

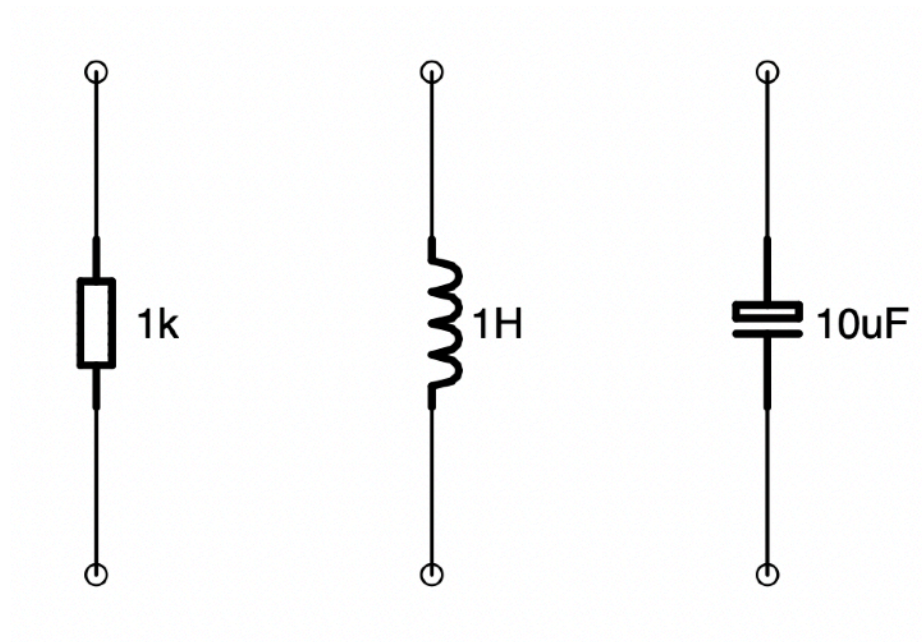
Appareils de mesure I

D. Mari

EPFL

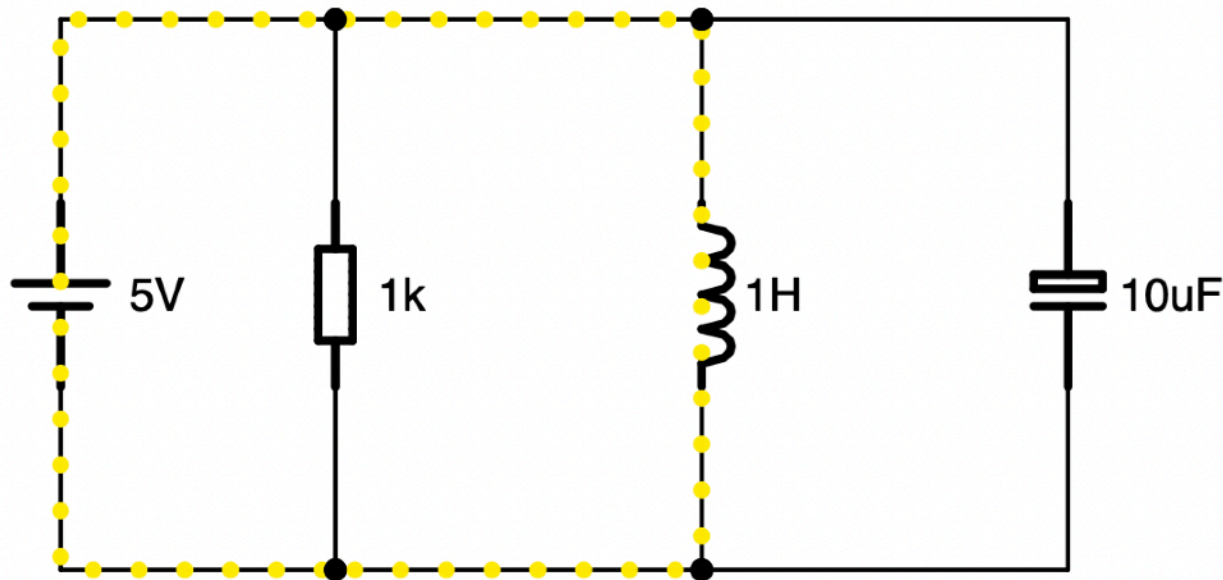


Éléments passifs des circuits électriques



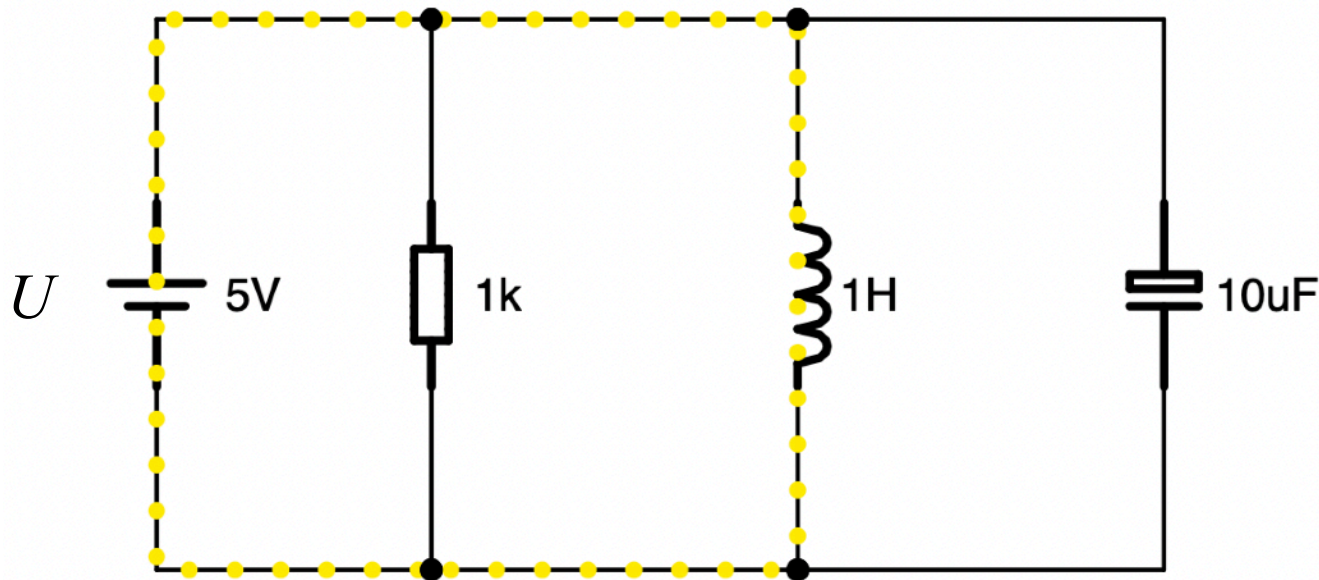
Résistance R Inductance L Capacité C

Éléments passifs des circuits électriques



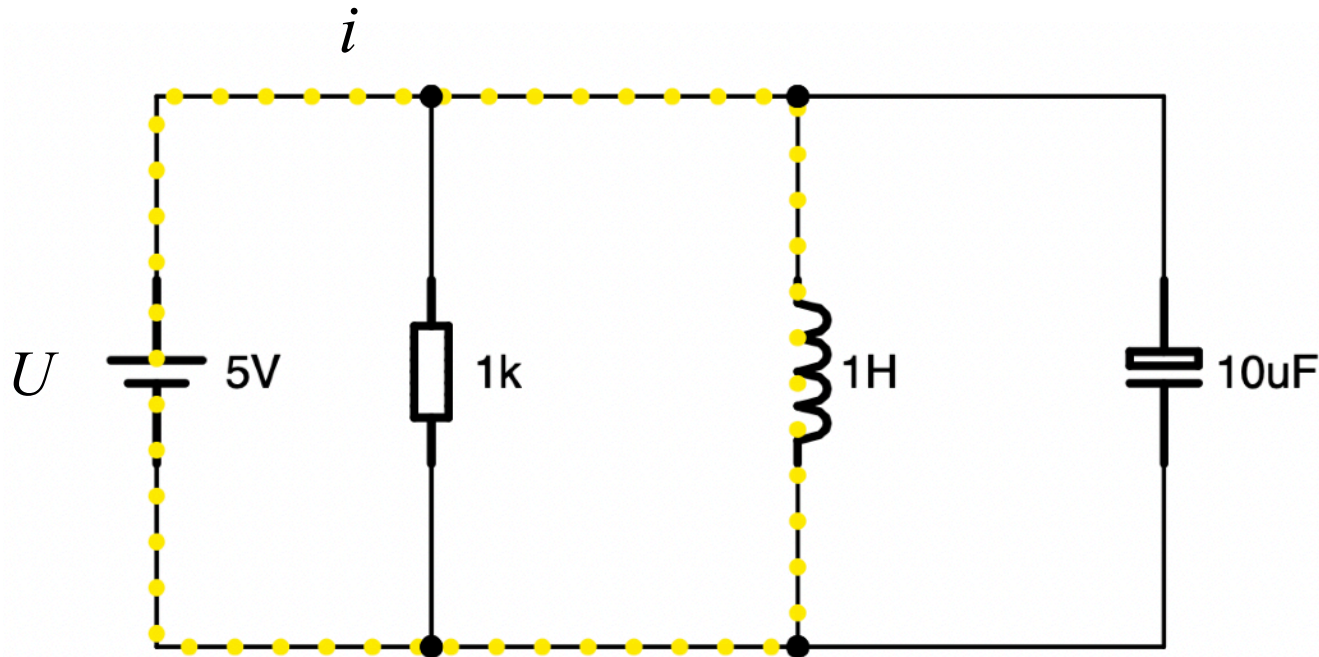
Résistance R Inductance L Capacité C

Éléments passifs des circuits électriques



Résistance R Inductance L Capacité C

Éléments passifs des circuits électriques



Résistance R Inductance L Capacité C

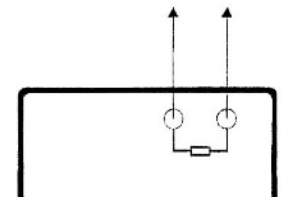
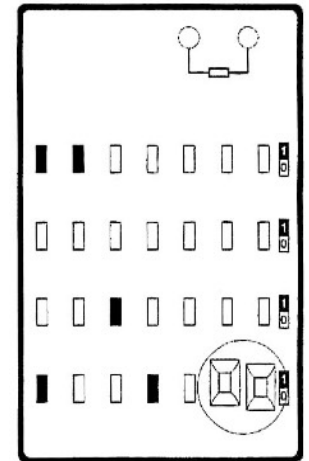
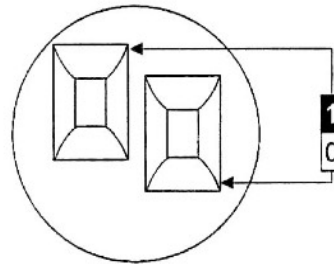
Boîtes de substitution

Décade R $U = Ri$



Resistance R	Tension max. U	Courant Max. I	Resistance R	Tension max. U	Courant max. I
