

Ecole Technologique des Plasmas Froids
16^e Journées du Réseau – « Les procédés plasmas »
3-5 Octobre 2022 – Bonascre



**L'ARC DE COUPURE
&
L'ARC DE DÉFAUT**

J.M. Bauchire



- **L'arc de coupure**
 - **Définition**
 - **Commande et protection – Le disjoncteur**
 - **Deux caractéristiques importantes de l'arc électrique**
 - **L'arc dans le disjoncteur LVAC**
 - **L'arc dans le disjoncteur HVAC**

- **L'arc de défaut**
 - **Définition**
 - **L'arc dans le réseau de distribution**
 - **L'arc dans le cœur électrique d'un avion**

❖ Définition

L'ouverture d'un circuit électrique (par séparation de contacts) parcouru par un courant provoque la formation d'un arc électrique. C'est arc électrique est dit *arc de coupure* lorsqu'il apparaît dans un appareil destiné à la coupure du courant électrique généralement en dehors du régime nominal.

❖ Caractéristiques macroscopiques

L'arc de coupure est un plasma thermique caractérisé par :

- Un fort courant
- Un fort rayonnement
- Des températures élevées
- Une dynamique importante/destructrice

❖ Application

Les appareils de coupure doivent donc être des appareils capables d'obtenir l'extinction de cet arc.

❖ Les fonctions (commande et protection) :

- **Sectionnement**

Mise hors tension, séparation du circuit.

- **Commande fonctionnelle**

Mise en tension ou hors tension de circuits en fonctionnement normal.

- **Coupure pour entretien**

Interdire la mise en mouvement d'organes de machines par coupure de l'énergie électrique, consignation.

- **Coupure d'urgence** ⚡

Coupure de l'alimentation électrique en cas de danger de nature électrique.

- **Arrêt d'urgence** ⚡

Coupure de l'alimentation électrique en cas de danger autre que de nature électrique.

- **Protection des circuits** ⚡

Coupure de l'alimentation électrique en cas de surintensité (surcharge ou court-circuit) => Détection et ouverture.

- **Protection contre les contacts indirects** ⚡

Contacts de personnes avec une masse sous tension, défaut d'isolement.

❖ Les appareils de commande et de protection :

Les appareils de coupure qui ont pour rôle de fermer et d'ouvrir des circuits électriques au moyen de contacts séparables sont définis comme appareils mécaniques de connexion.

- **Les sectionneurs**

Distance minimale d'ouverture de contacts ou supporter entre les bornes de chaque pôle une tension de choc (230/400 V, 4 mm, 5 kV). Ils ne peuvent pas couper du courant, pas ouvrir en charge. *Sectionnement, coupure pour entretien, coupure ou arrêt d'urgence (sous condition).*

- **Les interrupteurs**

Ouverture et fermeture de circuit sous courant nominal, supporter des surintensités (sous conditions). *Commande fonctionnelle.*

- **Les contacteurs**

Propriétés des interrupteurs, mais caractérisés par la télécommande et le grand nombre de manœuvres (automatismes).

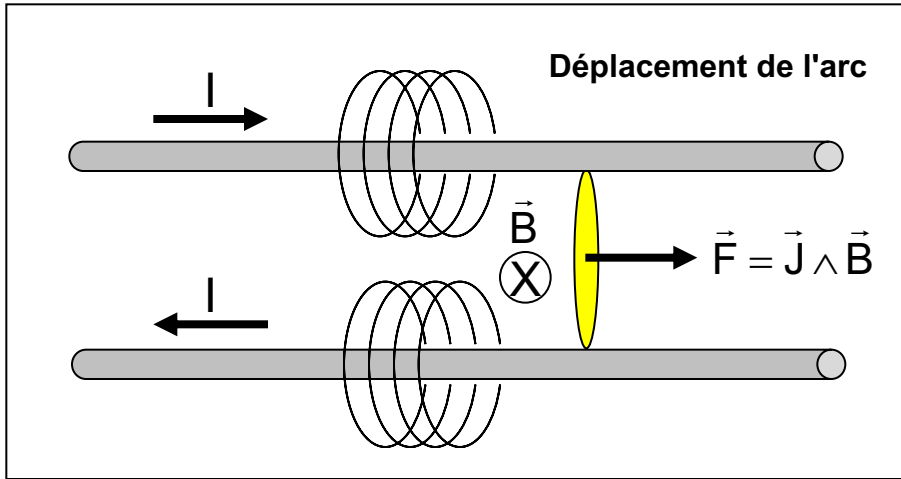
- **Les disjoncteurs** ⚡

Ouverture de circuit sous courant nominal, protéger des surintensités et des surcharges. *Les coupures, la commande fonctionnelle, l'arrêt d'urgence la protection des circuits, le sectionnement (sous condition).*

- **Les fusibles**

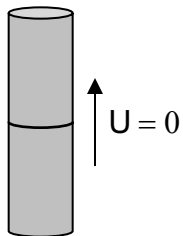
Protection des circuits contre les surintensités. Sectionneurs (sous condition).

