aussi, les disjoncteurs usuels doivent pouvoir établir des courants de 15 à 20 fois supérieurs à leur intensité nominale. La réalisation est délicate car le disjoncteur doit toujours être capable de rouvrir en cas de défaut.

➤ Conduire le courant

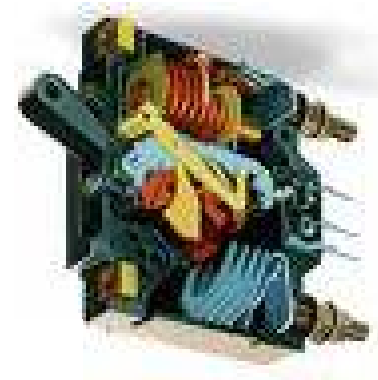
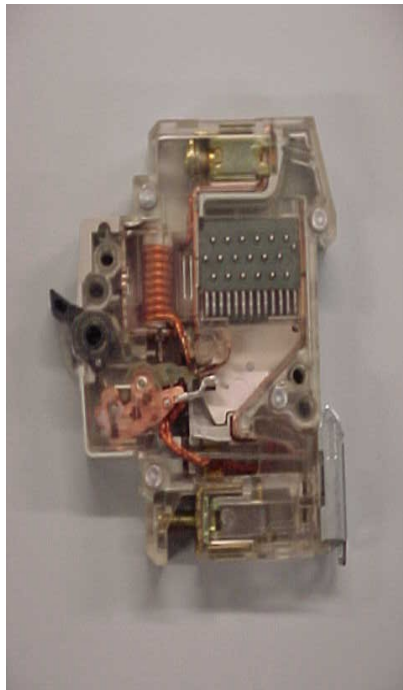
Cette fonction passive nécessite des précautions constructives, pour avoir tout à la fois un *échauffement admissible* et une possibilité d'ouverture rapide.

➤ Ouvrir le circuit, couper le courant, assurer le sectionnement

Par action volontaire, manuelle, télécommandée, ou réflexe sur le mécanisme (provoquée par le déclencheur suite à une surintensité). Ouverture définitive du disjoncteur. Quand le disjoncteur est ouvert, un niveau d'isolement est requis entre les parties « sous tension » et « hors tension », niveau validé par des tests diélectriques.

Le disjoncteur basse tension

Sa technologie

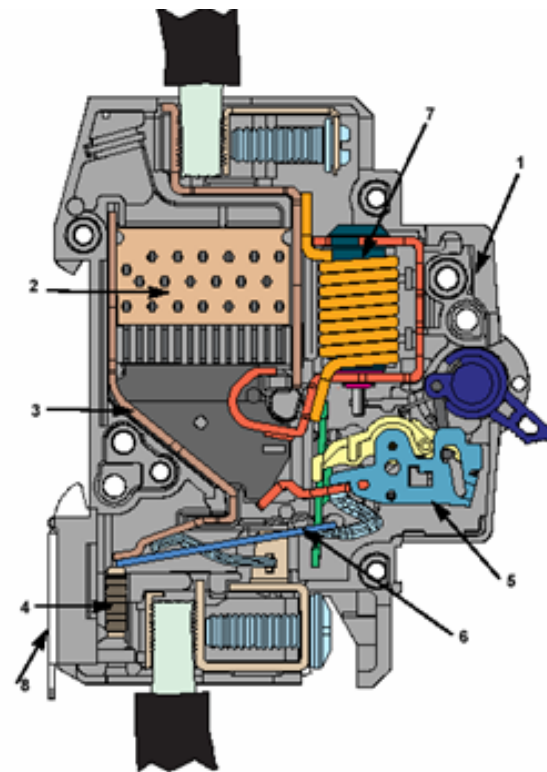


Le disjoncteur basse tension

Sa technologie

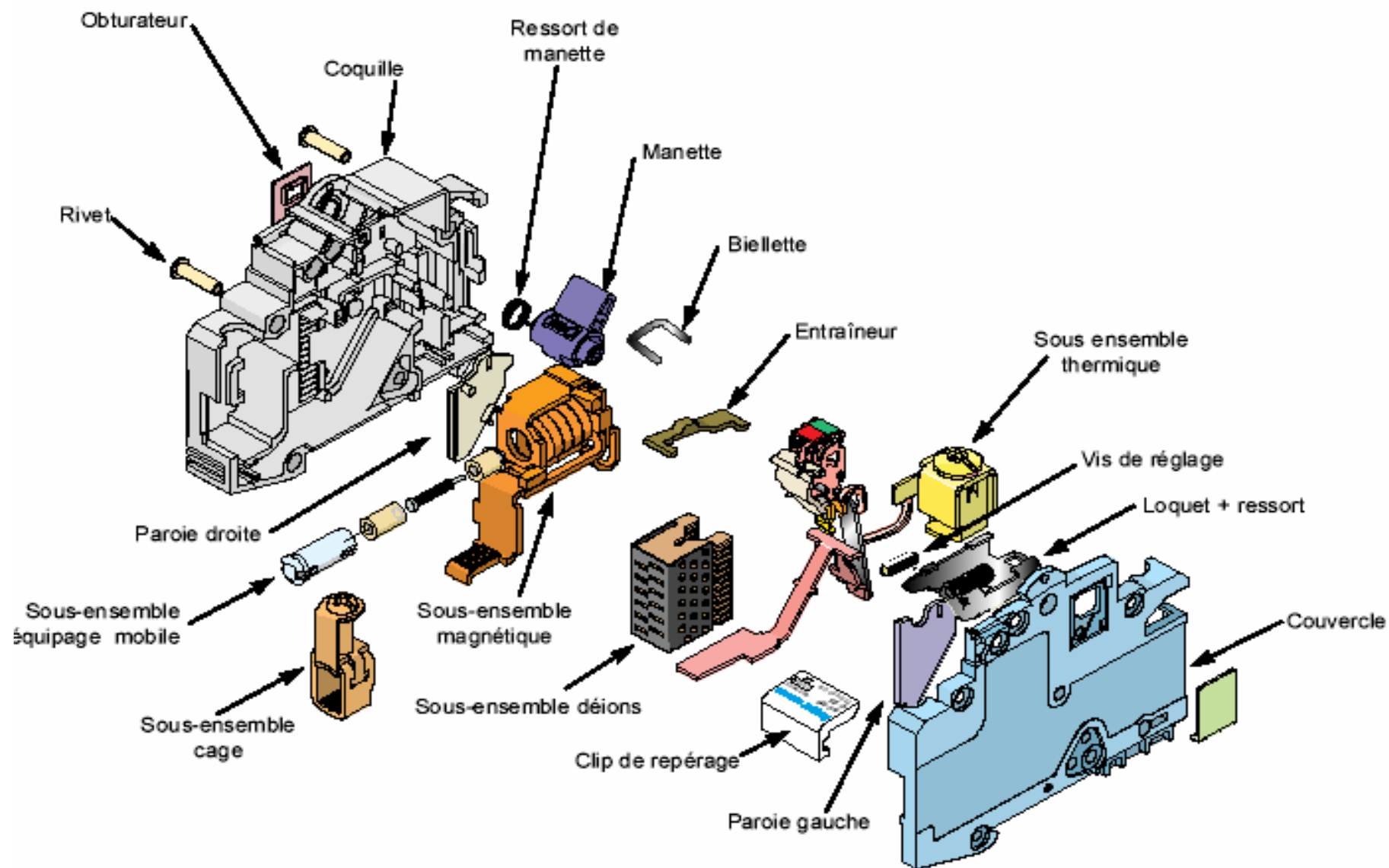
Bien que sa fonction essentielle soit la coupure des courant de court-circuit et de surcharge par action « réflexe » à propre courant, il permet aussi par une action volontaire extérieure les coupures des courants de surcharge et des courants normaux (d'emploi et plus petits). De plus, après toute ouverture, il assure un isolement en tension du circuit coupé. La conception d'un disjoncteur pouvant réunir dans un même boîtier toutes ces fonctions a conduit à adopter des solutions spécifiques quant aux :

- **mécanismes d'ouverture**
- **mécanismes de fermeture**
- **déclencheurs**
- **circuits électriques des pôles**
- **éléments de coupure (contacts, chambre...)**



Le disjoncteur basse tension

Sa technologie



Le disjoncteur basse tension

Sa technologie

- coquille (1)
- couvercle

- de pièces spécifiques :
 - chambre de coupure (2)
 - tôle d'arc (3)
 - vis de réglage (4)
 - sous-ensemble serrure (5)

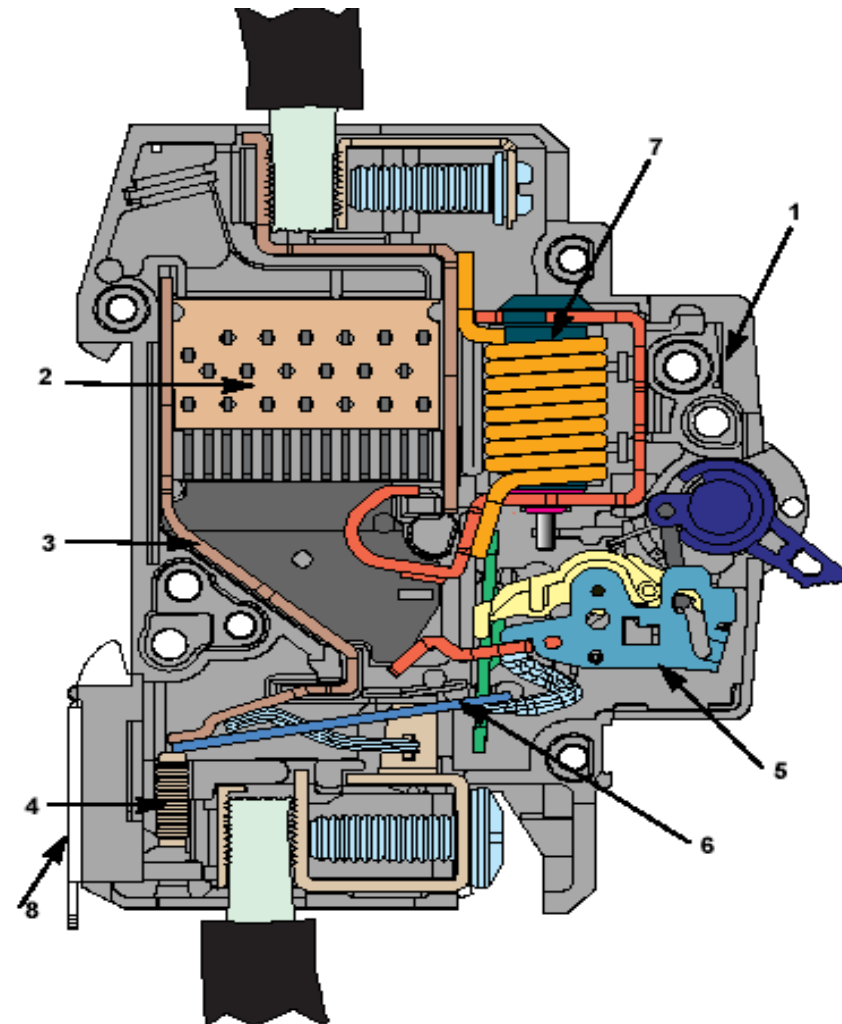
- d'ensembles variables :
 - sous-ensemble thermique (6)
 - sous-ensemble magnétique (7)

Remarque :

Certains disjoncteurs ne comportent pas de sous-ensemble thermique mais uniquement magnétique (ex : série MN). Ces disjoncteurs sont destinés à la protection des canalisations électriques alimentant les moteurs de désenfumage contre les courants de court-circuit. Ils ne déclenchent pas en cas de surcharge et acceptent les pointes de courant liées au démarrage de ces moteurs.

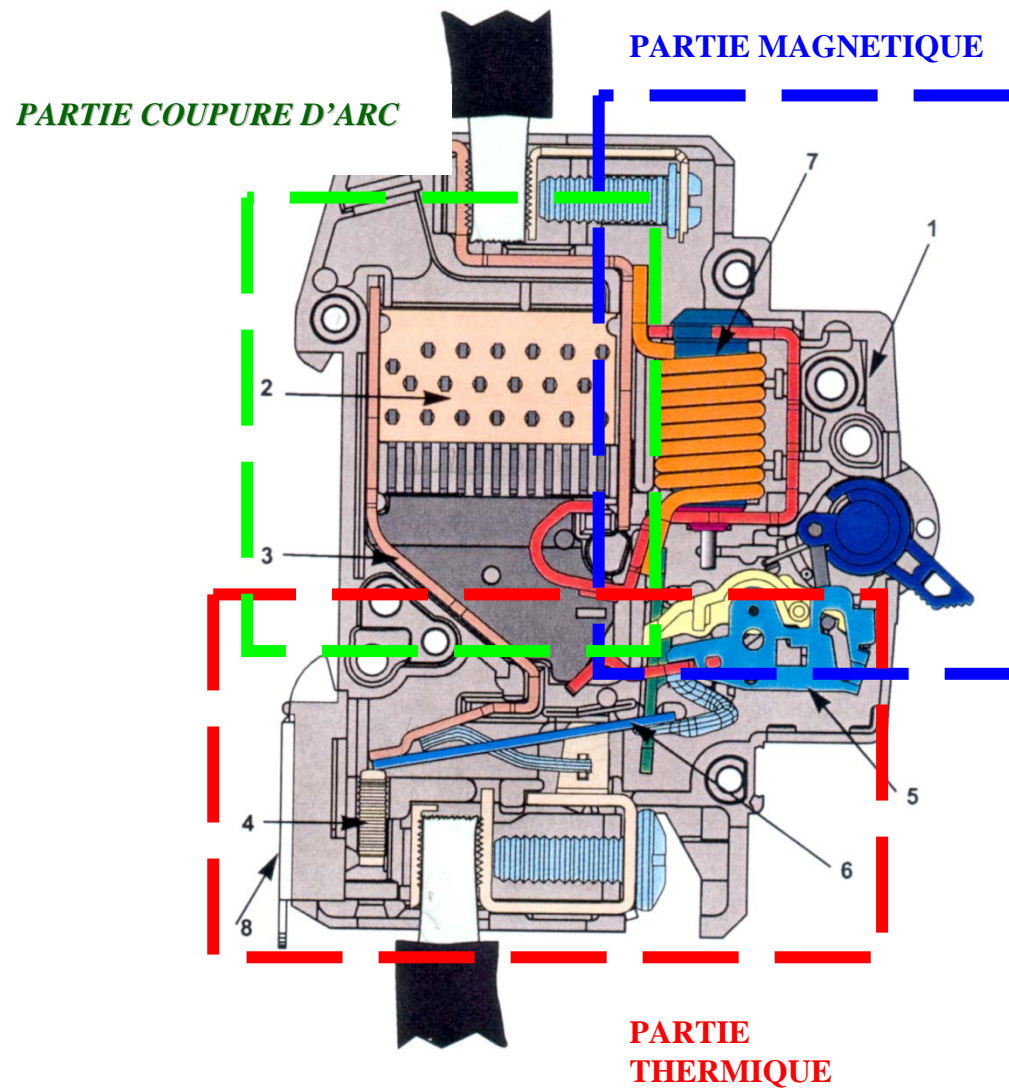
- de pièces de finition :
 - clip de marquage
 - ressort et loquet bistable (8)

La position bistable du loquet facilite le montage et démontage du disjoncteur sur le rail.



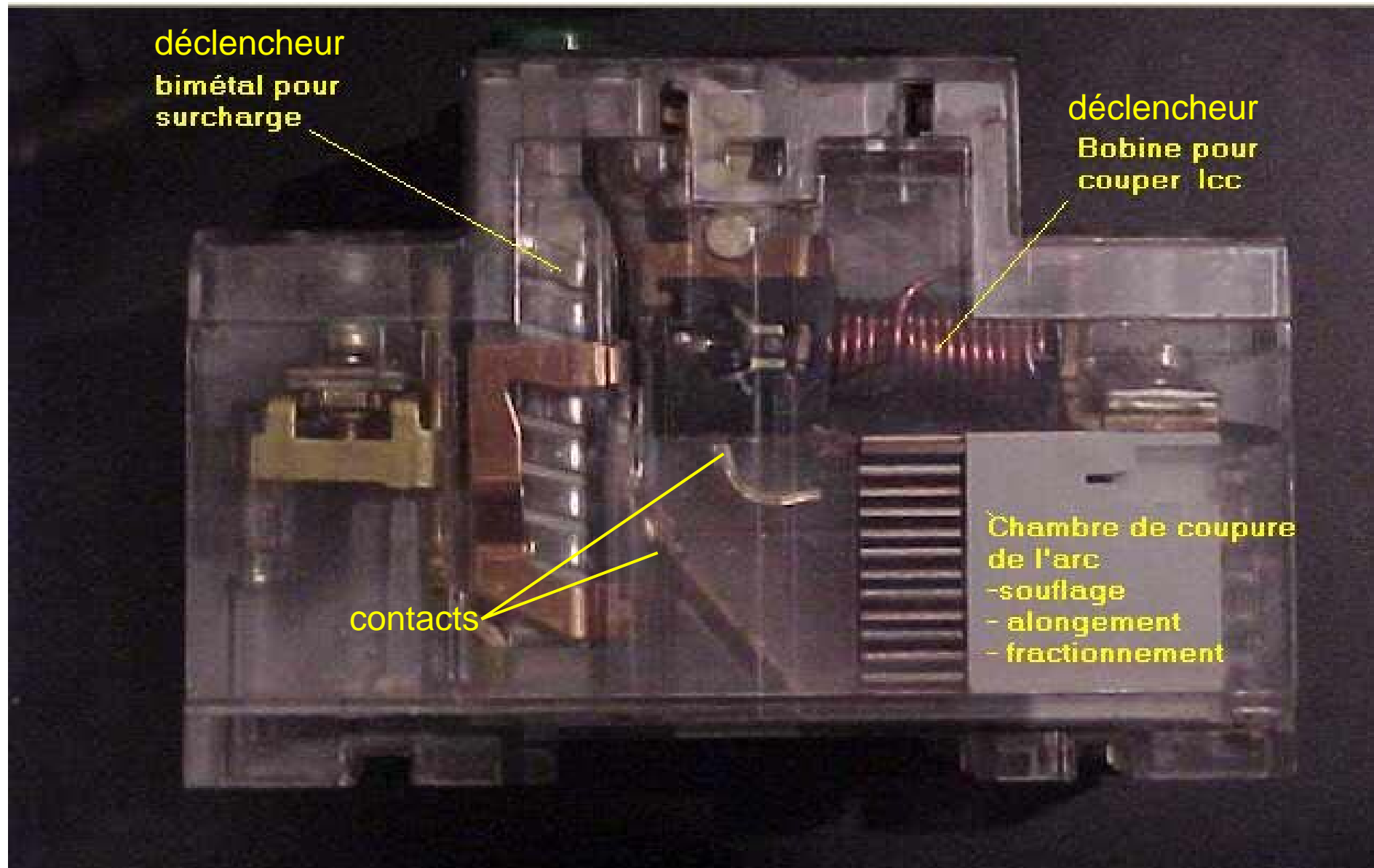
Le disjoncteur basse tension

Sa technologie



Le disjoncteur basse tension

Sa technologie



Le disjoncteur basse tension

Sa technologie : les déclencheurs



Les déclencheurs provoquent l'ouverture des contacts. Cette ouverture donne naissance à un arc électrique qui s'achève par une tension de rétablissement que l'appareil comme le circuit doivent supporter.

Le sous-ensemble thermique

- **But** : provoquer l'ouverture des contacts en cas de surcharge de faible importance mais prolongées. Pas très précis, temps de réaction lent (c'est voulu!!). Protection des conducteurs contre les échauffements dus aux surcharges prolongées.
- **Moyens** : on atteint un échauffement significatif du courant ou de la température déterminés qui provoque le déclenchement. Pour cela, une vis détermine l'origine de la course de la bilame (1). Une augmentation du courant par surcharge provoque l'échauffement et la déformation de celle-ci par la dilatation différentielle des deux alliages laminés à froid qui la constituent.

Le sous-ensemble magnétique

- **But** : provoquer l'ouverture des contacts en cas de surcharge importante ou de court-circuit. Déclenchement instantané, remplace les fusibles sur court-circuit. Supporte 3 à 15 fois le courant nominal, peut être étanche. Protection des équipements contre les courants de défaut, plutôt dédié aux applications d'ingénierie.
- **Moyens** : le champ magnétique créé autour de la bobine est proportionnel au courant qui la traverse et au nombre de spires. Le ressort s'oppose à l'attraction du noyau mobile vers le noyau fixe. Le choix des courbes de déclenchement se fait par l'emploi de ressorts différents.