1Ω	1,00V	1A	3kΩ	54,8V	18,3mA
2Ω	1,41V	707mA	4kΩ	63,2V	15,8mA
3Ω	1,73V	577mA	10kΩ	100,0V	10,0mA
4Ω	2,00V	500mA	20kΩ	141,4V	7,07mA
10Ω	3,16V	316mA	30kΩ	173,2V	5,77mA
20Ω	4,47V	224mA	40kΩ	200V	5,00mA
30Ω	5,48V	183mA	100kΩ	250V	2,50mA
40Ω	6,32V	158mA	200kΩ	250V	1,25mA
100Ω	10,00V	100mA	300kΩ	250V	833μA
200Ω	14,10V	70,7mA	400kΩ	250V	625μA
300Ω	17,30V	57,7mA	1MΩ	250V	250μA
400Ω	20,00V	50,0mA	2MΩ	250V	125μA
1kΩ	31,60V	31,6mA	3MΩ	250V	83,3μA
2kΩ	44,70V	22,4mA	4MΩ	250V	62,5μA

$$I = \sqrt{P/R}, U = \sqrt{P \cdot R}$$



Données techniques

Tension d'isolation	: 250V AC/DC
Tension aux bornes	: max. 250VAC / 60VDC (voir table)
Puissance	: 1 W
Precision	: < 1,0%
Résistance résiduelle	: < 125mΩ
Température d'utilisation	: -10°C à +50°C rF < 80%
Dimensions	: 170 x 110 x 47 mm
Masse	: 290g