Rappels sur l'arc

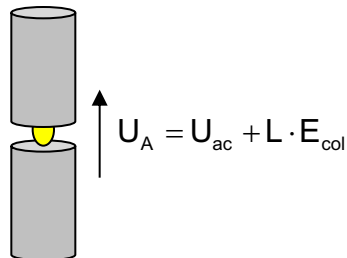


L'arc de coupure

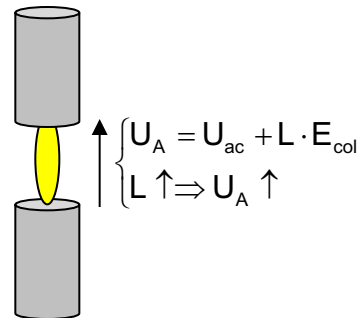
Contacts fermés



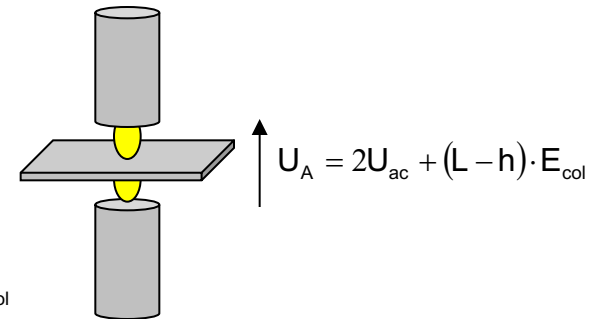
Séparation contacts



Etirement de l'arc



Fractionnement de l'arc

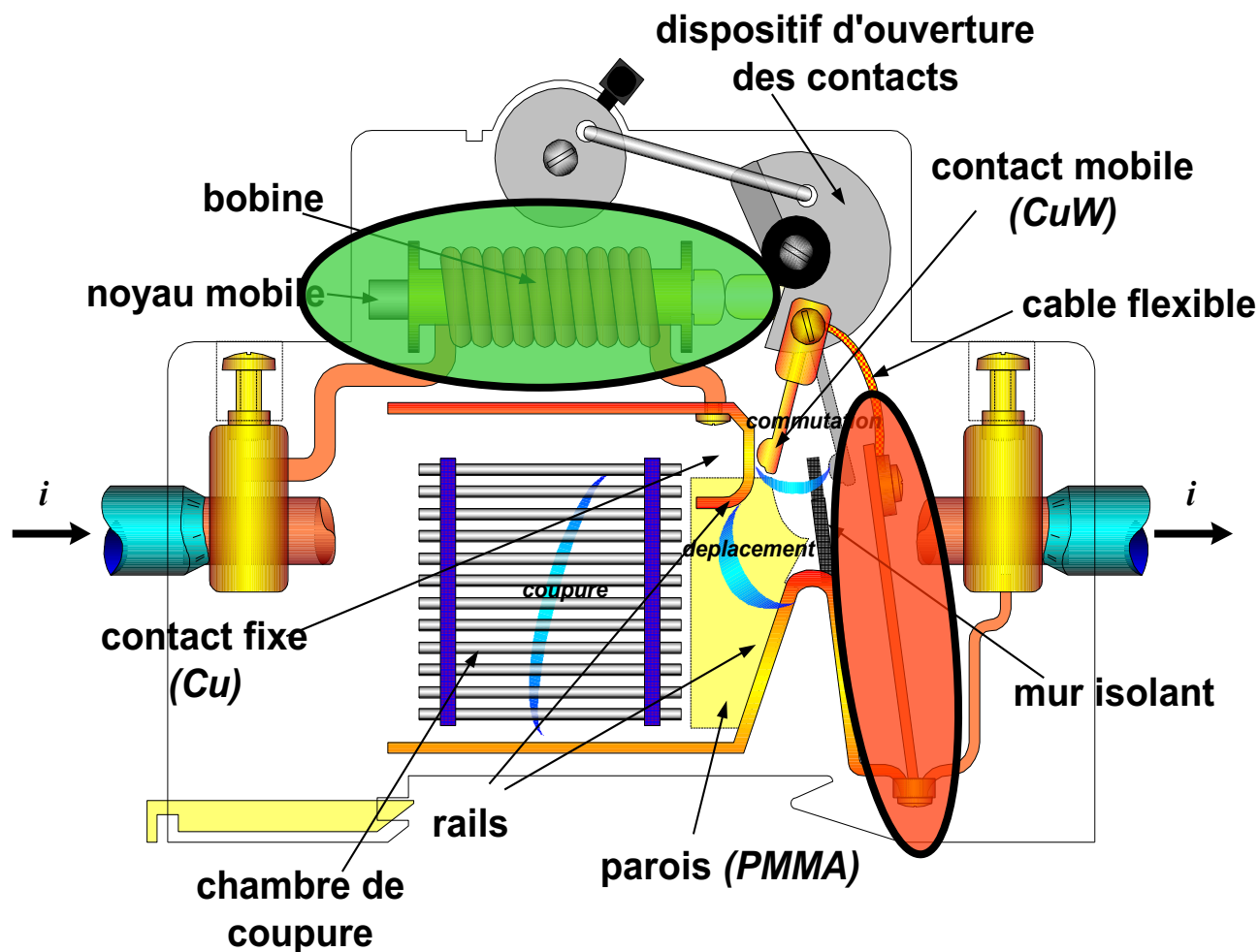


$$U_A = n \cdot U_{ac} + (L - n \cdot h) \cdot E_{col}$$

Allonger l'arc, le fractionner, le refroidir \Rightarrow Augmentation de U_A

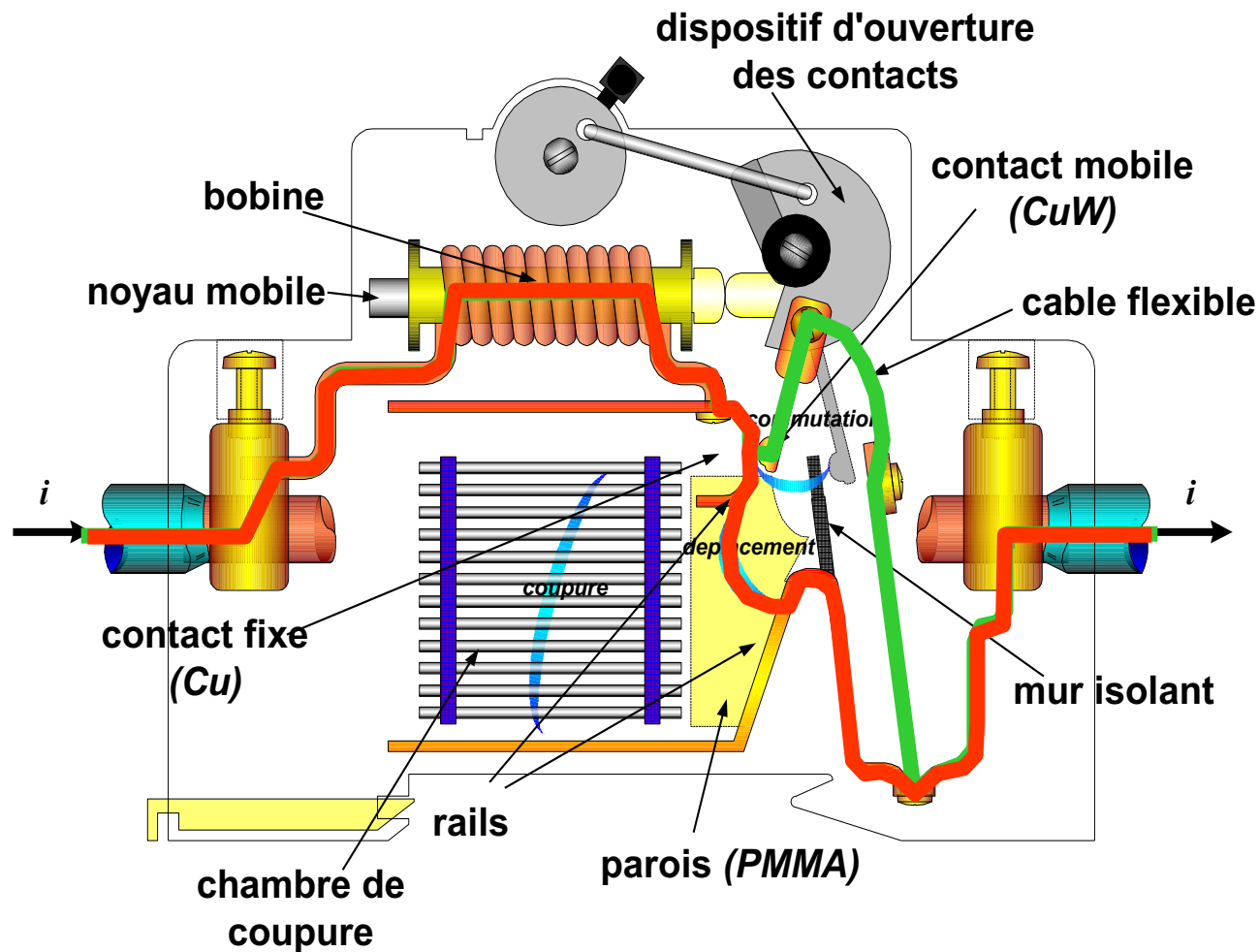
L'arc dans le disjoncteur Basse Tension AC

Déclenchement court-circuit



Déclenchement surcharge

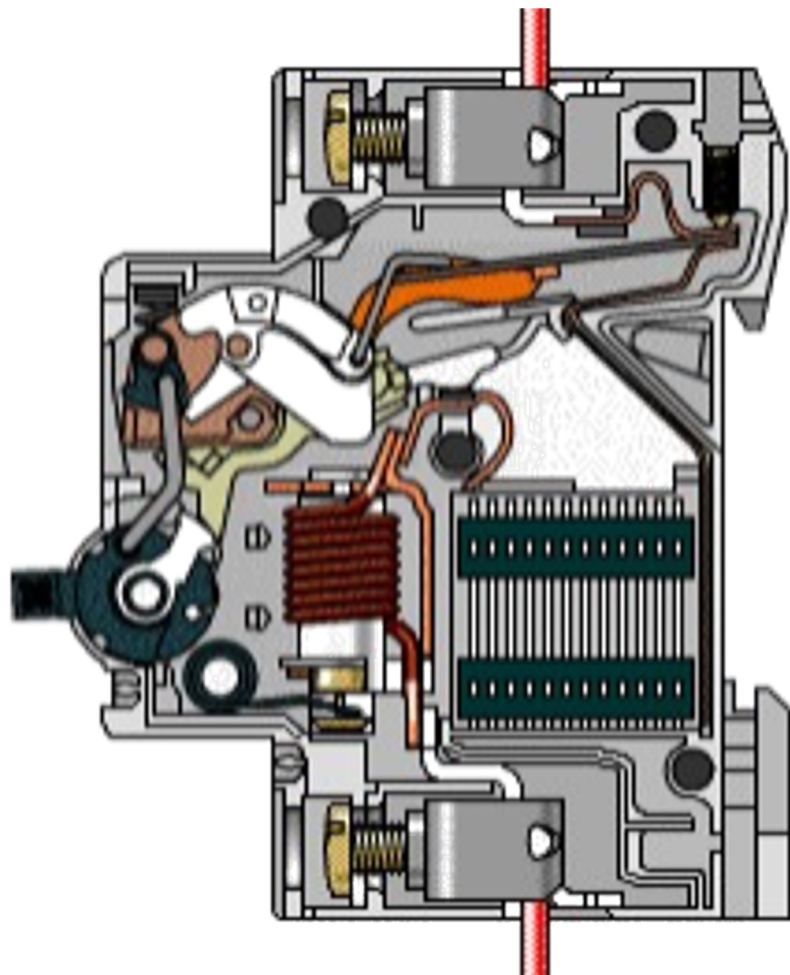
L'arc dans le disjoncteur Basse Tension AC



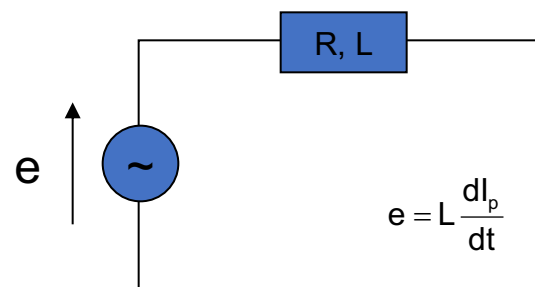
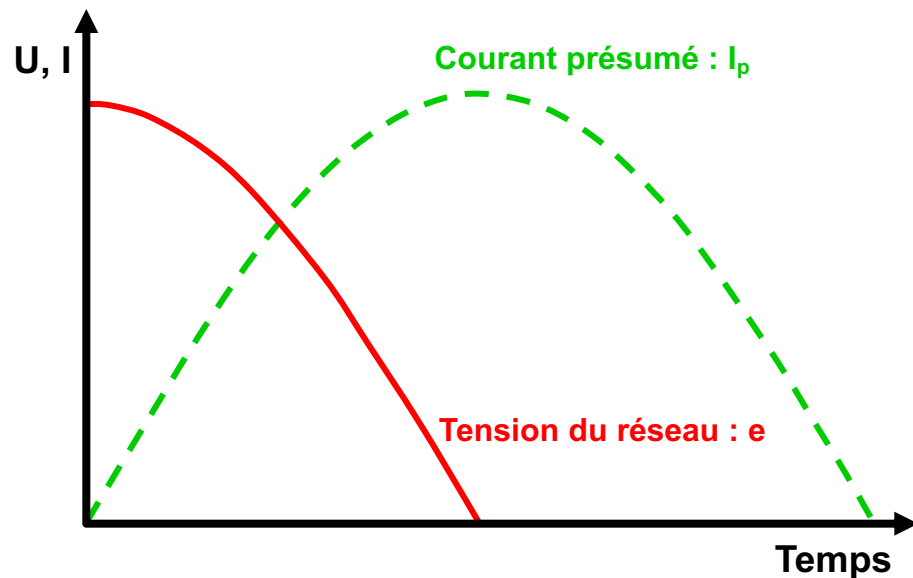
- Passage du courant en position fermée
- Passage du courant en position ouverte

L'arc dans le disjoncteur Basse Tension AC

Fonctionnement : Circuit fermé



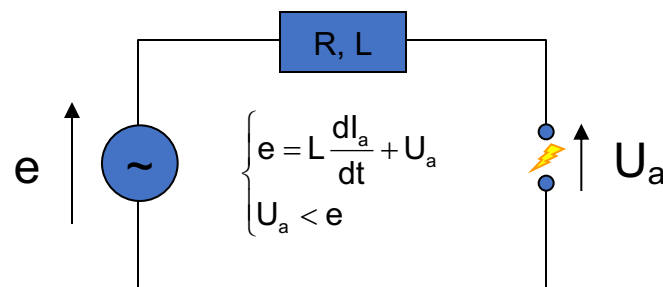
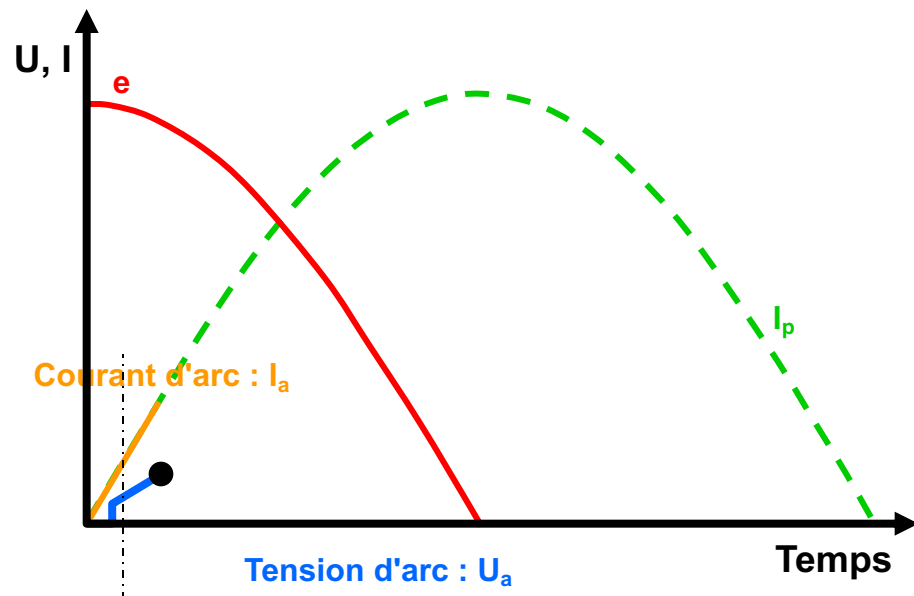
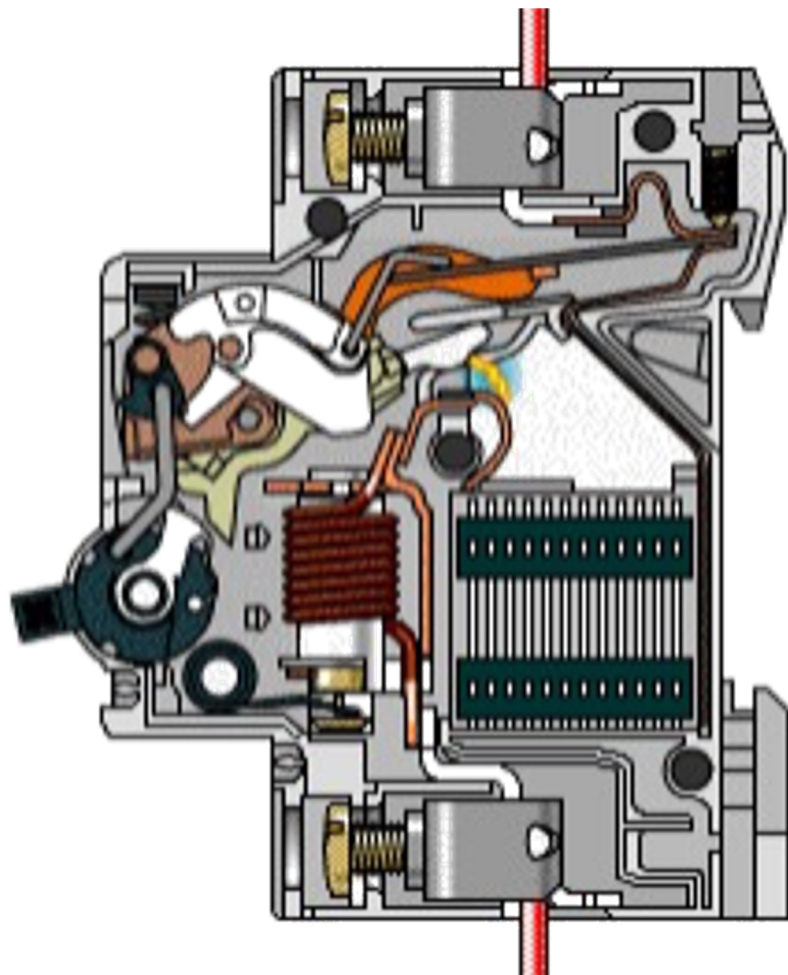
Avant le déclenchement sur court-circuit