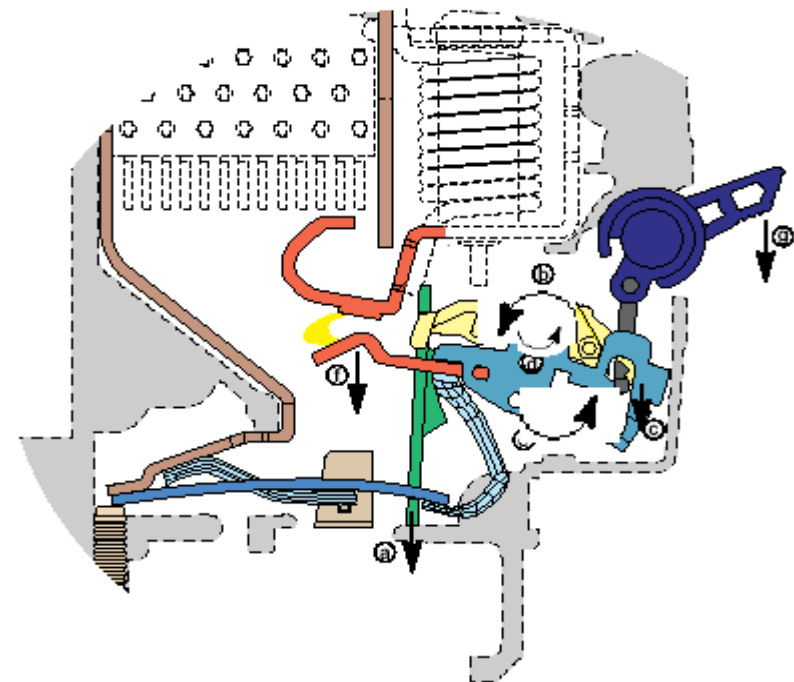
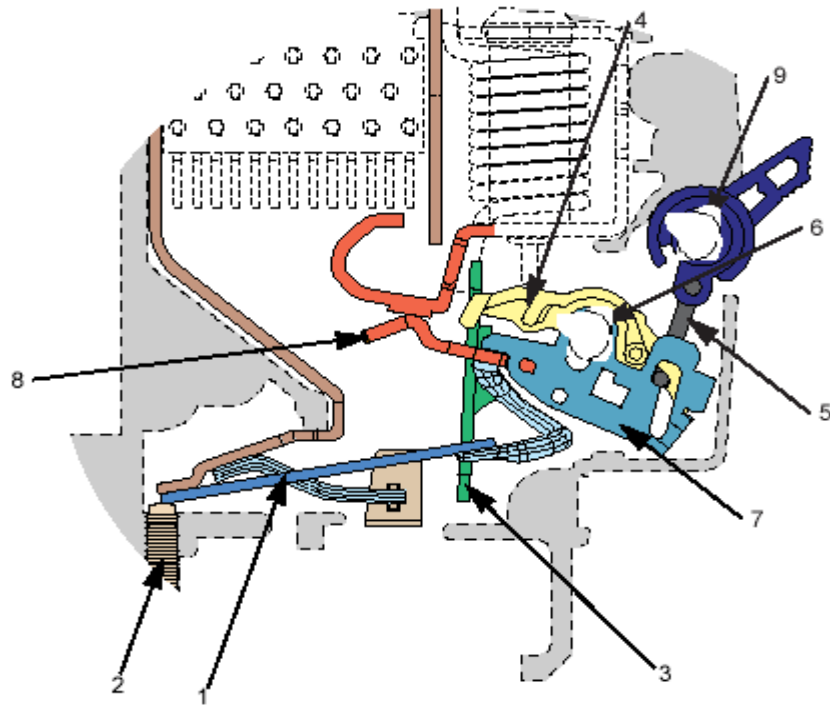
Le disjoncteur basse tension

Sa technologie : les déclencheurs

Le sous-ensemble thermique

La dilatation vers le bas du bilame provoque dans l'ordre :

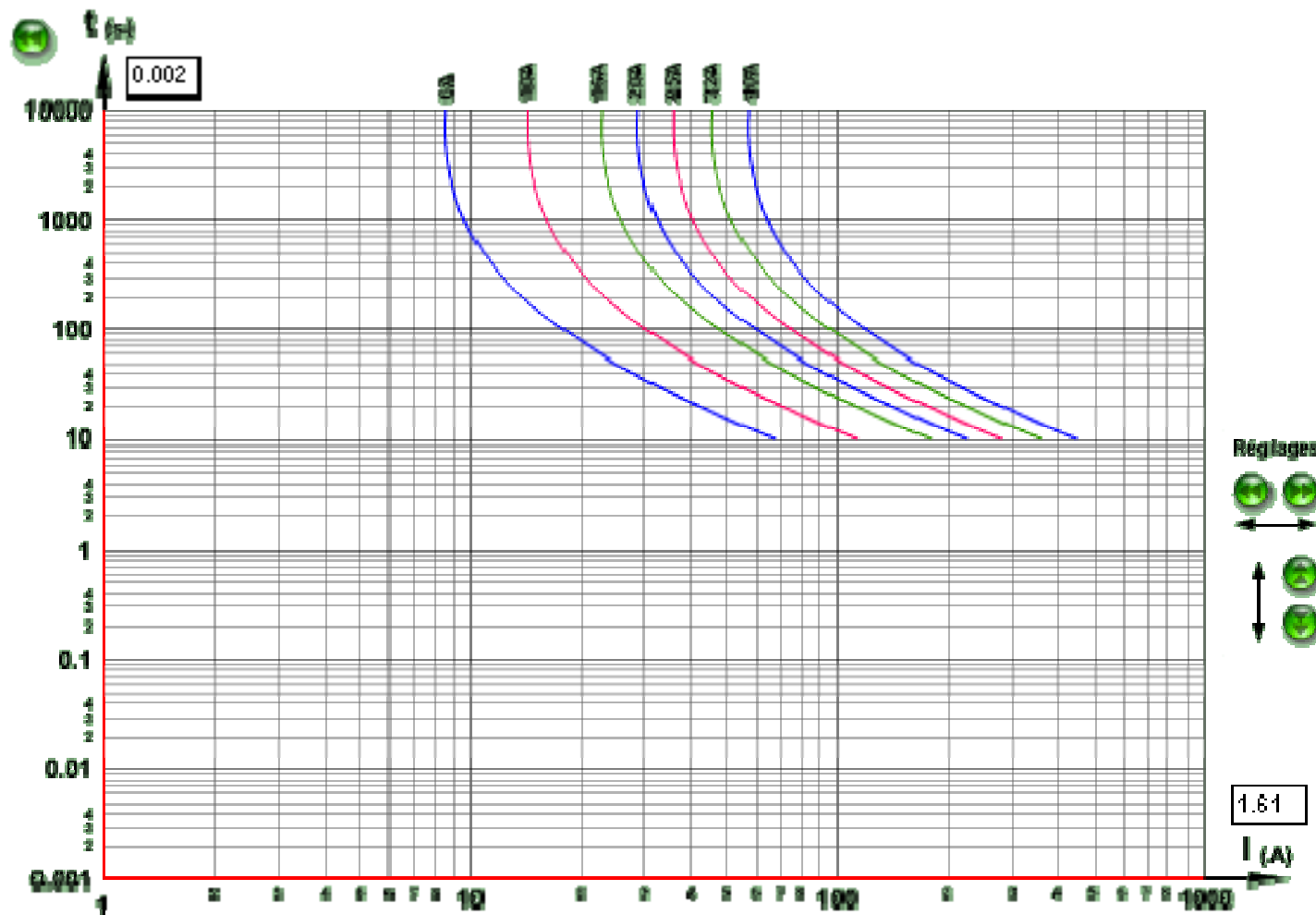
- a) la descente de l'entraîneur (3)
- b) la rotation du déclencheur (4)
- c) la libération de la biellette de son encoche (5)
- d) la détente du ressort de contact (6)
- e) la rotation du sous-ensemble serrure (7)
- f) l'ouverture des contacts (8)
- g) le déplacement de la manette (9)
- h) le retour de la biellette dans son encoche (grâce au ressort de rappel de la manette)



Le disjoncteur basse tension

Sa technologie : les déclencheurs

Courbe de déclenchement thermique du sous-ensemble thermique



Le disjoncteur basse tension

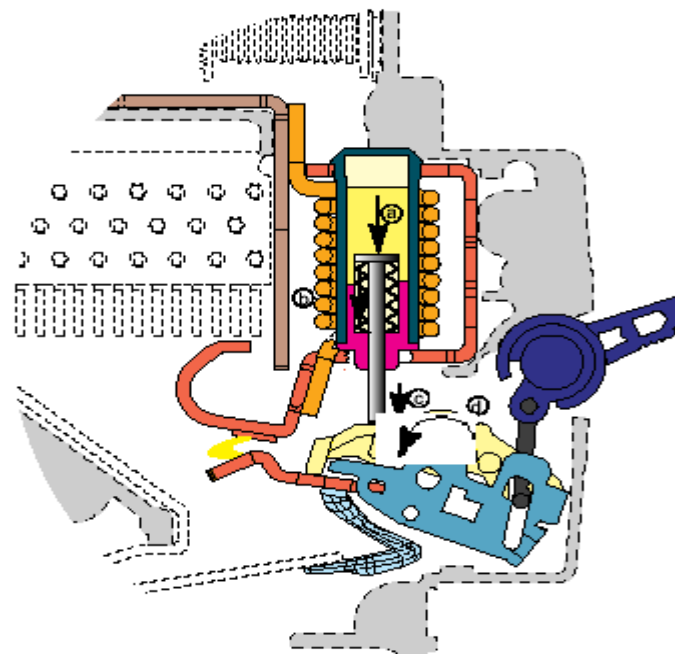
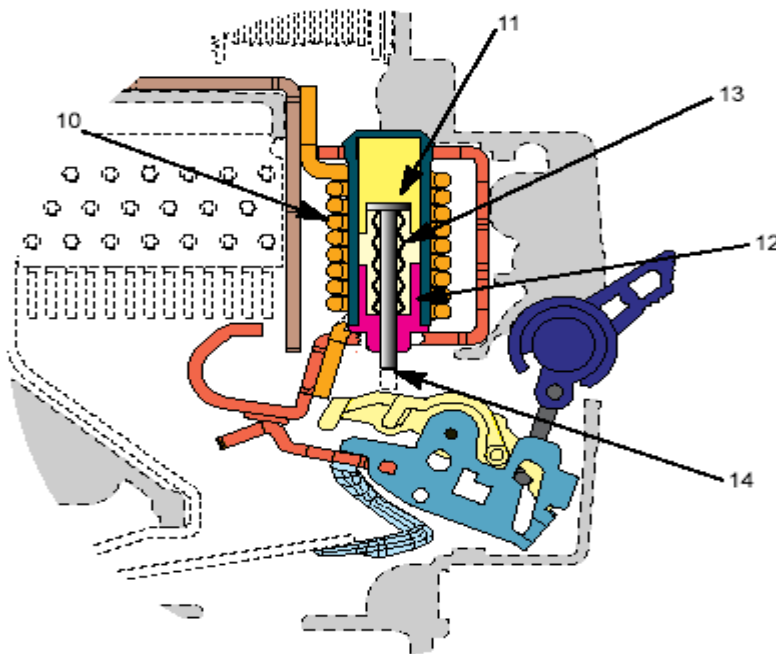
Sa technologie : les déclencheurs

Le sous-ensemble magnétique

Lors d'un court-circuit important, le champ magnétique qui en résulte produit dans l'ordre :

- a) l'attraction du noyau mobile (11) vers le noyau fixe (12)
- b) la compression du ressort calibré (13)
- c) le déplacement du percuteur (14)
- d) la rotation du déclencheur (4)

L'ouverture des contacts est directement réalisée par l'impact violent du percuteur sur le déclencheur qui répercute cet impact sur les contacts (phénomène "d'arrachage des contacts").

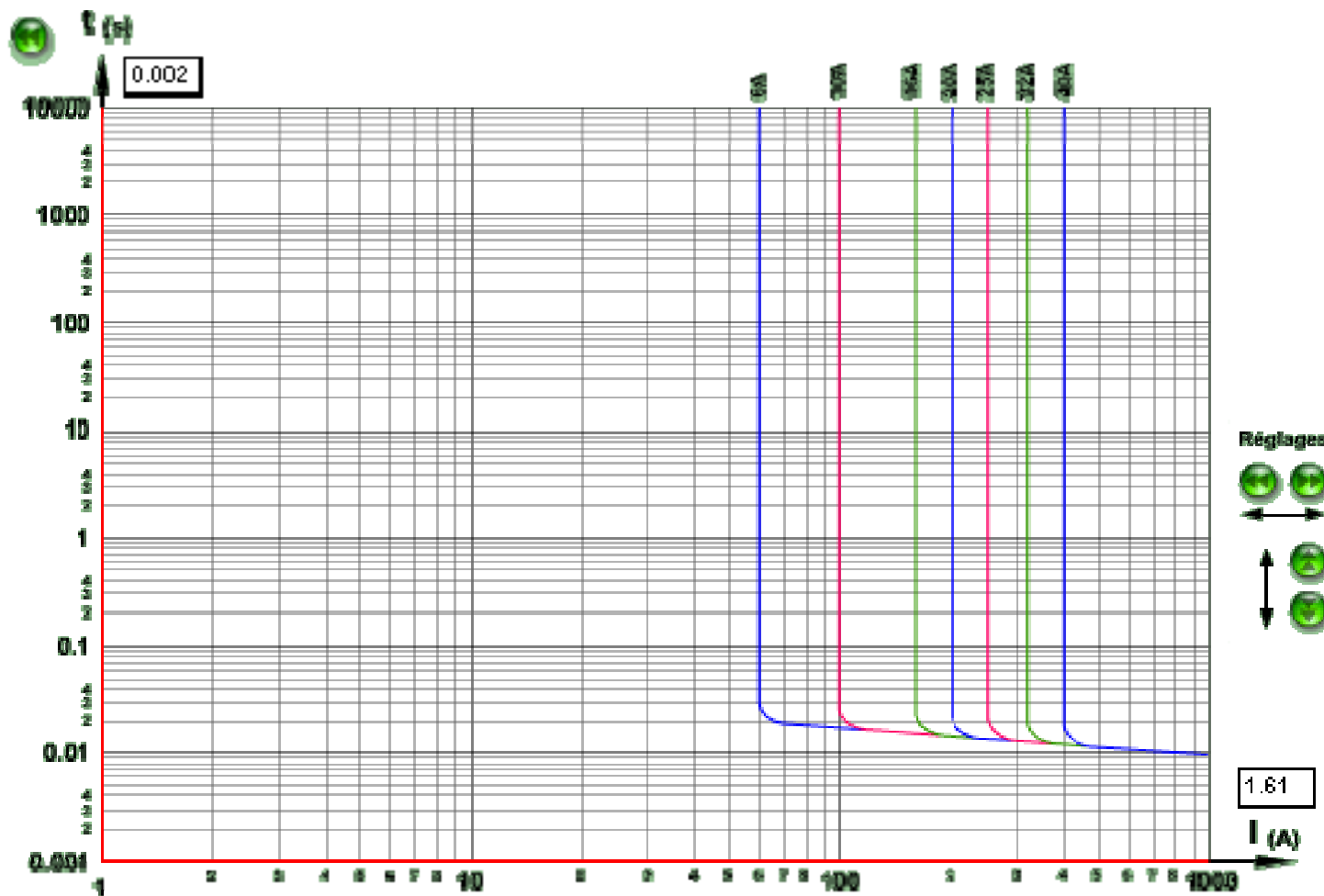


Le disjoncteur basse tension

Sa technologie : les déclencheurs

Courbe de déclenchement thermique du sous-ensemble magnétique

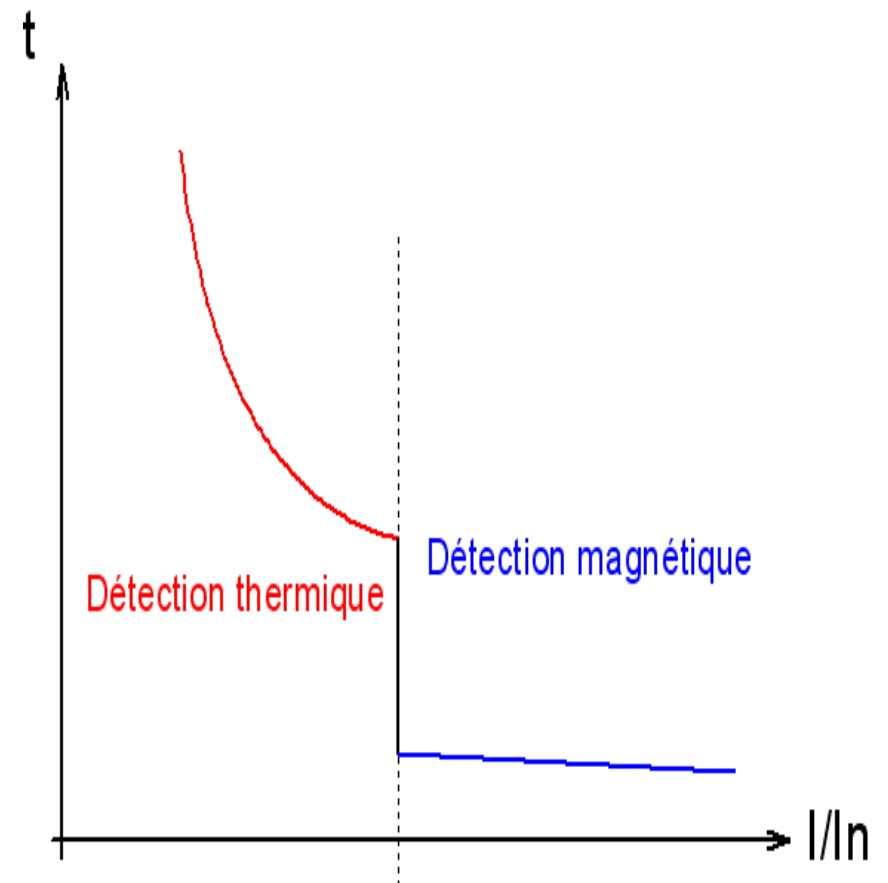
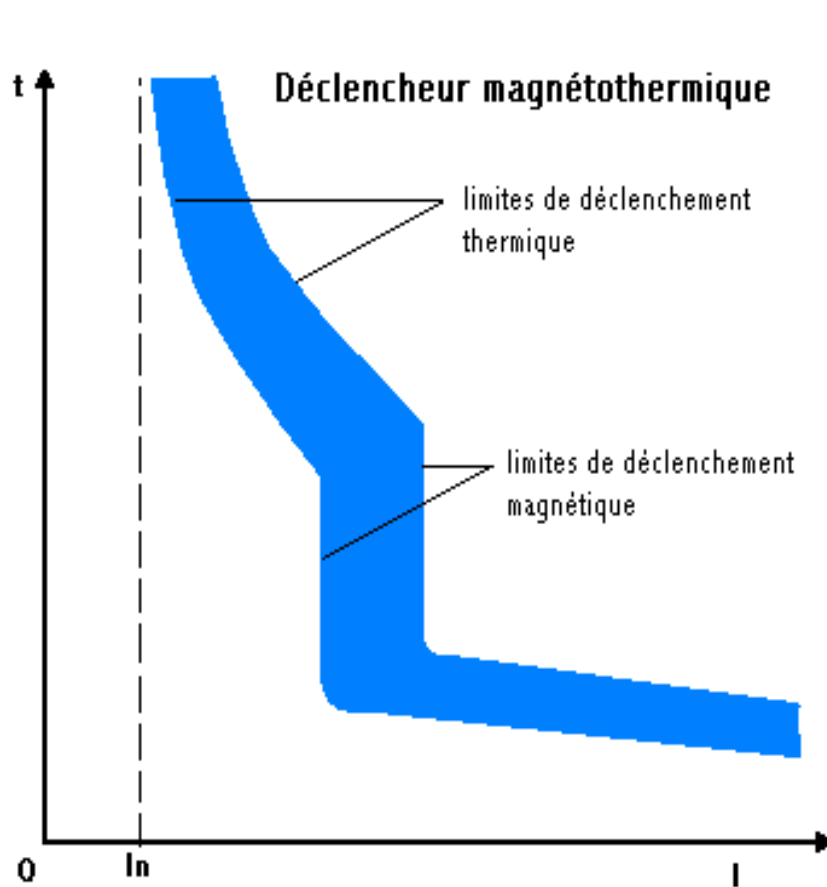
En cas de court-circuit le dispositif électromagnétique ouvre le disjoncteur en un temps très court, de l'ordre de quelques ms.



Le disjoncteur basse tension

Sa technologie : les déclencheurs

Caractéristiques Universelles

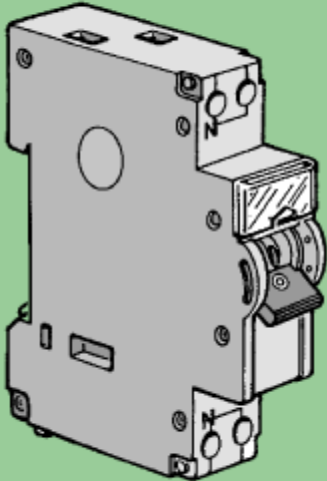


Le disjoncteur basse tension

Sa technologie : les déclencheurs

Bilan sur les déclencheurs

Technologie du
DISJONCTEUR MAGNETO-THERMIQUE



● DISPOSITIF THERMIQUE
● DISPOSITIF MAGNETIQUE
● SYNTHESE
● COURBE UNIVERSELLE

Ph.JUGUET / BEP Electrotechnique / Lycée A.KASTLER / 91410 - DOURDAN

Le disjoncteur basse tension

Quelques applications

Le disjoncteur de moteur :

Le disjoncteur de moteur assure la protection des appareils raccordés en aval.

Principe: Le disjoncteur de moteur fonctionne selon 2 principes.

- *thermique avec limiteur* : Ceci offre la possibilité de protéger les enroulements du moteur contre les surcharges imposées mécaniquement au moteur. Une augmentation de la charge sur l'arbre du moteur implique une augmentation du courant, donc une augmentation de la température sur la lame bimétallique.
- *magnétique* : Offre la possibilité de fermer ou d'ouvrir le circuit au moyen d'une commande manuelle ou automatique « indéfiniment ».

Les disjoncteurs (protecteur) de canalisation :

Le disjoncteur de canalisation n'assure que la protection des lignes - contre les courants de surcharge ou de court-circuit - alimentant les récepteurs mais pas ces derniers.

Il s'agit d'un disjoncteur de canalisation triphasé. Il en existe en d'autres exécutions (1,2,4 pôles). Un sectionneur de neutre peut y être accouplé. La tendance est au remplacement des fusibles sur les tableaux de distribution d'abonnés par des disjoncteurs magnéto-thermiques qui assurent la protection des canalisations et des appareils récepteurs d'énergie, ceci non seulement pour des raisons économiques et de sécurité (plus d'aluminium pour remplacer un fusible défectueux), mais aussi pour des questions de stockage des différents fusibles.

Les disjoncteurs



Disjoncteur à air comprimé



Disjoncteur 800kV

Haute Tension

Le disjoncteur haute tension

Son But

➤ Commission électrotechnique internationale



- **destiné à établir, supporter et interrompre des courant sous sa tention assignée** (la tension macimale du réseau électrique qu'il protège).
- **connecter ou déconnecter** une ligne dans un réseau électrique
- **éliminer un court-circuit** (conditions anormales spécifiées, foudre...)

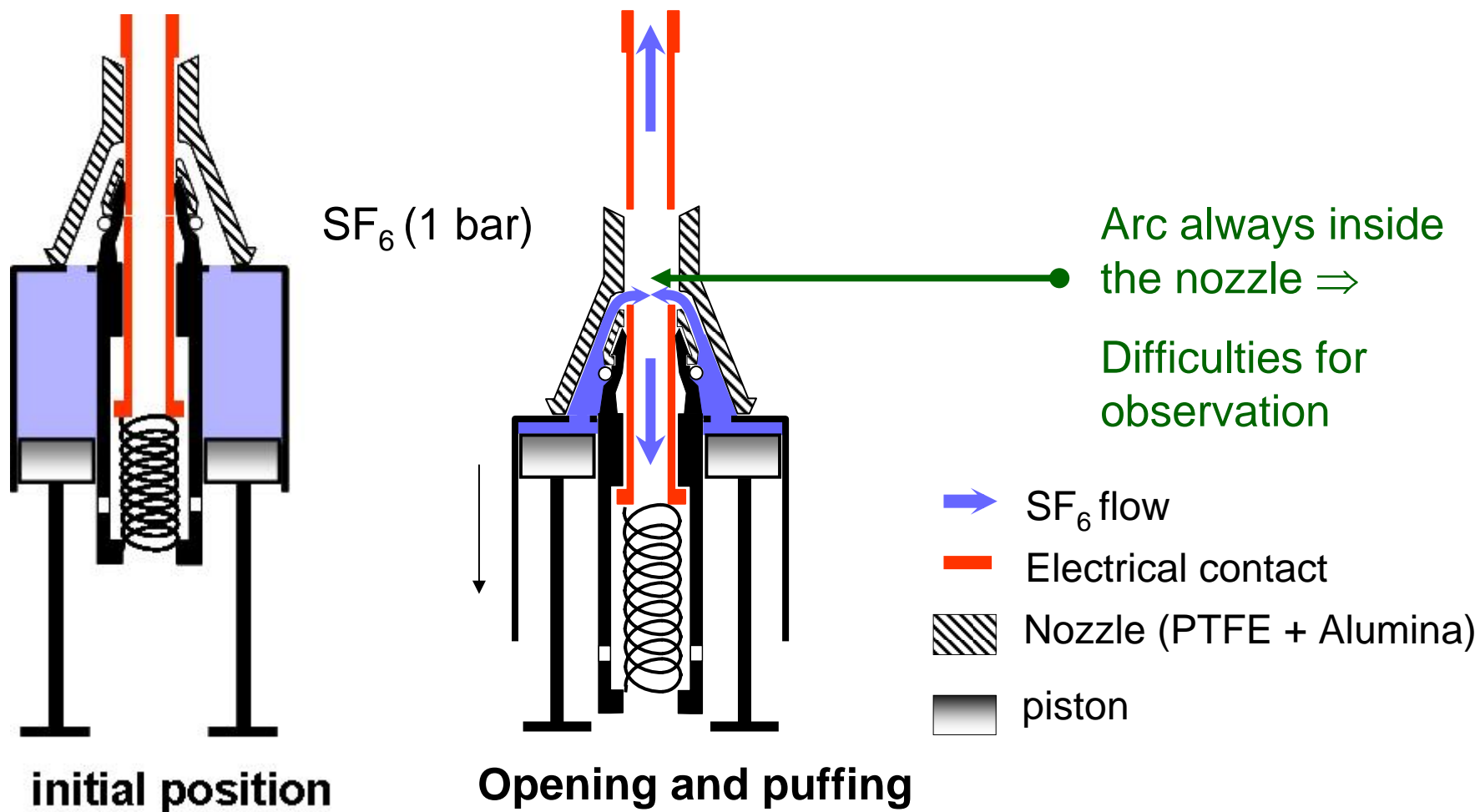
➤ Principes

- A ce jour, les disjoncteurs HT utilisent des gaz pour l'isolement et la coupure. Le vide est plutôt utiliser pour les disjoncteurs MT.
- A l'état normal, le gaz est un isolant, et permet de supporter la tension réseau connecté à ses bornes. Lorsque les contacts s'ouvrent, l'intervalle entre les contacts est soumis à un fort champ électrique et la température du milieu augmente rapidement (15000 °C!). Le gaz s'ionise, on parle alors de plasma. Sous l'action du soufflage exercé sur l'arc lors du fonctionnement du disjoncteur, la température de l'arc diminue, les électrons et les ions se re-combinent et le fluide retrouve ses propriétés isolantes.
La coupure de courant est alors réussie.

