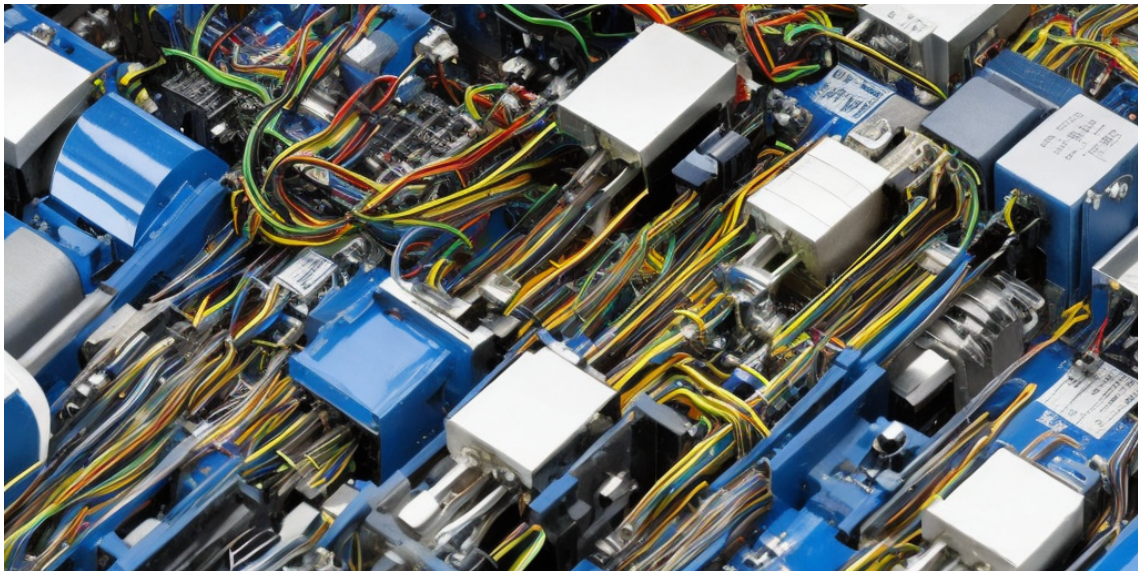


# Ingénierie des systèmes cyber-physiques

R1.10 - Electricité - Electrotechnique  
Partie 1 : Bases du régime continu

## Support de cours

Thomas Fromentèze





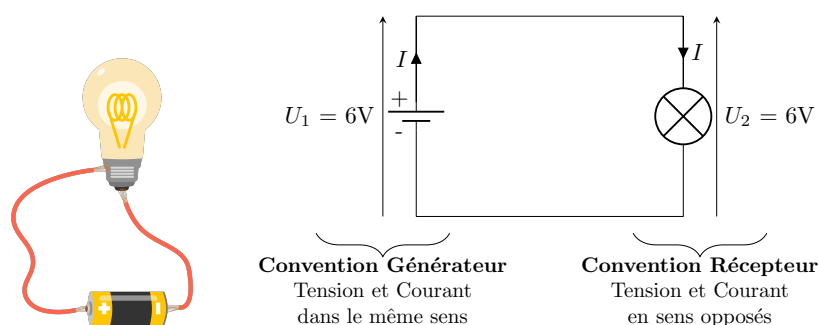
## Introduction

Pour la première partie de ce premier semestre, l'ensemble des circuits étudiés fonctionnent en **régime continu**. Cela signifie que nous utiliserons des appareils d'alimentation en tension dont le niveau ne varie pas en fonction du temps. Toutes les analyses seront réalisées seulement après l'installation d'un **régime permanent**, qui pour la plupart des montages apparaît très rapidement. L'objectif de ce cours est de se familiariser avec les notions de bases de l'électricité, d'intégrer des règles de sécurité élémentaires et d'apprendre à calculer puis à mesurer la valeur de grandeurs électriques dans différents montages.

## 1 Grandeurs électriques et conventions

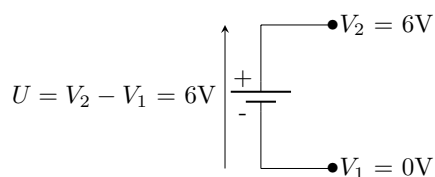
### 1.1 Introduction aux circuits électriques

L'étude d'un circuit basique permet de définir les différentes grandeurs électriques rencontrées en régime continu. Une pile est branchée sur les deux bornes d'une ampoule.



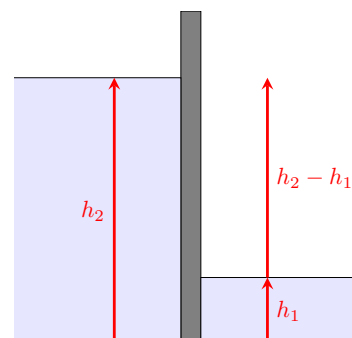
La tension de la pile, appelée aussi **différence de potentiels**, est ici de 6V (volt). Son application aux bornes de notre **dipôle récepteur** permet de former une **maille** dans laquelle circule un courant électrique  $I$ , dont l'intensité est mesurée en ampère (noté A). On définit avec plus de détails et de précisions ces différentes grandeurs dans les sections suivantes. Enfin, un **dipôle** correspond à un circuit électrique possédant deux bornes, tel qu'un générateur ou une résistance.

### 1.2 Différence de potentiels



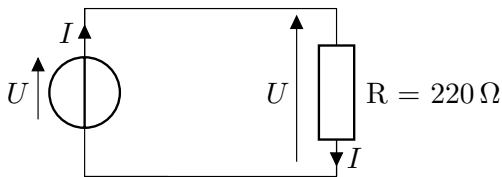
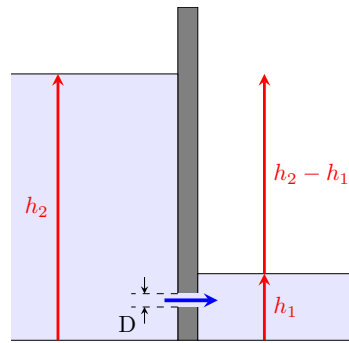
Chaque point d'un circuit peut être associé à une **énergie potentielle électrique** (aussi appelée plus simplement un **potentiel électrique**) noté  $V$  et exprimée en volt. La tension  $U$  mesurée aux bornes d'un dipôle correspond en réalité à une différence de potentiels électriques  $U = V_2 - V_1$ . Celle-ci peut être mesurée même si le circuit est ouvert et qu'aucun courant ne circule.