On néglige R
(pour simplifier)

L'arc dans le disjoncteur Basse Tension AC

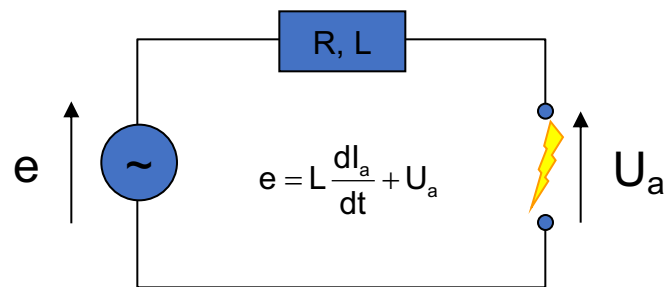
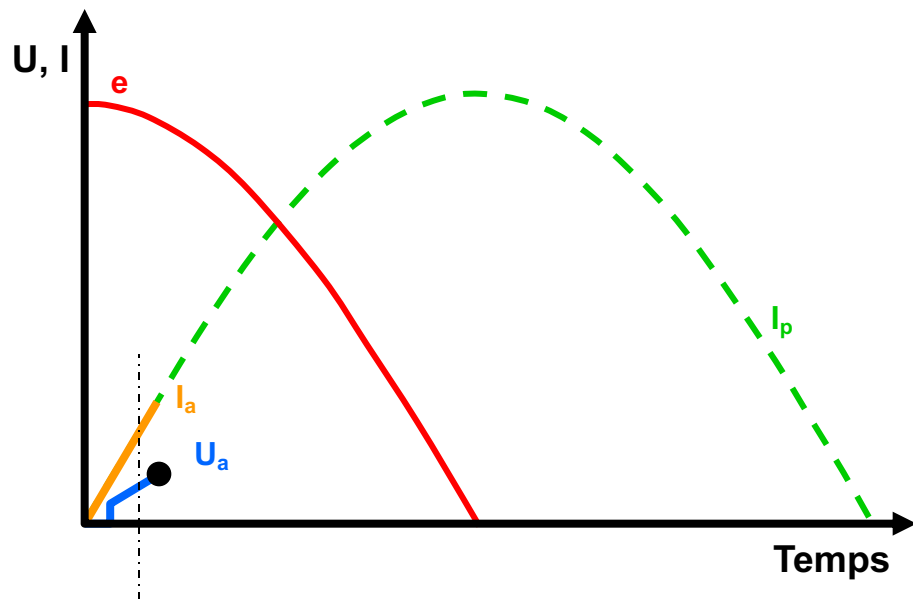
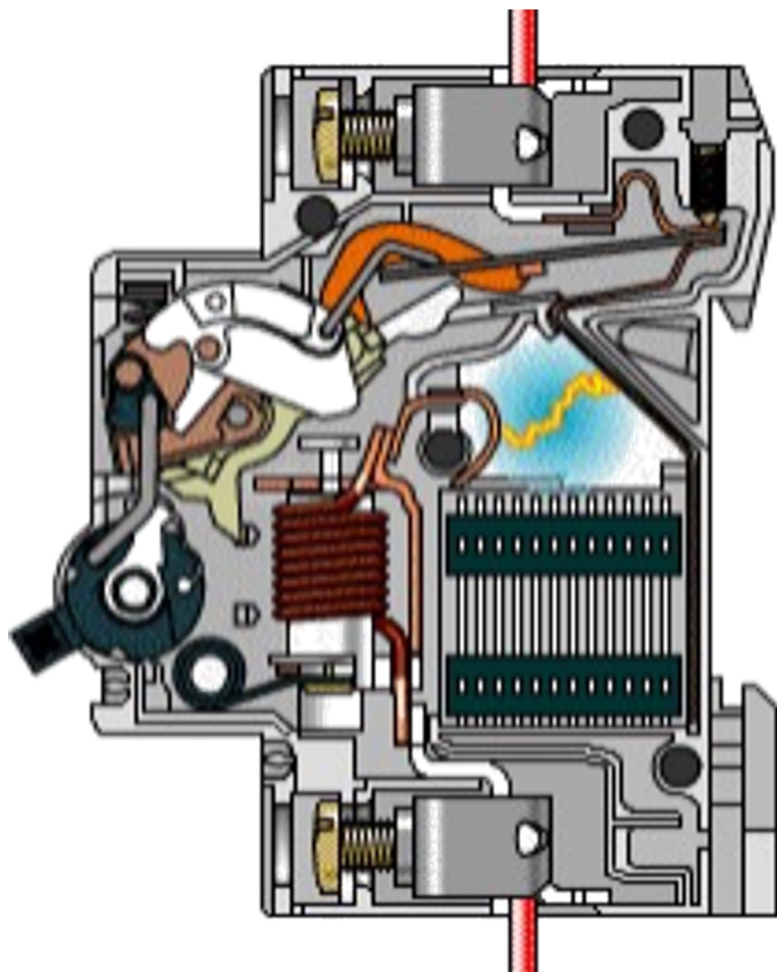
Fonctionnement : Séparation des contacts



Ouverture des contacts \Rightarrow Pont métallique fondu \Rightarrow Plasma

L'arc dans le disjoncteur Basse Tension AC

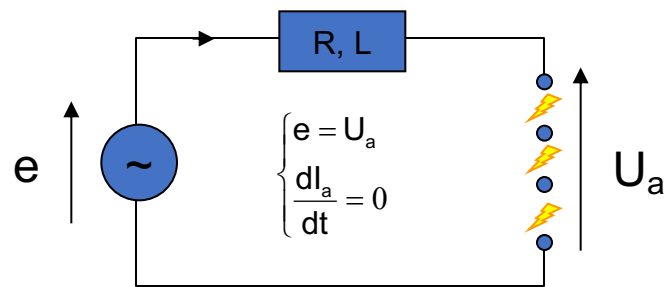
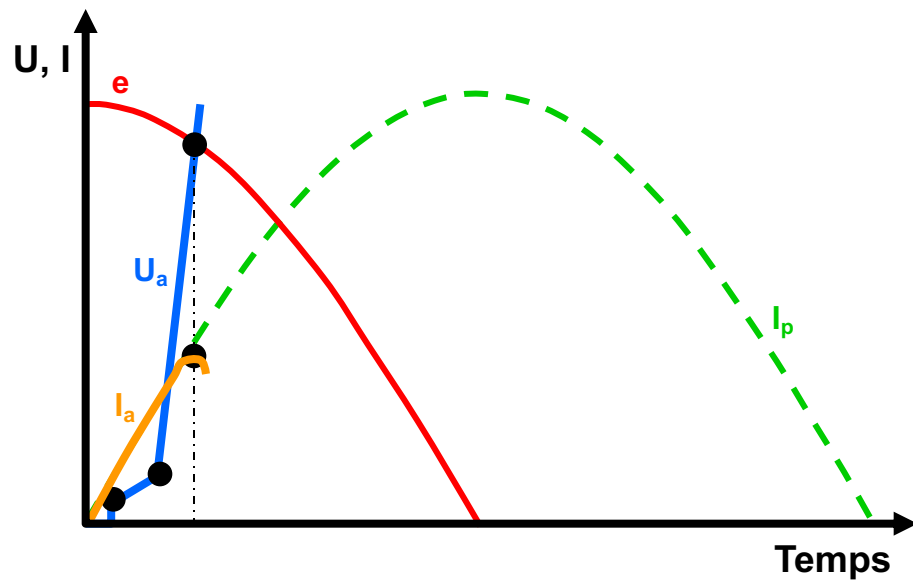
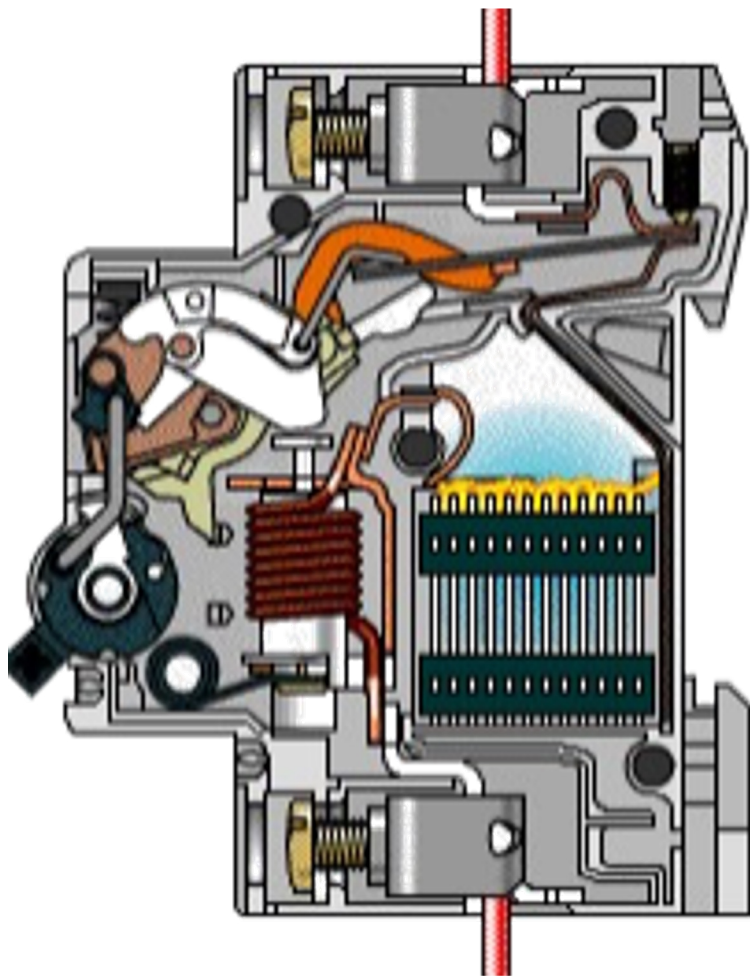
Fonctionnement : Commutation et déplacement de l'arc