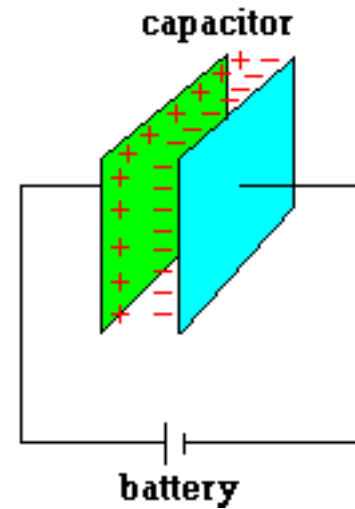
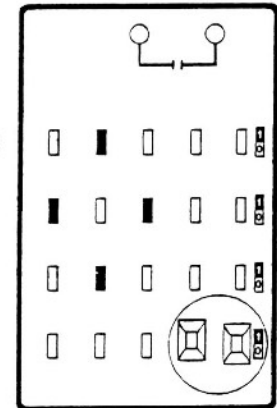
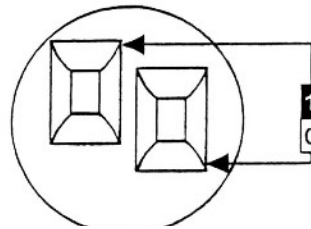
Décade C

$$Q = UC$$

$$i = \frac{dQ}{dt} = C \frac{dU}{dt}$$



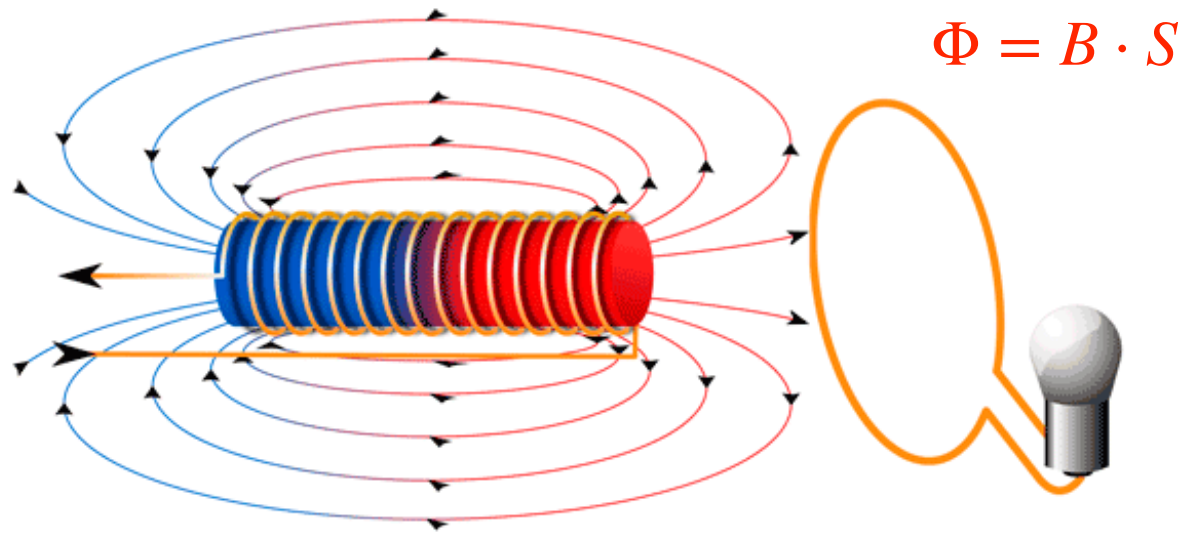
Condensateur



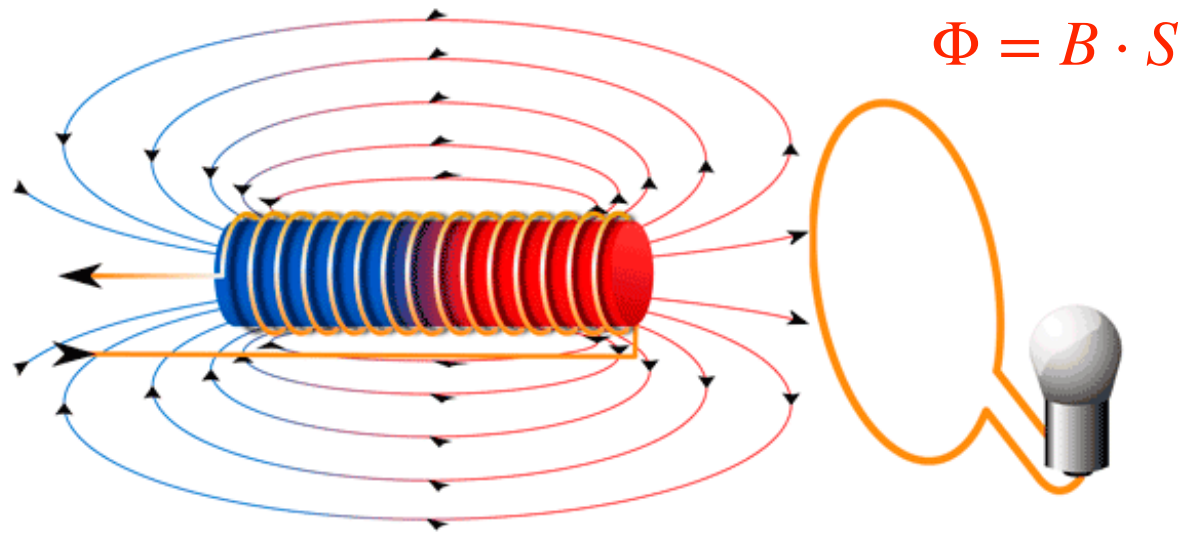
Données techniques

Tension d'isolation	: 250V AC/DC
Tension d'utilisation	: 100V DC
Précision	: 1 %
Capacité résiduelle	: < 75 pF
Température d'utilisation	: 0°C à +40°C rF < 80%
Dimensions	: 170 x 110 x 46 mm
Masse	: 470g

