

# Schémas et appareillage électriques : Connaissances recommandées

## Définitions fondamentales

### Installation électrique

Ensemble de matériels électriques mis en œuvre pour convertir, distribuer et utiliser l'énergie électrique.

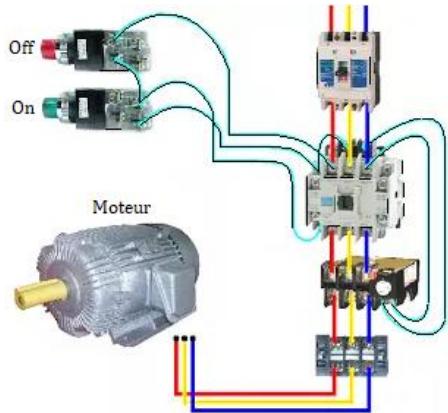


Figure 1 : Exemple d'installation alimentant un moteur.

### Matériel électrique

Matériel utilisant l'énergie électrique : machines, canalisations, appareils électriques ...



Figure 2 : Exemple de matériel électrique

### Appareillage électrique

Ensemble du matériel qui permet la connexion, la protection et la commande des circuits d'une installation électrique. Il s'agit des appareils de connexions, de protection, de commande et les accessoires qui leurs sont associés. Le tout est regroupé dans des armoires et des coffrets.



Figure 3 : Exemple d'appareillage électrique

### Schéma électrique

Dessin, par symboles graphiques, représentant les éléments d'une installation et les connexions fonctionnelles qui les relient.

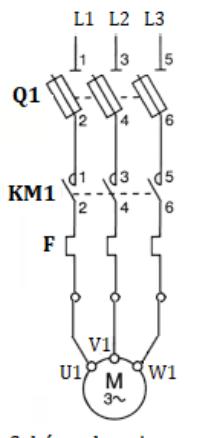


Schéma de puissance

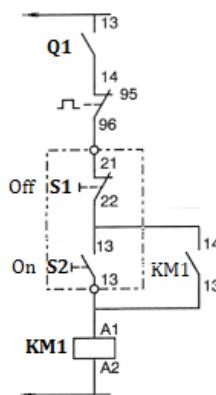


Schéma de commande

Figure 4 : Schémas de puissance et de commande du circuit précédent.

### Contact électrique

Deux éléments mécaniquement dissociables permettant le contrôle du passage des courants électriques dans un circuit. Un contact est caractérisé par sa résistance électrique et ses résistances à l'érosion et à l'oxydation. Afin de les optimiser, on utilise des surfaces de contact en alliages spéciaux (d'argent, de nickel, d'or, ...).

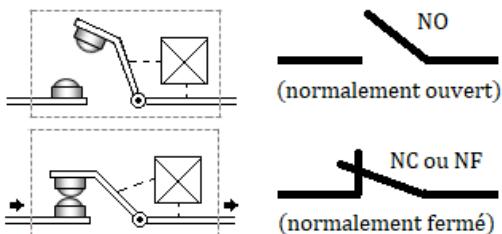
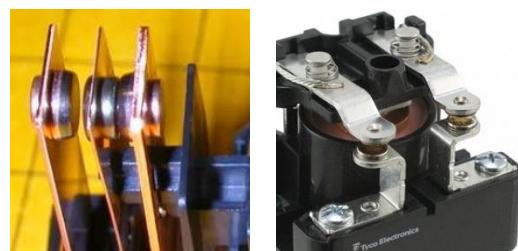
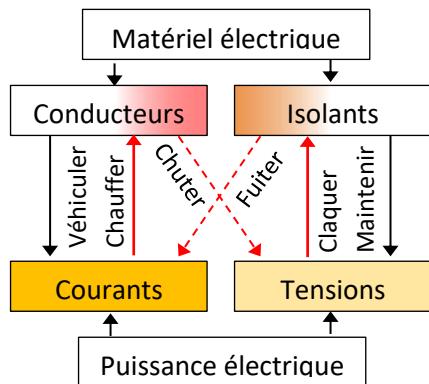


Figure 5 : Exemples de contacts simples et les symboles correspondants

## Notions fondamentales

La puissance électrique est le produit des grandeurs électriques tension×courant ( $U \times I$ ). Le matériel électrique est surtout composé de conducteurs et d'isolants.