Commutation \Rightarrow Déplacement de l'arc

L'arc dans le disjoncteur Basse Tension AC

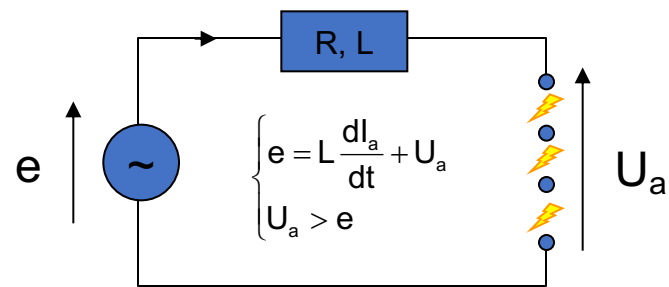
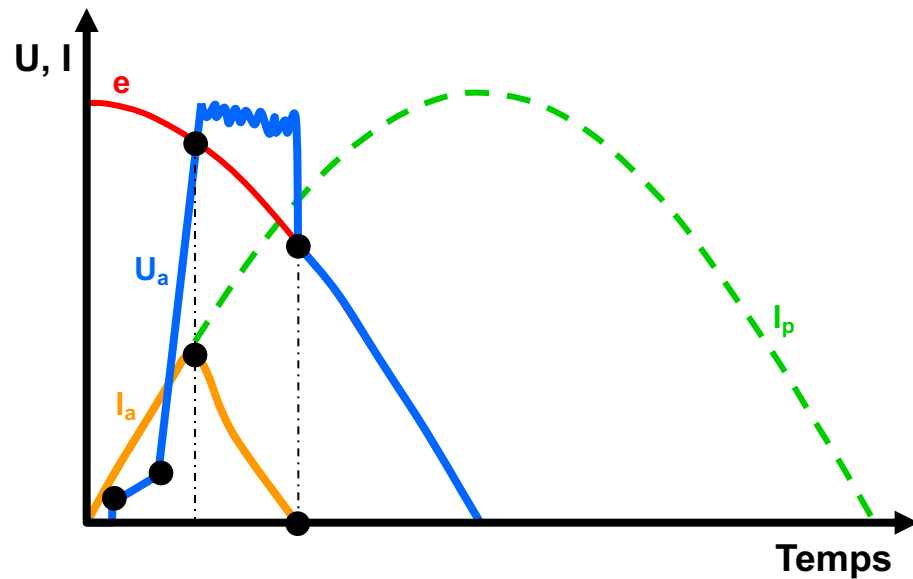
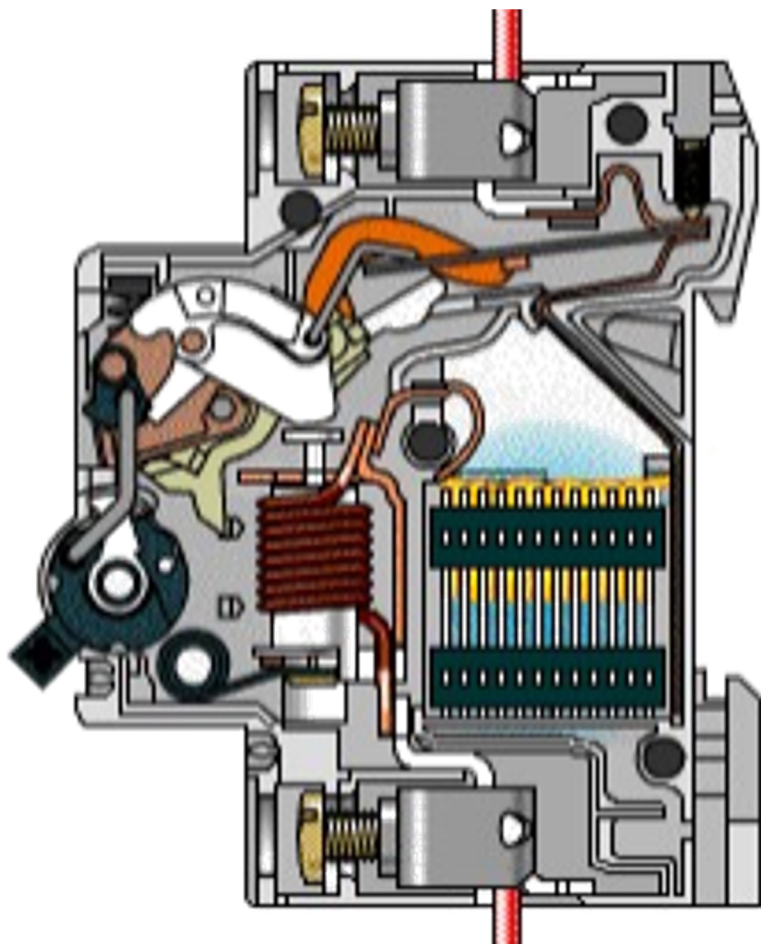
Fonctionnement : Entrée dans la chambre de coupure



Allongement de l'arc \Rightarrow Insertion dans chambre de coupure \Rightarrow Fractionnement

L'arc dans le disjoncteur Basse Tension AC

Fonctionnement : Limitation du courant et extinction



Sectionnement de l'arc ⇒ Extinction

❖ **Le procédé : La limitation du courant**

Déplacer l'arc rapidement dans la chambre

⇒ augmenter rapidement la tension de l'arc

⇒ limiter le courant jusqu'à l'extinction

❖ **Les échecs de coupure**

- L'arc stagne entre les contacts ou dans la préchambre

⇒ Pas de limitation du courant ⇒ Endommagement du disjoncteur

- Milieu reste chaud et conducteur

⇒ Re-claquage entre les contacts ⇒ Retard dans la coupure ⇒ Endommagement

- Collage des contacts

❖ **Les éléments d'amélioration**

- Optimisation de la taille et de la géométrie

- Optimisation des matériaux

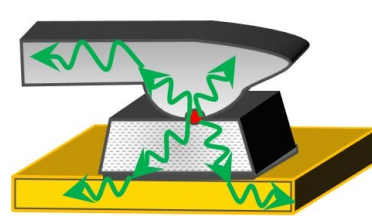
- Optimisation des contacts

- Vers d'autres dispositifs ?

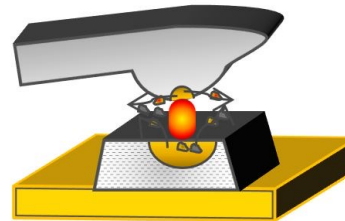
Le collage de contacts

❖ Problématique

Des phénomènes de collage, majoritairement sans impact sur le bon fonctionnement du produit de protection selon la norme, sont malgré tout observés. Si la force de séparation des contacts ne permet pas de décoller les contacts, c'est la sécurité des biens et des personnes qui est compromise.



Collage statique



Collage dynamique

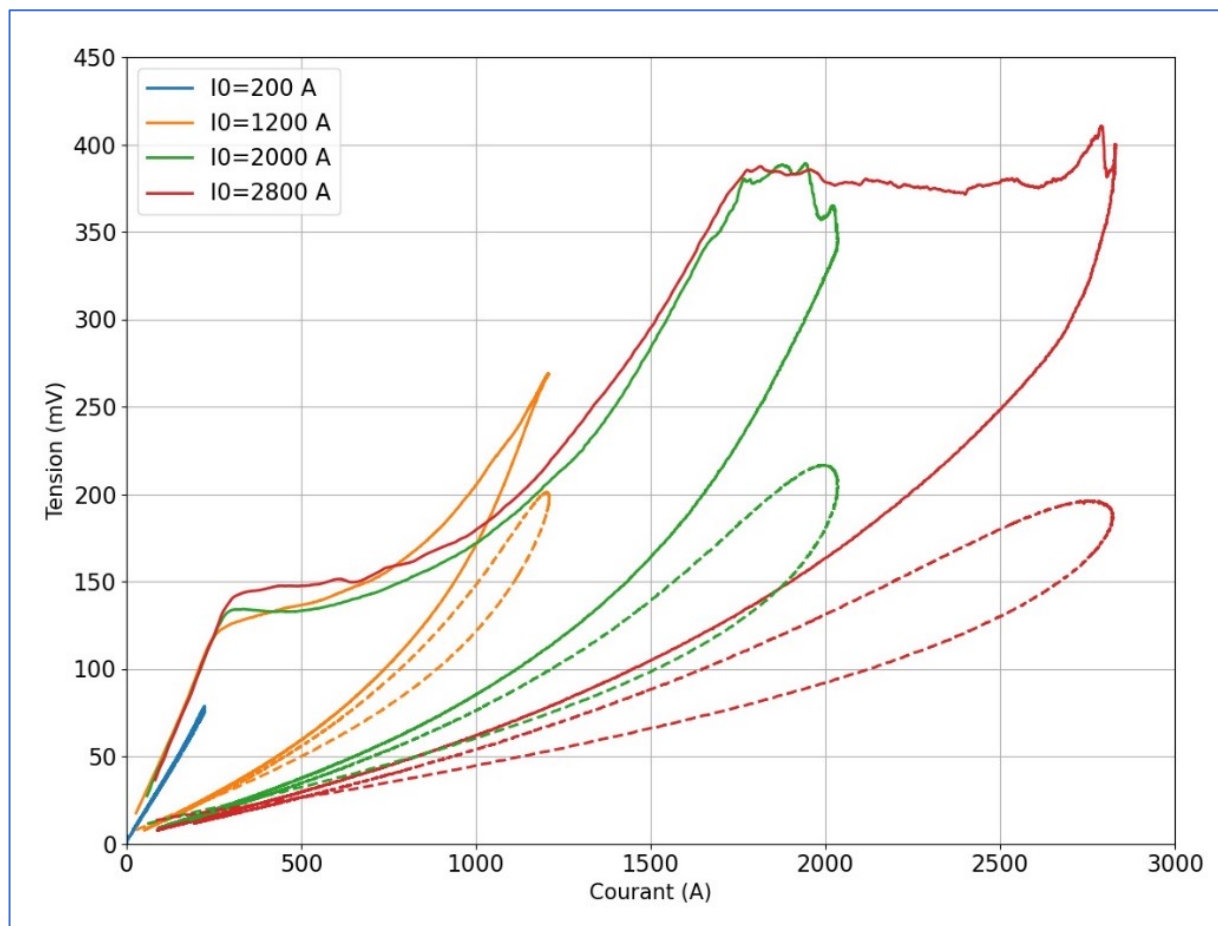
❖ Etude

Déterminer le comportement d'un contact électrique en fonction des différents paramètres opératoires : Intensité du courant, force de contact, nature des pastilles de contact...

Le collage de contacts

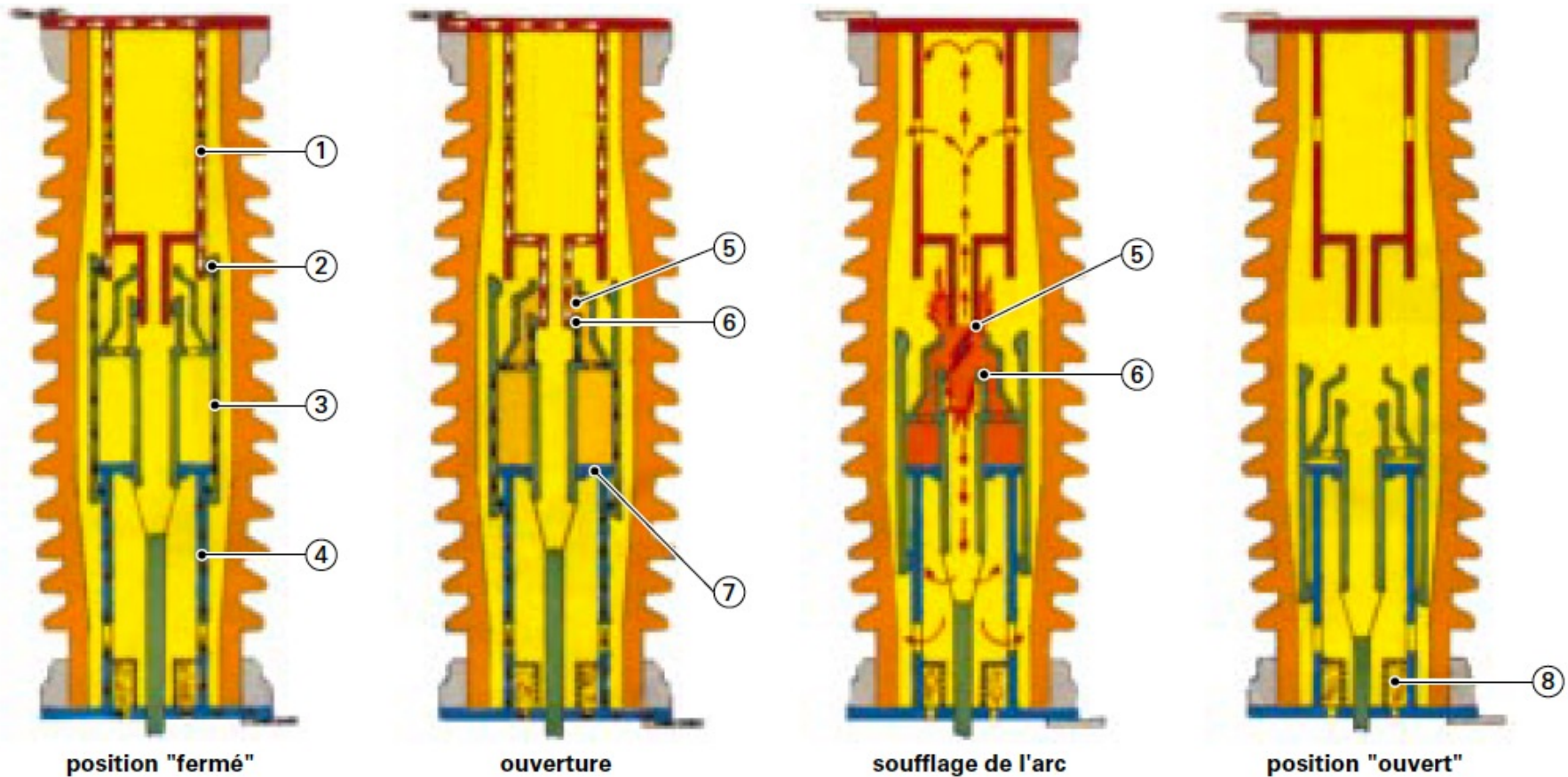
❖ Etude expérimentale et numérique

- Détermination des rayons de contacts en fonctions des paramètres opératoires.
- Validation des formules de la théorie des contacts (Holm, Kohlrausch).
- Définition d'un protocole expérimental pour déterminer le rayon de contact.