Le disjoncteur haute tension

Son But

SF₆



Puffing and nozzle erosion ➡ **Assistance to arc quenching**

Les disjoncteurs haute tension

Géométrie du dispositif



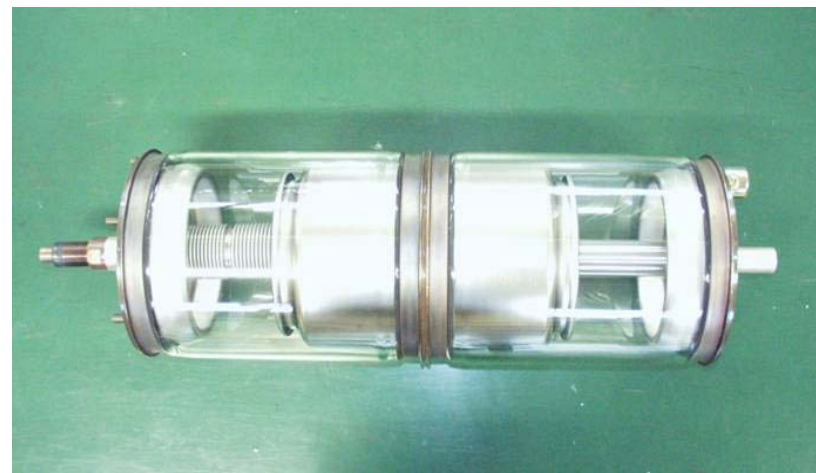
168kV/40kA VCB en 1989



84kV/40kA VCB en 1989



145kV/40kA VCB en 2003



145kV/40kA VCB en 2003

Les disjoncteurs haute tension

Géométrie du dispositif

SF₆

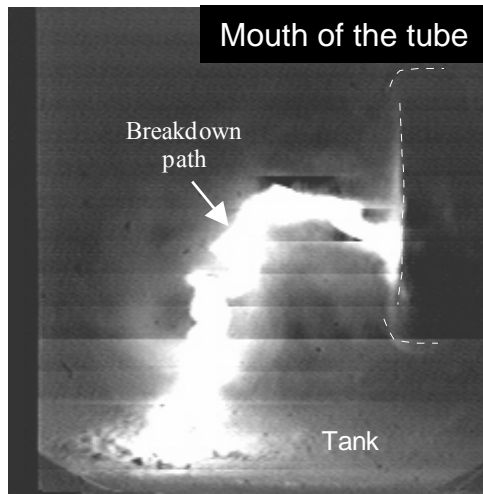
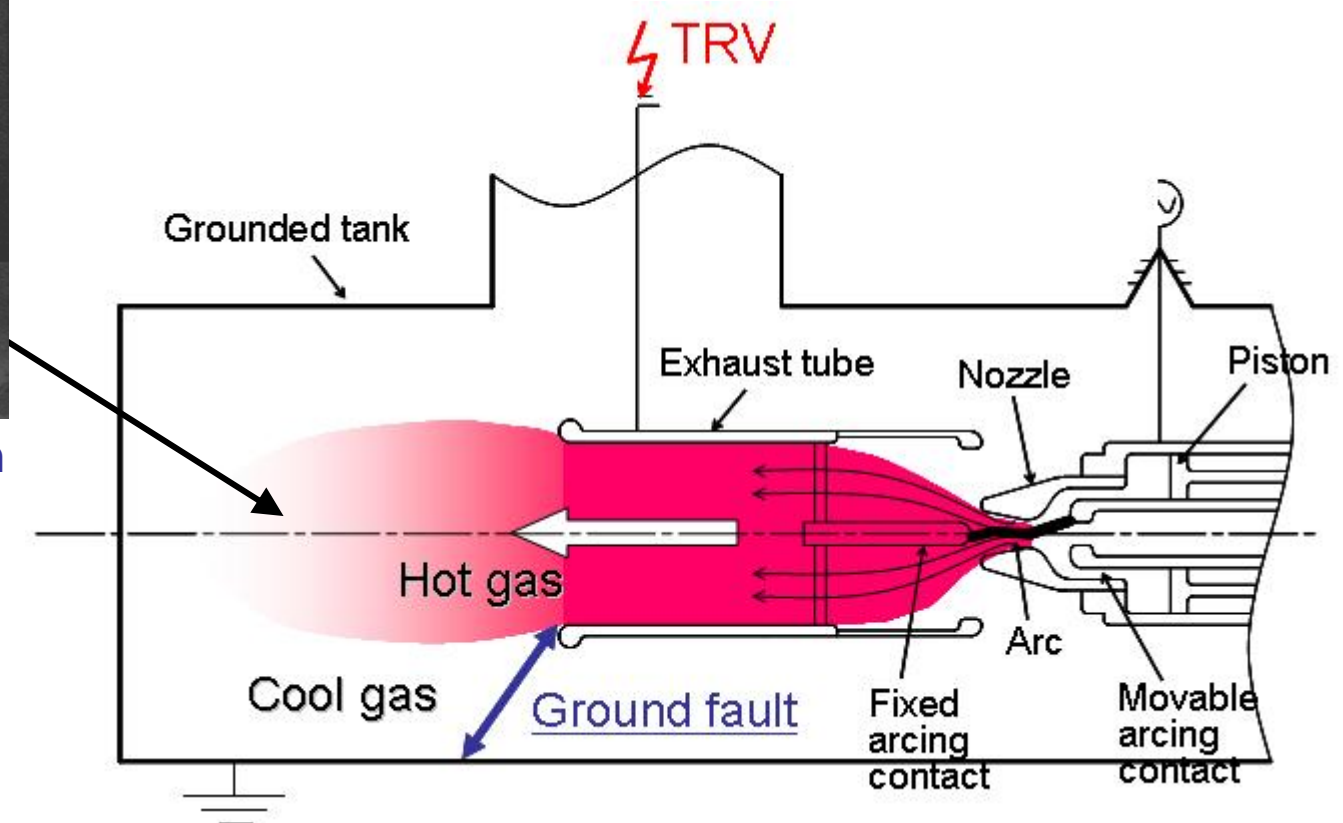


Photo of a breakdown



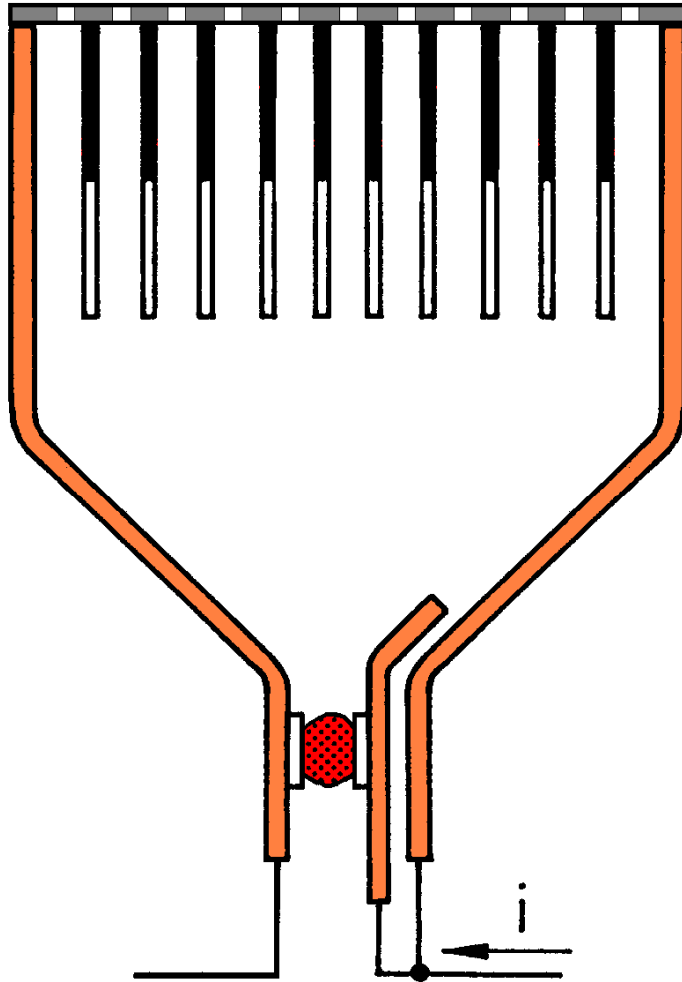
L'arc électrique dans un disjoncteur

L'arc électrique dans un disjoncteur



L'arc électrique dans un disjoncteur

Vie de l'arc électrique



3. Segmentation et extinction de l'arc

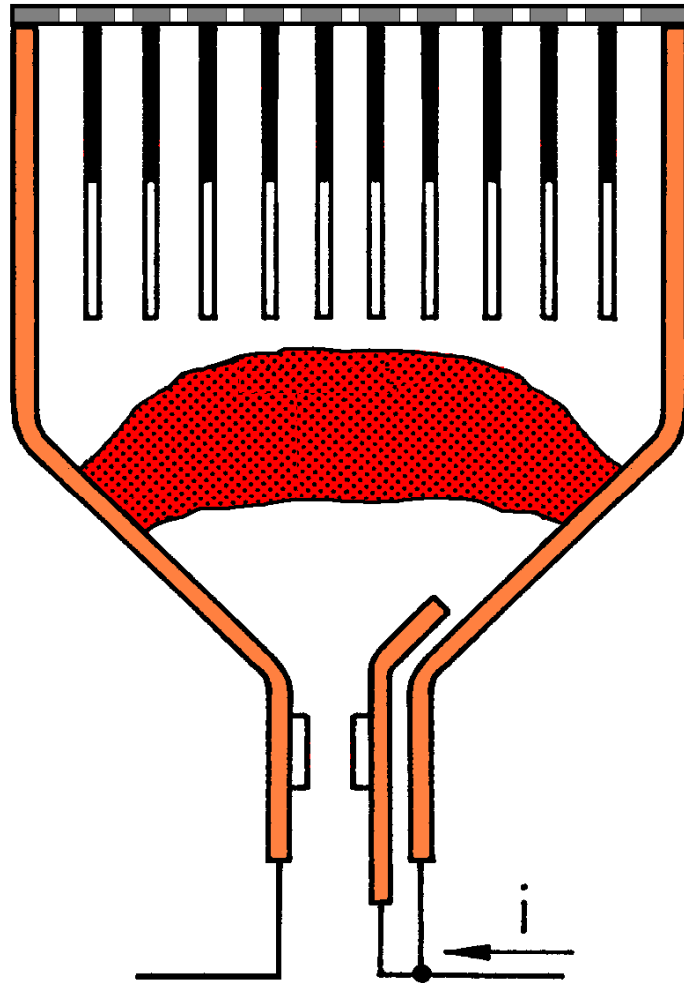
2. Déplacement de l'arc, étirement sous l'influence du champ magnétique

1. Séparation des contacts et création de l'arc

Disjoncteur Basse Tension (< 1000 V)

L'arc électrique dans un disjoncteur

Vie de l'arc électrique



3. Segmentation et extinction de l'arc

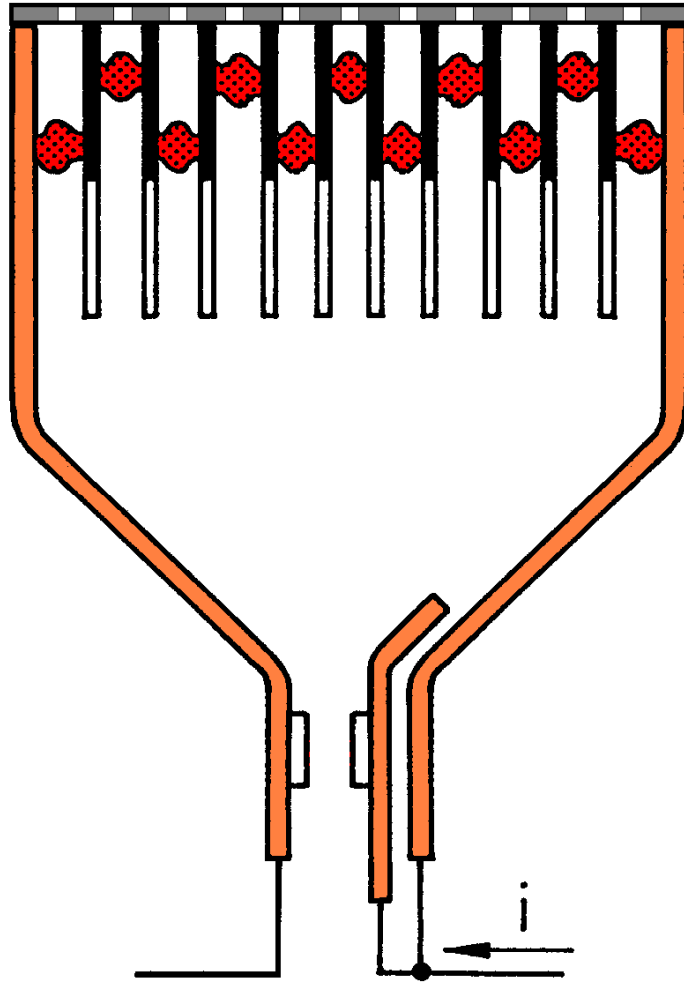
2. Déplacement de l'arc, étirement sous l'influence du champ magnétique

1. Séparation des contacts et création de l'arc

Disjoncteur Basse Tension (< 1000 V)

L'arc électrique dans un disjoncteur

Vie de l'arc électrique



3. Segmentation et extinction de l'arc

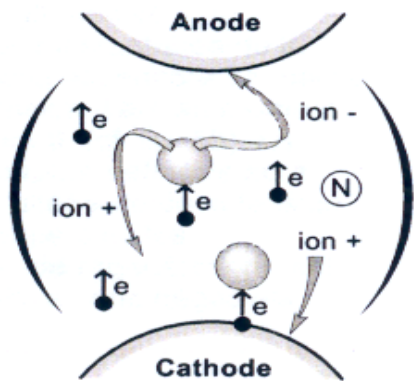
2. Déplacement de l'arc, étirement sous l'influence du champ magnétique

1. Séparation des contacts et création de l'arc

Disjoncteur Basse Tension (< 1000 V)

Le disjoncteur basse tension

Caractéristiques électriques : la tension d'arc



a : composition de la colonne d'arc.

L'arc est constitué d'une colonne de plasma composée d'ions et d'électrons. Cette colonne reste conductrice tant que sa température est suffisamment élevée. **L'arc est ainsi « entretenu » par l'énergie qu'il dissipe par effet Joule.**

La tension qui apparaît entre les deux contacts s'appelle **la tension d'arc (U_a)**. Une partie fixe $U_{AC} \cong 20$ à $40V$ apparaît à la séparation des contacts et dépend de la nature des matériaux. Une partie variable $U_L \cong 50$ à $100V$ apparaît une fois l'arc stabilisé, allongé et à l'équilibre pression-température. Le rôle de la tension d'arc est essentiel car elle conditionne l'énergie dissipée dans l'appareil au cours de la coupure

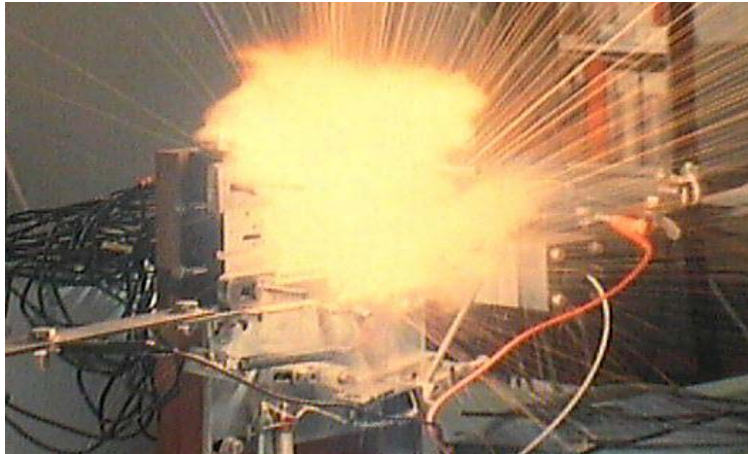
$$W_{arc} = \int_{t_0}^{t_{arc}} U_{arc} \cdot I_{arc} \cdot dt \quad \text{avec} \quad U_{arc} = U_{AC} + U_L$$

Où t_0 est l'instant d'initiation de l'arc et t_{arc} est l'instant de la coupure.

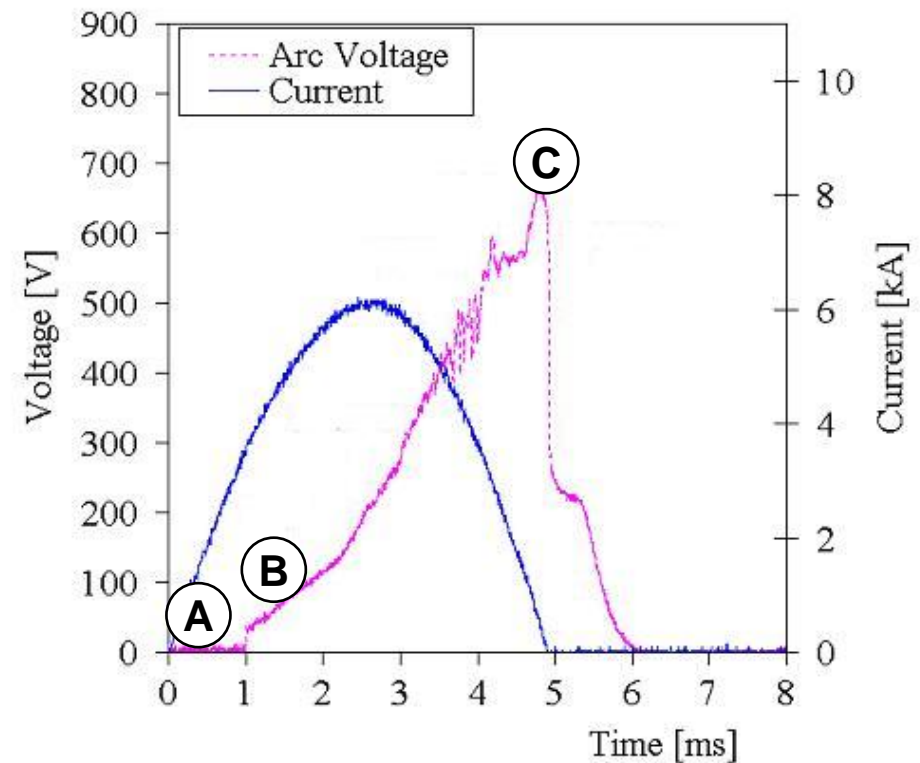
En moyenne tension et en haute tension, elle reste toujours très inférieure aux tension de réseau et n'a donc pas en général d'effet limiteur. La coupure se fait donc au voisinage du zéro « naturel » du courant alternatif.

L'arc électrique dans un disjoncteur

Caractéristiques électriques : la tension d'arc

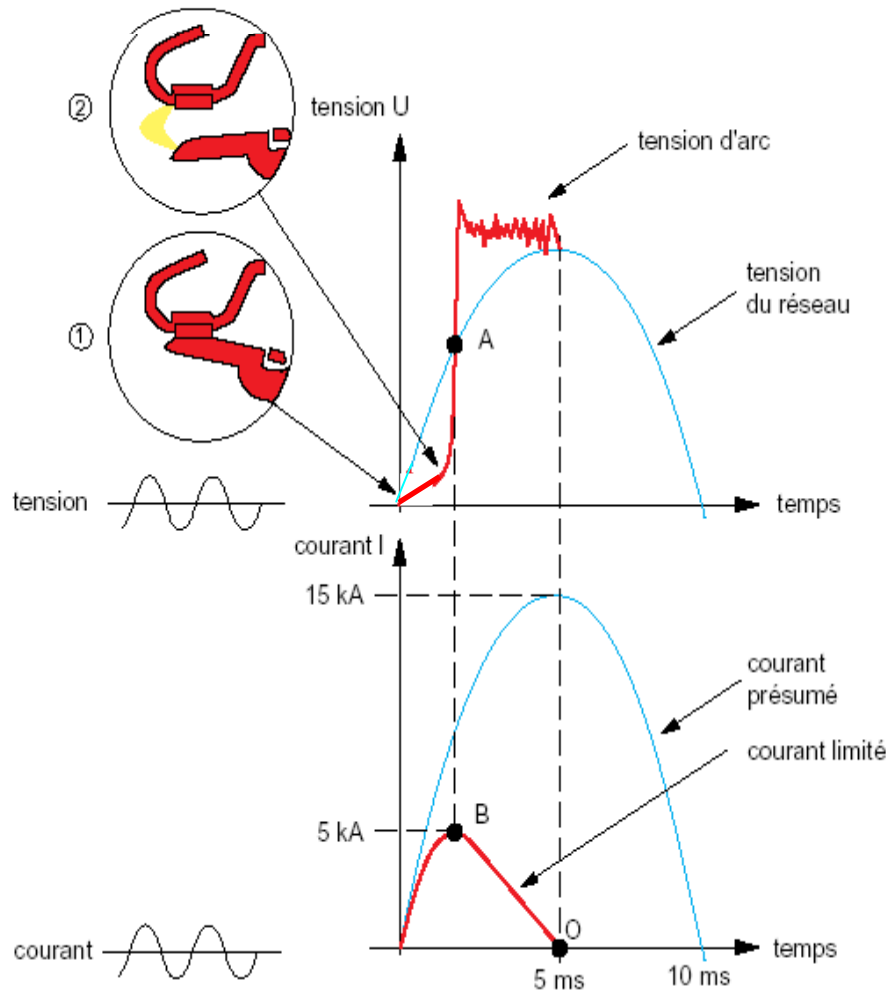


- A** 0 ms : initiation du courant
- B** 1 ms : séparation des contacts et création de l'arc
- C** 3.5 - 5 ms : l'arc est segmenté dans la chambre de coupure et le courant limité



L'arc électrique dans un disjoncteur

Caractéristiques électriques : *la tension d'arc*



1) Les contacts sont fermés, la tension d'arc est nulle

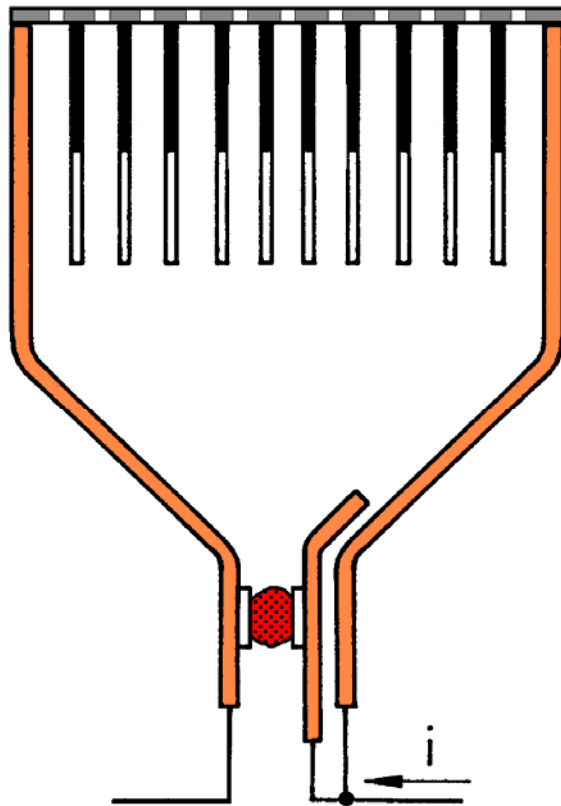
2) A l'ouverture des contacts, dès détection du court-circuit, une tension d'arc se développe. Dès qu'elle est supérieure à la valeur de la tension du réseau (**point A**), l'intensité du court-circuit diminue (**point B**) jusqu'à la valeur 0 (**point O**).