Le matériel et la puissance interagissent selon le diagramme suivant :



## Grandeurs nominales

Tout matériel électrique est caractérisé par ses grandeurs nominales : tension nominale ( $U_n$ ), courant nominal ( $I_n$ ) ou puissance nominale ( $S_n = U_n \times I_n$ ). Elles indiquent les conditions à réunir pour avoir un fonctionnement normal.

## Surintensités et surtensions

Le fonctionnement d'un matériel dépend de la puissance ( $U \times I$ ) qu'il reçoit par rapport à sa puissance nominale ( $U_n \times I_n$ ). Il y a surintensité, si le courant reçu dépasse le courant nominal ( $I > I_n$ ), et il y a surtension si la tension reçue dépasse la tension nominale ( $U > U_n$ ).

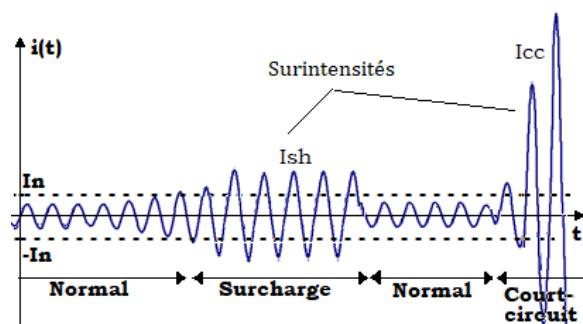


Figure 6 : Définition des surintensités ; surcharges et courts circuits

- La surcharge est due à une surexploitation d'un matériel d'une façon que le courant résultant dépasse sensiblement le courant nominal du matériel.

Les surcharges provoquent l'échauffement lent des conducteurs et par conséquence des isolants ce qui peut conduire à leurs dégradations voire leurs combustions.

- Le court-circuit est dû à un contact direct entre conducteurs de potentiels différents. Le courant résultant est très élevé et dépasse largement le courant nominal.

Les courts circuits provoquent un rapide échauffement des conducteurs pouvant les fondre ou incendier les isolants. De même des forces électrodynamiques pouvant déformer ou rompre les conducteurs.

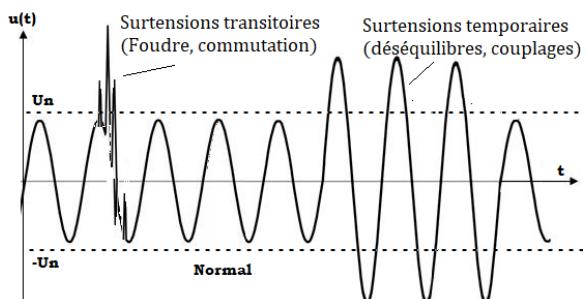


Figure 7 : Définition des surtensions

- Les surtensions transitoires sont dues aux commutations, démarrages et aux foudres. Caractérisées par des ondes à fronts rapides et de valeurs crêts très élevées.
- Les surtensions temporaires ou même permanentes sont dues aux déséquilibres et aux couplages de proximités. Leurs valeurs dépassent sensiblement la tension nominale.

Elles provoquent des échauffements, des décharges ou des claquages dans les isolants pouvant conduire à leurs dégradations voire même leurs carbonisations.

## Phénomènes fondamentaux

- Phénomènes dus aux courants électriques et se produisant dans les conducteurs.
- Phénomènes dus aux tensions électriques et se produisant dans les isolants.

## Phénomènes dus aux courants

Ils se produisent dans le métal du conducteur suite aux passages des courants.

- Echauffement des conducteurs
- Dilatation thermique
- Forces électromagnétiques

## Echauffement des conducteurs

Données nécessaires au conducteur :

- Résistance électrique  $R(\Omega)$
- Masse du conducteur  $m(\text{Kg})$
- Chaleur massique  $c (\text{J/Kg} \cdot ^\circ\text{C})$
- Résistance thermique  $R_{th} (^^\circ\text{C}/\text{W})$
- Température de fusion  $T_F (^^\circ\text{C})$
- Température ambiante  $T_a (^^\circ\text{C})$  ...