Pour mieux cerner la physique associée à ces notions, une analogie mécanique peut être proposée en analysant un barrage hydraulique. Ce barrage est bordé par deux niveaux d'eau  $h_1$  et  $h_2$  associés à des énergies potentielles de pesanteur  $E_p = mgh$ . Il existe une différence d'énergie potentielle  $\Delta E = mg(h_2 - h_1)$  dépendant de la différence de niveau  $h_2 - h_1$  même si aucun courant ne circule d'un côté vers l'autre. De façon intuitive, plus la différence d'énergie potentielle est grande et plus le travail mécanique que l'on peut en extraire est important.



### 1.3 Courant électrique et loi d'Ohm

Pour comprendre comment et à quelles conditions circule un courant électrique, nous pouvons utiliser à nouveau l'analogie du barrage. Si un trou de diamètre  $D$  est percé à travers celui-ci, la différence de hauteurs entre les deux niveaux va permettre la circulation d'un courant. L'intensité du courant dépend directement de la différence d'énergie potentielle de pesanteur et du diamètre du trou. On se place premièrement dans un contexte où les niveaux d'eau ne varient pas de chaque côté du barrage malgré la circulation du courant. Par analogie électrique, c'est le rôle d'un générateur régulé en tension représenté dans le schéma suivant.



L'analogie électrique du schéma précédent correspond à la connexion d'un **générateur de tension continue** à une **résistance**, dont la valeur est exprimée en Ohm, noté  $\Omega$ . Le générateur délivre une différence de potentiels  $U$  qui permet la circulation d'un courant  $I$  en fonction de la valeur de la résistance  $R$ .

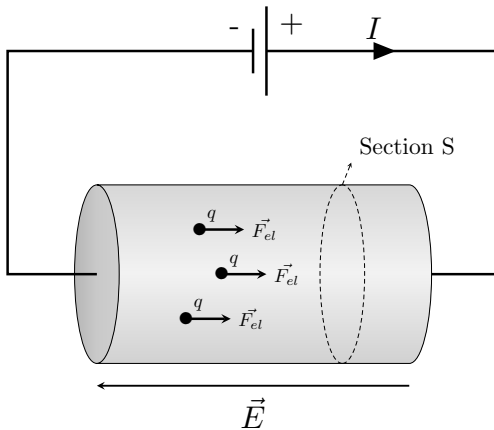
Grâce à l'analogie du barrage, on comprend que :

- Plus la résistance  $R$  est grande et plus le courant  $I$  traversant la maille est faible.
- Pour une résistance  $R$  constante, le courant  $I$  augmente si la tension  $U$  augmente.

Il existe en réalité une relation de proportionnalité entre ces trois grandeurs, déterminée par la **loi d'Ohm** :

$$U = RI$$

**Remarque :** Cette relation est valable si le courant traversant le dipôle et la tension à ses bornes sont de sens opposés. Dans le cas contraire, la relation s'écrit :  $U = -RI$ .



Le courant électrique correspond généralement à un déplacement d'un ensemble de **charges électriques**  $q$  appelées **électrons**, qui par convention sont négatives  $q = -e \approx -1,6 \cdot 10^{-19} \text{C}$  (Coulomb). L'application d'une différence de potentiels sur un matériau conducteur permet de créer un **champ électrique**  $\vec{E}$  qui met en mouvement les électrons par une **force électrique**  $\vec{F}_{el}$  :

$$\vec{F}_{el} = q\vec{E} = -e\vec{E}$$

Sous l'action de cette force orientée dans la sens opposé au champ électrique, les électrons (charges négatives) sont attirés par la borne positive. La circulation des électrons s'effectue donc

dans le sens opposé de la convention choisie pour le courant électrique.

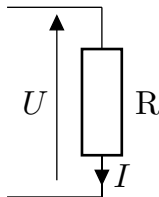
En régime continu, le courant électrique est finalement défini par le nombre de charges traversant la surface d'un conducteur par unité de temps :

$$I = \frac{\Delta Q}{\Delta t} = \frac{\text{Nombre d'électrons traversant la section S}}{\text{Intervalle de temps}}$$

## 1.4 Puissance électrique

La puissance électrique en régime continu, dont l'unité est le Watt (W), est définie par le produit entre la tension  $U$  aux bornes d'un dipôle et le courant  $I$  le traversant :

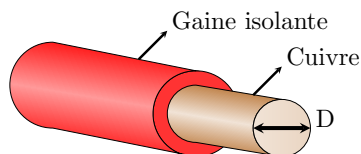
$$P = UI$$



Dans le cas d'une résistance, nous avons vu qu'il existe une relation entre la différence de potentiels à ses bornes  $U$  et le courant électrique  $I$  la parcourant. La puissance dissipée par une résistance peut alors s'exprimer en fonction de sa valeur en utilisant la loi d'Ohm  $U = RI$ . On parle alors de **puissance dissipée par effet Joule** :

$$P = RI^2 = \frac{U^2}{R}$$

Cette propriété se traduit par une production d'énergie thermique qui correspond à l'interaction des charges électriques en mouvement avec les atomes du matériau conducteur qui résistent à leur déplacement. On utilise ce phénomène dans de nombreux domaines pour produire de la chaleur à l'aide de résistances électriques (radiateurs, appareils électroménagers ...). Malheureusement, l'effet Joule est aussi un phénomène particulièrement limitant en électricité et en électronique, notamment lorsque l'on essaie de miniaturiser les circuits ou lorsque de grosses puissances électriques sont impliquées.



Pour cette raison, les fils électriques doivent être choisis en fonction de chaque application. Leur résistance est calculée de la façon suivante :

$$R = \frac{\rho L}{S}$$

- $\rho$  correspond à la résistivité du métal conducteur, exprimée en  $\Omega \cdot m$
- $L$  est la longueur du fil conducteur, en m.
- $S$  est sa section, en  $m^2$ .

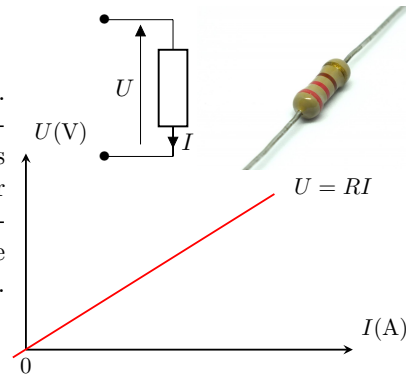
**Exercice** : Les fils standards utilisés en électricité de puissance peuvent présenter un diamètre  $D = 1.78\text{mm}$  et sont fabriqués avec un coeur conducteur en cuivre de résistivité  $\rho_{\text{cuivre}} = 1.7 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$ . Prouvez que pour une longueur de 100m, la résistance totale du fil est  $R \approx 0.67\Omega$ .