Le courant est coupé. Ce phénomène a pour effet d'une part de limiter le courant de court-circuit (15 kA présumé sont réduits à 5kA), d'autre part de réduire le temps de coupure du court-circuit (10 ms sont ramenés à 5 ms).

Il en résulte que, pour limiter à la fois la valeur du courant (point B) et le temps de coupure (point O), donc l'énergie dégagée, la tension d'arc doit être le plus rapidement possible supérieure à la valeur de la tension de réseau (point A). Ce principe est utilisé pour la limitation et la coordination des disjoncteurs.

L'arc électrique dans un disjoncteur

1. Séparation des contacts



Apparition de l'arc électrique

- Par claquage diélectrique entre deux électrodes (dépend du champ électrique E/d , de la forme des électrodes, de la nature du gaz et de la densité du gaz)

- Par l'ouverture d'un circuit lorsque le courant n'est pas nul

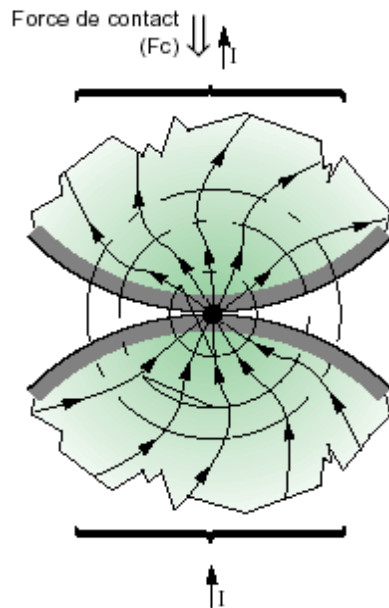
Circuit selfique : l'énergie magnétique stockée provoque l'apparition d'un arc électrique

Circuit résistif : la faible distance entre les électrodes entraîne un claquage diélectrique

L'arc électrique dans un disjoncteur

1. Séparation des contacts

Les contacts des disjoncteurs BT sont constitués par des zones d'éléments conducteurs mis en pression dans le même sens que leur déplacement possible. Deux phénomènes physiques liés aux matériaux utilisés et à la force de contact doivent retenir notre attention :

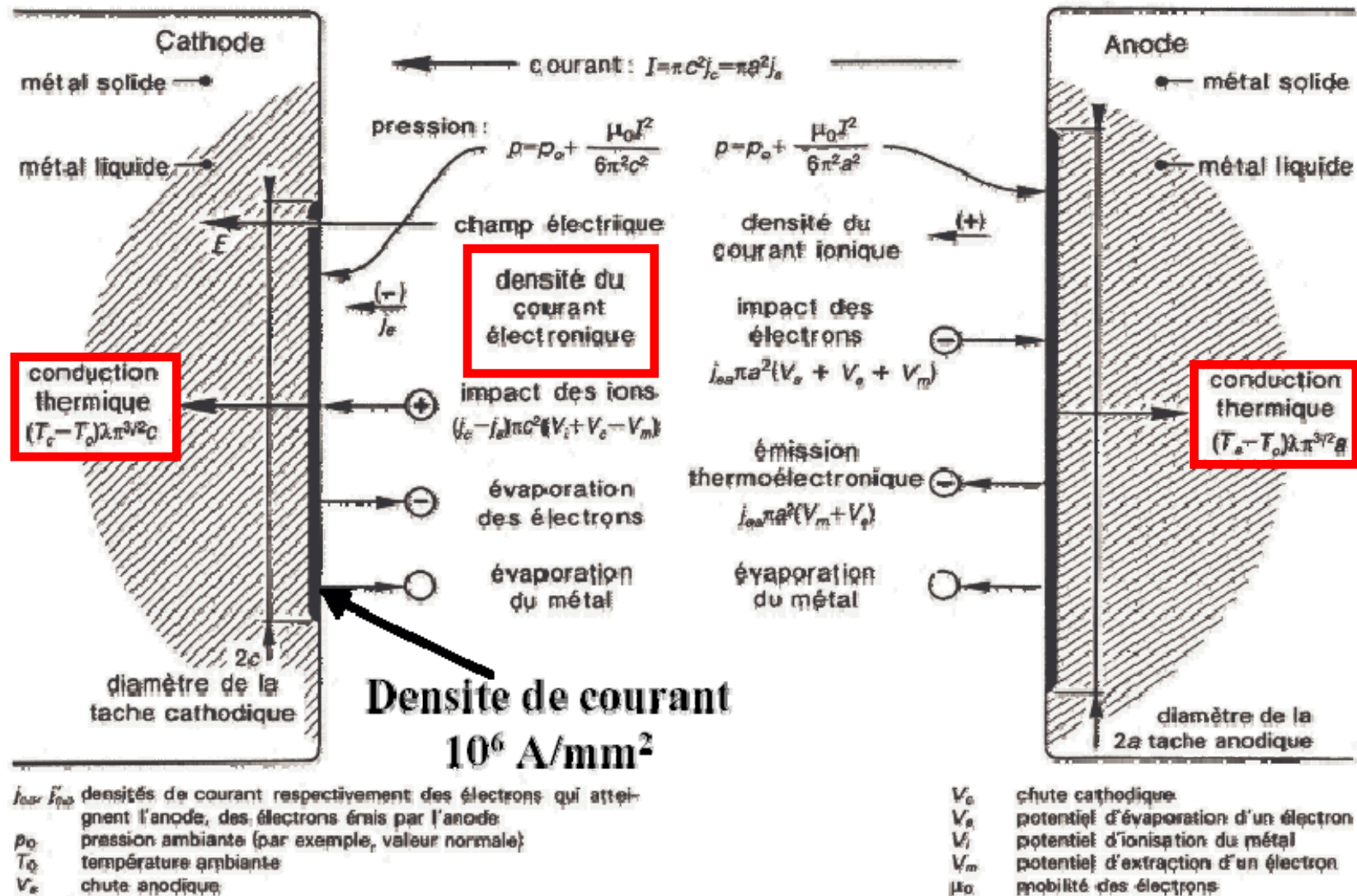


- **la résistance de contact** qui doit être la plus faible possible car elle conditionne la puissance ohmique développée au point de contact qu'il faut évacuer par conduction (**échauffement, érosion, oxydation, corrosion, fusion**)
- **la répulsion de striction** qui est une force due à l'interaction magnétique entre les lignes de courant. Pendant toute la durée de cette force, il y a **érosion** des pastilles (sur les contacts), risque de **soudure** si les contacts se referment, création de point chaud favorisant la **stagnation de l'arc** et compromettant ainsi son extinction

Pour de forts courants ($> 15 In$) et des appareils devant ouvrir et couper rapidement, il faut améliorer les conditions de répulsion du contact pour avoir au plus vite une tension d'arc. **Le choix des matériaux et de la force de contact sont donc déterminant quant à la résistance de contact, au seuil de répulsion, à l'érosion, la soudure...**

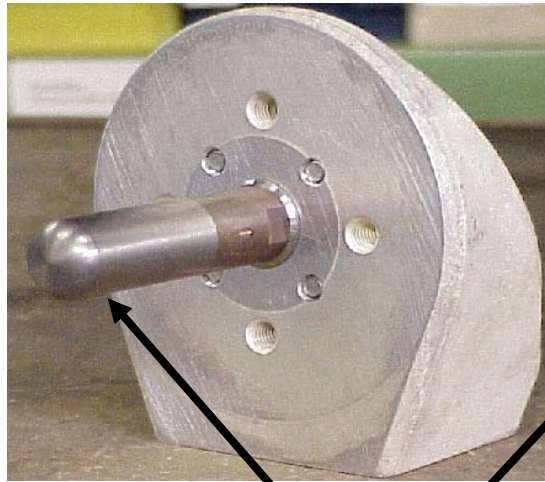
L'arc électrique dans un disjoncteur

1. Séparation des contacts : *phénomènes physiques*

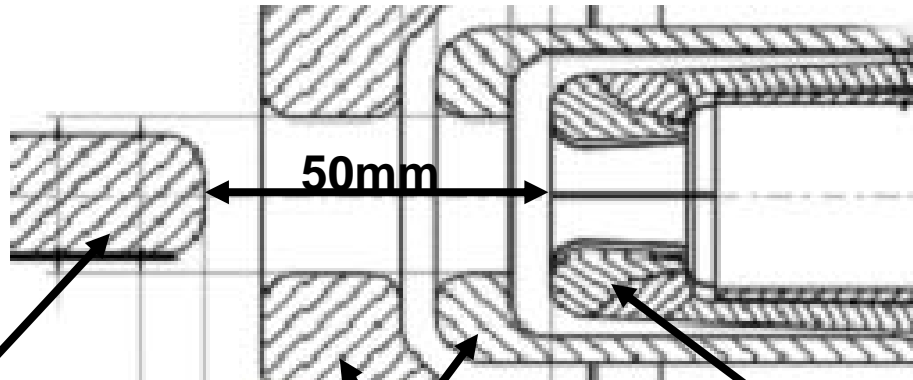


L'arc électrique dans un disjoncteur

*1. Séparation des contacts : **disjoncteur H.T***

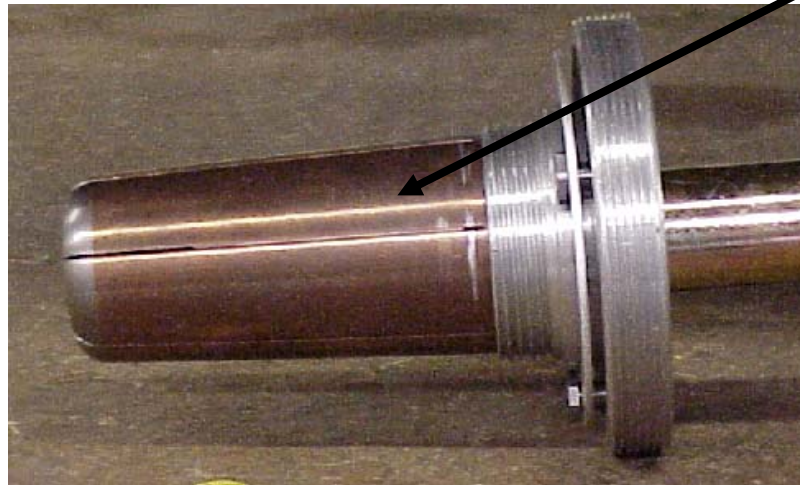


Plug:
 $\varnothing=19\text{m}$
m



Nozzle

Tulip



L'arc électrique dans un disjoncteur

*1. Séparation des contacts : **exemples***

VIDEO 1



VIDEO 2



L'arc électrique dans un disjoncteur

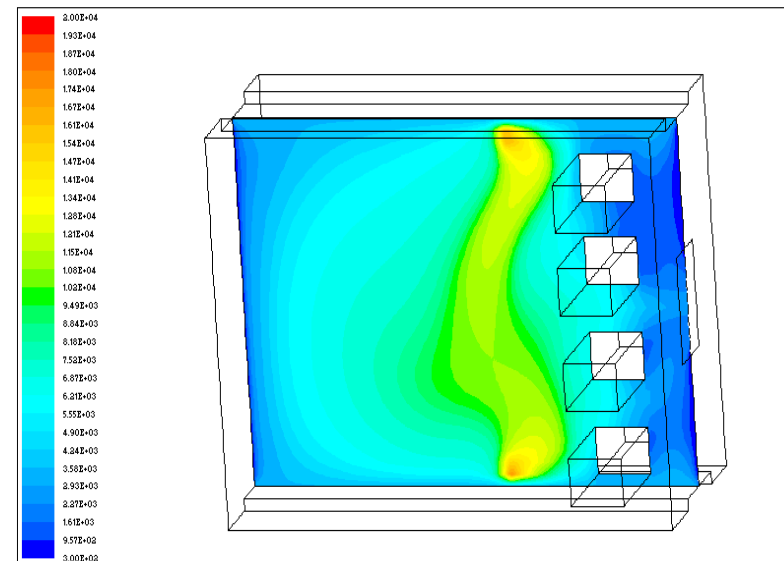
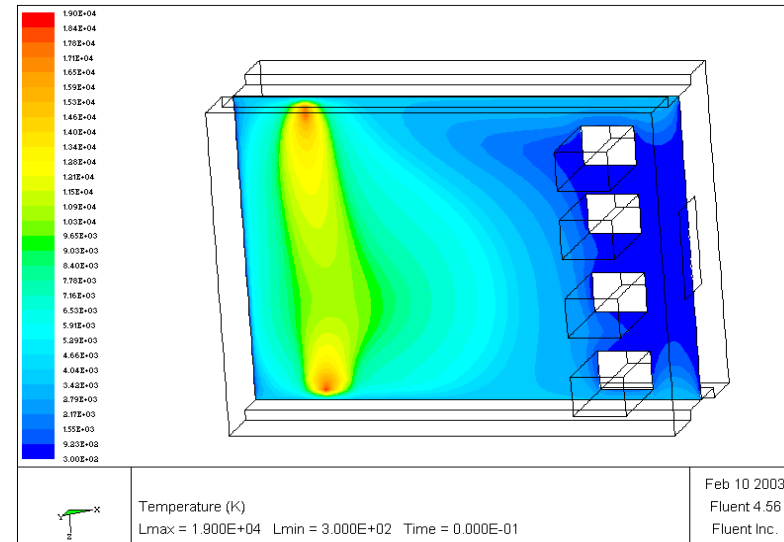
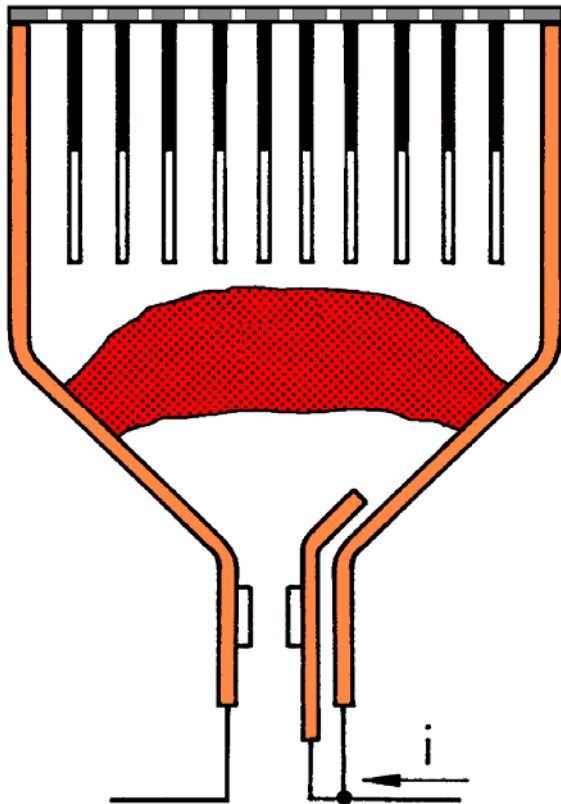
*1. Séparation des contacts : **exemples***

VIDEO 3



L'arc électrique dans un disjoncteur

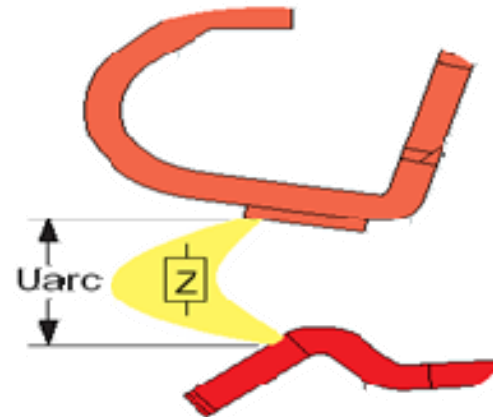
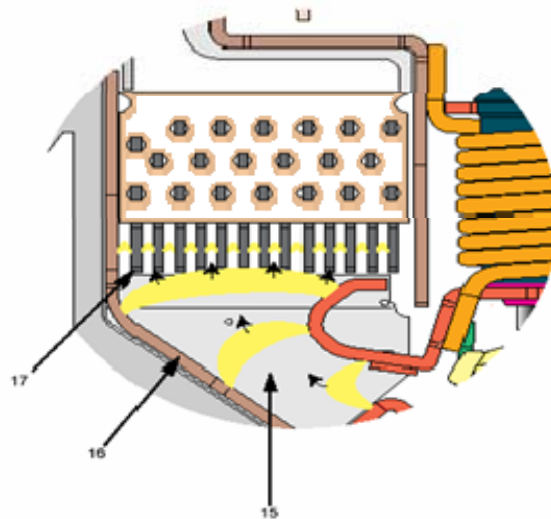
2. Déplacement de l'arc



L'arc électrique dans un disjoncteur

2. Déplacement de l'arc

Dès la séparation des contacts, *l'arc est déplacé* vers la chambre de coupure sous l'effet de la force dite de Laplace, induite par la géométrie des contacts. Au cours du trajet entre les contacts et la *préchambre*, *l'arc est canalisé* entre deux joues (15) qui permettent d'augmenter sa vitesse de déplacement, de guider sa trajectoire et de l'allonger. De par leur constitution et du fait de l'augmentation de température, les joues latérales libèrent un gaz qui contribue à la déionisation de l'air (17). Puis, se dirigeant vers *la chambre de coupure*, l'arc pénètre dans les déions (languettes d'acier cuivré) qui le *divise en plusieurs arcs* élémentaires.



L'arc peut être assimilé à une impédance qui s'ajoute à celle du disjoncteur et qui a pour effet :

- d'une part de limiter la valeur du courant de court-circuit
- d'autre part de générer une différence de potentiel appelée « tension d'arc » (U_{arc}) entre ses bornes

L'arc électrique dans un disjoncteur

2. Déplacement de l'arc : la préchambre

➤ **Situation :** cette zone est constituée par le volume qui sépare la zone de séparation des contacts et le début des séparateurs composant la chambre de coupure. Son aménagement est souvent nécessaire, voire indispensable.

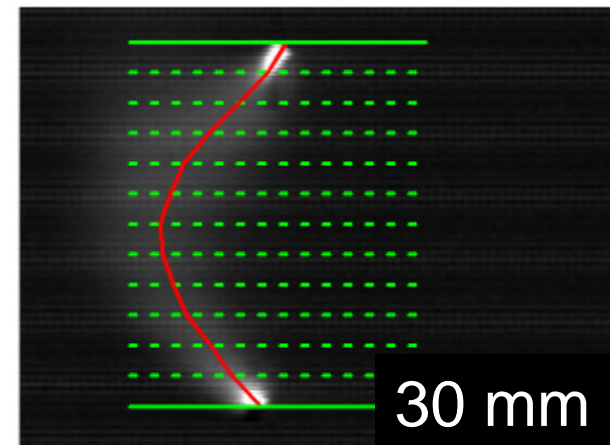
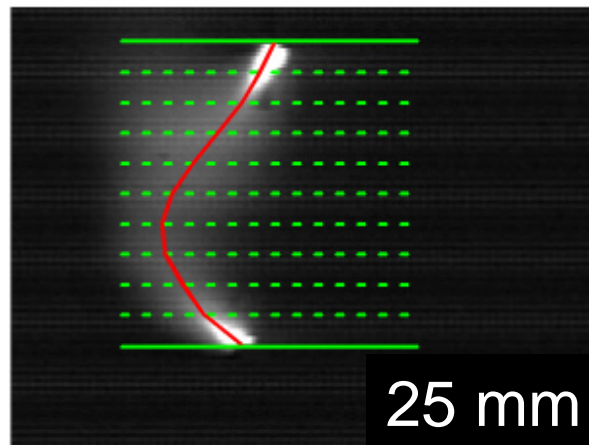
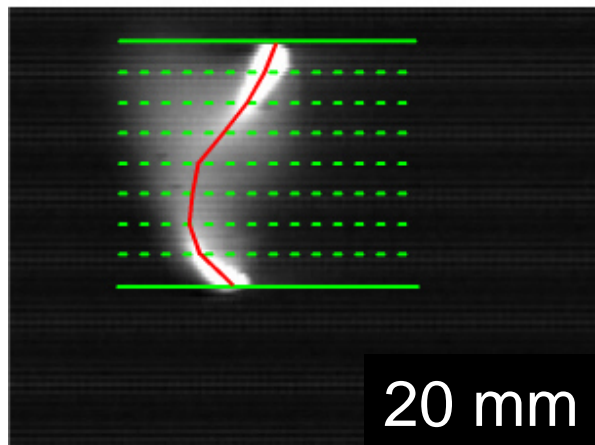
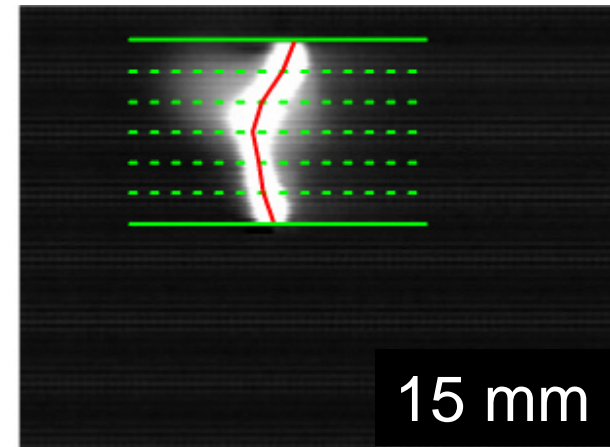
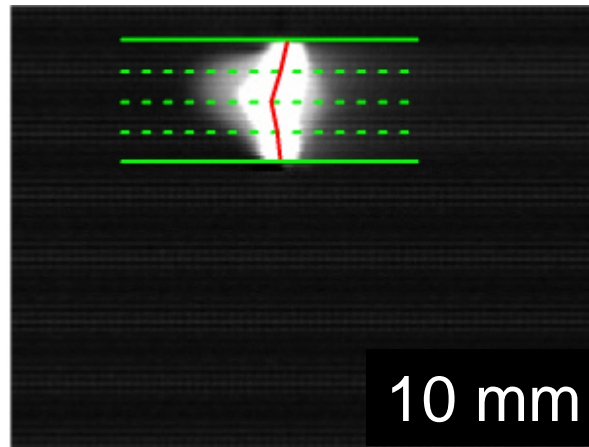
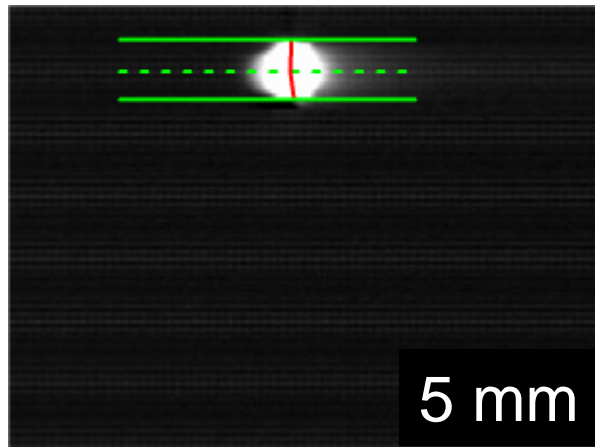
➤ **But :**

- *éviter la stagnation de l'arc sur les contacts* (érosion et points chauds); la pare-étincelles « inférieur » y contribue en assurant le déplacement du pied d'arc des contacts fixes vers le dessous des séparateurs de la chambre
- *favoriser un allongement de l'arc* plus rapide et plus grand que celui provoqué par la seule ouverture mécanique des contacts.
- *accentuer les effets magnétiques* déjà évoqués pour la répulsion du contact mobile en agissant sur le courant d'arc. En plus d'un « soufflage magnétique », un réel soufflage aérodynamique apparaîtra si l'énergie de l'arc naissant vaporise ou sublime des matériaux isolants gazogènes.
- *maintenir ou accentuer la pression* (inévitables lors de la coupure de forts courants en milieu confiné) pour favoriser l'évolution de la tension d'arc. La section droite de la colonne d'arc s'en trouve réduite et sa résistance augmentée, les différences de pressions entre cette zone (surpression due à l'arc) et l'arrière de la chambre de coupure (pression atmosphérique) favoriseront son entrée et son maintien dans la chambre.

