

Signaux électriques dans l'approximation des régimes quasi-stationnaires

Capacités exigibles :

- Exprimer l'intensité du courant électrique en termes de débit de charge.
- Exprimer la condition d'application de l'ARQS en fonction de la taille du circuit et de la fréquence.
- Utiliser la loi des mailles et la loi des nœuds.
- Algébriser les grandeurs électriques et connaître les conventions récepteur et générateur.
- Connaître les ordres de grandeur d'intensités, de tensions et de puissances dans différents domaines d'application.
- Modéliser une source de courant en utilisant la représentation de Thévenin.
- Évaluer la résistance de sortie d'une source de tension réelle (TP).
- Exprimer la puissance dissipée par effet Joule dans une résistance.
- Remplacer une association série ou parallèle de deux résistances par une résistance équivalente.
- Exploiter des ponts diviseur de courant ou de tension.
- Évaluer une résistance d'entrée ou de sortie à l'aide d'une notice ou d'un appareil afin d'appréhender les conséquences de leurs valeurs sur le fonctionnement d'un circuit.
- Étudier l'influence des résistances d'entrée ou de sortie sur le signal délivré par un GBF, sur la mesure effectuée par un oscilloscope ou un multimètre.

L'approximation des régimes quasi-stationnaires, ou régimes lentement variables, permet d'affirmer que l'intensité du courant est la même en tout point d'une branche du circuit. Le domaine de la physique associée à l'étude des circuits électriques dans ce cadre-là se nomme l'électrocinétique.

1. Définitions

• Electricité

- L'électricité est un phénomène qui met en jeu le mouvement des électrons dans la matière, ou bien (plus rarement) d'autres particules chargées (exemple : ions).
- Les électrons sont des particules élémentaires qui portent une charge négative et qui sont capables de se déplacer dans les matériaux conducteurs.

• Définitions

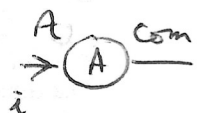
Dipôle électrique	Système relié à l'extérieur par deux bornes
Réseau (circuit) électrique	Circuit plus ou moins complexe constitué de dipôles connectés entre eux par des fils de résistance négligeable
Nœud	Point du réseau relié à plus de deux dipôles
Branche	Portion du réseau compris entre deux nœuds et ne passant qu'une fois par un nœud donné.
Maille	Parcours fermé constitué de branches et ne passant qu'une fois par un nœud donné

• Courant électrique – Intensité

Le courant électrique est un déplacement de charges électriques (électrons dans un conducteur, ions en solution)

L'intensité du courant qui traverse un dipôle se mesure avec un ampèremètre branché en série.

Elle correspond à un débit de charges.



- **Sens conventionnel du courant électrique**

➤ Le courant électrique circule de la borne positive du générateur vers la borne négative. C'est le sens dans lequel des charges électriques positives transitent.

➤ Intensité instantanée

$$i = \frac{dq}{dt}$$

q : charge transitant dans le conducteur.

➤ Charge électrique ayant transité ou accumulée

$$Q = \int_0^{\Delta t} i(t) dt$$

Dans le cas d'un régime continu :

$$Q = I \Delta t$$

Application 1 Vitesse des électrons dans un conducteur électrique

À l'instar du débit volumique d'un fluide dans une canalisation, l'intensité du courant électrique correspond au débit de charges électriques dans une section droite de fil conducteur. On cherchera dans l'étude qui suit à déterminer la vitesse moyenne de déplacement des électrons dans un fil de cuivre.

Données :

Nombre d'Avogadro $N_A = 6,022 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$

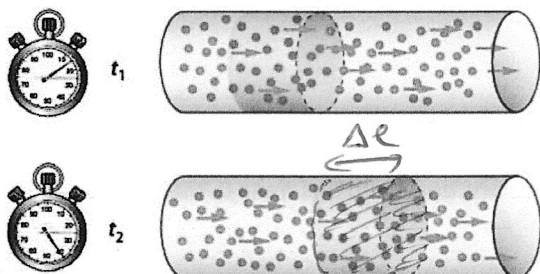
Charge élémentaire $e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$

Masse molaire du cuivre $M_{Cu} = 63,5 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$

Masse volumique du cuivre $\rho = 8,96 \cdot 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$

Nombre d'électron libre par atome de cuivre : 1

Les électrons libres d'un métal sont les électrons ayant la possibilité de se mouvoir au sein de la structure atomique et ainsi permettent le phénomène de conduction électrique.