## 1.5 Caractéristiques tension-courant des composants

Pour mieux comprendre le comportement électrique de certains dipôles, il est utile de travailler à l'aide de leurs caractéristiques tension-courant  $U = f(I)$ .

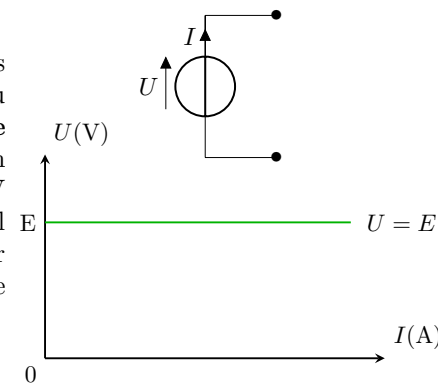
### 1.5.1 Résistance

Le cas le plus simple correspond à celui de la résistance. Nous avons vu avec la loi d'Ohm qu'il existe une relation de proportionnalité entre la différence de potentiels à ses bornes et le courant la traversant, traduite par l'équation  $U = RI$ . Cette relation se traduit graphiquement par une droite passant par l'origine et dont la pente est directement déterminée par la valeur de la résistance.



### 1.5.2 Générateur de tension idéal

Un générateur idéal délivre une tension constante à ses bornes quel que soit le courant fourni à l'ensemble du circuit. Cette tension à vide s'appelle aussi la **force électromotrice**. La plupart des générateurs de tension délivrent des valeurs constantes (par exemple,  $E=19V$  pour certaines alimentations d'ordinateurs portables). Il existe aussi des générateurs réglables (par exemple sur toute la plage 0-30V) qui ont par contre le désavantage d'être plus onéreux et volumineux.

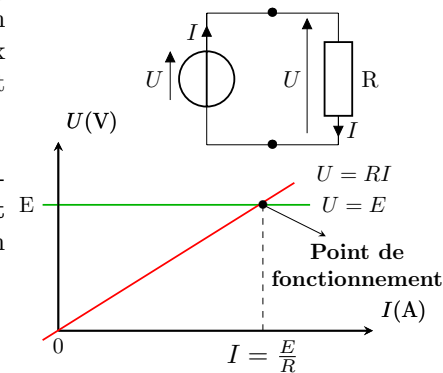


### 1.5.3 Association de deux composants et point de fonctionnement

Pour comprendre l'utilité de ces deux caractéristiques, nous connectons à nouveau une résistance à un générateur de tension. L'intersection entre les deux droites correspond à l'unique point de fonctionnement possible du circuit.

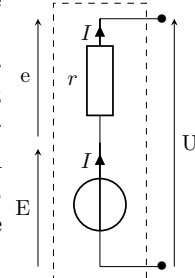
Une telle approche permet de déterminer pour une tension  $E$  délivrée par le générateur l'**intensité du courant** circulant dans la maille. Au point de fonctionnement, on détermine sa valeur :

$$E = RI \rightarrow I = \frac{E}{R}$$



### 1.5.4 Générateur de tension avec résistance interne

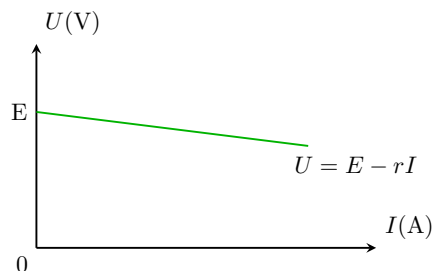
Dans le cas d'un générateur idéal, nous avons vu que la tension délivrée était absolument constante quel que soit le courant fourni au circuit. En pratique, cette caractéristique peut-être difficile à assurer, **notamment lorsque les courants délivrés sont importants**. En reprenant l'analogie du barrage, ce phénomène est lié à la difficulté de maintenir une différence constante entre les deux niveaux d'eau  $h_2 - h_1$  lorsqu'un courant important est créé entre les deux côtés. Ce principe est lié dans un générateur à la présence d'une **résistance interne**  $r$  qui absorbe une fraction de la tension générée.



Graphiquement, la tension  $U$  délivrée par le générateur correspond à la somme de la **tension à vide**  $E$  et de la tension  $e$  induite sur sa résistance interne  $r$ . En développant cette expression à l'aide de la loi d'Ohm, on obtient alors :

$$U = E + e$$

$$U = E - rI$$

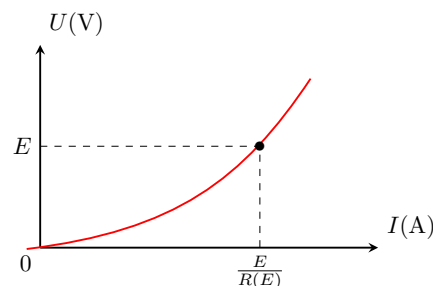


On remarque alors que plus le courant est important et plus la tension disponible aux bornes du générateur diminue. La pente de la droite dépend directement de la valeur  $r$  de la résistance interne du générateur, que l'on souhaite aussi faible que possible. La tension aux bornes de la résistance interne du générateur vaut  $e = -rI$  parce que le courant qui la traverse est orientée dans le même sens que la tension à ses bornes.

### 1.5.5 Composants non-linéaires

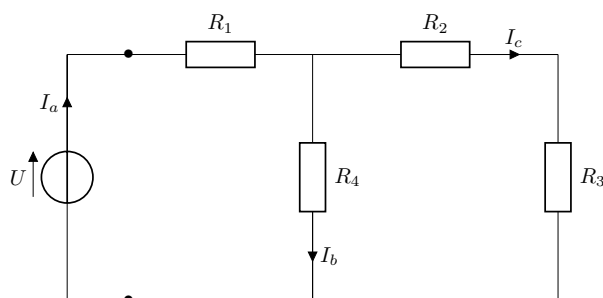
En régime continu, certains composants peuvent présenter des caractéristiques non-linéaires.

À titre d'exemple, voici la caractéristique d'une lampe à incandescence (ampoule à filament). Physiquement, plus la tension aux bornes de la lampe est importante et plus elle chauffe. De façon générale, les matériaux deviennent de moins bons conducteurs lorsque leur température augmente. On définit alors pour chaque valeur de tension d'alimentation  $E$  une résistance équivalente  $R(E)$ . Pour prédire le comportement de ce type de composant, il faut soit passer par une analyse graphique, soit extraire une équation compatible avec le comportement courant-tension du dipôle.