Lors du passage d'un courant  $I$ , l'énergie calorifique des pertes joule dans la résistance  $dW = R \cdot I^2 \cdot dt$  se partage en deux parties :

$$dW = R \cdot I^2 \cdot dt \rightarrow \left( \begin{array}{c} dW_d = \frac{T - T_a}{R_{th}} \cdot dt \\ dW_c = m \cdot c \cdot dT \end{array} \right)$$

1) une partie  $dW_c = m \cdot c \cdot dT$  reste dans le métal et entraîne l'augmentation de sa température  $dT$ .

2) une seconde partie  $dW_d = \frac{T - T_a}{R_{th}} \cdot dt$  est cédée au milieu extérieur à travers la surface.

L'énergie joule est alors la somme des deux parties :  $dW = dW_c + dW_d$  ou bien :

$$R \cdot I^2 \cdot dt = m \cdot c \cdot dT + \frac{T - T_a}{R_{th}} \cdot dt$$

C'est une équation différentielle 1<sup>ère</sup> ordre non homogène pour la température.

$$\frac{dT}{dt} + \frac{T - T_a}{m \cdot c \cdot R_{th}} = \frac{R \cdot I^2}{m \cdot c}$$

Avec les conditions initiales, la solution donne l'évolution temporelle  $T(t)$  de la température du conducteur suite au passage d'un courant  $I$ .

$$T(t) = R_{th} \cdot R \cdot I^2 \left( 1 - e^{-\frac{t}{m \cdot c \cdot R_{th}}} \right) + T_a$$

Dans la pratique des approximations linéaires à cette solution sont utilisées.

Aux premiers temps de passage du courant, toute l'énergie joule reste dans la masse du métal (1<sup>ère</sup> partie):  $R \cdot I^2 \cdot dt = m \cdot c \cdot dT$  ce qui donne la partie linéaire de la température du métal conducteur en fonction du temps:

$$T(t) = \frac{R \cdot I^2}{m \cdot c} \cdot t + T_a$$

Après certains temps, la masse du métal est totalement remplie d'énergie, sa température atteint une valeur limite ( $T_s$ ) d'équilibre stationnaire et cesse d'augmenter.

Toute l'énergie joule reçue est alors cédée à l'extérieur (2<sup>ème</sup> partie):  $R \cdot I^2 \cdot dt = \frac{T_s - T_a}{R_{th}} \cdot dt$  ce qui donne la valeur limite de la température stationnaire ( $T_s$ ).

$$T_s = R_{th} \cdot R \cdot I^2 + T_a$$

La superposition des deux parties donne la courbe pratique, de l'évolution temporelle de l'échauffement  $T(t)$  d'un conducteur suite au passage d'un courant  $I$ .

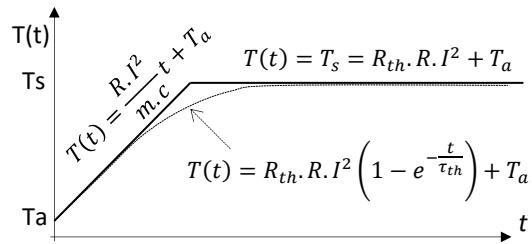


Figure 8 : Echauffements pratique (trait fort) et théorique (trait pointé) d'un conducteur portant un courant I

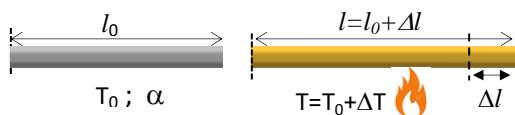
Les plus essentielles dans cette présentation sont les paramètres d'augmentation de la température ( $\alpha = \frac{R \cdot I^2}{m \cdot c}$ ) et de sa valeur limite d'équilibre stationnaire ( $T_s = R_{th} \cdot R \cdot I^2 + T_a$ ).

## Questions

- Quel est le courant minimal (de court-circuit) qui provoque la fusion d'un métal donné ? Evaluer alors le temps de fusion ?
- Si l'isolant d'un conducteur supporte une température maximale  $T_{max}$ . Evaluer le courant minimal (de surcharge) qui provoquent la détérioration de l'isolant ?
- Estimer alors le temps de détérioration de l'isolant ?