On admet que le nombre de particules qui traversent la section du fil pendant la durée $\Delta t = t_2 - t_1$ est contenu dans un cylindre de volume V , tel que :

rayon du fil (en m) $\rightarrow V = \pi \cdot r^2 \cdot v \cdot \Delta t$ $\leftarrow$ durée (en s)

vitesse de déplacement des particules (en $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

volume (en m^3)

$\Delta L = \text{longueur du cylindre}$

1. Calculer le nombre N d'électrons libres contenus dans un volume $1,0 \text{ m}^3$ de métal cuivre.

2. Donner l'expression de la charge électrique Q contenue dans un volume V de métal en fonction de V , N et e la charge électrique élémentaire.

3. À l'aide du document ci-contre, en déduire une relation entre cette charge Q , le nombre N , la vitesse v des électrons et la durée Δt dans le cas d'un fil de cuivre de rayon $r = 0,25 \text{ mm}$.

4. Déduire de la définition de l'intensité une expression de la vitesse v des électrons dans le cuivre. Faire l'application numérique pour une intensité du courant électrique égale à $I = 100 \text{ mA}$.

- **Ordres de grandeur pour l'intensité du courant**

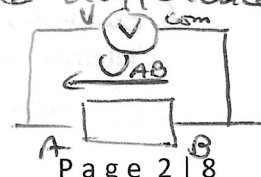
Électronique	circuits intégrés, transistors...	nA $\rightarrow$ mA
Électronique de puissance	alimentations, amplificateurs...	A $\rightarrow$ kA
Électrotechnique	moteurs, centrales...	A $\rightarrow 10^4$ A

- **Tension électrique**

La tension électrique correspond à la force qui rend les charges électriques mobiles. Elle se calcule par la différence de potentiel électrique.

$$U_{AB} = V_A - V_B$$

La tension aux bornes d'un dipôle se mesure avec un voltmètre branché en dérivation.



- **Tension électrique de référence – terre**

La terre est un conducteur électrique constitué de la surface de la Terre, dont on considère que le potentiel vaut en tout point 0 V. Il s'agit d'un point de référence pour compter les tensions électriques et on y relie la prise de terre pour les appareils électriques.

- **Classement des tensions**

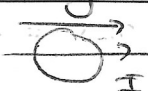
Dénomination	Très Basse Tension	Basse Tension	Haute Tension
AC	$U \leq 50 \text{ V}$	$50 \text{ V} < U \leq 1 \text{ kV}$	$U > 1 \text{ kV}$
DC	$U \leq 120 \text{ V}$	$120 \text{ V} < U \leq 1,5 \text{ kV}$	$U > 1,5 \text{ kV}$
Distance de sécurité	aucun danger	$> 30 \text{ cm}$	$> 2 - 3 \text{ m}$

La tension ne présente en soi aucun danger. C'est le courant traversant le corps humain, dont la résistance est très variable qui peut provoquer une douleur (5 mA), paralyser les muscles (20 mA), déclencher une fibrillation cardiaque et des brûlures (50 mA), voire provoquer une électrocution (1 A).

- **Association de composants électriques**

- Des composants sur une même branche et parcourus d'un même courant électrique sont en **série**.
- Des composants qui sont soumis à la même tension sont en **dérivation** (ou en **parallèle**).