L'arc électrique dans un disjoncteur

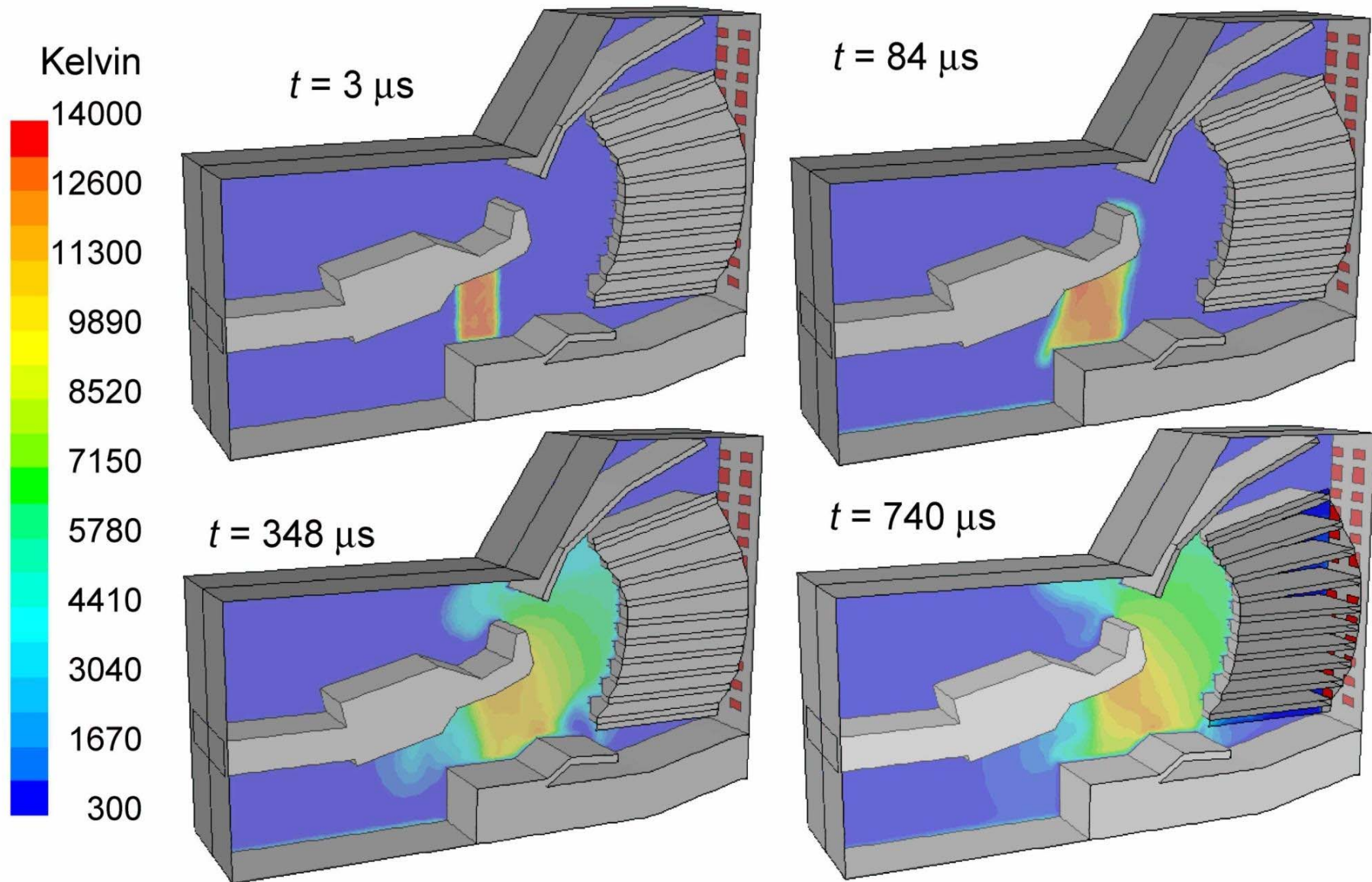
2. Déplacement de l'arc

Vitesse : 0.6
Courant : 110 A



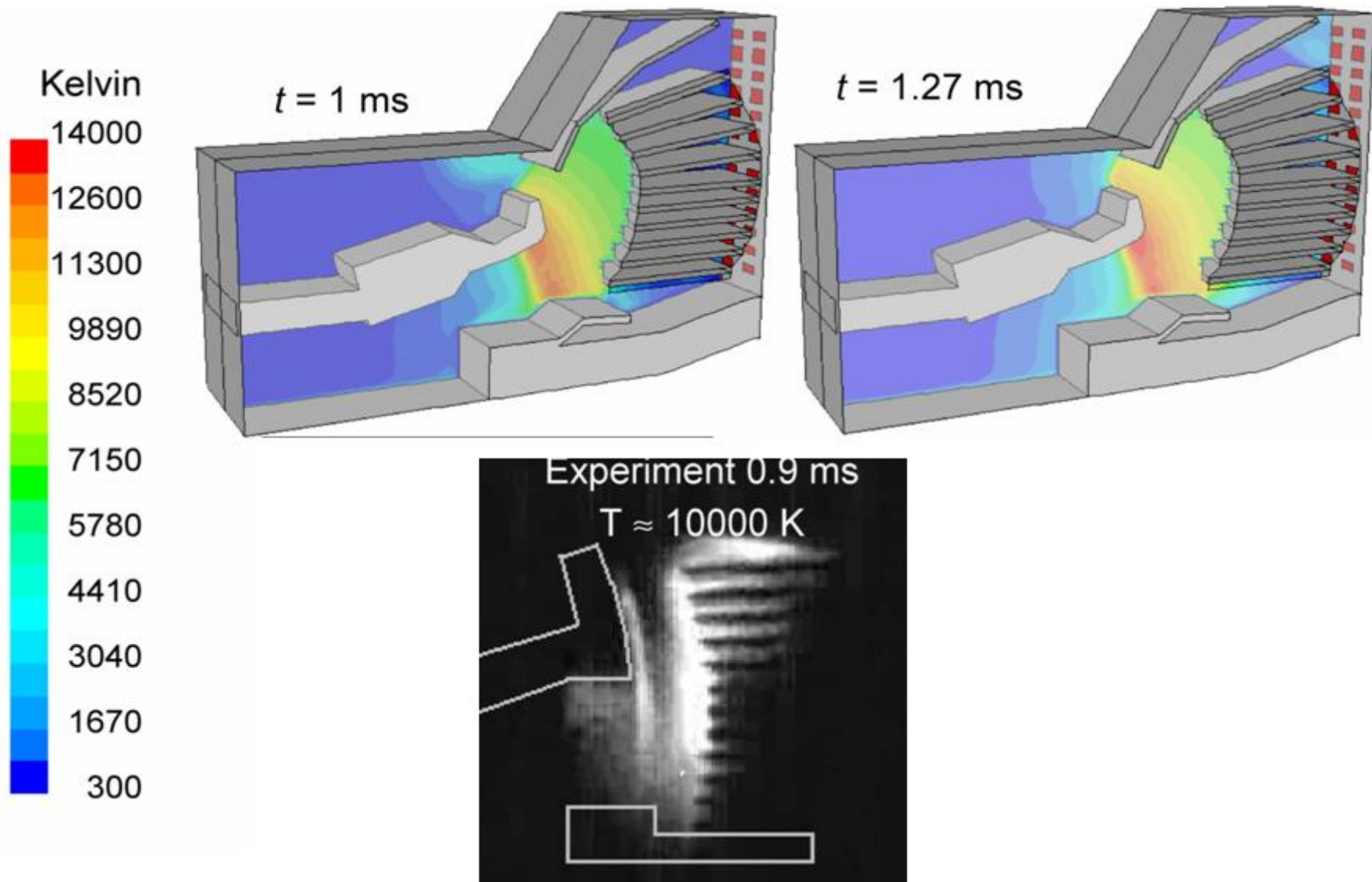
L'arc électrique dans un disjoncteur

2. Déplacement de l'arc



L'arc électrique dans un disjoncteur

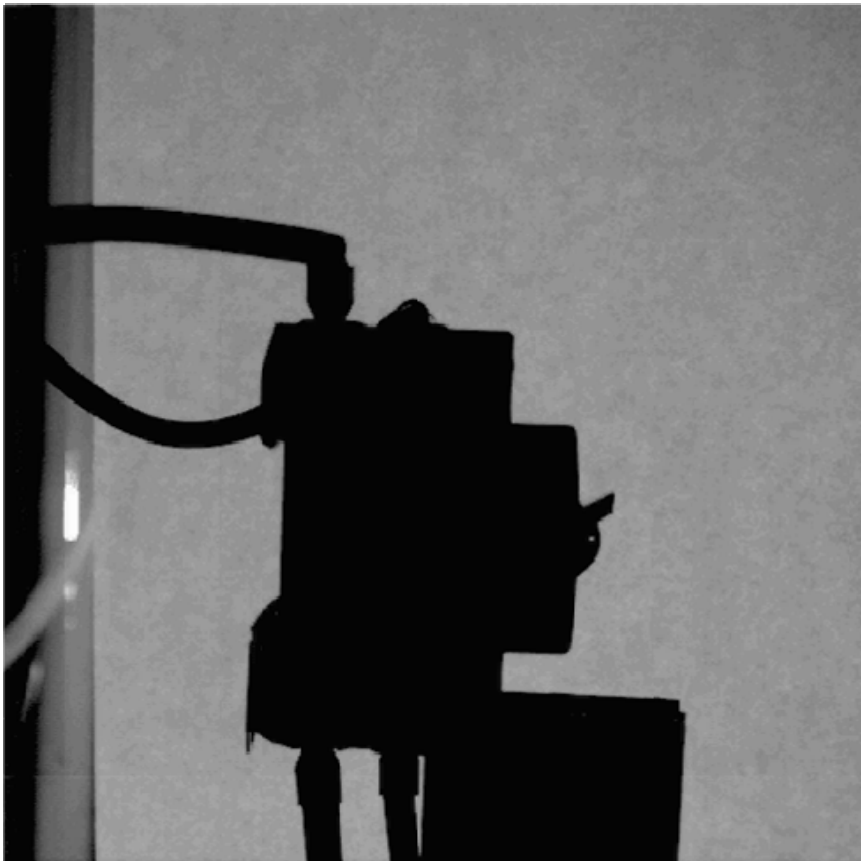
2. Déplacement de l'arc



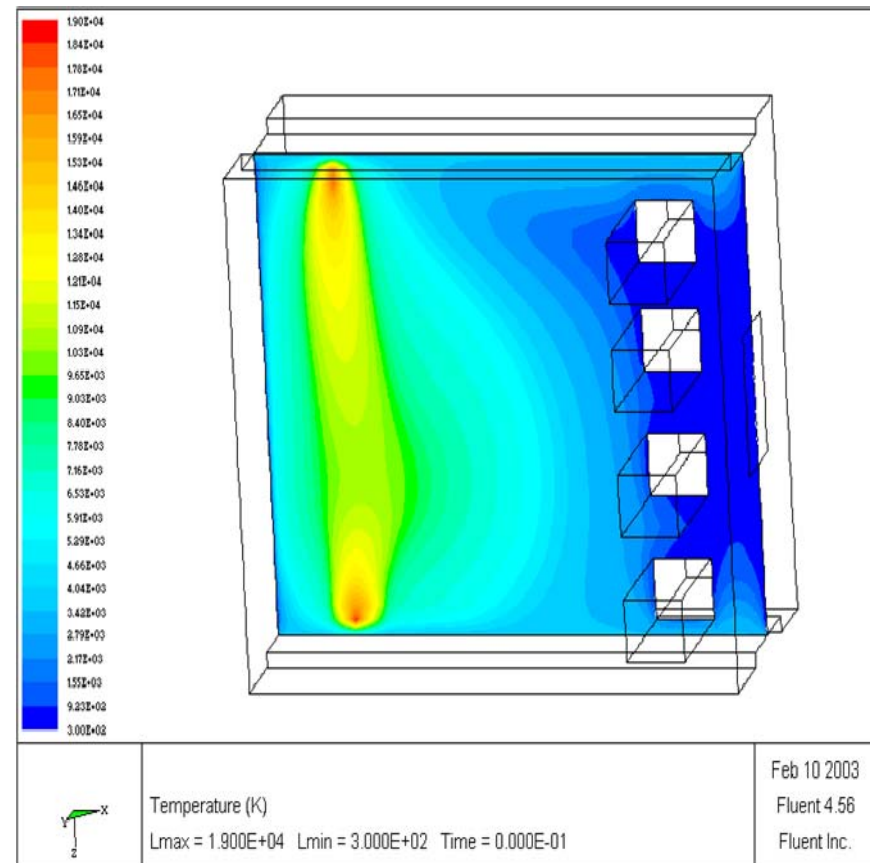
L'arc électrique dans un disjoncteur

*2. Déplacement de l'arc : **exemples***

VIDEO 1

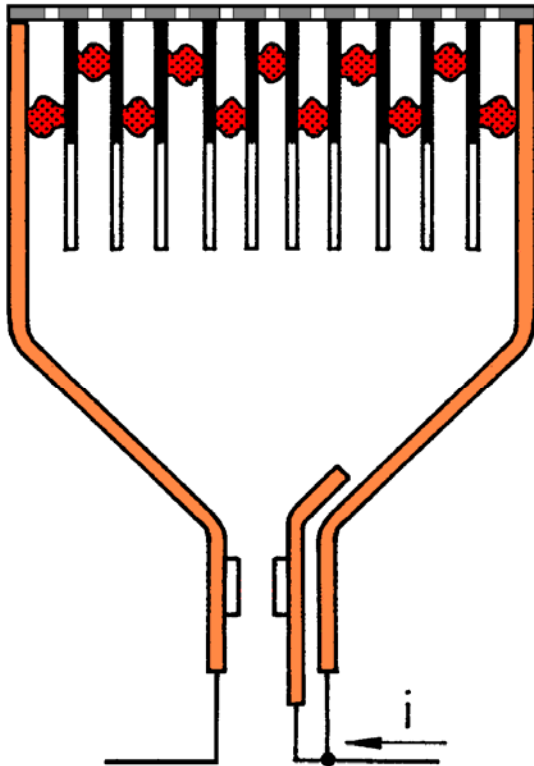


VIDEO 2



L'arc électrique dans un disjoncteur

3. La coupure de l'arc



Le processus de coupure avec un arc électrique s'effectue en trois périodes

- *la période d'attente*

(période entre l'ouverture des contacts et le zéro du courant)

- *la période d'extinction*

(passage par zéro du courant)

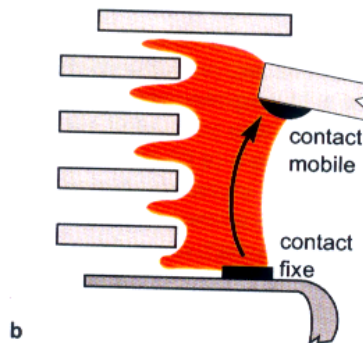
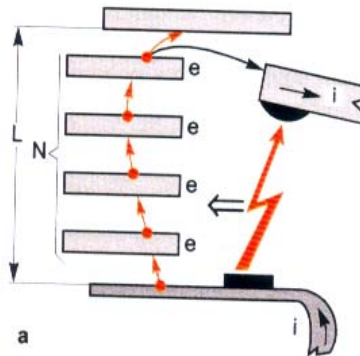
- *la période post-arc*

(période de régénération diélectrique)

L'arc électrique dans un disjoncteur

3. La coupure de l'arc : les chambres de coupure

➤ **But :** Le rôle de la chambre de coupure est d'*attirer et d'éteindre l'arc* lors d'un court-circuit qui se développe entre les contacts pendant la coupure. Cette zone doit *maintenir la tension d'arc* à une valeur convenable tout en *absorbant l'énergie développée* par l'arc qui peut être phénoménale : si $U_a=500V$ et $i=100000A$ pendant 2ms, alors $P_a=5MW$ et $W_a=10kJ$. Elle doit également satisfaire :



- à des conditions de régénération diélectrique suffisante pour *assurer une coupure définitive du courant*, malgré la tension du réseau. Les phénomènes physiques ne sont plus essentiellement électriques : la thermique, l'aérodynamique, le rayonnement jouent un rôle dans les bilans d'énergie de chaque instant.

- *au fractionnement de l'arc* en autant d'arcs élémentaires qu'il y a d'intervalles. Dans ce cas, nous avons $U_a = N \cdot U_{ac} + (L - Ne)U_L$ (U_{ac} tension d'arc minimale due au phénomène anode/cathode et qui provoque allongement de l'arc). *Elle emmagasine l'énergie produite* sous forts courants dans la colonne plasma (par échauffement ou liquéfaction). Néanmoins, il existe une limite supérieure en intensité au-delà de laquelle, l'arc reste en avant des séparateurs tout en ayant des échanges thermiques très importants avec ceux-ci.

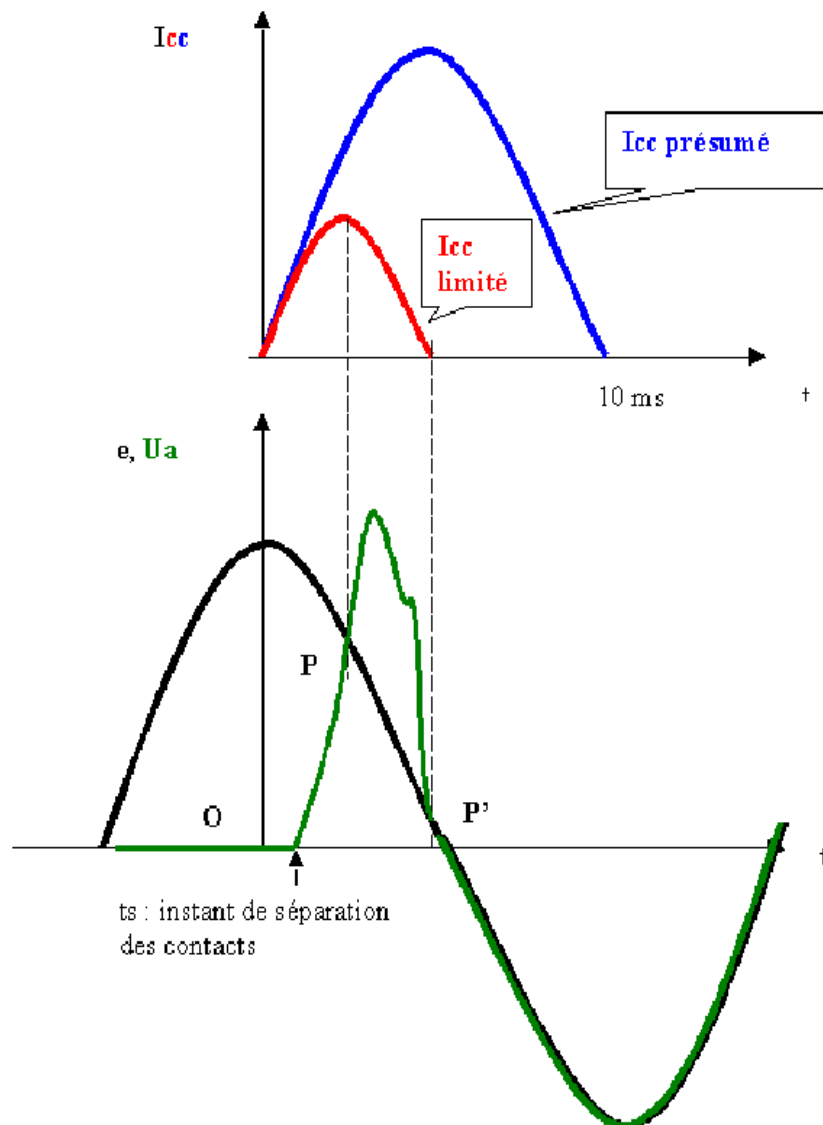
L'arc électrique dans un disjoncteur

La coupure

Pour les disjoncteurs à haute tension, le principe de coupure retenu est la ***coupure du courant lorsqu'il passe par zéro*** (ceci se produit toutes les dix millisecondes dans le cas d'un courant alternatif à 50 Hz). En effet, c'est à cet instant que la ***puissance*** qui est ***fournie*** à l'arc par le réseau est ***minimale*** (cette puissance fournie est même nulle à l'instant où la valeur instantanée du courant est nulle), on peut donc espérer, ***moyennant un soufflage suffisant***, mettre à profit cet intervalle de temps pendant lequel le courant est de faible intensité pour ***refroidir*** suffisamment ***l'arc*** afin que sa température diminue et que l'espace entre les contacts redevienne ***isolant***.