## Dilatation thermique des matériaux

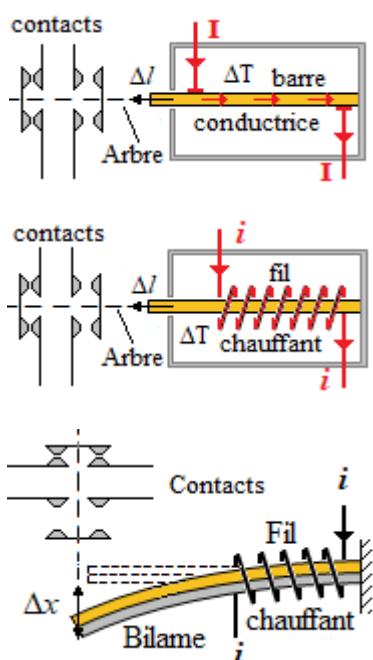
Tout métal, caractérisé par son coefficient de dilatation thermique  $\alpha$  ( $^{\circ}\text{C}^{-1}$ ), se dilate suite aux variations de sa température.



$$\Delta l / \Delta T = \alpha \cdot l_0 \Leftrightarrow \Delta l = \alpha \cdot l_0 \cdot \Delta T$$

Ce principe est exploité dans le domaine de l'appareillage pour concevoir des contacts de contrôle commandés par la température (relais thermiques, thermostats ...).

Le courant à contrôler chauffe, directement ou par le biais d'un fil résistant chauffant, une barre ou un bilame. L'augmentation de la température entraîne la dilatation de la barre ou la courbure du bilame.



La dilatation ou la courbure, due à la variation de la température provenant d'un courant, est utilisée, par un arbre, pour entraîner un ensemble de contacts.

## Questions

- On suppose un échauffement direct d'une barre. Pour un courant  $I$  supposé normal, quelle est la course de dilatation maximale qu'il peut provoquer dans une barre ? Cette course entraîne-t-elle le basculement des contacts ?
- Pour un courant de surcharge  $I_{sh}$ , quelle est la dilatation minimale qui doit provoquer le basculement des contacts ? Quel est la surcharge minimale correspondante ? Quel est le temps maximal de basculement ?

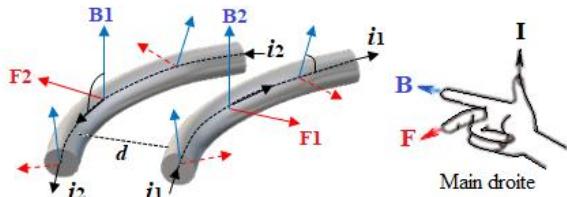
## Forces électromagnétiques

Il y a deux types de forces liées aux courants. La force de Laplace entre courants et champs magnétiques, et la force magnétique entre circuits magnétiques parcourus par des flux.

La force de Laplace est telle qu'un conducteur de courant  $i$ , placé dans un champ d'induction  $B$  (souvent provenant des courants dans d'autres conducteurs), est soumis à une force  $\mathbf{F}$  appelée de Laplace calculée à partir de :

$$d\vec{F} = i \cdot d\vec{l} \times \vec{B} \Leftrightarrow df = i \cdot dl \cdot B \cdot \sin \theta$$

La force totale est alors :  $F = \int i \cdot B \cdot \sin \theta \cdot dl$



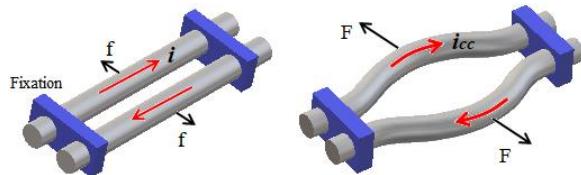
Lorsque les conducteurs sont parallèles et de mêmes longueurs, cette force est maximale :

$$F_1 = F_2 = \left( \frac{\mu \cdot l}{2\pi \cdot d} \right) \cdot i_1 \cdot i_2 = k \cdot i_1 \cdot i_2$$

Elle est attractive lorsque les courants ont le même sens et répulsive si ils sont opposés.

Lors de surintensités élevées (courts circuits) ces forces deviennent très importantes et

provoquent des déformations ou des ruptures dans les conducteurs et leurs fixations.