- **Convention d'orientations du circuit électrique et puissance électrique**

Convention générateur		Puissance emise: $P = UI$
Convention récepteur		Puissance reçue: $P = UI$

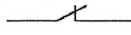
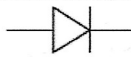
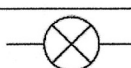
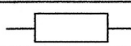
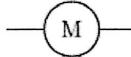
- **Régime continu (DC)**

Toutes les grandeurs électriques (tension, intensité) sont constantes au cours du temps. On note généralement les grandeurs continues avec une lettre capitale.

- **Régime alternatif (AC)**

Les grandeurs électriques changent de signe au cours du temps. On note généralement les grandeurs variables avec une lettre minuscule.

2. **Symboles dans un circuit électrique**

Composant	Symbole	Rôle
Fil électrique	 ou 	conduit l'électricité dans le circuit
Interrupteur ouvert		interrompt le passage de l'électricité
Interrupteur fermé		autorise le passage de l'électricité
Diode		autorise le passage de l'électricité dans le sens de la flèche
Diode électroluminescente (LED)		produit de la lumière si le courant est dans le sens de la flèche
Lampe		produit de la lumière
Dipôle ohmique (ou résistance)		« gêne » le passage de l'électricité; chauffe
Moteur		produit du mouvement

Pile		fournit de l'énergie électrique
Générateur idéal de tension		fournit de l'énergie électrique
Condensateur		accumule des charges électriques
Bobine		retarde l'établissement du courant
Générateur idéal de courant		fournit de l'énergie électrique

3. Lois de l'électricité

• Approximation des régimes quasi stationnaires

➤ **Propagation de l'onde électrique** : l'établissement d'une tension ou d'un courant dans un circuit n'est pas un phénomène instantané. Elle se produit à la vitesse de la lumière (c).

➤ **ARQS** : l'intensité est la même en tout point d'une branche du circuit, ce qui impose que la dimension l du circuit soit très petite devant la longueur d'onde λ $l \ll \lambda$

Ex : en TP, $l \approx 1\text{ m}$, si $f = 100\text{ kHz}$, alors
 $\lambda = c/f \approx 3 \cdot 10^8 / 10^5 = 3 \cdot 10^3\text{ m} \gg l \Rightarrow \text{ARQS vérifiée}$

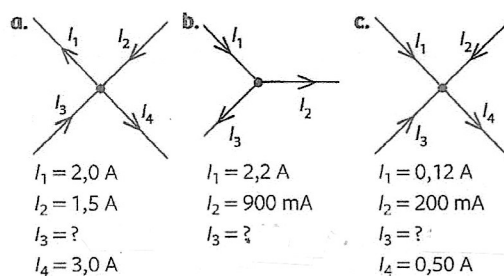
➤ Dans le cadre de ce cours, l'ARQS est toujours considérée comme valable.

• Loi des nœuds

La somme des intensités de courants arrivant sur un nœud est égale à celle qui en repartent

Cette loi est une conséquence du principe de la conservation de la charge électrique (pas de charges créées ou détruites) en régime stationnaire.

Application 2 Loi des nœuds



• Loi des mailles

La somme algébrique des tensions dans une maille est nulle, la tension étant comptée positivement si elle est orientée dans le sens du parcours

$\Rightarrow$ Somme des tensions dans le sens horaire = Somme des tensions dans le sens anti-horaire

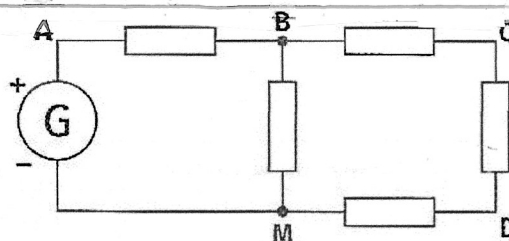
Application 3 Loi des mailles

On donne $U_{AM} = 12\text{ V}$; $U_{AB} = 2\text{ V}$; $U_{CD} = 1\text{ V}$; $U_{MD} = -4\text{ V}$

a. Flécher les tensions U_{AM} , U_{AB} , U_{CD} , U_{MD} , U_{BM} et U_{BC} .

b. Écrire les relations correspondant à deux mailles.