L'arc électrique dans un disjoncteur

La période d'attente : la tension d'arc



A l'ouverture du disjoncteur sur court-circuit, la loi qui régit l'évolution du courant I_{cc} est :

$$e - U_a = R \cdot I_{cc} + L \cdot \frac{dI_{cc}}{dt} \approx L \cdot \frac{dI_{cc}}{dt}$$

Le dispositif de protection insère ainsi très rapidement une chute tension U_a qui joue le rôle de fcm s'opposant à la croissance du courant de court-circuit présumé I_{cc} . On obtient en conséquence un « effet limiteur » du courant de court-circuit, effet d'autant plus efficace que U_a est élevée. Au point P, $e = U_a$ soit $dI/dt = 0$ (I_{cc} est maximum). Au point P', la coupure est effective, mais il peut y avoir un **rétablissement transitoire de la tension**.

La tension d'arc dépend de 3 paramètres :

- le nombre de subdivisions de l'arc électrique dans la chambre afin de multiplier les chutes de tension
- la longueur de l'arc
- le degré d'ionisation du milieu à proximité de l'arc

L'arc électrique dans un disjoncteur

La période post-arc : *régénération diélectrique*



Pour que la coupure soit réussie, il ne suffit pas que le courant devienne nul. Il faut que le milieu jusque là ionisé se régénère diélectriquement pour résister à la tension réseau. La vitesse de régénération diélectrique doit donc être plus rapide que celle de la tension transitoire de rétablissement TTR sinon un claquage diélectrique apparaît (ré-allumage ou réamorçage de l'arc).

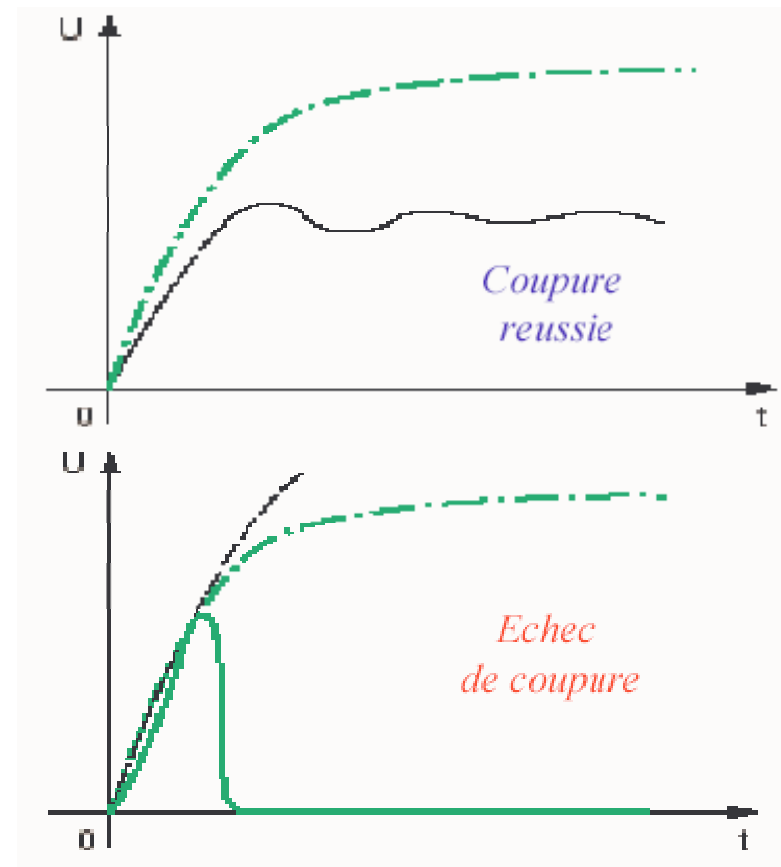
Coupure réussie

$TTR < U_{\text{régénération}}$

Echec de coupure réussie

$TTR > U_{\text{régénération}}$

- Tension de rétablissement
- - - Courbe de régénération diélectrique
- Tension de rétablissement si l'appareil n'avait pas réamorcé
- Tension de rétablissement avec réamorçage



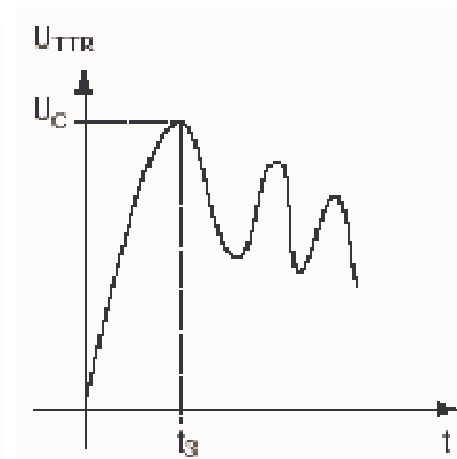
L'arc électrique dans un disjoncteur

*La période post-arc : **tension transitoire de rétablissement***

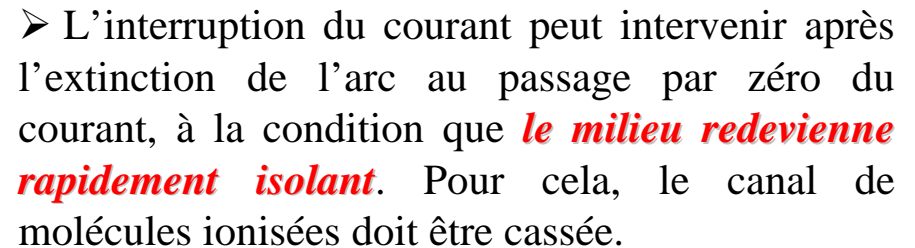
La vitesse de croissance de la TTR a un rôle fondamental sur les capacités de coupure des appareils. La norme impose pour chaque tension nominale une valeur enveloppe qui correspond aux besoins normalement rencontrés.

Le pouvoir de coupure PdC d'un disjoncteur correspond à la valeur la plus élevée du courant qu'il peut couper à sa tension assignée et la TTR assignée correspondante. Un disjoncteur doit donc être capable de couper tout courant inférieur à son PdC pour toute TTR dont la valeur est inférieure à la TTR assignée.

Tension assignée (U_r en kV)	7,2	12	17,5	24	36	52
Valeur crête de la TTR (U_C en kV)	12,3	20,6	30	41	62	89
Temps t_3 (en μs)	52	60	72	88	108	132
Vitesse d'accroissement (U_C / t_3)	0,24	0,34	0,42	0,47	0,57	0,68



Conditions nécessaires pour une **coupure réussie**



➤ Si la puissance dissipée par effet joule dépasse la puissance de refroidissement caractéristique de l'appareil, le milieu ne refroidit plus. Il y a emballement thermique qui provoque une nouvelle rupture diélectrique et l'apparition d'un arc. Il n'y a pas de coupure de courant.

L'arc électrique dans un disjoncteur

*Conditions nécessaires pour une **coupure réussie***



Tout le problème de coupure d'un courant alternatif va résider dans la vitesse avec laquelle l'arc se désionise et perd sa conductance au voisinage du zéro du courant pour devenir rapidement isolant.

IL FAUT :

- un milieu avec une **conductivité thermique** importante en particulier dans la phase d'extinction pour évacuer l'énergie thermique de l'arc (conductivité thermique)
- un milieu qui retrouve ses **propriétés diélectriques** le plus vite possible afin d'éviter un réamorçage intempestif
- A température élevée, un milieu qui soit **un bon conducteur électrique** pour réduire la résistivité de l'arc et dissiper son énergie emmagasinée (conductivité électrique)
- A température faible, un milieu qui soit **un bon isolant électrique** pour faciliter le rétablissement de la tension.

L'arc électrique dans un disjoncteur

*Conditions nécessaires pour une **coupure réussie***

PLUS PRECISEMENT :

➤ ***éviter que la TTR ne dépasse la caractéristique de régénération.***

Cela signifie qu'il faut une vitesse de régénération beaucoup plus rapide que celle de la TTR pour résister à la tension réseau encore présente (sinon réamorçage de l'arc). Si la TTR coupe la courbe de régénération, il peut s'en suivre l'apparition d'un courant postarc. Si ce courant dépasse une valeur critique sous une tension critique, il s'en suivra un redémarrage du courant d'arc et il faudra attendre le prochain passage par zéro du courant à couper.

➤ ***avoir une tension d'arc élevée.***

La coupure se fera si cette tension est plus importante que la tension réseau au moment du passage par zéro du courant.

➤ ***éviter les échauffements thermiques.***

Si le courant d'arc vient se stabiliser contre une paroi isolante, sa surface d'échange thermique diminue et les composants de l'isolant s'échauffent et peuvent favoriser l'entretien de l'arc par conduction (conductivité électrique et thermique). Il ne faut pas réchauffer trop le plasma car celui-ci devient meilleur conducteur. Les électrons libérés véhiculent le courant dans l'arc et entretiennent le mécanisme d'ionisation. La chute de tension dans l'arc permet d'apporter sous forme d'effet joule la puissance nécessaire à l'entretien de l'arc pour les hautes températures et contribue ainsi à l'équilibre des pertes par conduction, convection et rayonnement.

L'arc électrique dans un disjoncteur

*Conditions nécessaires pour une **coupure réussie***

COMMENT FAIRE ?

Cela dépend du milieu dans lequel s'établi l'arc.

- ***trouver des milieux à forte conduction électrique à haute température*** (capacité que possède le plasma pour conduire le courant). Cela permet de réduire à haute température la résistivité de l'arc et d'évacuer l'énergie thermique de l'arc. A basse température, cette conduction peut poser problème car elle peut faciliter le claquage.
- ***trouver des milieux à forte conduction thermique*** (capacité que possède le plasma pour conduire la chaleur). Cela permet de diminuer l'échauffement dans le milieu et/ou contacts. Plus elle est grande, plus le plasma aura tendance à se refroidir et l'arc avec.
- ***trouver des milieux qui rayonnent.*** Pertes énergétiques qui peuvent être considérées comme un avantage mais également comme un inconvénient. Au niveau des contacts, le rayonnement favorise l'érosion des électrodes/contacts et donc l'accrochage de l'arc (effet positif pour la création de l'arc mais également négatif quand il s'agit de réamorçage). Au sein du plasma, le rayonnement correspond à des pertes énergétiques et donc à un refroidissement du gaz (effet favorable).
- énergie, effets magnétiques, notion de température, effets de pression

L'arc électrique dans un disjoncteur

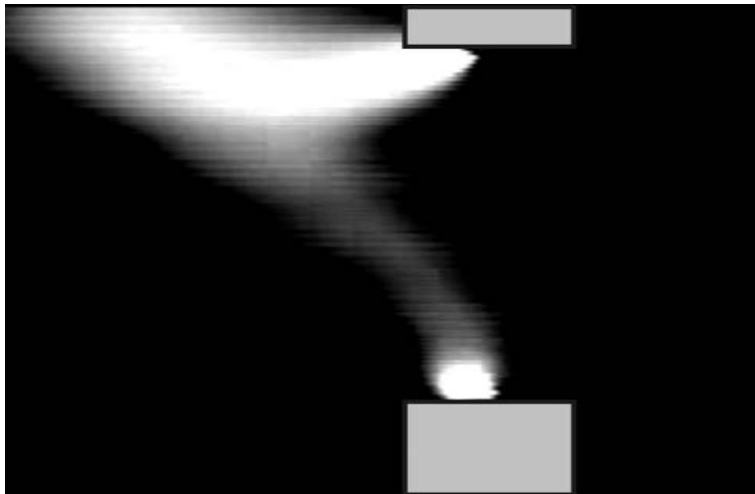
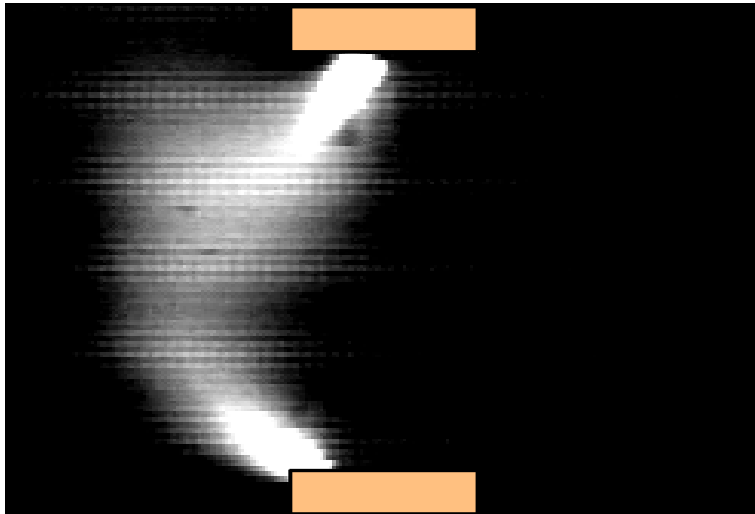
La coupure : différentes méthodes (BT, MT, HT)

	<i>Huile</i>	<i>Air</i>	<i>SF6 / Vide</i>
<i>Sécurité</i>	Risque d'explosion et d'incendie si l'augmentation de pression (manœuvres multiples) produit une défaillance	Manifestation extérieures importantes (émissions de gaz chauds et ionisés lors des coupures	Pas de risque d'explosion, ni de manifestations extérieures
<i>Encombrement</i>	Volume de l'appareil relativement important	Installation nécessitant de grandes distances. Coupure non confinée	Faible
<i>Entretien</i>	Remplacement périodique de l'huile (décomposition irréversible de l'huile à la coupure)	Remplacement des contacts d'arc si possible. Entretien périodique de la commande	Nul sur les éléments de coupure. Lubrification minimale des mécanismes de commande
<i>Sensibilité à l'environnement</i>	Le milieu de coupure peut être altéré par l'environnement (humidité, poussières...)		Non sensibles : ampoule de scellées à vie.
<i>Coupure en cycle rapide</i>	Le temps de diminution de pression, long, nécessite de déclasser le PdC s'il y a risque de coupures successives.	L'évacuation de l'air chaud très lente nécessite un déclassement du PdC	Le SF6 et le vide recouvrent très rapidement leurs propriétés diélectriques : pas de déclassement
<i>Endurance</i>	Médiocre	Moyenne	Excellente

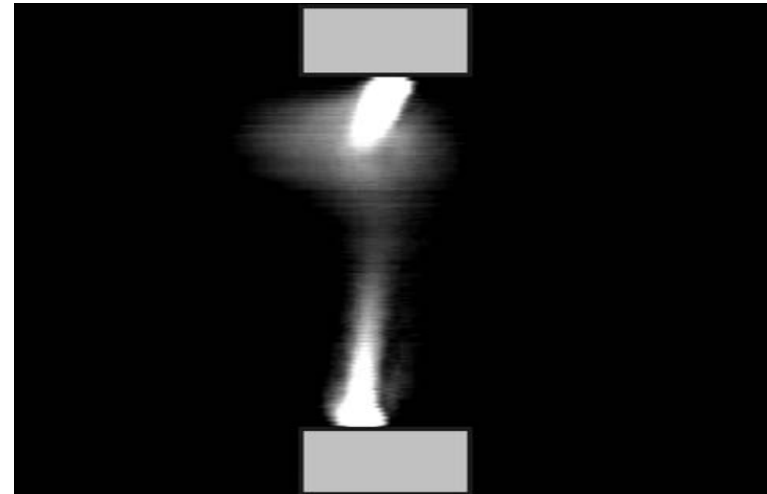
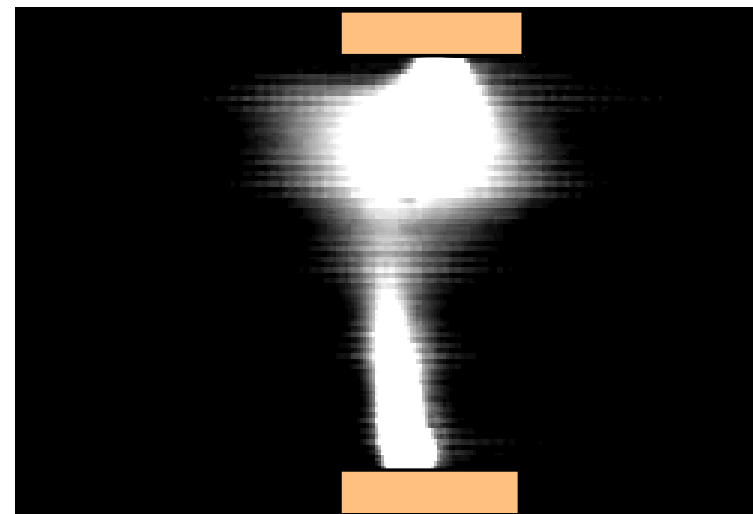
L'arc électrique dans un disjoncteur

La qualité de coupure

Coupure réussie



Echec de la coupure



Coupure réussie

VIDEO 1



VIDEO 2



L'arc électrique dans un disjoncteur

Coupure échouée



A RECUPERER



Comment trouver ? par la recherche !!!

- *Qu'étudie t'on dans les laboratoires ?*
- *Pourquoi étudier les phénomènes physiques présents ?*
- *Quels sont les moyens mis en œuvre pour améliorer la sécurité ?*

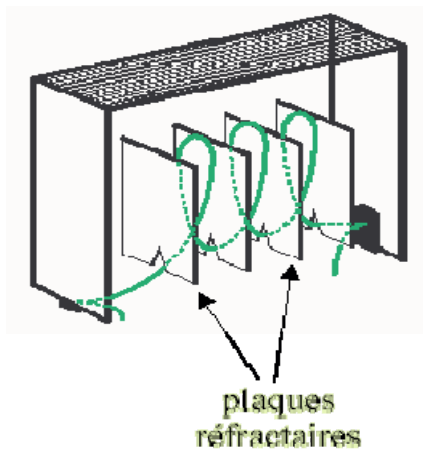
L'arc électrique dans un disjoncteur

Étude : le milieu de coupure

Avantages : En BT, la technique de coupure dans l'air à pression atmosphérique est utilisée universellement pour sa simplicité, son endurance, son absence de surtension et son effet limiteur :

- *rigidité électrique relativement faible*
- *constante de temps de désionisation élevée (10ms), limite le risque de surtension*
- *efficace pour la coupure jusqu'à des tensions voisines de 20kV.*

Besoins : on a besoin de dispositifs avec une puissance de refroidissement suffisante et une tension d'arc élevée après le passage à zéro du courant pour éviter l'emballement thermique. Il faut maintenir l'arc suffisamment court, tant que l'intensité est importante et l'allonger seulement à l'approche du zéro du courant. Pour des tensions supérieures, l'air comprimé est employé pour améliorer la tenue diélectrique et la vitesse de refroidissement et de désionisation. L'arc est alors refroidi par des systèmes de soufflage à haute pression (entre 20 et 40 bars).

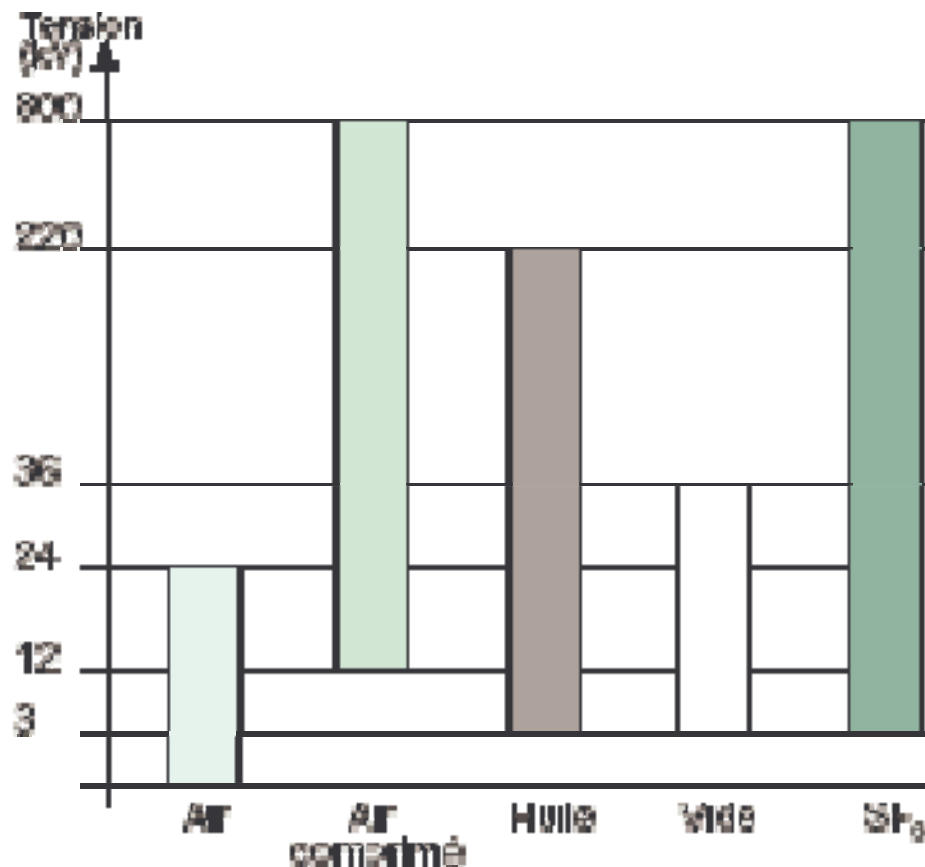


En conséquence, la dimension de **la chambre** est principalement définie par la puissance de court-circuit du réseau, **la longueur de l'arc** peut être très importante (plusieurs mètres sous 24kV, développement de l'arc sous la forme d'un solénoïde), les énergies de commande de quelques centaines de joules (compte tenu des vitesses requises pour l'ouverture des contacts, de quelques m/s). **L'arc doit s'étirer entre les plaques réfractaires de la chambre de coupure, s'allonger et se refroidir jusqu'à ce que sa tension d'arc devienne supérieure à celle du réseau et la coupure devient effective.**

L'arc électrique dans un disjoncteur

Étude : le milieu de coupure

Pour couper les courants de charge ou de défaut, on a développé des disjoncteurs et des contacteurs utilisant divers milieux de coupure : l'air à pression atmosphérique ou à haute pression, l'hydrogène produit par décomposition de l'huile, le vide ou le SF6.