## 2 Analyse d'un circuit électrique

Nous avons découvert le fonctionnement des composants dans la section précédente. Une analyse graphique permet de prédire le fonctionnement de circuit très simple composé d'une source et d'un unique récepteur. Nous devons développer des outils analytiques plus performants pour l'étude de circuits un peu plus complexes :

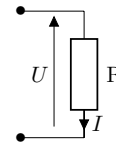


## 2.1 Trois lois fondamentales du régime continu

Ces trois lois sont à connaître par cœur et permettent l'étude de tous les circuits fonctionnant en régime continu. Leur application permet de déterminer la différence de potentiels appliquées aux bornes de tous les dipôles d'un circuit et de déterminer les courants les traversant.

### 2.1.1 Loi d'Ohm

Cette loi a déjà été présentée dans une section précédente. Elle donne le courant traversant une résistance en fonction de la tension appliquée à ses bornes. Lorsque l'on travaille sur un point de fonctionnement fixe, tous les dipôles récepteurs peuvent être remplacés par des résistances équivalentes.



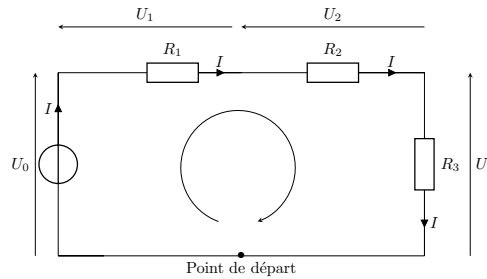
$$U = RI$$

### 2.1.2 Loi des mailles

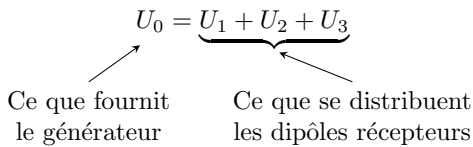
Il s'agit d'une des deux lois de Kirchoff, basées sur le principe de conservation d'énergie. Dans une maille, la somme algébrique des tensions donne toujours zéro. Dans l'exemple donné ici, en partant d'un point de départ quelconque dans la maille, on somme les tensions en prenant en compte la direction de leur flèches. On obtient :

$$U_0 - U_1 - U_2 - U_3 = 0$$

En réarrangeant cette équation, on peut aussi présenter la loi des mailles de la façon suivante :



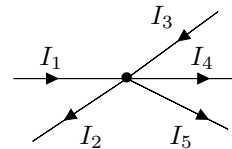
$$\sum_k U_k = 0 \text{ dans une maille}$$



### 2.1.3 Loi des nœuds

Il s'agit d'une des deux lois de Kirchoff, basées sur le principe de conservation d'énergie. La somme des courants électriques entrants dans un nœud est égale à celle des courants sortants. Dans l'exemple ci-contre, la loi des nœuds permet de déterminer la relation suivante :

$$I_1 + I_3 = I_2 + I_4 + I_5$$



$$\sum I_{\text{entrant}} = \sum I_{\text{sortant}} \text{ dans un nœud}$$

## 2.2 Associations de résistances

Pour l'étude de circuits complexes, il est souvent possible de grouper des résistances afin de simplifier les calculs.



### 2.2.1 Montage en série

On analyse premièrement un circuit présentant deux résistances **montées en série**. Par applications des lois énoncées précédemment, on trouve dans ce circuit :

$$U_1 = R_1 I \quad (\text{Loi d'Ohm}) \quad (1)$$

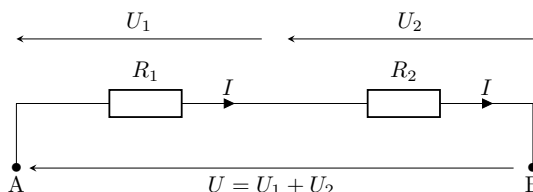
$$U_2 = R_2 I \quad (\text{Loi d'Ohm}) \quad (2)$$

$$U = U_1 + U_2 \quad (\text{Loi des mailles}) \quad (3)$$

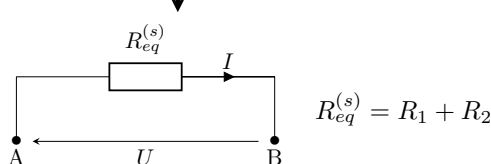
En insérant les équations (1) et (2) dans (3), on obtient :

$$U = (R_1 + R_2)I = R_{eq}^{(s)} I \quad (4)$$

On identifie ici une relation entre la tension appliquée entre les bornes A et B et le courant les traversant. Tout se passe comme si le circuit n'était en fait composé que d'une unique résistance  $R_{eq}^{(s)} = R_1 + R_2$ .



↓ Circuit équivalent

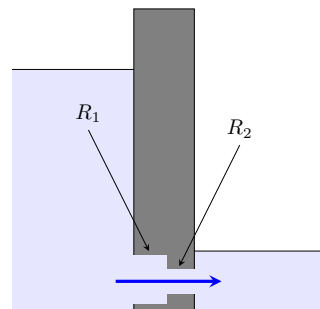


De façon générale, pour un circuit composé de  $N$  résistances montées en série ( $R_1, R_2, \dots, R_N$ ), l'expression de la résistance équivalente est :

$$R_{eq}^{(s)} = \sum_k R_k$$

#### Analogie hydraulique

Le principe du barrage hydraulique est à nouveau utilisé pour illustrer l'association de résistances en série. Dans cette expérience, tout le courant ne passe que par une unique ouverture constituée de différents diamètres représentant différentes résistances à l'écoulement du fluide. Cette analogie permet d'illustrer le fait que c'est la section de plus faible de diamètre (la plus grande résistance) qui limite principalement la circulation totale du courant dans un montage en série.



### 2.2.2 Montage en parallèle

Un deuxième type de montage couramment rencontré est le **montage en parallèle**, aussi appelé **montage en dérivation**. On commence par analyser le cas de deux résistances montées en parallèle. On obtient les équations suivantes dans ce circuit :

$$U = R_1 I_1 \quad \text{Loi d'Ohm} \quad (1)$$

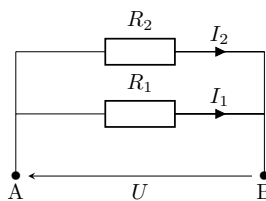
$$U = R_2 I_2 \quad \text{Loi d'Ohm} \quad (2)$$

$$I = I_1 + I_2 \quad \text{Loi des nœuds} \quad (3)$$

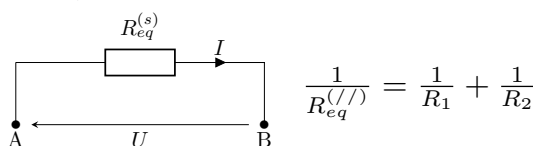
En insérant les équations (1) et (2) dans (3), on obtient :

$$I = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2} \quad (4)$$

$$I = U \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \quad (5)$$



↓ Circuit équivalent



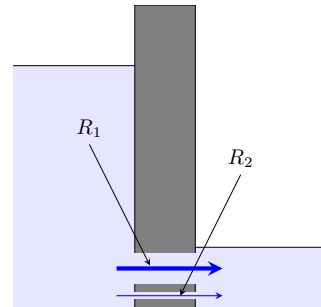
Par identification avec la loi d'Ohm  $I = U/R$ , tout se passe comme si le circuit pouvait être simplifié en remplaçant les résistances montées en parallèle par une résistance équivalente unique  $R_{eq}^{(//)} = \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right)^{-1} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$ .