c. En déduire les valeurs des tensions U_{BM} et U_{BC}



4. Dipôle ohmique

• Résistance électrique

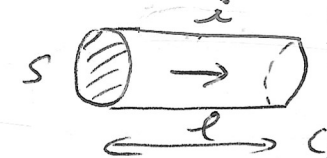
- C'est la propriété d'un corps d'empêcher le passage du courant électrique. Elle se mesure en ohms (Ω).
- Par abus de langage, une résistance désigne aussi un composant électronique : le dipôle ohmique

• Résistance électrique d'un conducteur

Elle dépend de la géométrie, et de la nature du matériau

$R = \frac{\rho l}{S}$ ρ : résistivité S : m^2

Conductance : $G = \frac{1}{R}$ (Siemens)

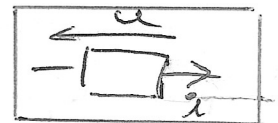


• Quelques valeurs de résistivité électrique

Matériau	cuivre	or	fer	mercure	carbone	eau pure	verre
Résistivité ($\Omega \cdot m$)	$1,7 \times 10^{-8}$	$2,2 \times 10^{-8}$	$1,0 \times 10^{-7}$	$9,4 \times 10^{-7}$	$4,0 \times 10^{-6}$	$1,8 \times 10^5$	10^{17}

• Loi d'Ohm en régime continu ou variable

$$U = R i \quad \Leftrightarrow \quad i = G U$$

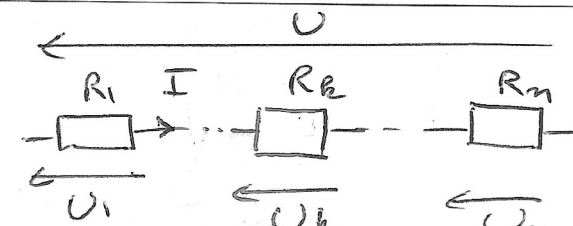


• Effet Joule

- Au passage d'un courant électrique dans un matériau, il y a un dégagement de chaleur.
- Tous les matériaux conducteurs subissent l'effet Joule, sauf les supraconducteurs qui ont une résistance nulle.
- Pour un matériau de résistance R parcouru d'un courant d'intensité i , la puissance thermique (chaleur) dissipée par effet Joule est :

$$P = R i^2$$

• Diviseur de tension

Schéma du montage	Relation
	$U_k = \frac{R_k}{R_1 + R_2 + \dots + R_n} U$

Démonstration :

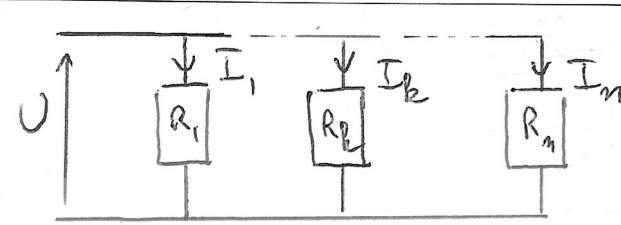
$$U_k = R_k I$$

$$\text{or } U = U_1 + U_2 + \dots + U_n = R_1 I + R_2 I + \dots + R_n I$$

$$= (R_1 + R_2 + \dots + R_n) I \quad \text{d'où} \quad U_k = \frac{R_k}{R_1 + R_2 + \dots + R_n} U$$

Avec 2 résistances $U_1 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} U$

• Diviseur de courant

Schéma du montage	Relation
	$I_k = \frac{G_k}{G_1 + G_2 + \dots + G_n} I$

Démonstration : $I_k = G_k U$

$$I = I_1 + I_2 + \dots + I_n = G_1 U + G_2 U + \dots + G_n U$$

$$= (G_1 + G_2 + \dots + G_n) U \text{ d'où } I_k = \frac{G_k}{G_1 + G_2 + \dots + G_n} I$$

Avec 2 résistances : $I_1 = \frac{1/R_1}{1/R_1 + 1/R_2} I = \frac{R_2}{R_1 + R_2} I$