Dans le domaine de l'appareillage, ces forces sont utilisées pour réaliser des contacts auto-répulsifs limiteurs de courants. Dès qu'un courant passant par le contact atteint une valeur suffisante, la force développée entre parties parallèles du contact éjecte l'élément mobile en créant un arc électrique.

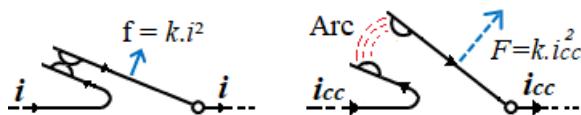
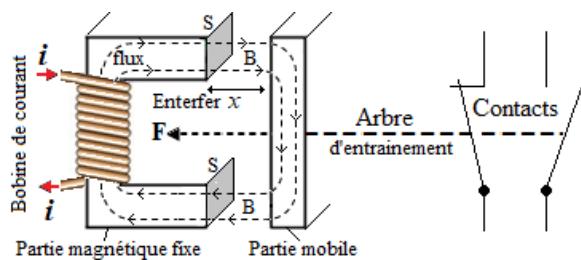


Figure 9 : Contacts auto-répulsifs limiteurs de courants.

La force électromagnétique est telle qu'une bobine de courant crée un flux canalisé dans un circuit magnétique ayant un entrefer et une partie libre. La partie libre se trouve soumise à une force **F** toujours d'attraction vers la source de l'induction (partie fixe du circuit magnétique).



La force d'attraction est donnée en fonction de l'induction dans l'entrefer :

$$F = \frac{S \cdot B^2}{2\mu_0}$$

L'induction magnétique **B** dans l'entrefer est fonction du courant dans la bobine  $B = f(i)$ .

Dans le domaine de l'appareillage, ces forces électromagnétiques sont utilisées pour concevoir des dispositifs électroaimants pour commander des contacts (relais magnétique, contacteurs, interrupteurs, électrovannes...).

## Questions

Une bobine ayant **N** spires autour d'un circuit magnétique ayant une section constante, une perméabilité élevée et un entrefer initiale **e**.

Comment varie le courant, l'induction et la force d'attraction magnétique en fonction du déplacement de la pièce mobile si l'alimentation de la bobine est :

- en tension continue ?
- en tension alternative ?

## Phénomènes dus à la tension

Ils se produisent dans les isolants entre conducteurs suite à l'application des tensions.

- Echauffement des isolants
- Décharges électriques et claquages

**Un isolant/diélectrique** : matériau, de très faible conductance électrique **g**, destiné à empêcher la conduction entre conducteurs portés à de potentiels différents.

**Dégénération d'un isolant** : diminutions irréversibles des propriétés isolantes.

**Décharge électrique** : un canal conducteur de courant se formant, sous certaines conditions, à travers un isolant entre deux conducteurs.

**Rigidité diélectrique** : champ électrique maximal que peut supporter un isolant avant que se produise une décharge disruptive (claquage).

## Echauffement

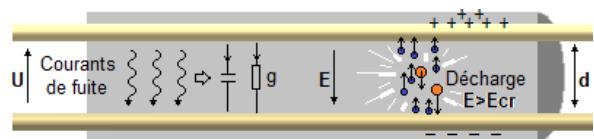


Figure 10 : Câble isolé par un isolant de masse **m**, de capacité calorifique **c** de conductance **g** et de rigidité **Ecr**

Un système de deux conducteurs isolé par un isolant d'épaisseur **d**, de faible conductance **g**, la tension appliquée est  $U = V_1 - V_2$ .

L'énergie calorifique, provenant des fuites de courants dans la conductance **g** de l'isolant dus à l'application de la tension **U**, est :

$$\Delta W = g \cdot U^2 \cdot \Delta t$$

Cette énergie entraîne l'augmentation de la température de l'isolant selon:  $\Delta W \approx m \cdot c \cdot \Delta T$   
ce qui donne:  $\frac{\Delta T}{\Delta t} \approx \frac{g \cdot U^2}{m \cdot c}$

La température de l'isolant augmente comme le carré de la tension appliquée.

On note que cet échauffement de l'isolant dû à la tension s'ajoute à l'échauffement provenant des courants dans les conducteurs.