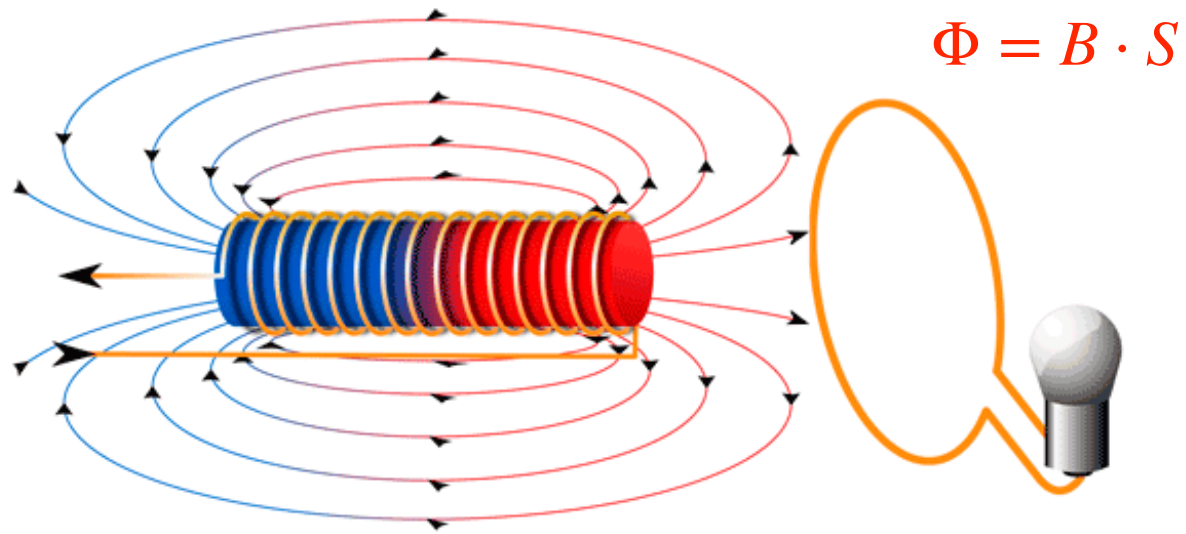
Décade L Inductance



Décade L Inductance



Décade L Inductance



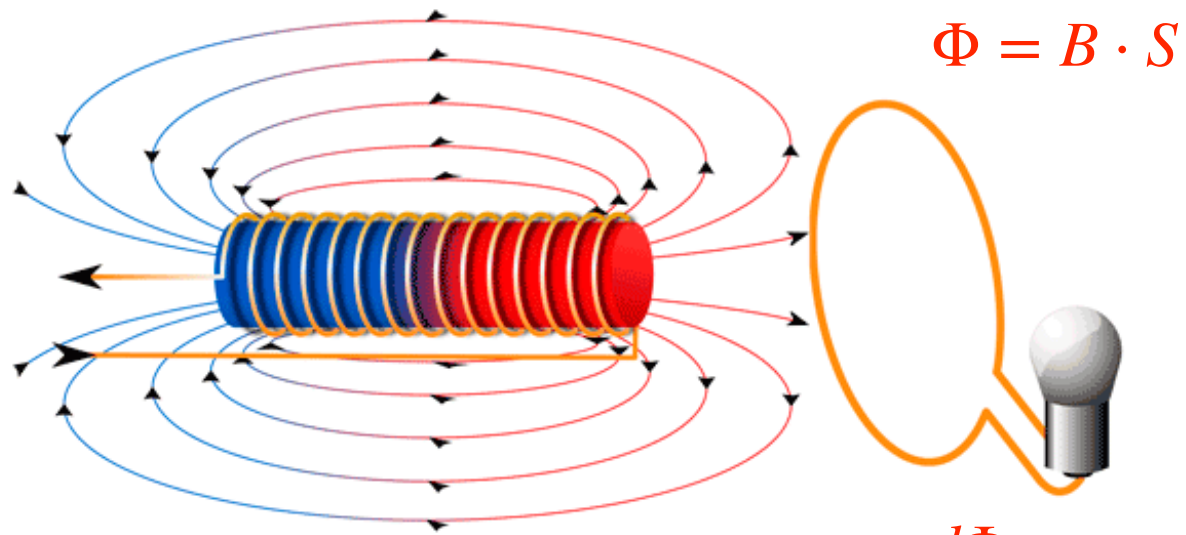
$$N\Phi = Li$$

N =nombre de spires


$$U = -N \frac{d\Phi}{dt}$$

Loi de Lenz

Décade L Inductance



$$\Phi = B \cdot S$$

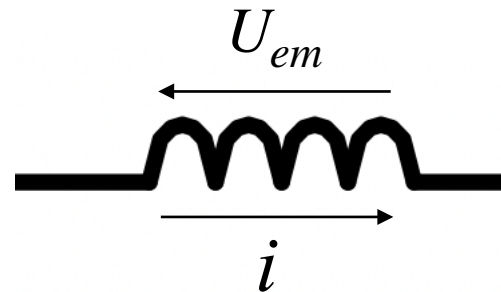
$$N\Phi = Li$$

$$U = -N \frac{d\Phi}{dt}$$

N =nombre de spires

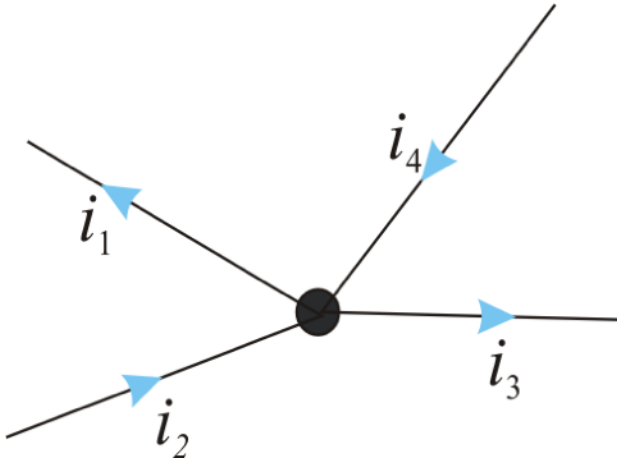
Loi de Lenz

$$U_{em} = -N \frac{d\Phi}{dt} = -L \frac{di}{dt}$$



Lois de Kirchhoff

1ère loi



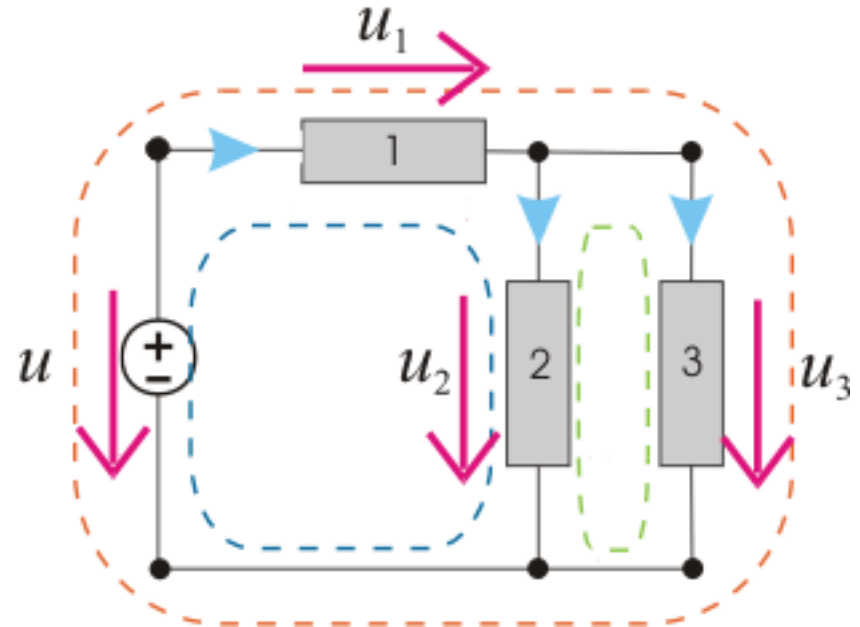