L'arc dans le disjoncteur Haute Tension AC

- ❖ Le principe de coupure d'un disjoncteur HT est basé sur le passage par zéro du courant : Exemple du disjoncteur SF₆



- ① porte-contact fixe
- ② contact permanent
- ③ cylindre de soufflage
- ④ porte-contact mobile

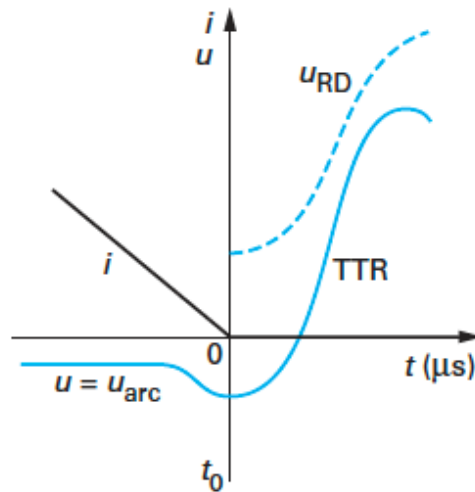
- ⑤ contact d'arc fixe
- ⑥ contact d'arc mobile
- ⑦ piston de soufflage

- ⑧ tamis moléculaire (pour absorber l'humidité et les produits de décomposition)

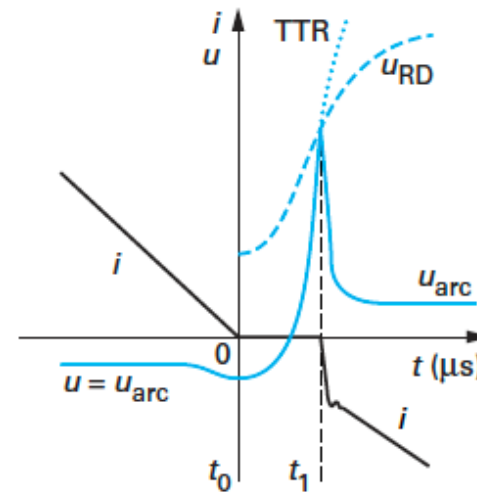
L'arc dans le disjoncteur Haute Tension AC

❖ Les échecs de coupure

- Réamorçage diélectrique
- Réamorçage thermique



(a) coupure réussie



(b) réamorçage diélectrique

i intensité du courant dans l'arc

u_{arc} tension aux bornes de l'arc

u_{RD} tension de régénération diélectrique entre contacts

TTR tension transitoire de rétablissement

❖ Le procédé : Eteindre l'arc au passage par zéro du courant

- ⇒ Le milieu doit recouvrer une rigidité diélectrique rapidement
- ⇒ Les puissances mises en jeu sont très importantes
- ⇒ La fiabilité doit être importante

❖ Les perspectives

- Nouveaux besoins, nouveaux marchés (DC)
- Enjeux environnementaux (Remplacement du SF₆)

❖ Les enjeux du remplacement du SF₆

- L'industrie du transport de l'électricité représente environ 80 % de l'utilisation mondiale de SF₆. Le SF₆ est listé comme gaz à effet de serre qui génère, en cas de fuite, 23 500 fois plus d'émissions que le CO₂ et peut demeurer dans l'atmosphère jusqu'à 3 200 ans.
- Le nouveau gaz doit :
 - Être un mélange de gaz « autorisés »
 - Avoir les mêmes performances (diélectrique, thermique)
 - Avoir les mêmes plages de températures, y compris dans les zones froides jusqu'à -25°C, sans risque de liquéfaction du gaz
 - Ne pas induire de modifications notables des appareils

- **L'arc de coupure**
 - **Définition**
 - **Commande et protection – Le disjoncteur**
 - **Deux caractéristiques importantes de l'arc électrique**
 - **L'arc dans le disjoncteur LVAC**
 - **L'arc dans le disjoncteur HVAC**

- **L'arc de défaut**
 - **Définition**
 - **L'arc dans le réseau de distribution**
 - **L'arc dans le cœur électrique d'un avion**

❖ Définition

Un arc de défaut est un arc électrique apparaissant au sein d'un circuit de façon subite entre deux ou plusieurs conducteurs lors d'une anomalie dans le circuit. La puissance de l'arc de défaut peut varier en fonction de son intensité et de sa durée. Mais il est généralement destructeur (incendie, explosion...). L'arc génère également d'ondes qui peuvent perturber ou détruire des équipements électroniques sensibles.



❖ Exemples d'anomalies

- **Connexion de fil lâche** : Les bornes à vis qui sont connectées de manière lâche sur les prises murales peuvent toucher d'autres fils et provoquer un défaut d'arc. Elles peuvent aussi se desserrer en raison de la fréquence des branchements et des retraits.
- **Fils surchauffés** : La chaleur peut détruire l'isolation autour du fil ou le conducteur lui-même, créant un petit espace entre eux. Le courant saute à travers cet espace, créant un défaut d'arc.
- **Fils endommagés** : les fils peuvent être endommagés pour diverses raisons : clouage sur les murs, pliage, pincement ou torsion des fils, vibrations, rongeurs...
- **Bornes endommagées** : Les bornes et les fils peuvent être corrodés en raison d'une utilisation excessive qui réduit leur efficacité.
- **Liquide à proximité des outils électriques** : Les liquides tels que l'eau peuvent également être la cause d'un défaut d'arc dans un circuit.

L'arc de défaut dans le réseau de distribution



- Les opérateurs travaillant sur des installations électriques peuvent être accidentellement exposés à des arcs de forte puissance.
- Pour les protéger, le rayonnement des arcs doit être caractérisé.
- Plus précisément, l'irradiance spectrale doit être connue pour déduire les valeurs d'exposition maximale admissible de l'œil humain et de la peau*.

**European Parliament and Council, On the minimum health and safety requirements regarding the exposure of workers to risks arising from physical agents, Official Journal of The European Union Directive 2006/25/EC OJ L114/38*

L'arc de défaut dans le réseau de distribution

- Expériences réalisées au Centre de Recherche « Les Renardières » d'EDF

- Electrodes cylindriques

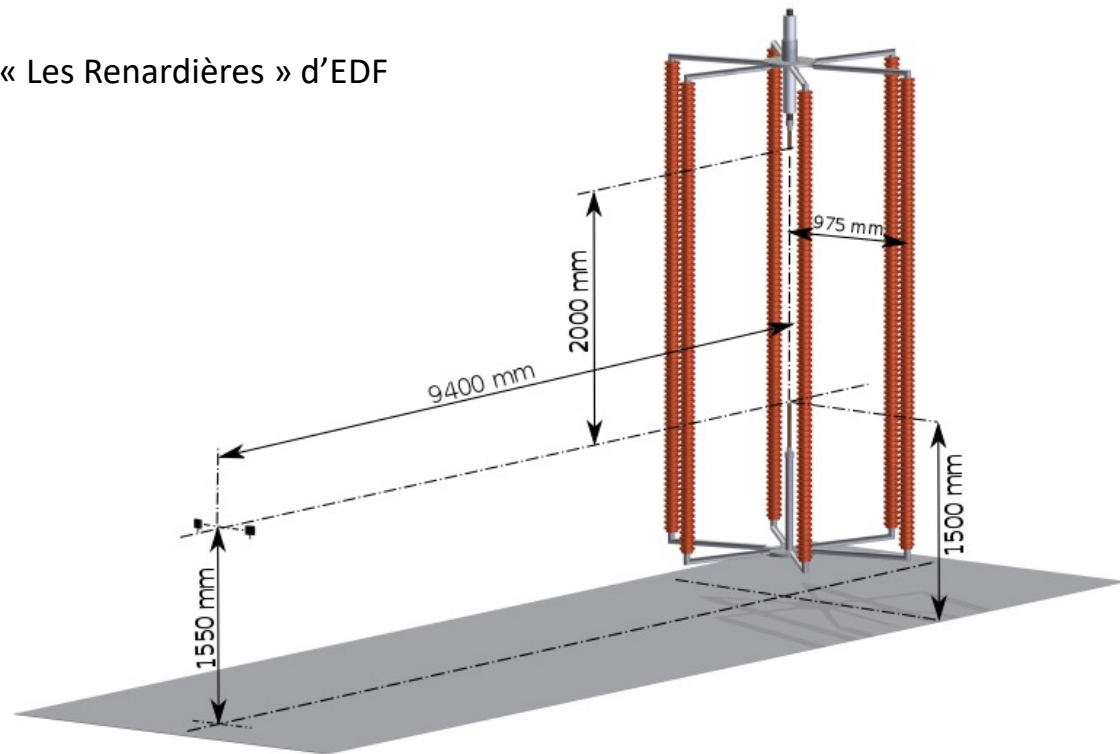
- □ Cuivre, Acier, Aluminium
- ⊖ 25 mm
- ↑ 2m gap
- ⚡ Fil fusible (ignition)

- Alimentation électrique

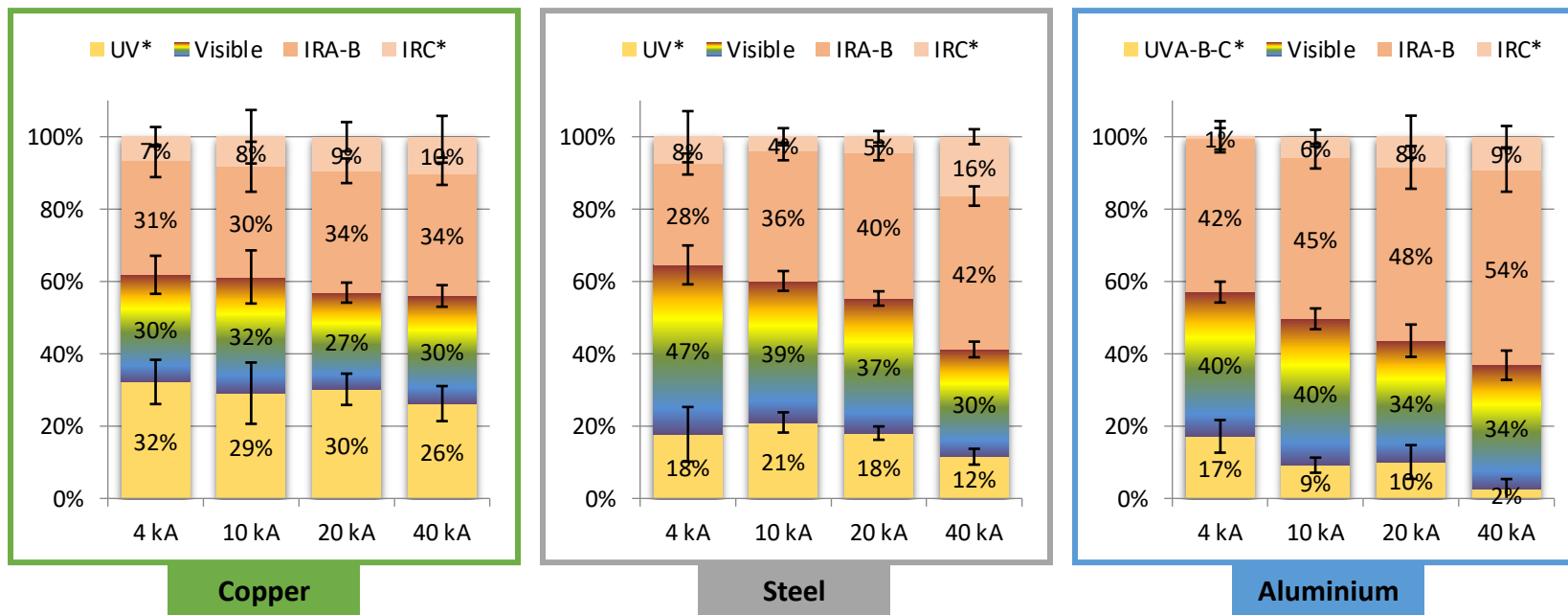
- ⏏ 5 périodes, 50 Hz / AC
- I = 4, 10, 20 and 40 kA RMS