De façon générale, pour un circuit composé de N résistances montées en parallèle ( $R_1, R_2, \dots, R_N$ ), l'expression de la résistance équivalente est :

$$\frac{1}{R_{eq}^{(//)}} = \sum_k \frac{1}{R_k}$$

### Analogie hydraulique

Pour cette nouvelle analogie, les trous sont placés en parallèle à travers le barrage et présentent des diamètres différents. La majorité du courant va nécessairement passer par les sections les plus importantes (les résistances les plus faibles).



## 2.3 Pont diviseur de tension

Parmi les outils d'analyse des circuits électriques, le pont diviseur de tension est particulièrement utile pour réaliser un abaissement ou une élévation de tension.

Dans cet exemple, un générateur délivre une tension  $E$  à deux résistances  $R_1$  et  $R_2$  montées en série et présentant des différences de potentielle  $U_1$  et  $U_2$  à leurs bornes.

**L'objectif est de donner une relation entre la tension  $E$  fournie à l'entrée du circuit et la tension  $U_2$  qui pourrait être délivrée à un composant.**

D'après la loi des mailles :

$$E = U_1 + U_2 \tag{1}$$

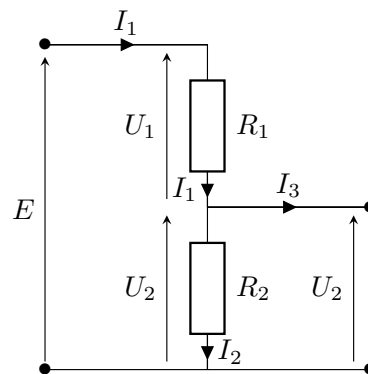
D'après la loi d'Ohm, les tensions aux bornes des résistances prennent la forme suivante :

$$U_1 = R_1 I_1 \tag{2}$$

$$U_2 = R_2 I_2 \tag{3}$$

Enfin, d'après la loi des nœuds :

$$I_1 = I_2 + I_3 \tag{4}$$



Aucun composant n'est connecté sur la branche délivrant le courant  $I_3$ , celui-ci est donc nul ( $I_3 = 0A$ ). Dans ces conditions, on peut simplifier l'équation (4) et définir un courant unique  $I$  traversant tout le circuit :

$$I_1 = I_2 = I$$

Finalement, on peut ré-écrire la loi des mailles en s'aidant de l'ensemble des relations :

$$E = R_1 I_1 + R_2 I_2 \quad (5)$$

$$= R_1 I + R_2 I \quad (6)$$

$$= (R_1 + R_2) I \quad (7)$$

On isole à partir de cette dernière équation l'expression du courant  $I$  :

$$I = \frac{E}{R_1 + R_2} \quad (8)$$

$$U_2 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} E$$

On peut enfin injecter cette expression dans l'équation (3) :

$$U_2 = R_2 I_2 \quad (9)$$

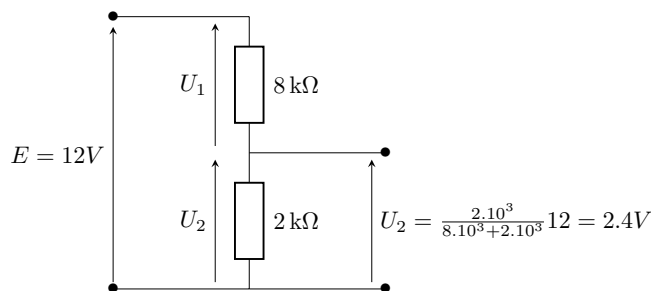
$$= R_2 I \quad (10)$$

$$U_2 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} E \quad (11)$$

On trouve finalement une expression déterminant la tension de sortie du pont diviseur en fonction de la tension d'entrée et des valeurs des résistances choisies.

#### Exemple d'utilisation pratique :

On dispose d'une batterie délivrant une tension  $E = 12V$  que l'on souhaite utiliser pour alimenter un moteur à courant continu tolérant une tension d'entrée comprise entre 2V et 3V seulement. Pour ne pas endommager le moteur, on réalise un circuit abaisseur de tension à l'aide de résistances  $R_1 = 8k\Omega$  et  $R_2 = 2k\Omega$  :



Le rapport de valeur des résistances nous permet de ne récupérer qu'une fraction de la tension d'entrée.

#### Exercices :

- Proposer un montage permettant de diviser une tension par 2.
- Proposer un montage permettant de multiplier une tension d'entrée par un facteur 1,5.

**Pour aller plus loin :** Le pont diviseur a l'avantage de permettre de transformer une tension continue facilement mais dissipe de l'énergie continuellement. Des solutions alternatives notamment basées sur le principe d'alimentation à découpage (Buck, Boost, Push-Pull ...) présentent de biens meilleurs rendements mais sont hors du programme de première année de BUT GMP.

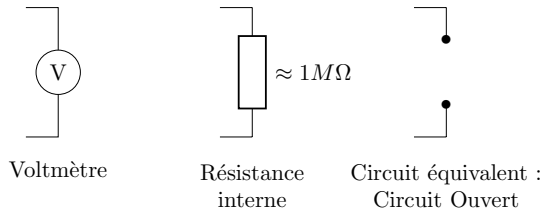
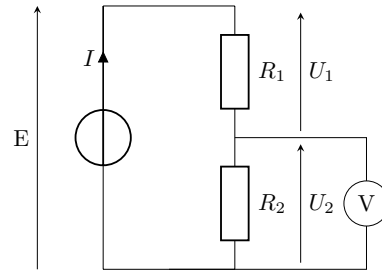
## 2.4 Appareils de mesure et modèles équivalents

Des appareils permettent la mesure des trois grandeurs rencontrées en régime continu. Il est nécessaire d'apprendre à brancher correctement ces différents appareils et à les remplacer par des modèles équivalents lors de l'étude de circuits.

### 2.4.1 Voltmètre

Le voltmètre permet de mesurer une tension. Il se place en parallèle de l'élément aux bornes duquel on souhaite mesurer une différence de potentiels. Dans l'exemple ci-contre, le voltmètre nous permet de lire la tension  $U_2$  aux bornes de la résistance  $R_2$ .