$$i_2 - i_1 + i_4 - i_3 = 0$$

2ème loi (loi des mailles)

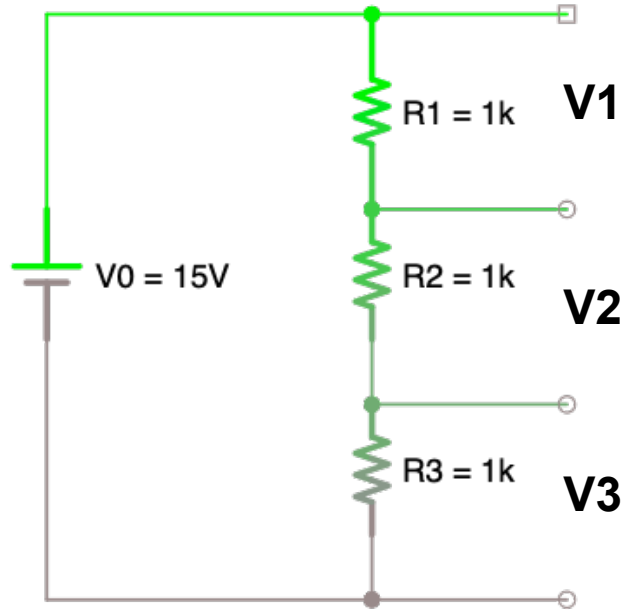
$$-u + u_1 + u_2 = 0$$

$$-u_2 + u_3 = 0$$

$$-u + u_1 + u_3 = 0$$



Diviseur de tension

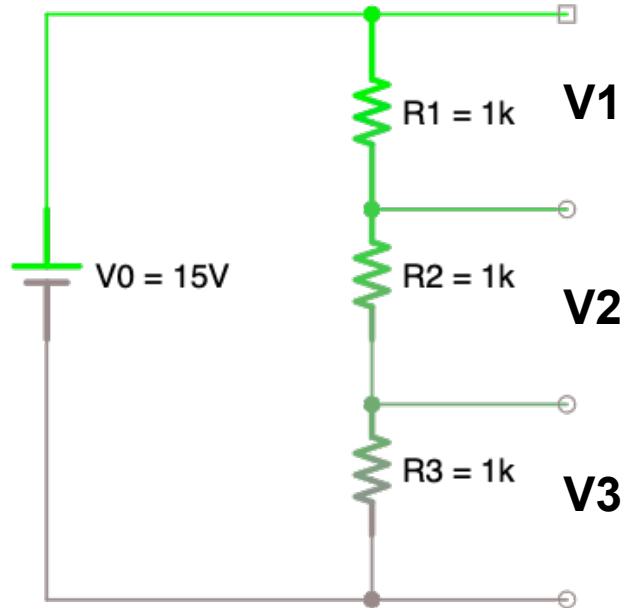


$$V_1 = \frac{R_1}{R_1 + R_2 + R_3} V_0 = 5V$$

$$V_2 = \frac{R_2}{R_1 + R_2 + R_3} V_0 = 5V$$

...

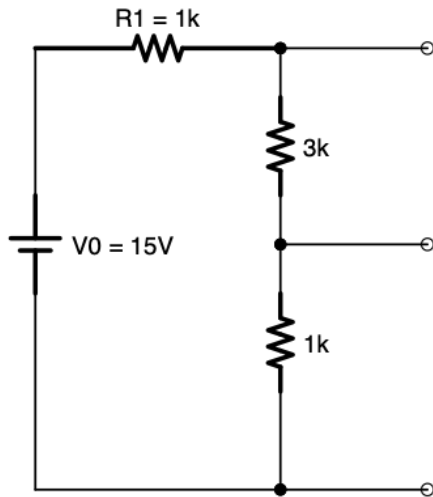
Diviseur de tension



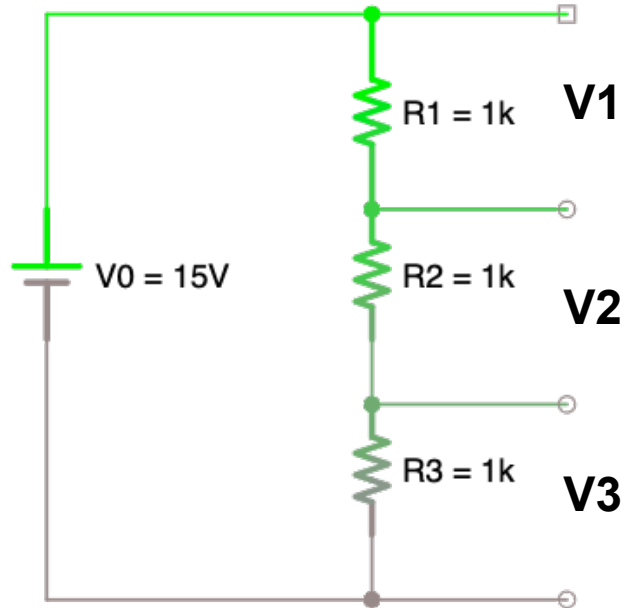
$$V_1 = \frac{R_1}{R_1 + R_2 + R_3} V_0 = 5V$$

$$V_2 = \frac{R_2}{R_1 + R_2 + R_3} V_0 = 5V$$

...