• Association de résistances

En série	En parallèle
En série, les résistances s'ajoutent :	En parallèle, les conductances s'ajoutent :
$R_{eq} = R_1 + R_2 + \dots + R_n$	$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}$

Démonstration : Par définition : $U = R_{eq} I$ Par définition $I = G_{eq} U$

$$\text{ou } U = (R_1 + R_2 + \dots + R_n) I$$

Par identification :

$$R_{eq} = R_1 + R_2 + \dots + R_n$$

$$\text{ou } I = (G_1 + G_2 + \dots + G_n) U$$

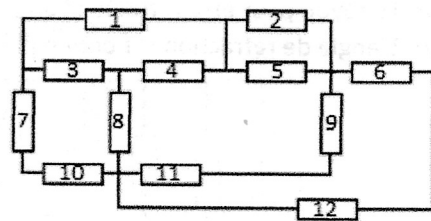
Identification $\Rightarrow G_{eq} = G_1 + \dots + G_n$

2 résistances en parallèle :

$$R_{eq} = \frac{1}{1/R_1 + 1/R_2} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \text{ Produit / Somme}$$

Application 4 En série ou en parallèle ?

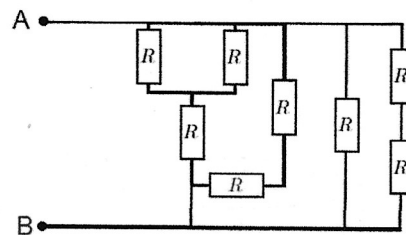
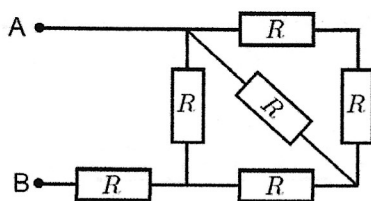
Dans le circuit ci-dessous, identifier les nœuds ; indiquer quels sont les dipôles qui sont en série ou en parallèle.



Application 5 Résistance équivalente

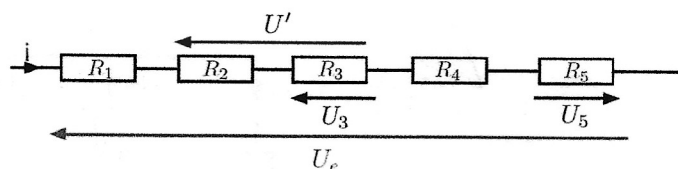
Tous les résistors de ces circuits sont identiques, de résistance R .

Déterminer la résistance équivalente des circuits ci-dessous entre les bornes A et B.

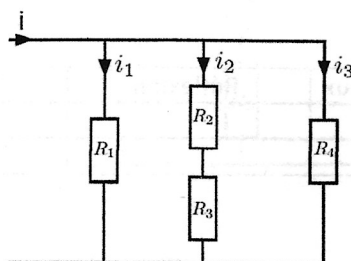


Application 6 Diviseurs de tension et de courant

1. Exprimer U_3 , U_5 et U' en fonction de U_e .



2. Exprimer i_1 , i_2 et i_3 en fonction de i .



5. Sources de tension

➤ Générateur de tension idéal

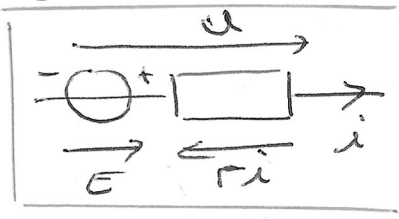
La tension fournie est indépendante du courant qui le traverse. On l'appelle la **force électromotrice** (f.e.m.) du générateur.

➤ Générateur réel

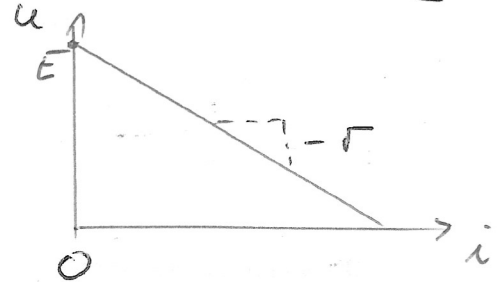
Un générateur réel est doté d'une résistance de sortie faible ($\sim 1 \Omega$), mais parfois non négligeable devant les autres résistances du circuit.