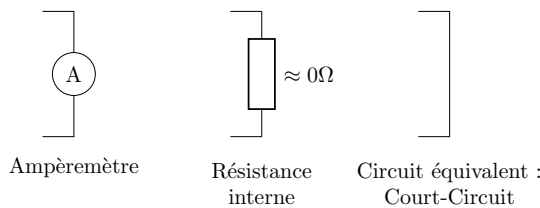
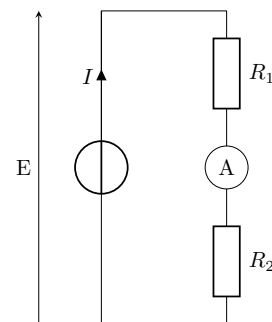
La résistance interne d'un voltmètre est très grande, généralement de l'ordre de  $1M\Omega$ . Sa présence crée donc une très faible perturbation du circuit puisque presque aucun courant ne le traverse. Dans ces conditions, un voltmètre se comporte comme un **circuit-ouvert**.



### 2.4.2 Ampèremètre

L'ampèremètre permet de mesurer un courant. Il se place en série dans une maille. Dans l'exemple ci-contre, l'ampèremètre permet de mesurer le courant  $I$  parcourant l'ensemble des éléments de cette maille.

Puisqu'il est monté en série, la résistance interne d'un ampèremètre est très faible pour ne pas impacter la circulation du courant mesuré. Il se comporte alors comme un fil électrique idéal, appelé aussi **court-circuit**. La valeur de la résistance interne de l'appareil dépend directement du calibre réglé.

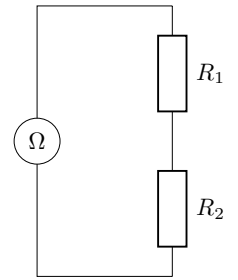


**Mise en garde : l'utilisation d'un ampèremètre requiert toujours une attention particulière!** Sa résistance interne étant très faible, les courants qui le traversent peuvent rapidement atteindre de grandes valeurs et endommager l'appareil de mesure et les générateurs du circuit qui ne doivent pas être court-circuités.

- **Un ampèremètre doit être réglé sur son calibre le plus grand au début de chaque mesure**, typiquement de l'ordre de plusieurs ampères.
- Il est toujours nécessaire de s'interroger quant à la résistance présentée aux bornes du générateur du circuit avant la mise en marche. Celle-ci doit être suffisamment grande pour limiter la circulation du courant.

### 2.4.3 Ohmmètre

Un ohmmètre permet de mesurer une résistance. Il se connecte simplement aux bornes du ou des éléments à mesurer. Si une association de résistance est connectée à un ohmmètre, celui-ci mesure alors la résistance équivalente du montage. Dans l'exemple ci-contre, la valeur mesurée est  $R_{eq} = R_1 + R_2$ .



# Ingénierie des systèmes cyber-physiques

R1.10 - Electricité - Electrotechnique

Partie 1 : Bases du régime continu

## Exercices de Travaux Dirigés

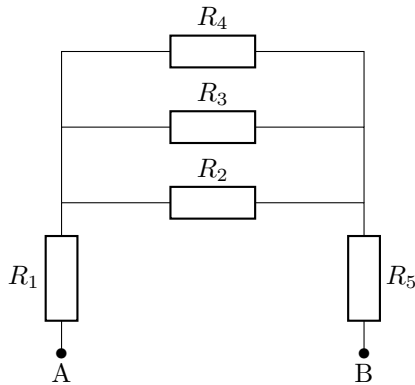
Thomas Fromentèze

# 1 Résistances

On souhaite premièrement calculer une série de résistances équivalentes. Il est nécessaire de progresser par étapes en réalisant des groupements d'éléments montés en parallèle ou en série. N'hésitez pas à refaire un schéma sur votre correction afin de justifier plus facilement les différentes étapes de vos calculs et les groupes associés.

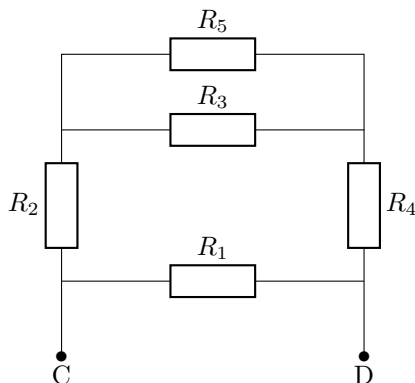
- Temps prévu pour la première page  $\approx 45$  minutes.

## 1.1 Montage 1



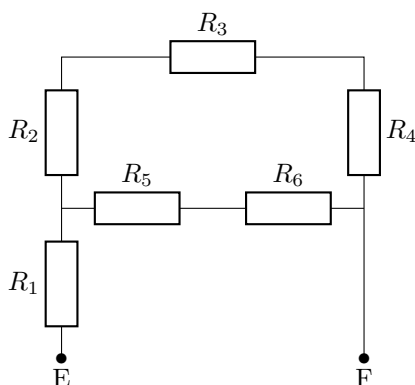
- Déterminer l'expression de la résistance équivalente  $R_{AB}$  du dipôle AB.
- Donner l'application numérique avec  $R_1 = 50\Omega$ ,  $R_2 = 300\Omega$ ,  $R_3 = 300\Omega$ ,  $R_4 = 300\Omega$  et  $R_5 = 50\Omega$ .

## 1.2 Montage 2



- Déterminer l'expression de la résistance équivalente  $R_{CD}$  du dipôle CD.
- Donner l'application numérique avec  $R_1 = 50\Omega$ ,  $R_2 = 1000\Omega$ ,  $R_3 = 300\Omega$ ,  $R_4 = 1000\Omega$  et  $R_5 = 50\Omega$ .

## 1.3 Montage 3



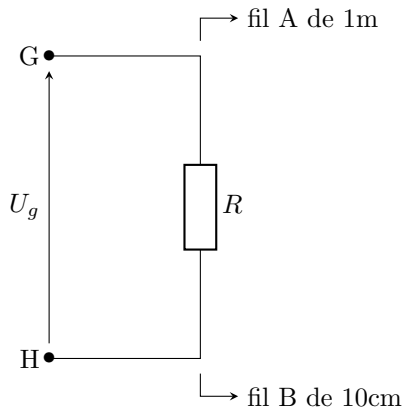
- Déterminer l'expression de la résistance équivalente  $R_{EF}$  du dipôle EF.
- Donner l'application numérique avec  $R_1 = 50\Omega$ ,  $R_2 = 1000\Omega$ ,  $R_3 = 300\Omega$ ,  $R_4 = 1000\Omega$  et  $R_5 = 50\Omega$ .