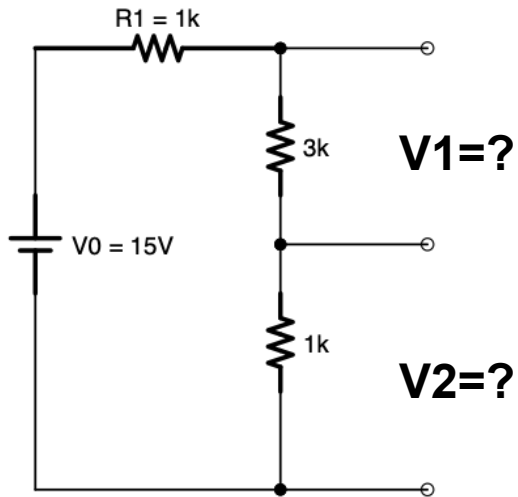
Diviseur de tension



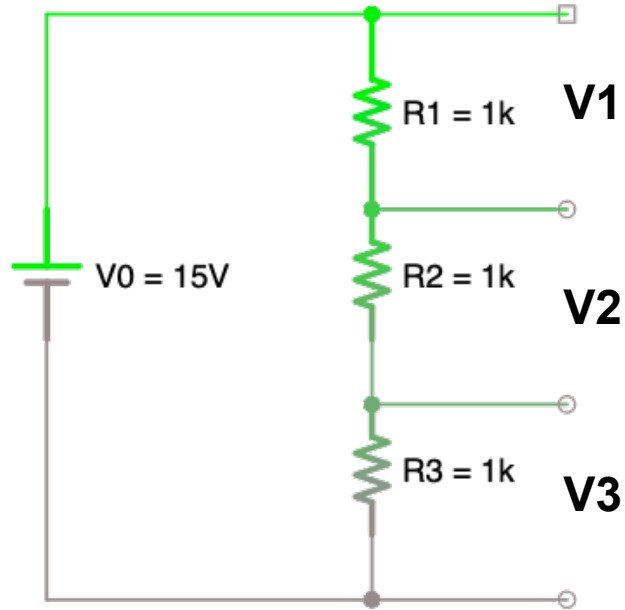
$$V_1 = \frac{R_1}{R_1 + R_2 + R_3} V_0 = 5V$$

$$V_2 = \frac{R_2}{R_1 + R_2 + R_3} V_0 = 5V$$

...



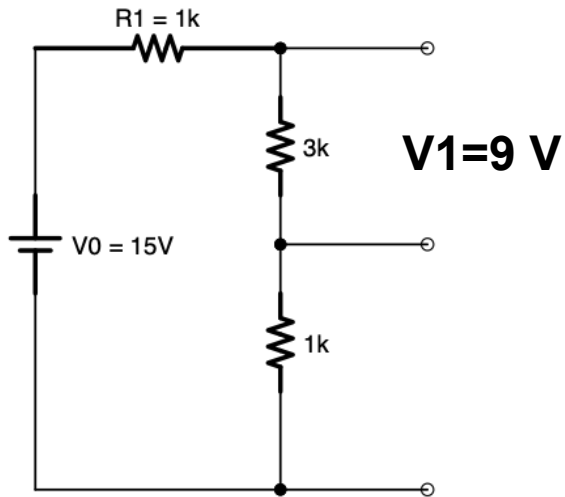
Diviseur de tension



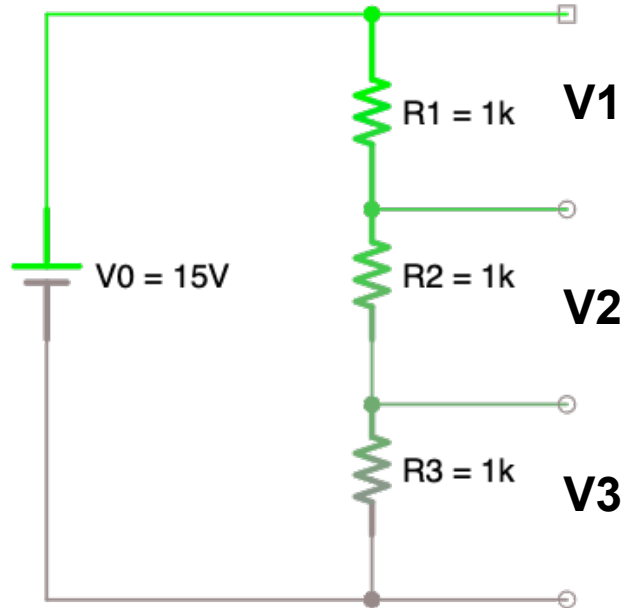
$$V_1 = \frac{R_1}{R_1 + R_2 + R_3} V_0 = 5V$$

$$V_2 = \frac{R_2}{R_1 + R_2 + R_3} V_0 = 5V$$

...



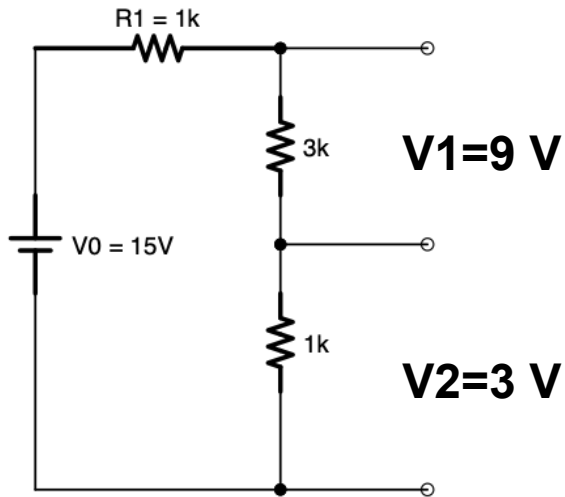
Diviseur de tension



$$V_1 = \frac{R_1}{R_1 + R_2 + R_3} V_0 = 5V$$

$$V_2 = \frac{R_2}{R_1 + R_2 + R_3} V_0 = 5V$$

...



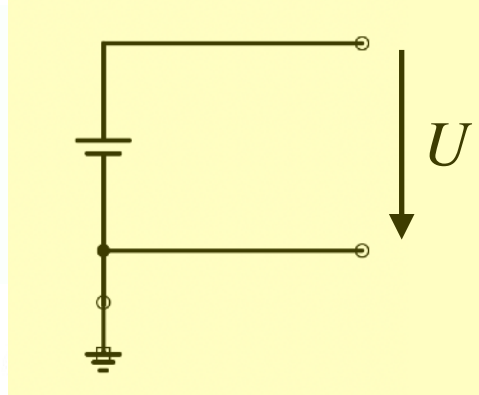
Sources

Piles

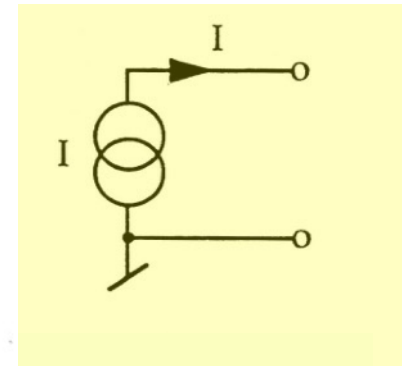


Sources de tension et de courant parfaites

Les sources parfaites de tension ou de courant sont telles que la tension produite U ou le courant fourni I sont constants et indépendants de la charge qui est connectée aux bornes.