➤ Modèle de Thévenin

Le générateur de Thévenin est modélisé par l'association en série d'un générateur de tension idéal et d'une résistance :



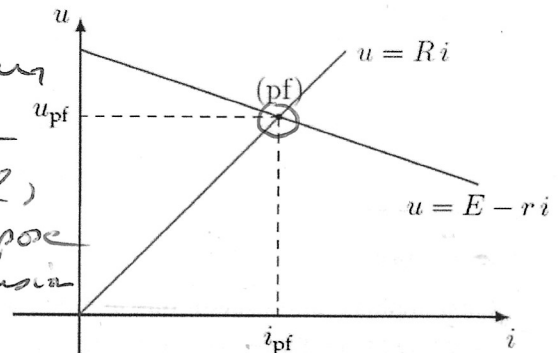
$$u = E - rI$$



➤ Point de fonctionnement

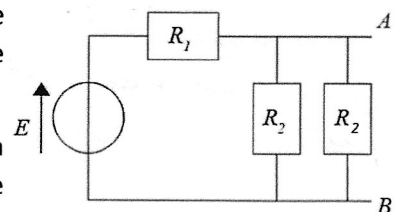
Couple (i, u) pour lequel un récepteur peut être alimenté par un générateur.

On peut le déterminer par le calcul, ou bien graphiquement si l'on dispose de la caractéristique courant - tension des composants.



Application 6 Générateur branché sur plusieurs dipôles

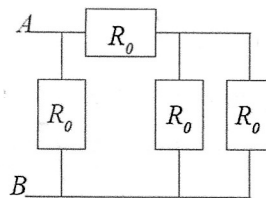
On considère un générateur dont le circuit est représenté ci-contre. On donne $E = 10 \text{ V}$, $R_1 = 50 \Omega$, $R_2 = 100 \Omega$. La sortie se branche sur A et B. On commence par déterminer le générateur de Thévenin équivalent à ce générateur.



1. Pour déterminer la fem e ou tension à vide, il suffit de mesurer la tension U_{AB} lorsque rien n'est branché sur le générateur. Comment brancher le voltmètre pour effectuer cette mesure (on précisera les bornes) ?
2. Exprimer e en fonction de E , R_1 et R_2 et faire l'application numérique.
3. Pour déterminer la résistance interne r , il suffit de déterminer la résistance équivalente au circuit entre A et B en remplaçant le générateur idéal de tension par un fil. Exprimer r en fonction de R_1 et R_2 puis calculer r .
4. On veut brancher le générateur sur un premier dipôle dont le circuit est représenté ci-dessous. On donne $R_0 = 150 \Omega$.

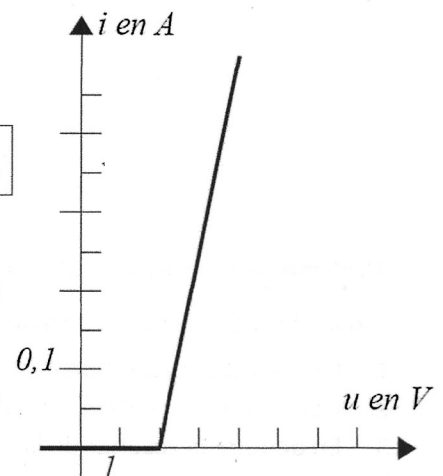
- a. Exprimer puis calculer la résistance équivalente R_{eq} à ce dipôle entre A et B.

- b. On branche le dipôle sur le générateur (A sur A, B sur B), exprimer la tension aux bornes du dipôle en fonction de e , r et R_{eq} , et le courant le traversant. Faire l'application numérique.