### Décharges électriques

Une émission de charges ( $\pm$ ), à travers un isolant, provoquée par un apport d'énergie.

Lorsque la tension appliquée  $U$  croît, le champ électrique entre conducteur  $E \approx \frac{U}{d}$  augmente jusqu'au-delà du champ critique de l'isolant  $E_{cr}$  (rigidité)  $E > E_{cr}$ . L'énergie apportée est alors capable d'initier le phénomène d'ionisation de l'isolant : émissions, accélérations, collisions et multiplications de charges (avalanche). L'isolant perd sa rigidité et devient conducteur. C'est le claquage de l'isolant par décharges partielles.

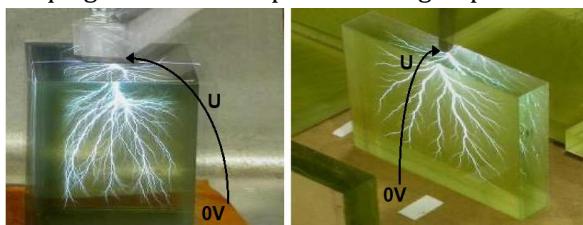
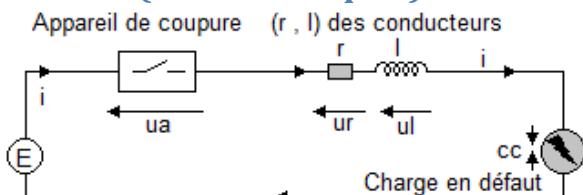


Figure 11 : images montrant le claquage dans le plexiglas.  
Le claquage dépend de la forme des conducteurs, de la distribution du champ  $E$ , et d'autres facteurs.

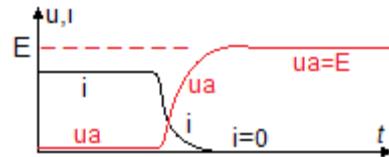
### Phénomènes d'interruption du courant (Arcs électriques).



$$E = u_a + u_r + u_l = u_a + r \cdot i + l \cdot \frac{di}{dt}$$

Lorsque l'appareil de coupure est fermé, sa tension est très faible  $u_a \approx 0$  (bon contact). Si l'appareil s'ouvre, le courant s'annule certainement s'il décroît constamment  $\frac{di}{dt} < 0$  jusqu'à s'annuler.

$$E - u_a - r \cdot i = l \cdot \frac{di}{dt} < 0 \Leftrightarrow E - r \cdot i < u_a$$

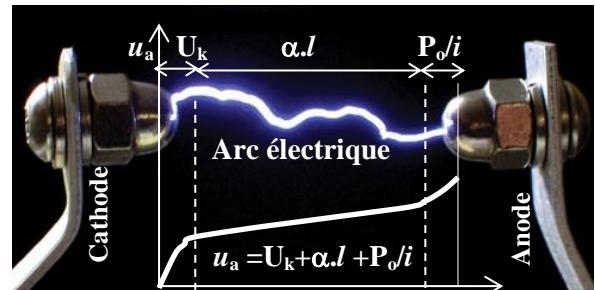
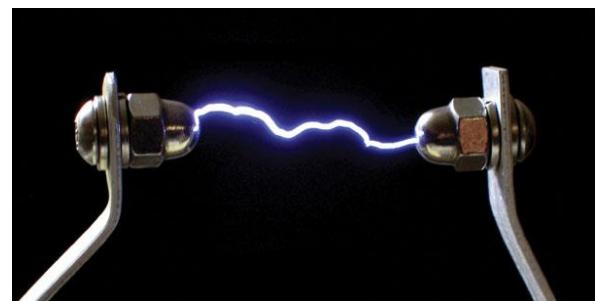