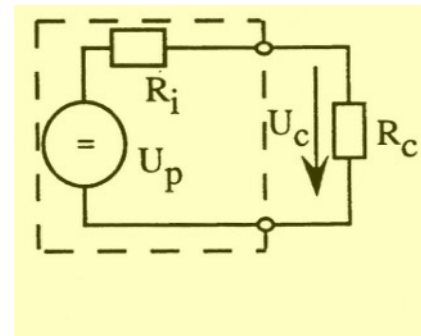
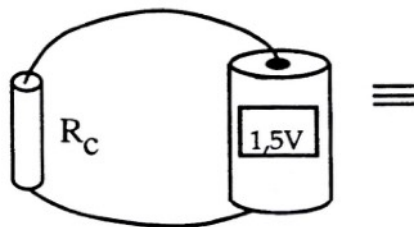
Source de tension



Source de courant

Résistance interne d'une source de tension

Une source de tension non régulée, telles qu'une pile ou une batterie par exemple, présente une résistance interne R_i non négligeable qui implique que la tension aux bornes de cet élément dépend de la charge R_c qui y est connectée.

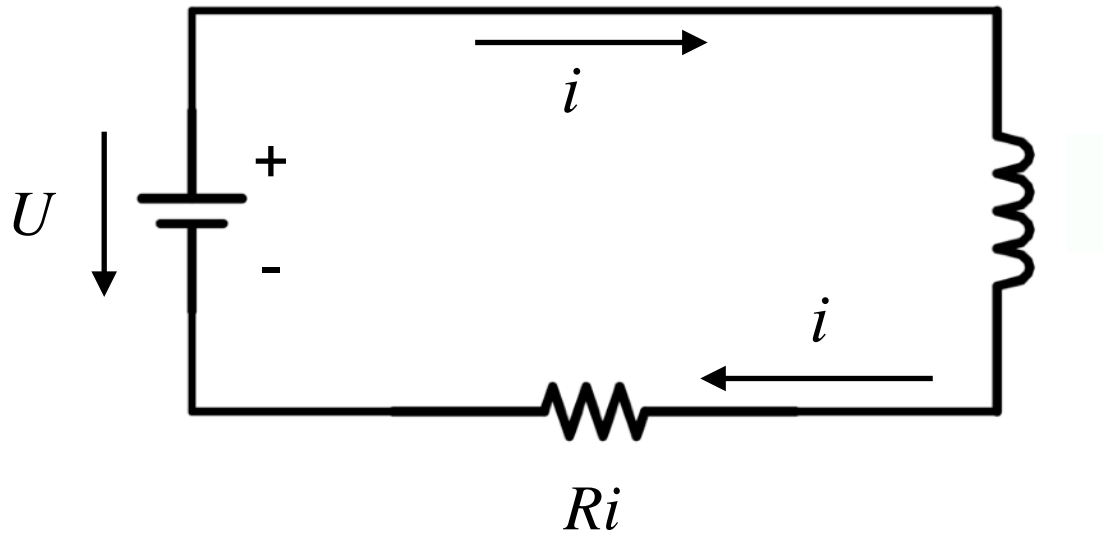


$$U_c = \frac{R_c}{R_i + R_c} U_p$$

U_p = tension à vide, pour $R_c = \infty$

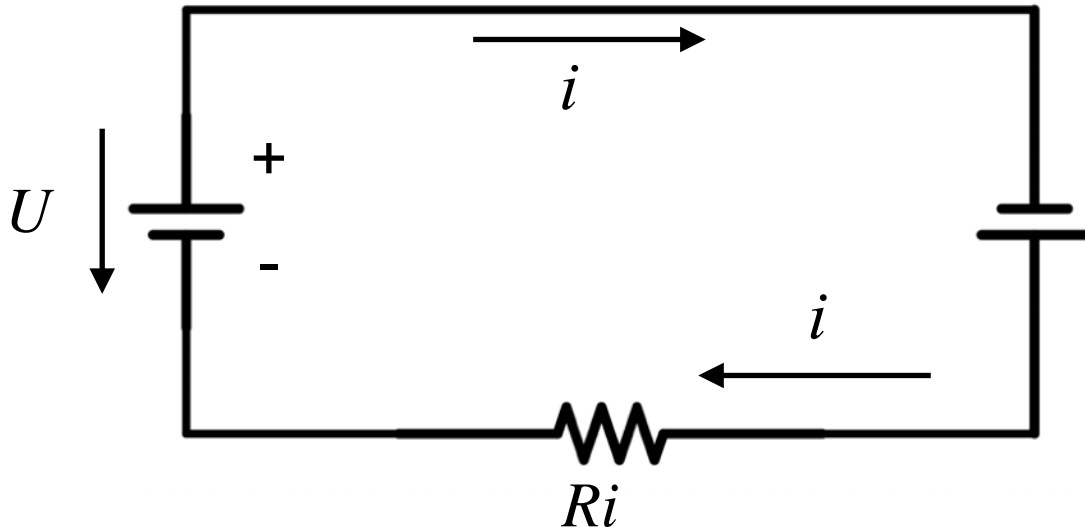
Inductance dans un circuit

$$U_{em} = -N \frac{d\Phi}{dt} = -L \frac{di}{dt}$$



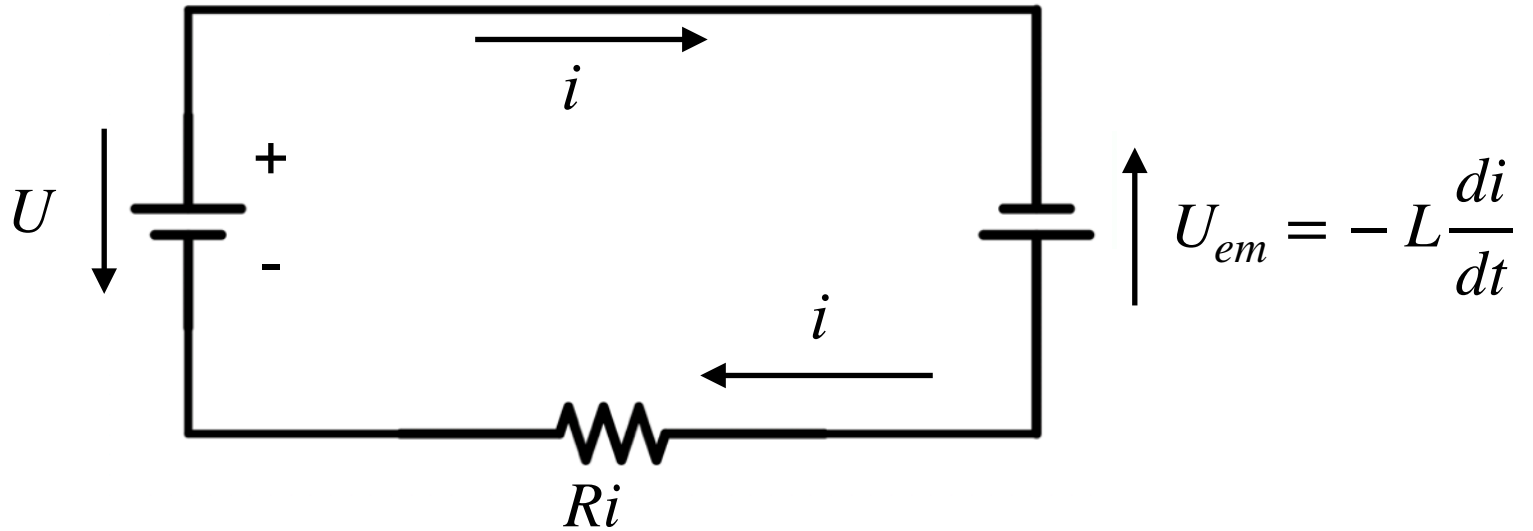
Inductance dans un circuit

$$U_{em} = -N \frac{d\Phi}{dt} = -L \frac{di}{dt}$$



Inductance dans un circuit

$$U_{em} = -N \frac{d\Phi}{dt} = -L \frac{di}{dt}$$



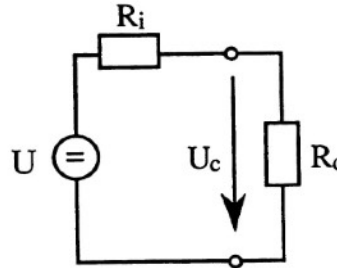
Voltmètres, Ampèremètres & Co.



Mesure de tension

Mesure de tensions continues ($U=$) ou (V_{DC})

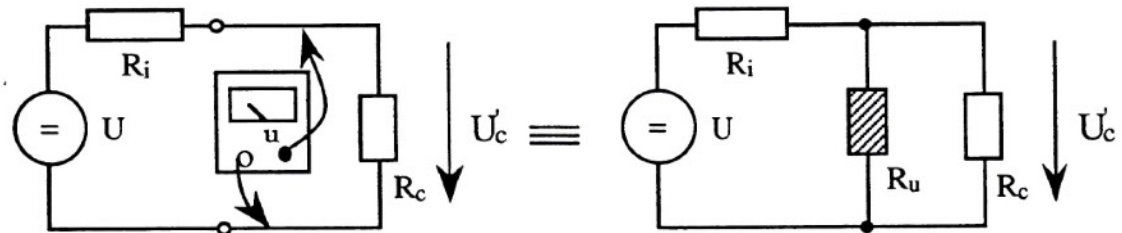
Considérons le circuit suivant, composé d'une source de tension U avec une résistance interne R_i connectée à une charge R_c



La tension aux bornes de la charge vaut :