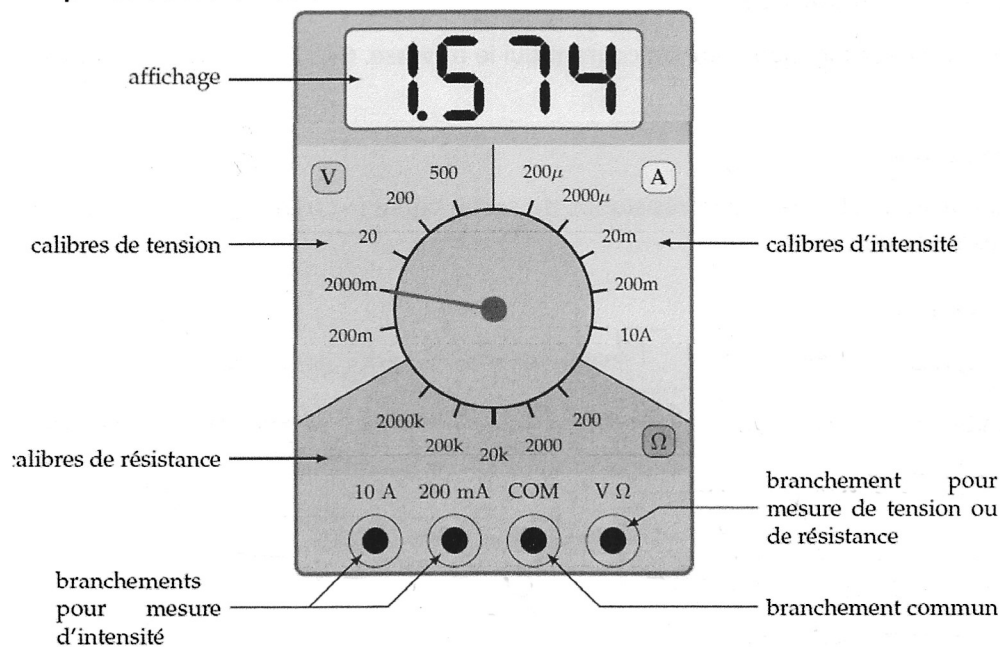
5. On veut maintenant brancher une diode sur le générateur, la caractéristique de la diode est donnée ci-contre.

- a. Tracer ci-contre la caractéristique du générateur de Thévenin.
- b. Déterminer le courant traversant la diode ainsi que la tension à ses bornes.



6. Le multimètre

➤ Présentation simplifiée du multimètre



➤ Utilisation du multimètre

Grandeur mesurée	Rôle du multimètre	Branchement	Bornes utilisées
Tension	Voltmètre	Parallèle	V et COM
Intensité	Ampèremètre	Série	200 mA (ou 10 A) et COM
Résistance	Ohmmètre	Hors-circuit	Ω et COM

➤ Calibre

C'est la plus grande valeur que le multimètre est capable de mesurer pour une grandeur donnée.

Exemple : Lors d'une mesure d'intensité, si l'on choisit 2000μ, cela signifie que l'on pourra mesurer des intensités inférieures à $2000 \mu A = 2 \text{ mA}$.

➤ Choix du calibre

On commence toujours par utiliser le calibre le plus grand, puis on va vers les calibres plus petits pour gagner en précision.

➤ Résolution

Plus petite décimale affichée par le multimètre - Elle dépend du calibre

➤ Précision, incertitude

Elle dépend du multimètre et de la grandeur mesurée. Elle est généralement indiquée dans la notice.

Grandeur	Précision indiquée
Tension	$\pm 1\% \times \text{affichage} + 10 \times \text{résolution}$
Intensité	$\pm 2\% \times \text{affichage} + 5 \times \text{résolution}$
Résistance	$\pm 2\% \times \text{affichage} + 10 \times \text{résolution}$

Application 7 Précision d'un multimètre

On lit $U = 1,574 \text{ V}$ sur l'écran du multimètre.

1. Quelle est la résolution affichée ?
2. Quelle est la précision du multimètre pour cette mesure ?
3. En déduire le résultat de la mesure de la tension associé à un niveau de confiance de 95 %.