Donc la condition pour que le courant d'arc s'éteint (extinction de l'arc) est :

$$u_a > E - r \cdot i$$

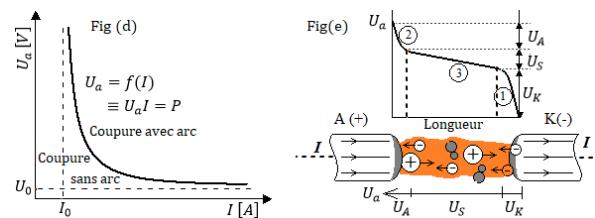
Si la résistance du circuit est négligeable, cette condition devient :

$$u_a > E$$



### Tension d'arc

La caractéristique statique d'arc  $U = f(I)$  est donnée sur la figure de gauche. Tandis que la figure de droite donne la tension d'arc en fonction des paramètres de contacts (formule empirique de Herta Ayrton) :



$$U_a = U_K + U_S + U_A = u_K + \alpha \cdot l + P_o / I$$

- $U_a$  : Tension d'arc
- $U_k$  : composante constante dépendant seulement de la nature de la cathode.
- $U_s$  : composante proportionnelle avec la longueur de l'arc
- $U_A$  : composante liée à la puissance de refroidissement.

Pour éteindre un arc électrique, il faut augmenter sa tension jusqu'à dépasser la tension du circuit (de la source). Ceci peut se faire par plusieurs techniques

- Fractionnement d'arc: multiplier les cathodes revient à multiplier la composante  $U_k$ .
- Allonger l'arc: c'est augmenter sa longueur par des techniques naturelles ou forcées
- Souffler l'arc: c'est augmenter sa puissance de refroidissement (augmenter la composante  $U_A$ )

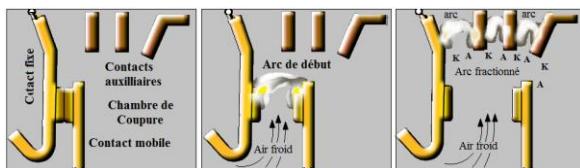


Figure 12 : Fractionnement & allongement

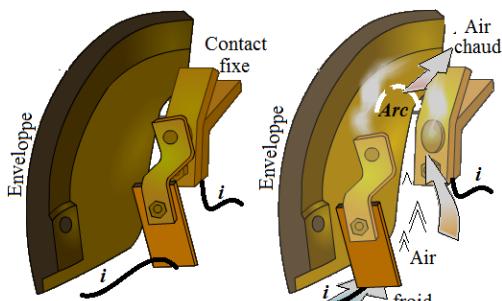


Figure 13 : Soufflage naturel & allongement

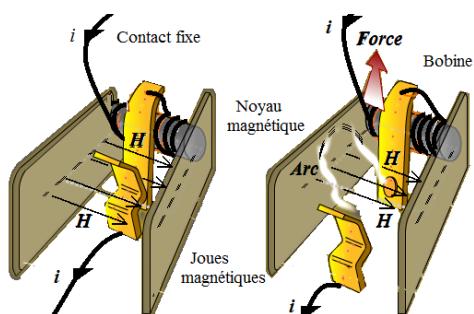


Figure 14 : Soufflage magnétique & allongement

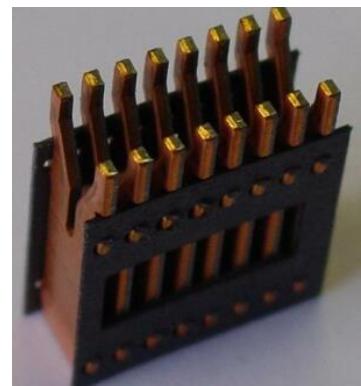


Figure 15 : Chambre de coupure & de fractionnement

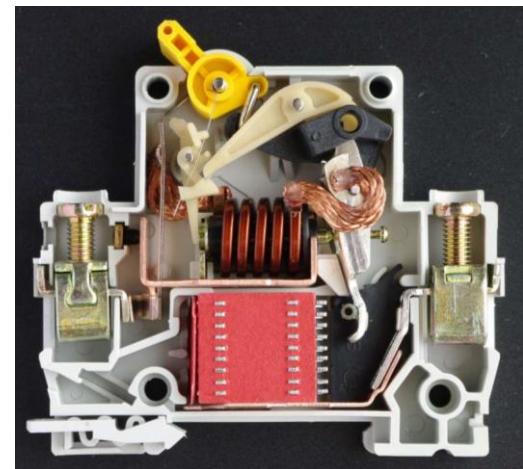


Figure 16 : Disjoncteur magnétothermiques montrant les déclencheurs thermique et magnétiques, les contacts fixe et mobile, ainsi que la chambre de coupure.