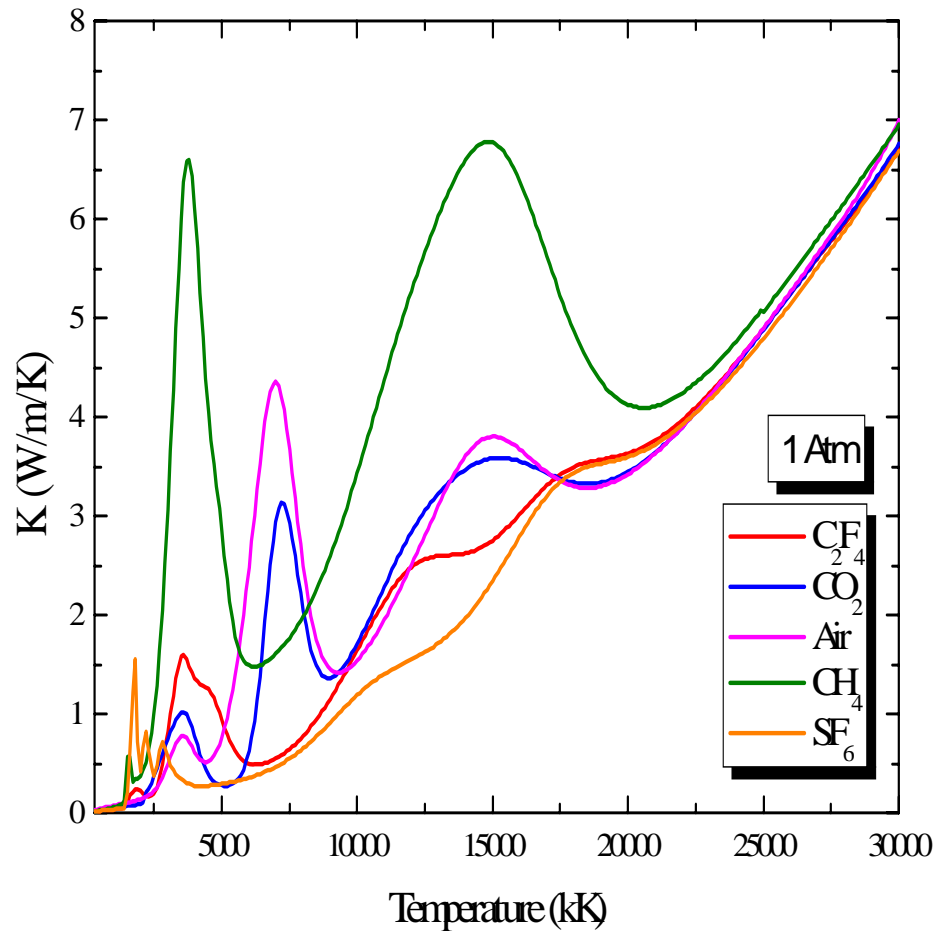
La coupure dans l'air ou l'huile a tendance à disparaître en moyenne tension

La coupure dans le vide ou le SF6 occupe maintenant une place dominante.

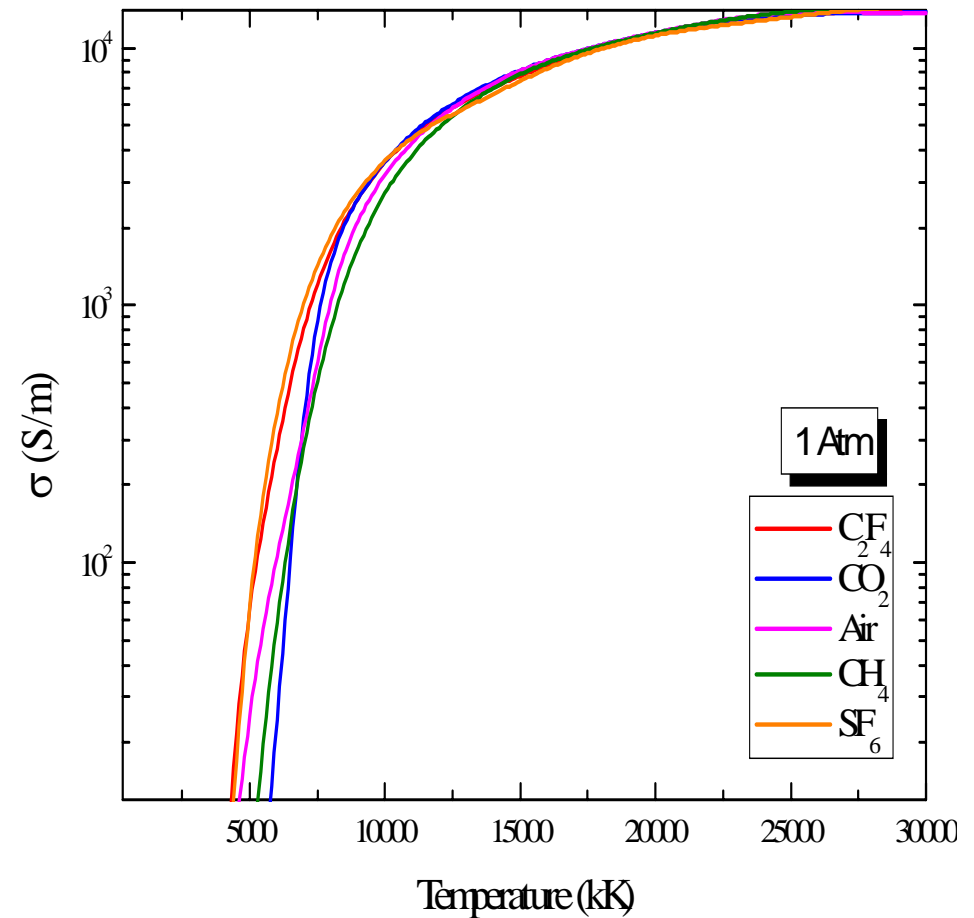
L'arc électrique dans un disjoncteur

Étude : les propriétés du milieu de coupure

conductivité thermique



conductivité électrique

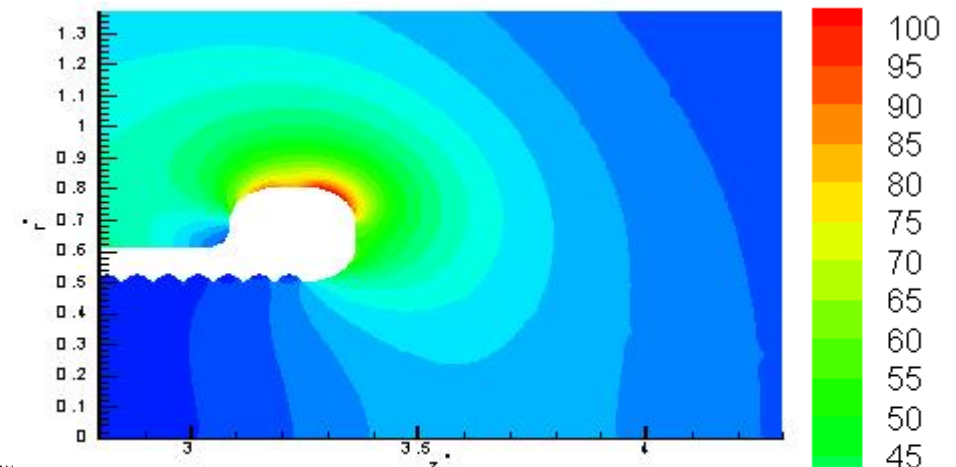


L'arc électrique dans un disjoncteur

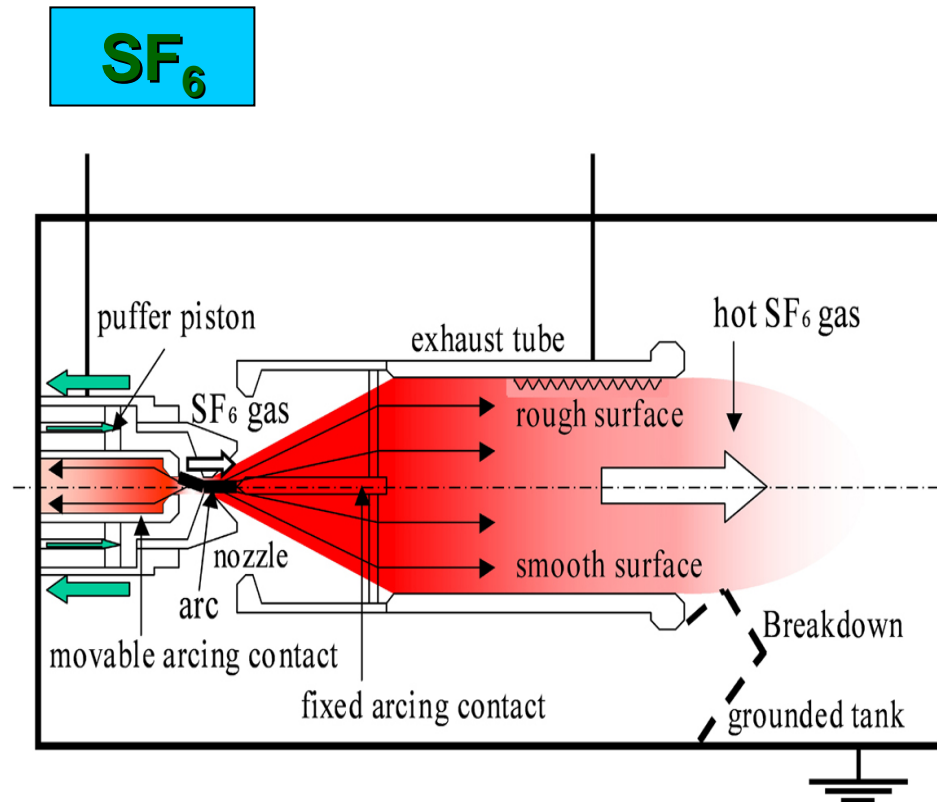
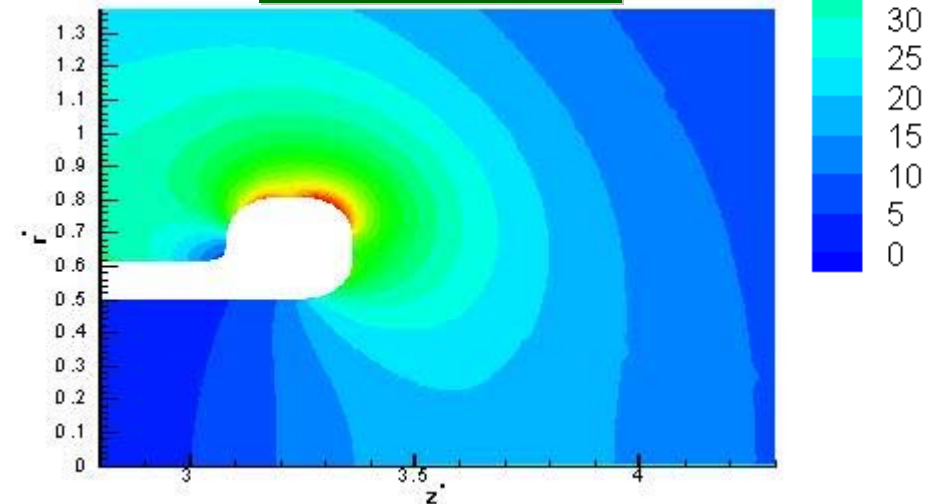
Étude : Phénomènes aux contacts (champ électrique)

E_{field} (kV/cm)

Rough Surface



Smooth Surface



L'arc électrique dans un disjoncteur

Étude : les phénomènes physiques

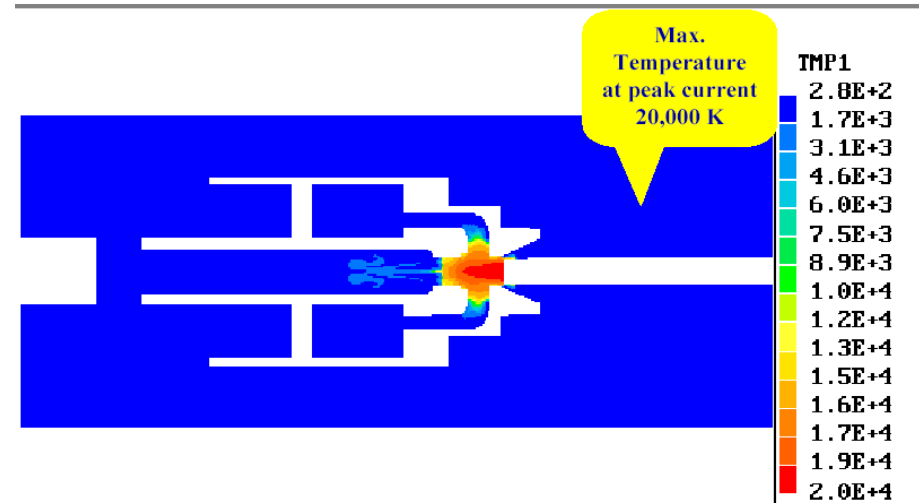
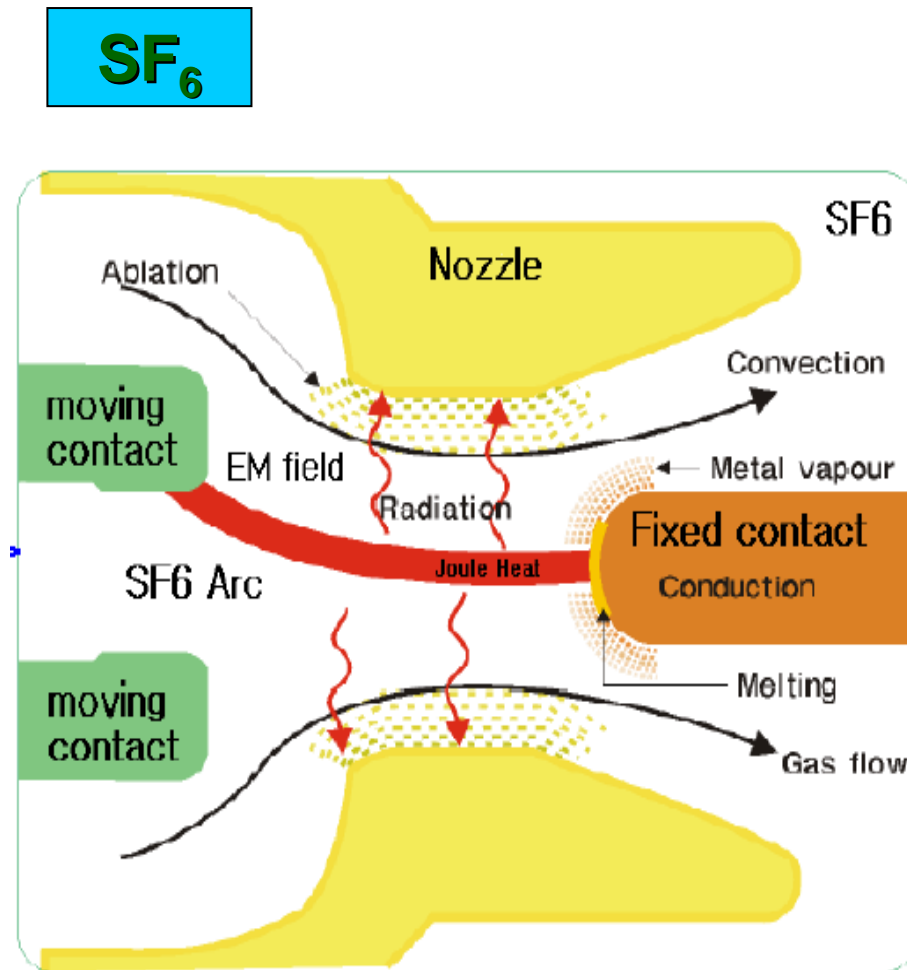


Fig. 2 Temperature distribution at peak current

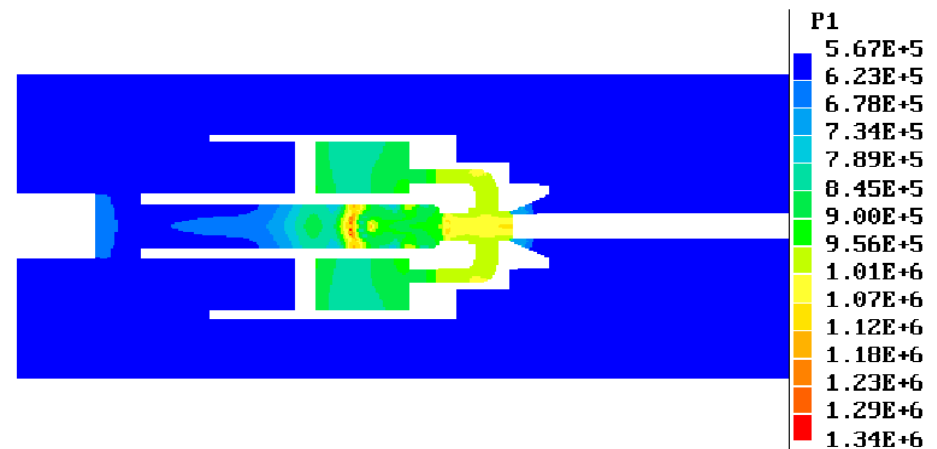


Fig. 3 Pressure distribution at peak current

L'arc électrique dans un disjoncteur

Étude : les phénomènes physiques

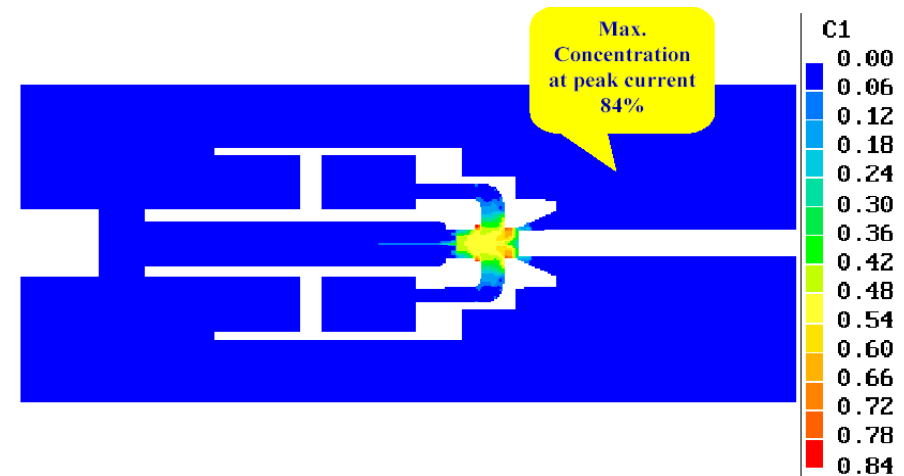
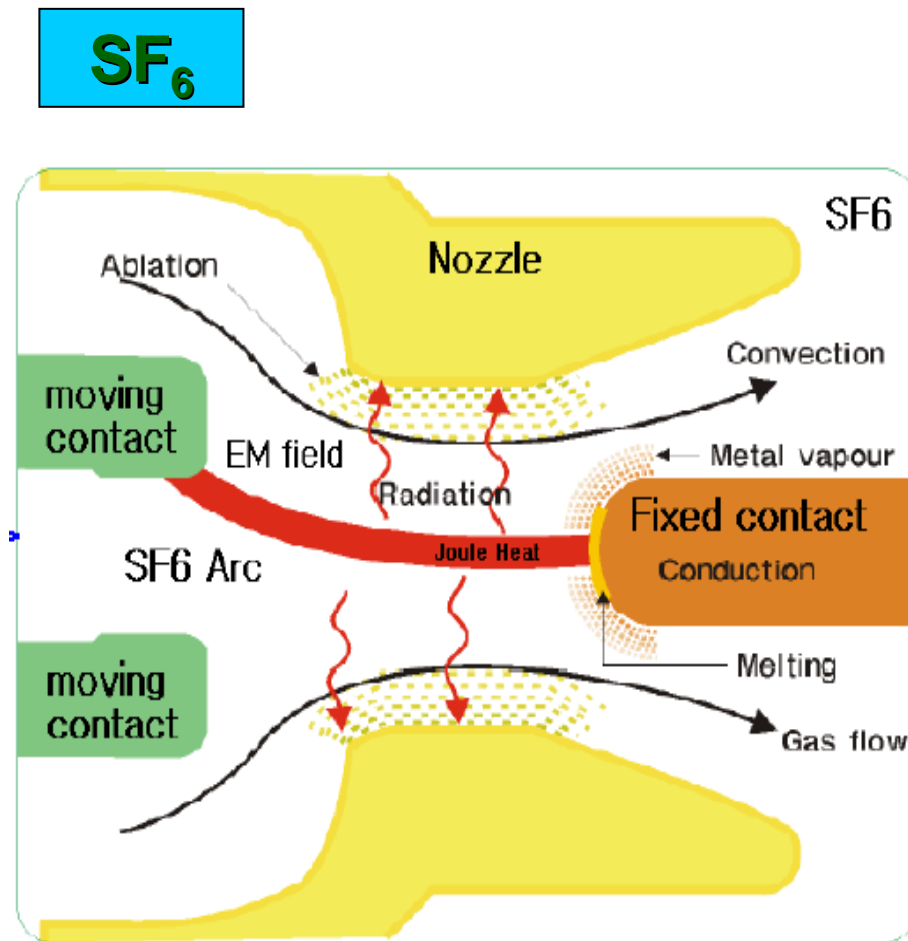


Fig. 4 Concentration distribution at peak current

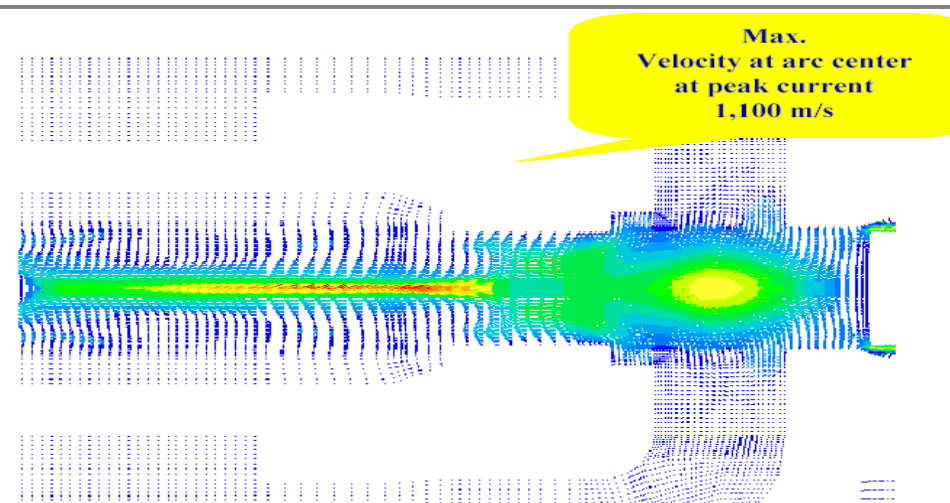
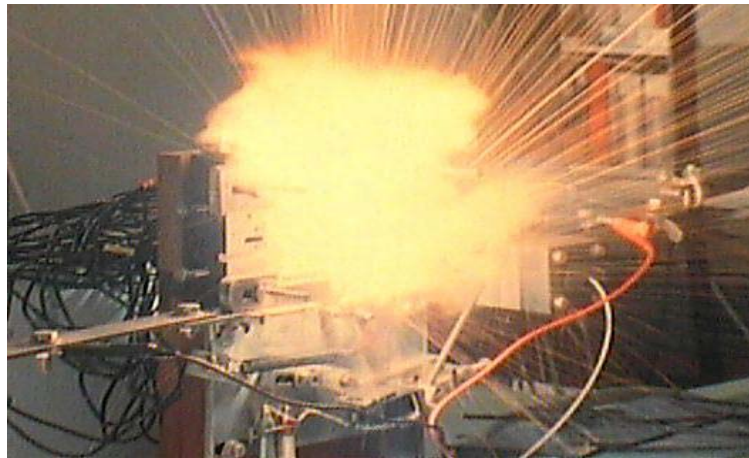