## 1.4 Astuces de simplification

- Déterminer la résistance équivalente de 100 résistances de  $1\Omega$  montées en série.
- Déterminer la résistance équivalente de 100 résistances de  $1000\Omega$  montées en parallèle.

## 1.5 Résistances linéiques et pertes de tension

On s'intéresse dans cet exercice à l'impact des fils électriques dans les montages industriels et ceux réalisés en TP.



- Un dipôle GH est formé en connectant une résistance  $R = 10\Omega$  à deux fils de cuivre A et B de longueurs respectives 1m et 10cm. Le diamètre initial des fils est  $d_1 = 1\text{mm}$ .

a) Rappeler la formule générale de la résistance d'un fil en précisant bien toutes les unités.

b) Déterminer la valeur des résistances des fils A et B. Pour information, la résistivité du cuivre vaut :  $\rho_{\text{cuivre}} = 1.7 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$ .

c) Calculer ensuite la valeur de la résistance équivalente  $R_{GH}$  du dipôle GH. Que peut-on en conclure ?

- On remplace maintenant les fils A et B par de nouveaux fils C et D de longueurs identiques à précédemment, mais de diamètre  $d_2 = 0.1\text{mm}$ .

d) Déterminer la valeur de la nouvelle résistance équivalente  $R'_{GH}$ .

Est-ce qu'il est nécessaire de prendre en compte l'impact des fils dans ce nouveau montage ?

- On s'intéresse maintenant aux pertes de tension qui peuvent être induites dans les fils. C'est une préoccupation centrale pour toutes les installations électriques car elle détermine directement le diamètre des conducteurs à utiliser.

On branche au dipôle GH une alimentation continue fournissant une tension stabilisée  $U_g = 10\text{V}$ . On garde pour cette partie les fils C et D de plus petite section.

e) Déterminer l'expression du courant  $I$  traversant le dipôle GH et faire l'application numérique.

f) En déduire la valeur de la chute de tension entre l'alimentation  $U_g$  et celle aux bornes de la résistance  $U_R$ .

g) Déterminer la puissance dissipée dans l'ensemble des fils et celle absorbée par la résistance  $R$ .

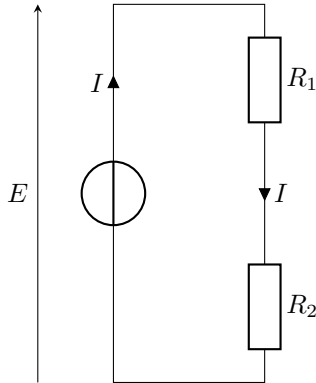
- Les normes de sécurité imposent que les chutes de tension dans les fils ne dépassent pas un certain pourcentage de la tension d'alimentation, déterminé en fonction du type d'appareil alimenté.

h) Déterminer dans l'installation étudiée la valeur minimale du diamètre de fil de cuivre garantissant un niveau de perte inférieur à 1% de la tension d'alimentation.



## 2 Tensions et Courants

### 2.1 Pont diviseur et modèles équivalents

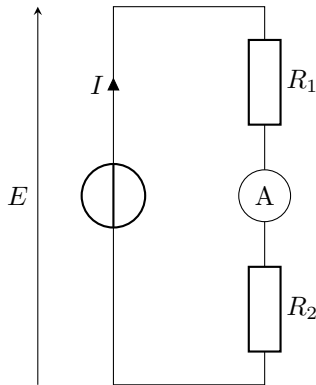


• On s'intéresse au montage suivant, composé d'une alimentation délivrant une tension constante  $E$  à deux résistances  $R_1$  et  $R_2$  montées en série.

a) Déterminer l'expression du courant  $I$  parcourant cette maille. Calculer ensuite sa valeur avec  $E = 12V$ ,  $R_1 = 10\Omega$  et  $R_2 = 220\Omega$ .

b) Déterminer ensuite l'expression de la différence de potentiels  $U_{R_2}$  aux bornes de la résistance  $R_2$ , puis calculer sa valeur.

Comment peut-on justifier que  $U_{R_2} \approx E$  dans la situation étudiée ?



• On souhaite maintenant réaliser l'expérience permettant de mesurer la valeur du courant. Un ampèremètre est ainsi connecté entre les deux résistances.

c) Quelle est la résistance interne d'un ampèremètre idéal et quelles précautions est-il nécessaire de prendre avant de mettre le circuit sous tension ?

• On utilise pour cette expérience un ampèremètre de qualité moyenne présentant une résistance équivalente  $R_A = 10\Omega$ .

d) Déterminer l'expression puis la valeur du courant installé dans cette nouvelle maille et calculer l'écart relatif  $|\delta_I|$  en prenant la valeur du premier montage comme référence. On ne s'intéresse ici qu'à la valeur absolue de l'écart.

e) Montrer que cet écart relatif peut s'écrire tel que  $|\delta_I| = \frac{R_A}{R_A + R_1 + R_2}$

f) Quelle est la valeur minimale de la somme des résistances  $R_1 + R_2$  permettant d'obtenir une erreur de mesure inférieure à 1% ?

g) Déterminer la puissance dissipée dans chaque élément du montage, puis dans la résistance équivalente présentée aux bornes de l'alimentation. Que peut-on en conclure ?

# Ingénierie des systèmes cyber-physiques

R1.10 - Electricité - Electrotechnique

Partie 1 : Bases du régime continu

## Travaux Pratiques

Caractérisation d'un moteur à courant continu

Thomas Fromentèze

Le TP dure 2h et **un compte-rendu par groupe est à rendre en fin de séance**. Il n'est pas nécessaire de traiter tous les points pour avoir une bonne note mais un travail de préparation avant la séance est incontournable.

Les montages doivent être validés avant chaque mise sous tension. L'endommagement des appareils à disposition se traduira par un malus important sur la note de TP.

Le rapport doit commencer par une introduction qui présente les objectifs du TP ainsi que les moyens mis en œuvre pour les atteindre. La structuration du corps du compte-rendu est libre mais doit permettre une analyse de l'ensemble des expériences réalisées en TP, en incluant une présentation des montages et les résultats obtenus. Une conclusion faisant le bilan des expériences réalisées ainsi qu'une analyse critique des résultats obtenus est aussi attendue.

Les différentes consignes sont là pour vous aider à enrichir votre rapport. Vous devez vous appuyer sur ces points pour construire votre propre analyse des caractéristiques du moteur.