- Diagnostics

- 📷 Caméra rapide couleur (2000 fps)
- 📡 Capteurs de rayonnement, avec filtres



L'arc de défaut dans le réseau de distribution

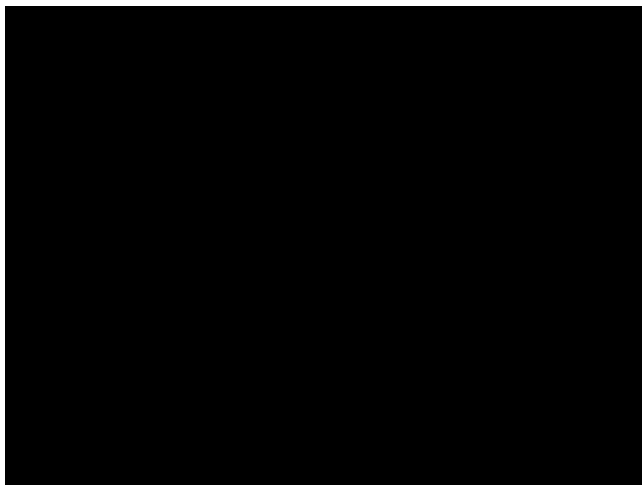


- Énergie radiative relative dans les différents domaines spectraux
 - L'IRA-B et le Visible sont les principales contributions
 - La proportion d'UV est plus élevée pour le cuivre
 - La partie IRC est faible et peu précise

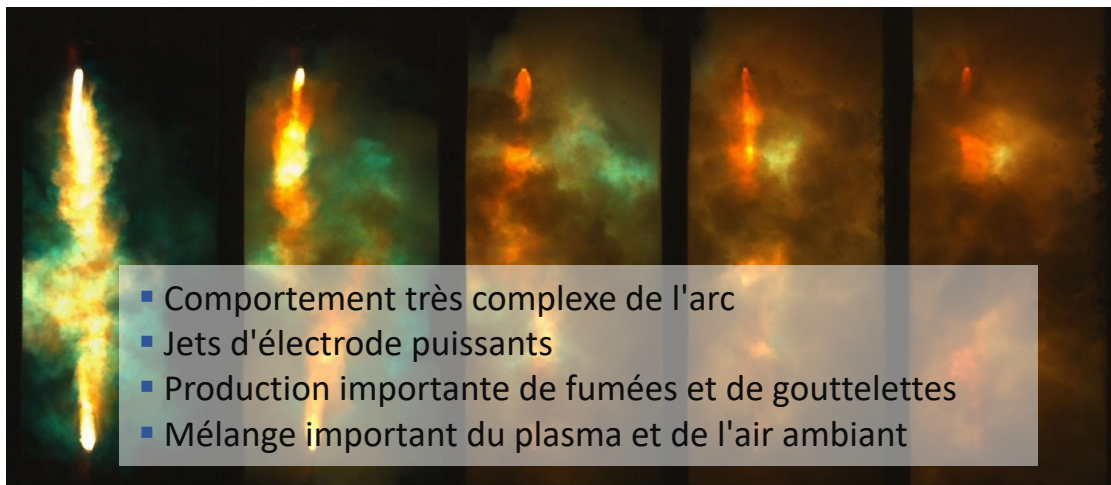
➡ D'où vient exactement le rayonnement de l'arc ?

L'arc de défaut dans le réseau de distribution

Vidéos de l'arc, dans le cas d'électrodes en aluminium, courant de 10 kA et 40 kA RMS



Photos de l'arc, dans le cas d'électrodes en aluminium, pour un courant de 40 kA RMS, et des temps de 7,5 ms à 87,5 ms par pas de 20 ms (de gauche à droite).



Le plasma d'arc est supposé être une source homogène composée des plasmas suivants aux températures (K) :

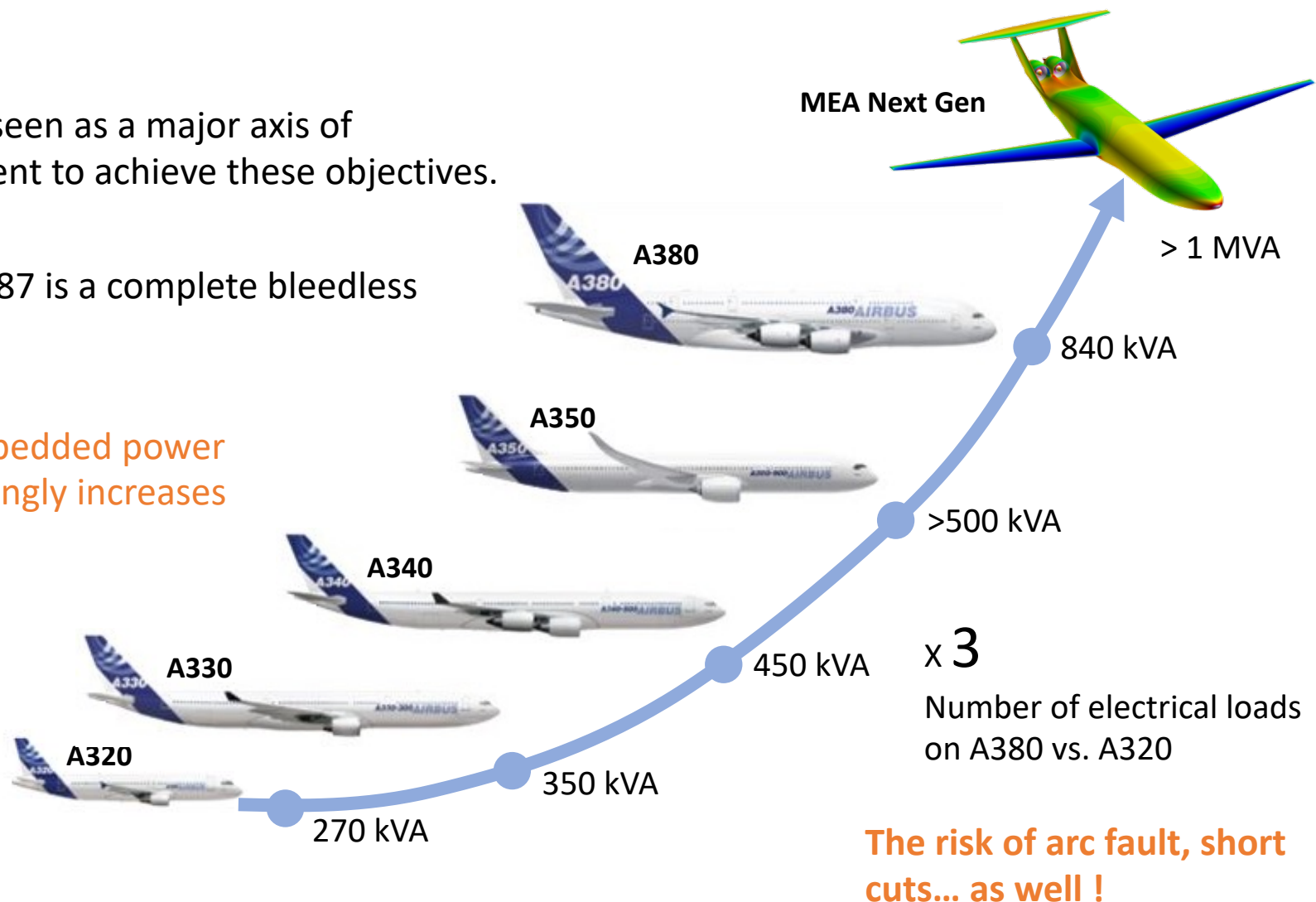
Electrode	Air pur	Air – 1% métal	Corp noir
Cuivre	12000	7000	1000
Acier	12000	5000	1200-1500
Aluminium	12000	5000	1000-1500

L'arc de défaut dans le cœur électrique d'un avion

⇒ **MEA** is seen as a major axis of improvement to achieve these objectives.

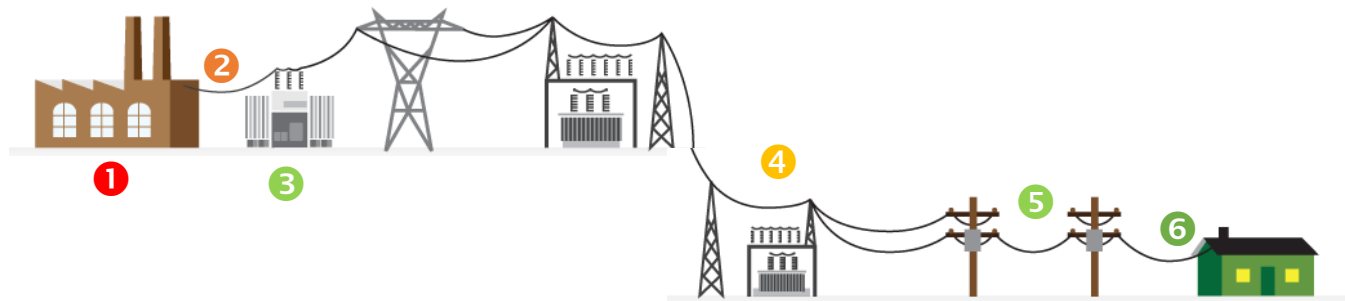
☞ Boeing 787 is a complete bleedless aircraft.