Fig. 5 Velocity vector distribution at peak current

L'arc électrique dans un disjoncteur

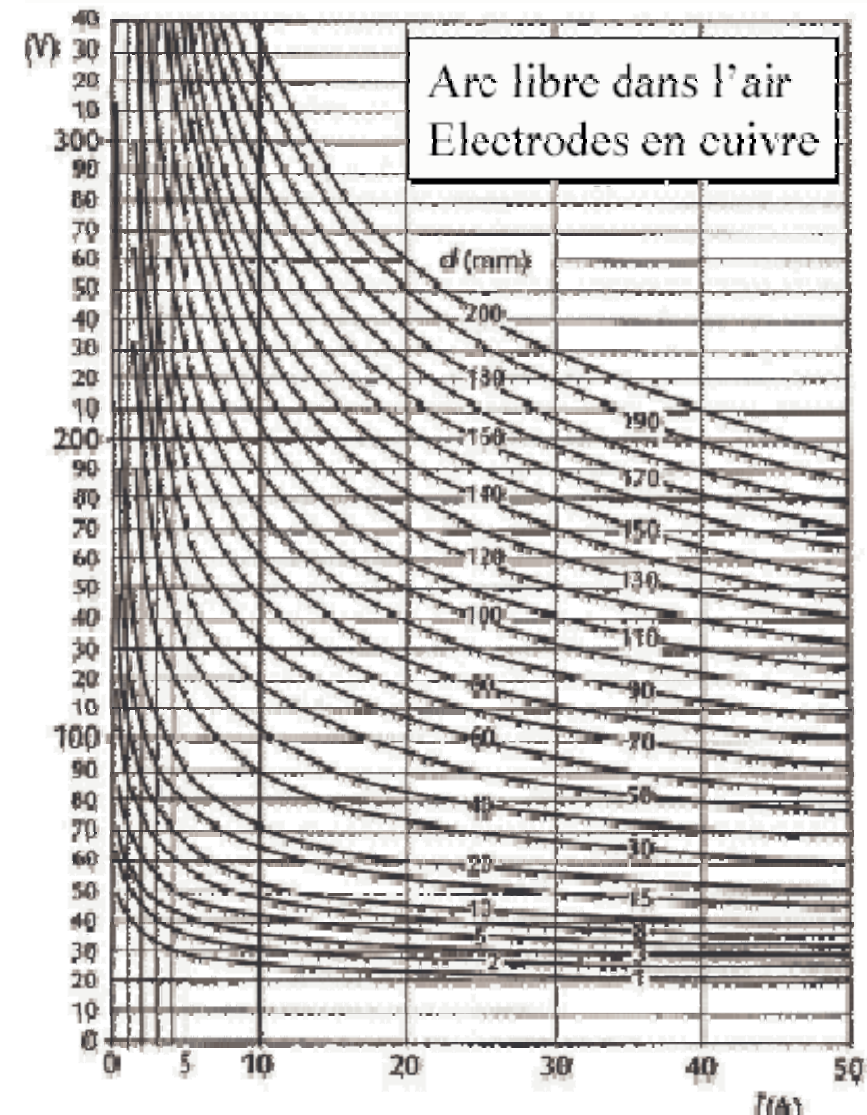
Étude : la tension – la distance inter-électrode



Tension d'arc U_A : $U_A = U_{AC} + E$

Tableau 4 - Exemples de valeurs de champ électrique pour une colonne d'arc assez longue (> 1 cm)

Milieu	Appareil	E (V/mm)
Air	arc libre	1
SF ₆	disjoncteurs HT	10
Corindon (poudre)	fusibles	10
Silice (poudre)	fusibles	25
Huile (soufflage transversal)	disjoncteurs MT	10
Huile (soufflage axial)	disjoncteurs MT	20



L'arc électrique dans un disjoncteur

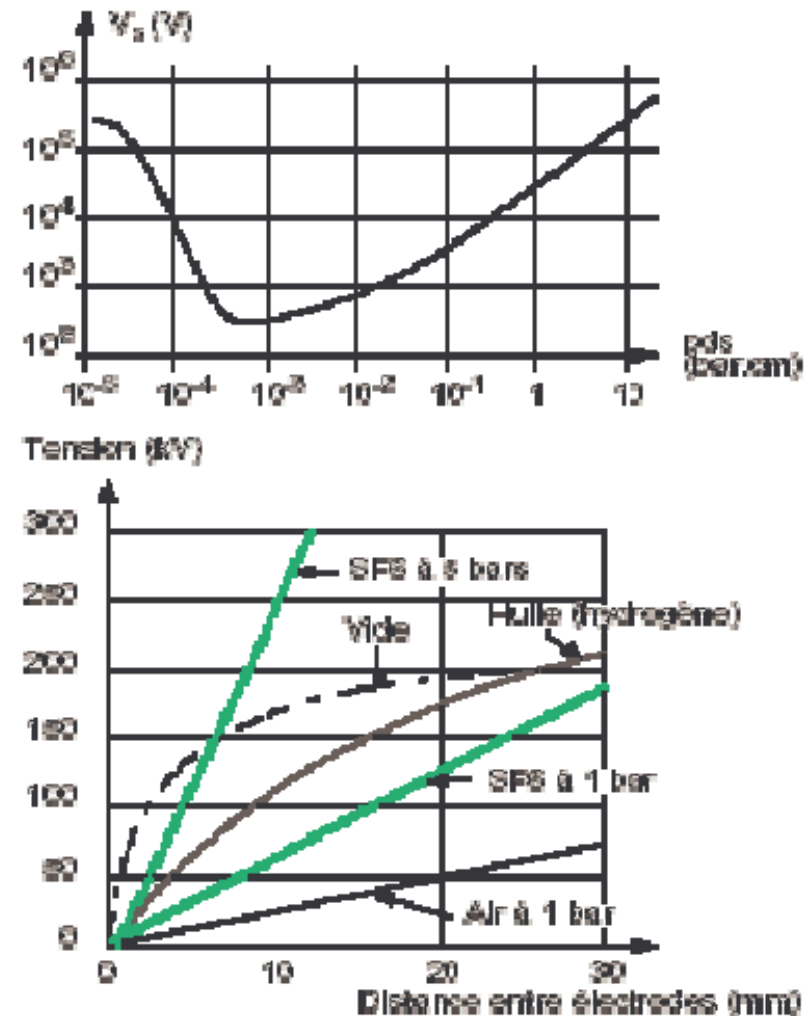
Étude : la tension – la distance inter-électrode

La qualité d'isolant se mesure par la tenue diélectrique entre les contacts qui dépend de la pression du gaz et de la distance entre les électrodes.

1 – **La zone à haute pression** dite de « régime atmosphérique » où la tenue diélectrique est proportionnelle à la pression de gaz et à la distance intercontacts.

2- **La zone à faible pression** où la tenue diélectrique atteint un vrai minimum entre 200 et 600V suivant le gaz utilisé (minimum de Paschen). Il est atteint pour une valeur déterminée du produit de la pression avec la distance intercontacts (\sim de 10^2 mbar.cm)

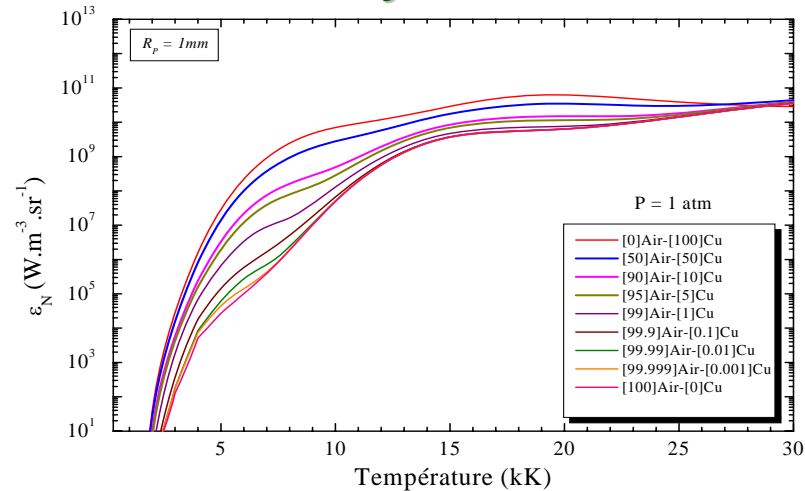
3 – **La zone du vide** où la tension de claquage ne dépend plus que de la distance entre les contacts et de l'état de leur surface.



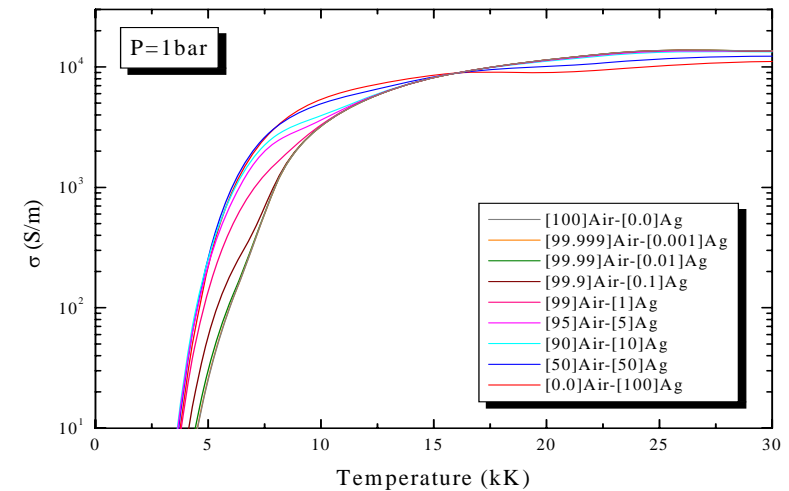
L'arc électrique dans un disjoncteur

Étude : Influence de l'érosion des métaux

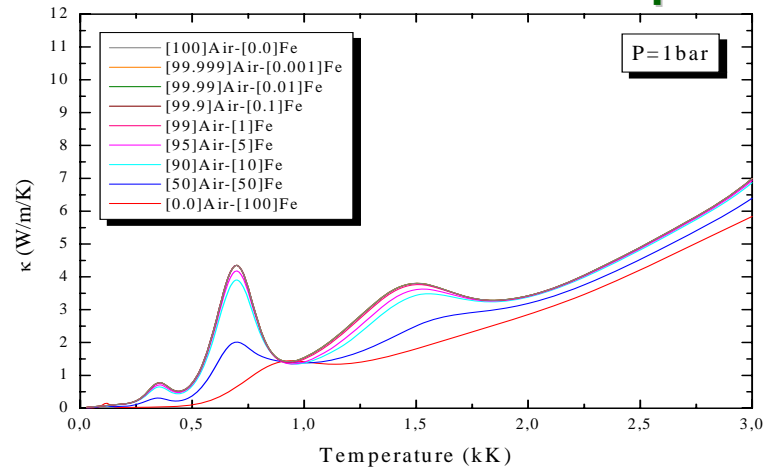
Sur le rayonnement



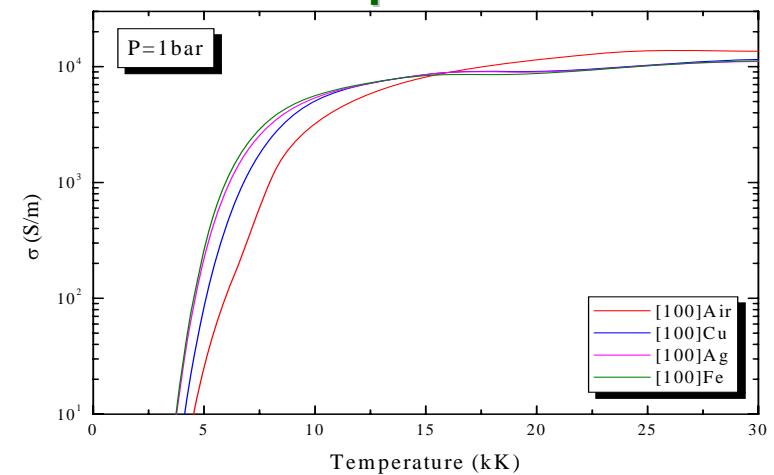
Sur la conductivité électrique

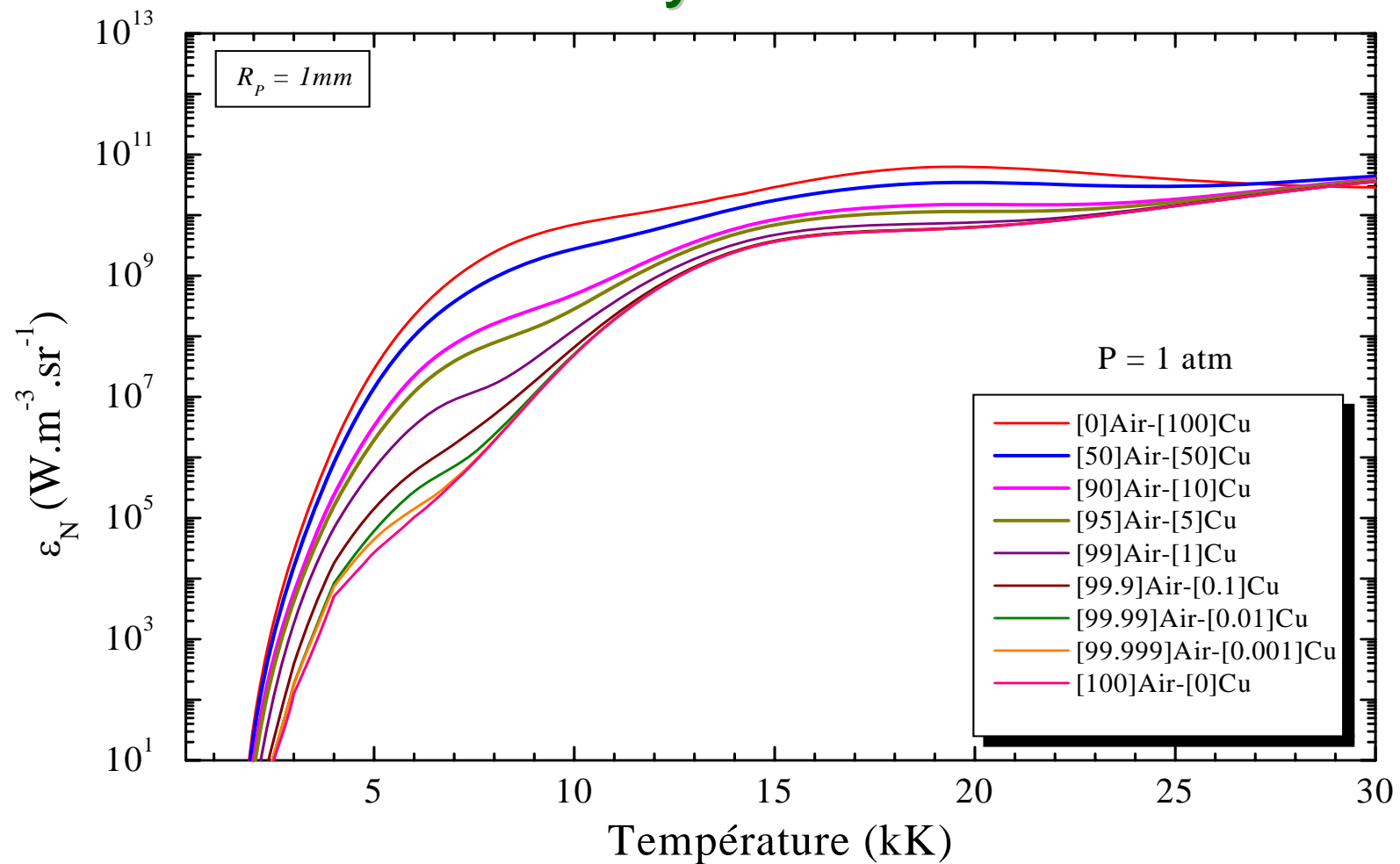


Sur la conductivité thermique



Comparaisons

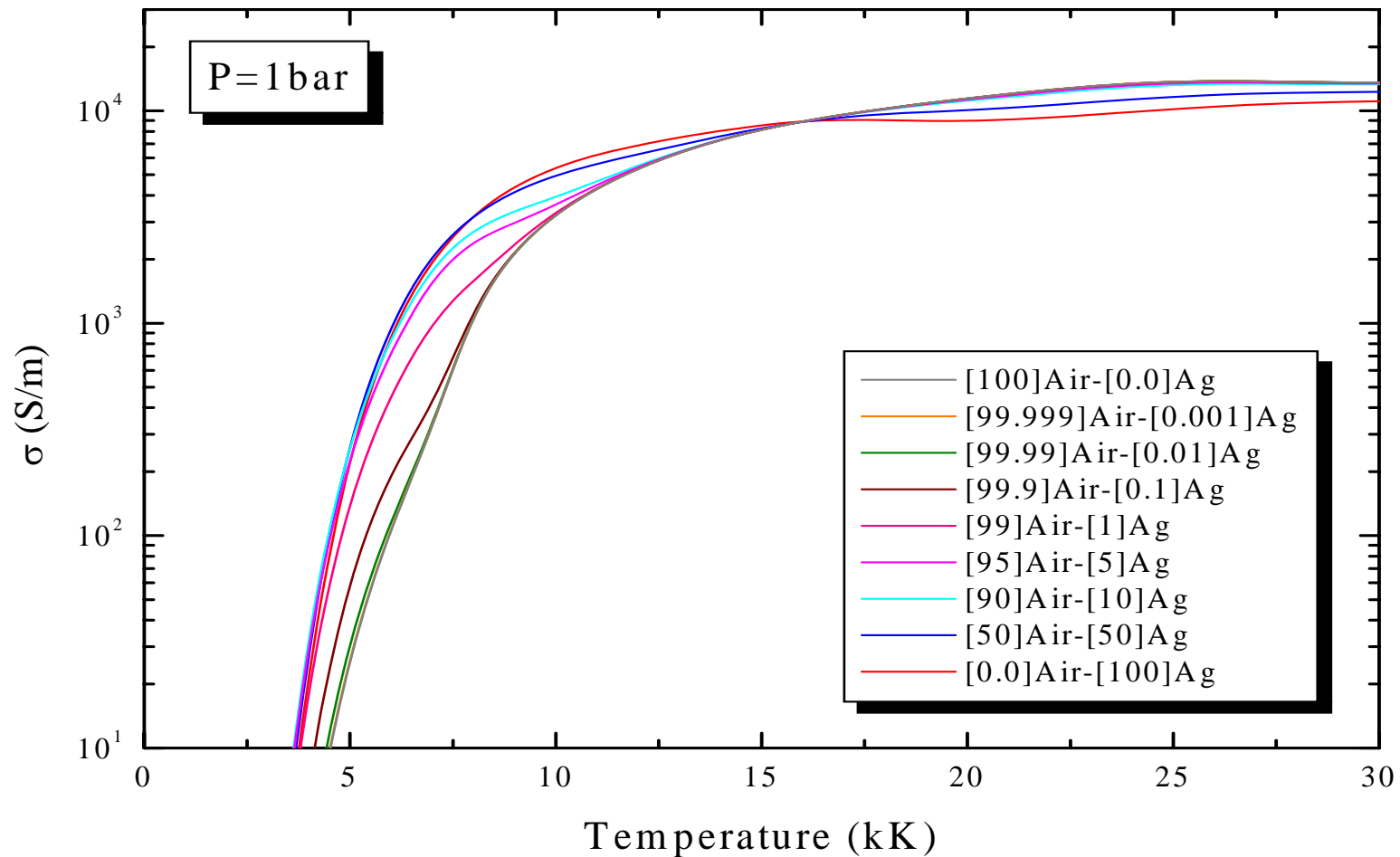




L'arc électrique dans un disjoncteur

Étude : Influence de l'érosion des métaux

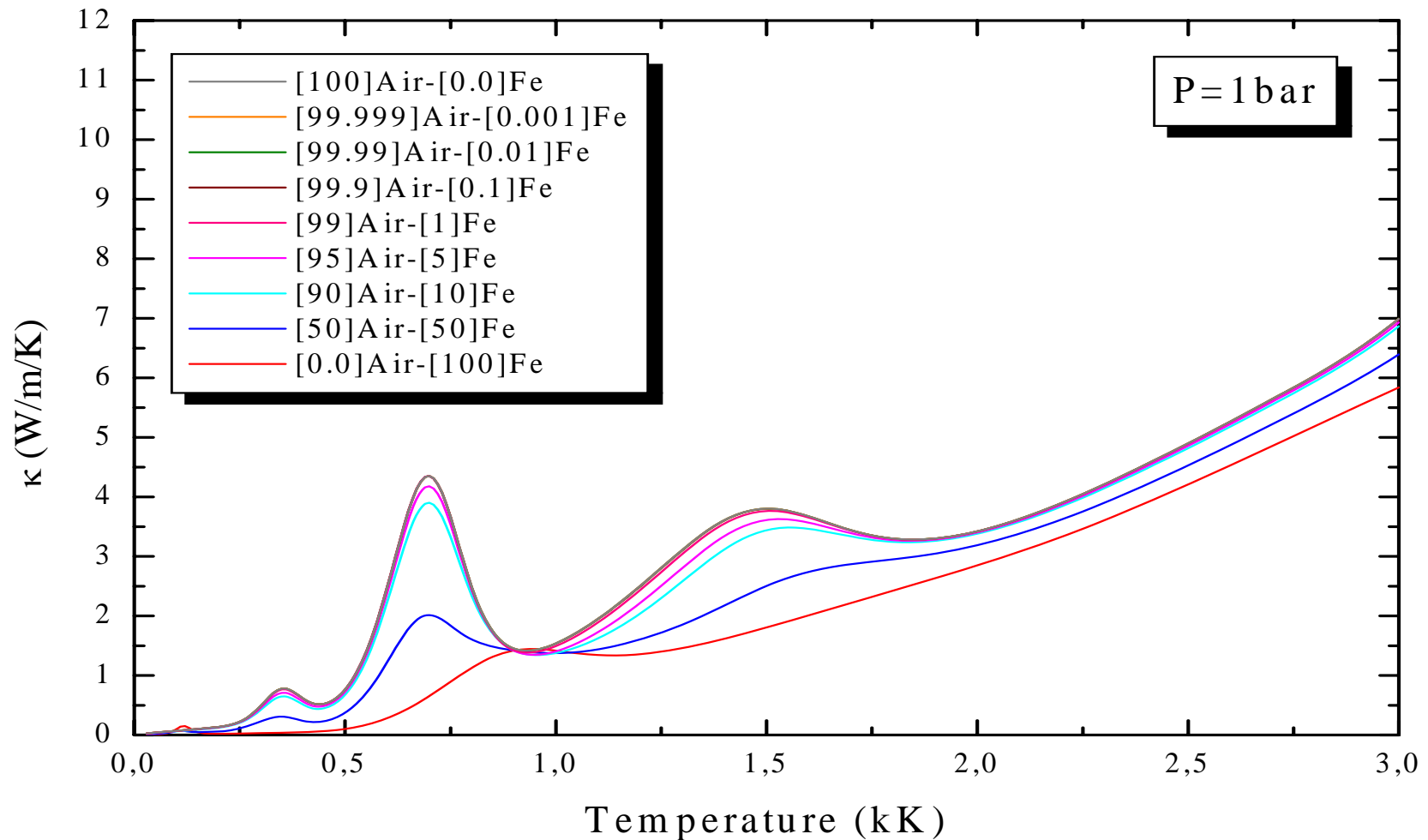
Sur la conductivité électrique



L'arc électrique dans un disjoncteur

Étude : Influence de l'érosion des métaux

Sur la conductivité thermique



L'arc électrique dans un disjoncteur