## 1 Présentation du matériel

Pour étudier ces caractéristiques, on dispose d'une alimentation en tension continue réglable entre 0V et 15V, capable de délivrer une puissance maximum de 45W. On utilise aussi un multimètre qui servira successivement à mesurer des différences de potentiels (voltmètre) et des courants électriques (ampèremètre), en s'aidant du cours et de la vidéo de préparation de TP. Un stroboscope permet enfin de déterminer la vitesse de rotation du moteur en émettant des flashes périodiques selon un intervalle de temps ajustable.



FIGURE 1 – Matériel utilisé pour la caractérisation d'un moteur à courant continu.

On aura besoin pour cette étude du modèle équivalent du moteur :

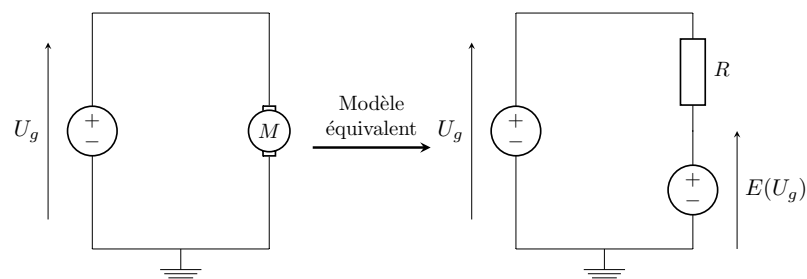


FIGURE 2 – Circuit équivalent d'un moteur à courant continu fonctionnant en régime continu.

Le moteur est modélisé par la résistance  $R$  présentée entre ses bornes, montée en série avec la force contre-électromotrice  $E(U_g)$ . La mise en rotation du moteur induit une tension qui vient s'opposer à celle de l'alimentation. Ce phénomène limite ainsi le courant traversant le moteur et sa vitesse maximale.

## 2 Réglage de l'alimentation continue

On souhaite vérifier que la valeur de tension affichée par l'alimentation continue correspond bien à la tension délivrée entre ses bornes "+" et "-".

- Proposer un montage à l'aide du matériel à disposition permettant de mesurer la tension continue délivrée par le générateur. Justifier votre choix en rappelant la valeur de la résistance équivalente d'un voltmètre.

**Faites vérifier votre montage avant la mise sous tension.**

- Relever dans un tableau un ensemble de valeurs entre 0V et 12V affichées sur le générateur de tension ( $U_{\text{gén}}$ ) et sur le voltmètre ( $U_{\text{mes}}$ ).

## 3 Mesure des caractéristiques électriques du moteur

On veut maintenant déterminer la valeur du courant traversant le moteur en fonction de la tension délivrée à ses bornes, générée par l'alimentation réglée entre 0V et 12V.

**L'alimentation en tension ne doit jamais délivrer plus de 12V.**

- Proposer un montage permettant de déterminer la valeur du courant traversant le moteur pour différentes valeurs de tension d'alimentation. Justifier votre choix en rappelant la valeur de la résistance interne d'un ampèremètre idéal, tout en précisant les risques liés à la manipulation de ce dernier.

**Faites vérifier votre montage avant la mise sous tension.**

- Relever dans un tableau la valeur du courant  $I$  en fonction de la tension d'alimentation  $U_g$ .
- Tracer l'évolution du courant continu  $I$  en fonction de la valeur de la tension d'entrée  $U_g$ .
- Déterminer la résistance présentée par le moteur pour différents points de la courbe.
- Déterminer la puissance électrique injectée dans le moteur en fonction de la tension  $U_g$ .
- Mesurer à l'aide de la fonction ohmmètre du multimètre la résistance aux bornes du moteur.

## 4 Etude de la force contre-électromotrice

- A l'aide de la figure 2, déterminer l'équation reliant la tension d'alimentation  $U_g$ , la résistance  $R$ , le courant  $I$  et la force contre-électromotrice  $E(U_g)$ .
- Déterminer les valeurs de la force contre-électromotrice  $E(U_g)$  à l'aide des mesures précédentes.

## 5 Mesure de la vitesse de rotation du moteur

Cette partie nécessite l'utilisation d'un stroboscope qui émet des flashes lumineux de forte intensité. **Les personnes souffrant de pathologies incompatibles avec l'utilisation du stroboscope doivent bien évidemment s'en tenir éloignées pendant les mesures.**

La mesure de la vitesse de rotation du moteur s'effectue en augmentant progressivement la fréquence des flashes émis par le stroboscope. La platine mise en rotation par l'arbre du moteur donnera l'impression de ralentir progressivement jusqu'à s'arrêter complètement si la fréquence des flashes correspond exactement à la vitesse de rotation.

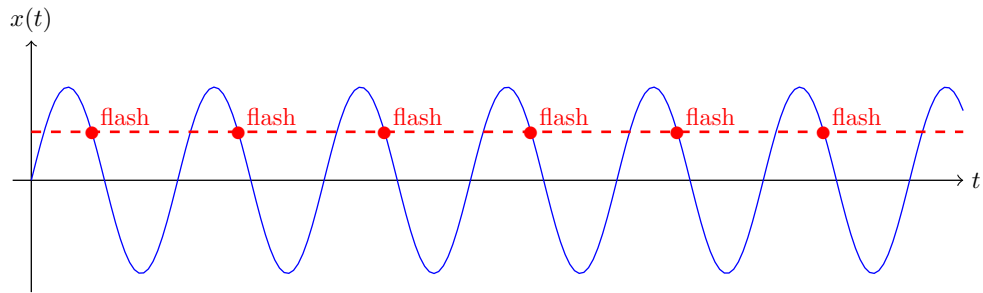


FIGURE 3 – Principe de la stroboscopie : le flash est émis à la même fréquence que le mouvement périodique que l'on essaie de caractériser. La cible apparaît alors statique parce qu'elle est toujours visible à la même position.

- Mesurer la vitesse de rotation du moteur  $\omega_M$  pour un ensemble de tensions d'alimentation  $U_g$  variant entre 6V et 12V.
- Représenter dans un graphe l'évolution de  $\omega_M$  en fonction de  $U_g$ .

## 6 Quelques pistes de réflexion pour compléter le rapport

- Expliquer pourquoi le moteur apparaît tourner lentement quand la fréquence du stroboscope est légèrement plus lente ou rapide que la fréquence de rotation du moteur.
- Que se passe-t-il si la fréquence du stroboscope est exactement deux fois inférieure à celle du moteur ?
- Analyser l'évolution de la vitesse du moteur en fonction de la tension d'alimentation à ses bornes. Que se passe-t-il pour de grandes valeurs de  $U_g$  ?
- Dans la zone linéaire, quel est le coefficient permettant de déterminer la vitesse de rotation du moteur en fonction de la tension appliquée à ses bornes.