⇒ The embedded power supply strongly increases

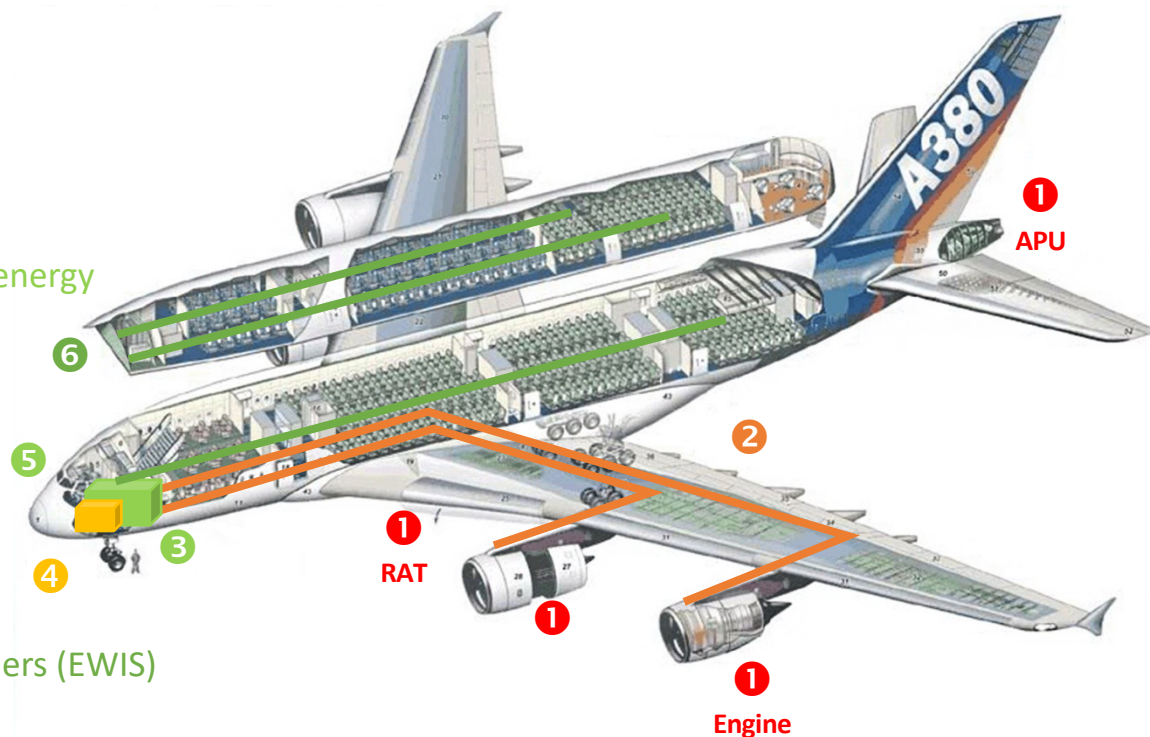


L'arc de défaut dans le cœur électrique d'un avion

Aircraft electrical system principles



- 1 Power plant / Generator
- 2 Electrical energy transport
- 3 Distribution & protection of primary energy
- 4 Voltage adaptation (transformers)
- 5 Secondary distribution & protection
- 6 Electrical energy transport to consumers (EWIS)



- Loss of whole system probability $< 10^{-9}$ per EFH
- System architecture has to follow **Redundancy, Segregation and Dissimilarity**

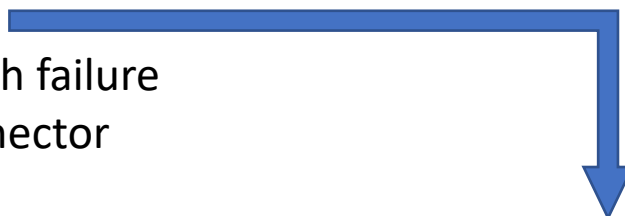
⇒ Design rules

- Special constrains:
 - Long life time
 - Vibrating system
 - **Pressure** ($2 \times 10^4 \text{ Pa} < P < 1 \times 10^5 \text{ Pa}$)
 - Temperature ($-60^\circ\text{C} < T < 40^\circ\text{C}$)
 - **Electrical network diversity** :
 - 28 VDC
 - 115 VAC, 230 VAC
 - $360 \text{ Hz} < f < 800 \text{ Hz}$
 - toward HVDC...
 - Weight, material composition (fire, dielectric...), operational reliability...
- ⇒ Terrestrial solutions not appropriate

- Electric arc is a complex phenomenon in a complex environment

- Arc fault incidents:

- Foreign Object Debris (FOD)
- Electro-mechanical power switch failure
- Upon live disconnection of connector



- 3-steps arc fault mitigation:

- Arc prevention (Installation rules)



Box design (hole sizes...)
Protection of active parts (painted busbars...)

- Arc occurrence (Arc containment)



Distance between busbars, between busbars and structure, arc traps...

- Arc cut-off (Protection device)



Tripping devices...

L'arc de défaut dans le cœur électrique d'un avion



Example of busbars after arcing
Zodiac experiments

L'arc de défaut dans le cœur électrique d'un avion

Arc propagation

230 V, 760 Hz, h = 5 mm.

AC arc

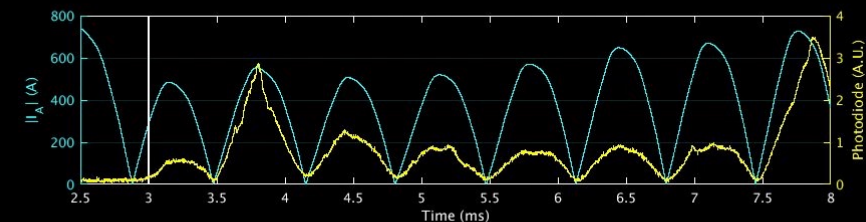
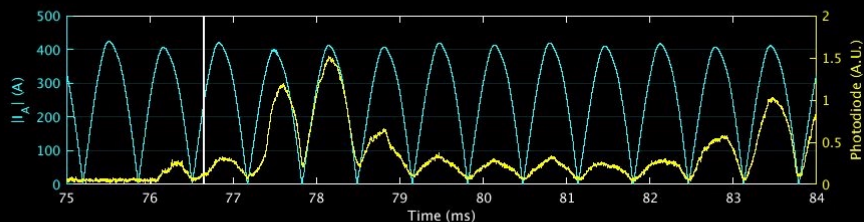
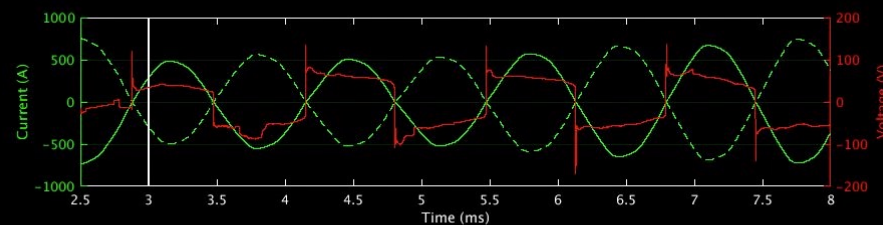
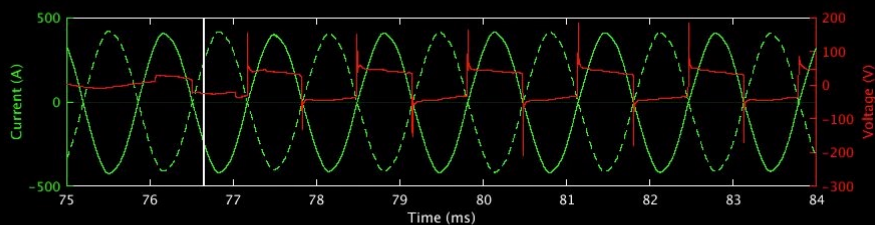
230 V, 760 Hz, h = 8 mm.



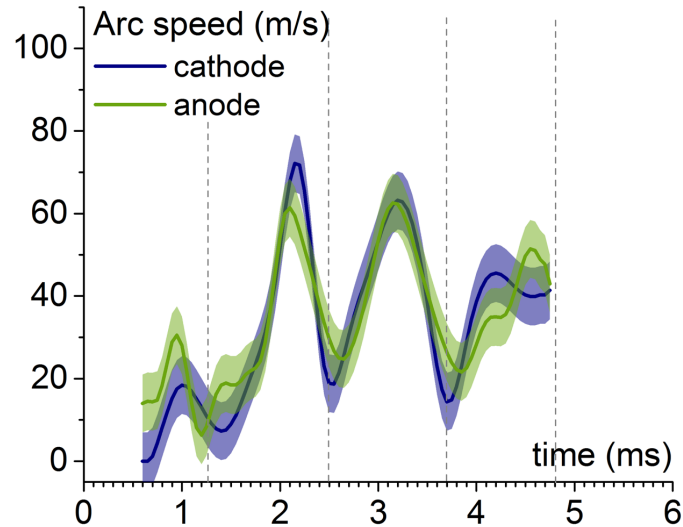
1085-step1 / 50001
Time from trigger = 76.65 ms
 $U_{AB} = -024 \text{ V}$
 $I_A = -244 \text{ A} / I_B = +238 \text{ A}$



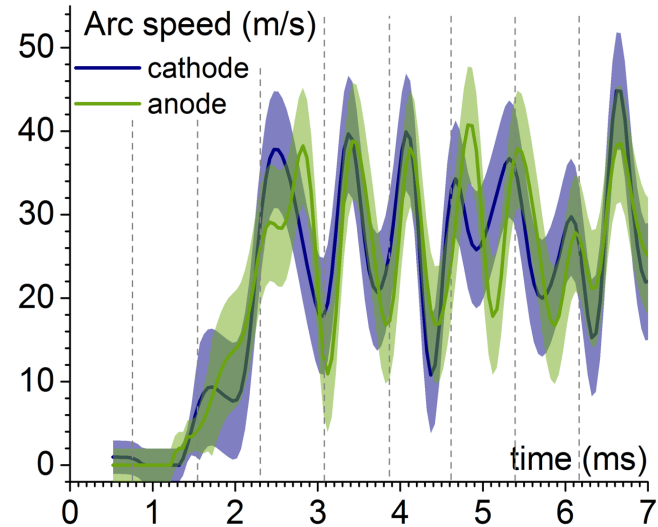
1093-step3 / 120004
Time from trigger = 03.00 ms
 $U_{AB} = +034 \text{ V}$
 $I_A = +290 \text{ A} / I_B = -297 \text{ A}$



AC arc



$I_{\max} = 1400 \text{ A}$, 420 Hz, $h = 5 \text{ mm}$



$I_{\max} = 400 \text{ A}$, 760 Hz, $h = 5 \text{ mm}$

- Maximum value of the arc speed is defined by I_{\max} ,
- Oscillation of the speed coincide with the arc current variation,
- The arc velocity is not zero even when $I = 0$.

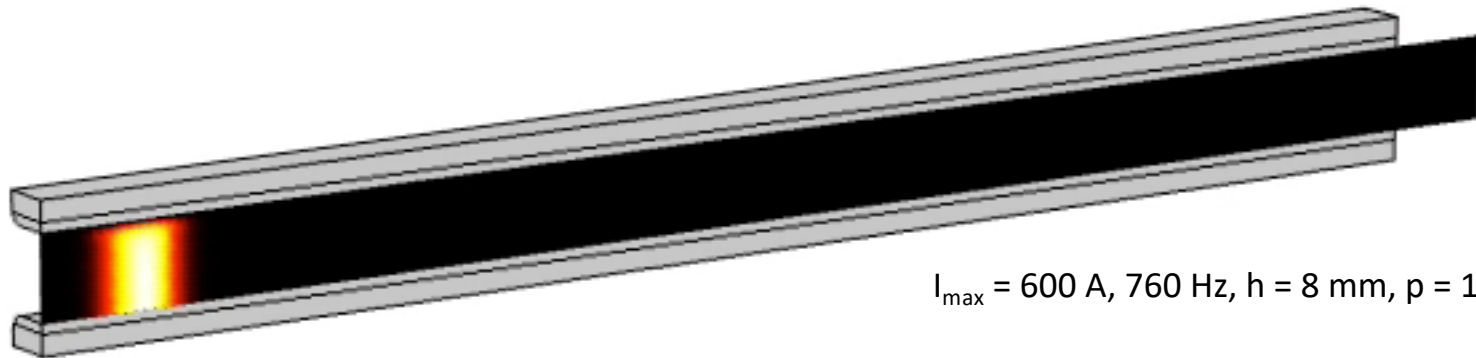
AC arc – Numerical modelling

Model adaptation:

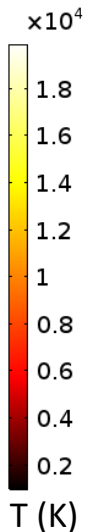
- Geometry adaptation,
- The arc current waveform is an input parameter (taken from the experiment),
- Numerical realization is not straight forward due to predefine package (Alternation Dirichlet and Neumann BC),
- Less stable (requires smaller time stepping while arc current close to zero) -> Increasing calculation time.

Investigation of the arc propagation behavior (speed) depending on the external conditions:

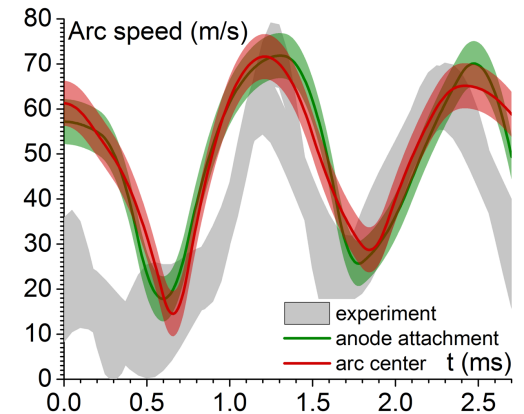
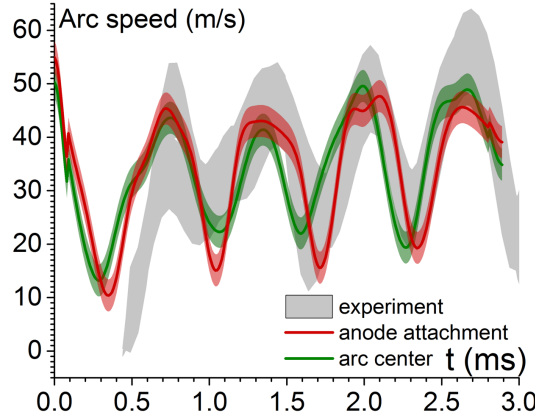
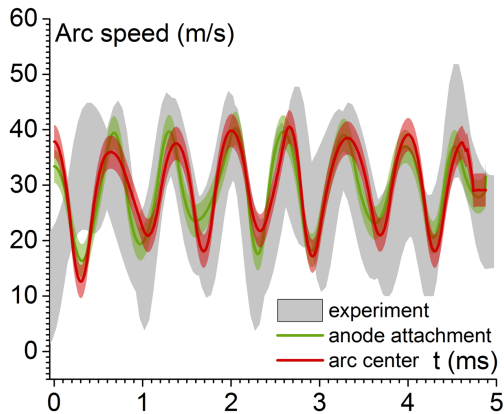
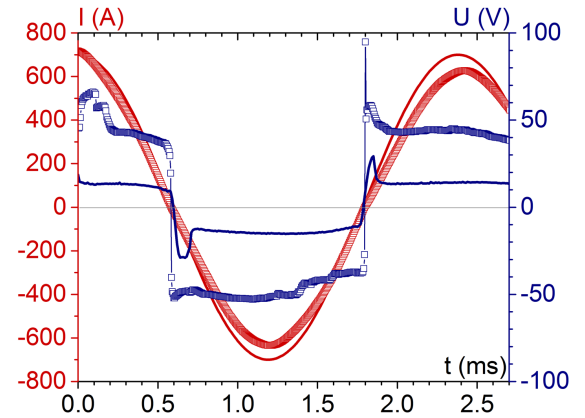
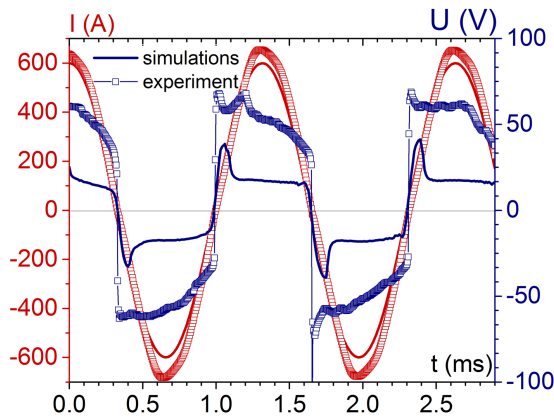
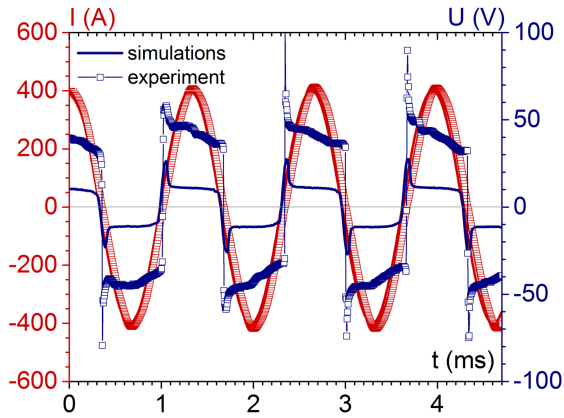
- Arc current,
- Inter-electrode gap,
- Gas pressure (0.1 – 1atm).



$I_{\max} = 600 \text{ A}$, 760 Hz , $h = 8 \text{ mm}$, $p = 1 \text{ atm}$.



AC Arc – Comparison with experiment

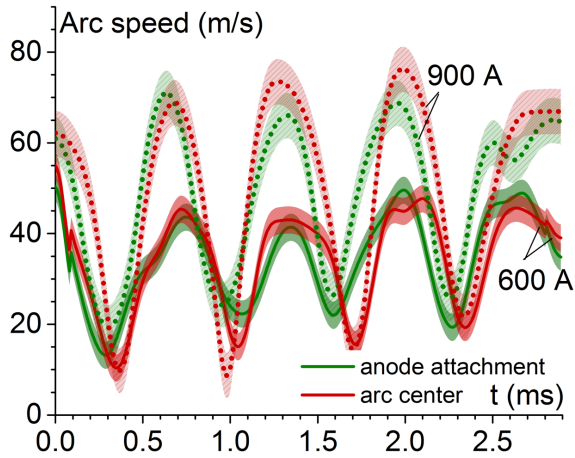


400 A, 760Hz, 5 mm

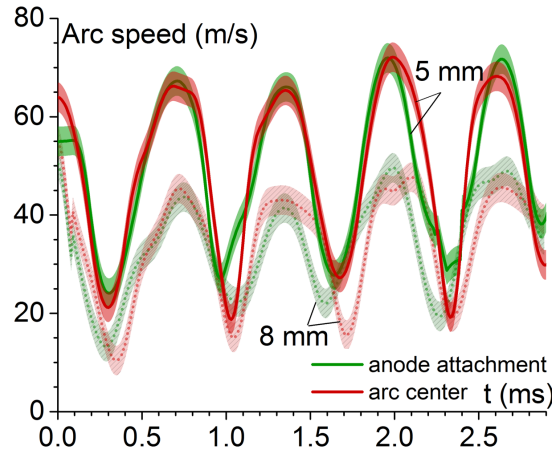
600 A, 760Hz, 8 mm

700 A, 420Hz, 5 mm

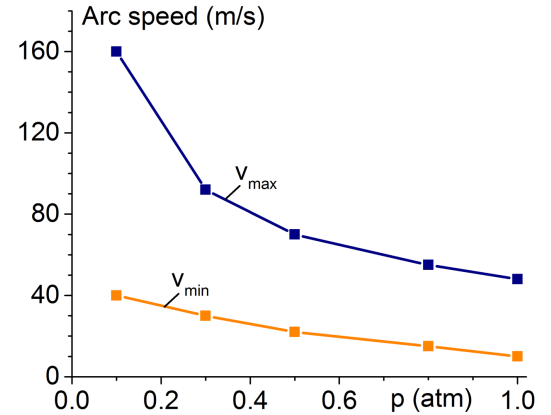
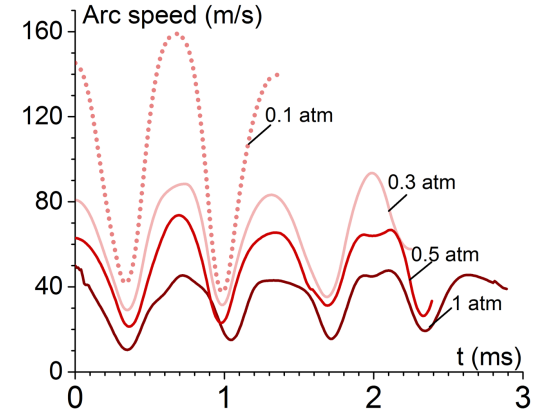
AC Arc – Influence of operating parameters



Impact of the current I_{max}
760Hz, $h = 8\text{mm}$, $p = 1\text{atm}$



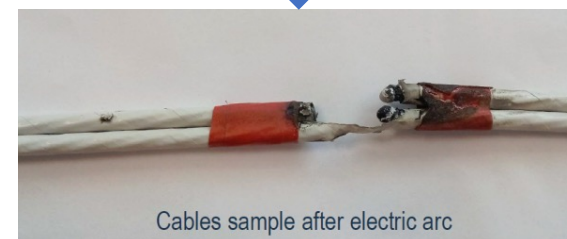
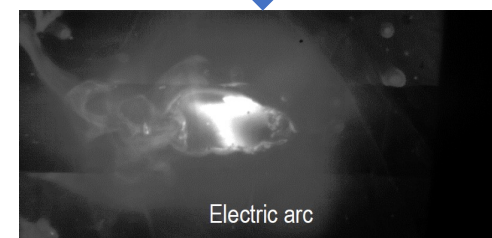
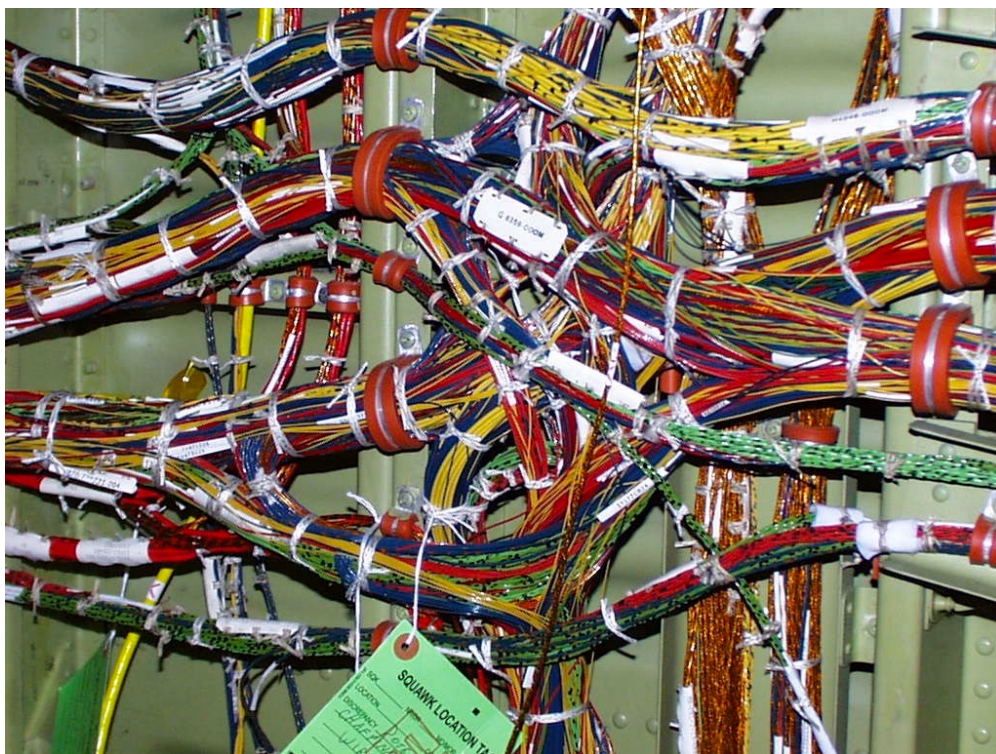
Impact of the gap
 $I = 600\text{A}$, 760Hz, $p = 1\text{atm}$



Impact of the pressure
 $I = 600\text{A}$, 760Hz, $h = 8\text{mm}$

- If arc current I_{max} \nearrow , the arc speed v_{arc} \nearrow
- If the gap h \searrow , the arc speed v_{arc} \nearrow
- If the gas pressure p \searrow , the arc speed v_{arc} \nearrow

Study of the mechanisms of propagation of electric arc fault between damaged wires



Ecole Technologique des Plasmas Froids
16^e Journées du Réseau – « Les procédés plasmas »
3-5 Octobre 2022 – Bonascre



L'ARC DE COUPURE & L'ARC DE DÉFAUT

Des questions ??