$$U_c = \frac{R_c}{R_i + R_c} U$$

Lors de la mesure de U_c , la résistance interne (R_u) du voltmètre va intervenir en modifiant le circuit équivalent, de sorte que la valeur mesurée U'_c ne sera pas exactement égale à la valeur initiale U_c



$$U'_c = \frac{R_u R_c}{R_i(R_u + R_c) + R_u R_c} U$$

Cette affectation de la valeur mesurée par l'appareil de mesure est *un phénomène tout à fait général* lors de la mesure d'une grandeur physique. Pour que la valeur mesurée ne s'écarte pas trop de la valeur réelle, il faut que la résistance interne du voltmètre soit très grande :

$$R_u \gg R_c \Rightarrow U'_c \approx U_c$$



Voltmètre



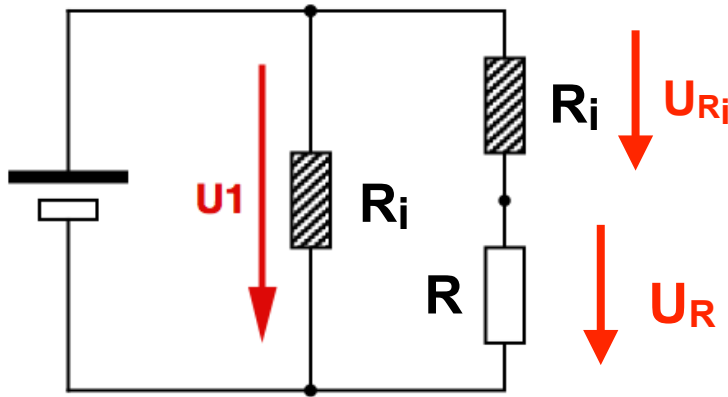
MODEL	FUNCTION	RANGE	ACCURACY	RESOLUTION
M-3860D M-3850D M-3870D	DC VOLTAGE	400 mV 4 V 40 V 400 V	$\pm 0.3\%$ of rdg +1 dgt	100 μ V 1 mV 10 mV 100 mV
		1000 V	$\pm 0.5\%$ of rdg +1 dgt	1 V
M-3850D M-3870D	AC VOLTAGE	400 mV 4 V 40 V 400 V	$\pm 0.8\%$ of rdg +3 dgt	100 μ V 1 mV 10 mV 100 mV
		750 V	$\pm 1.0\%$ of rdg +3 dgt	1 V
3860D	AC VOLTAGE (True rms)	400 mV 4 V 40 V	$\pm 0.8\% + 3$ dgt ($\pm 2.5\% + 5$ dgt)	100 μ V 1 mV 10 mV
		400 V 750V	$\pm 1.0\%$ of rdg +3 dgt	100 mV 1 V

Note: Impedance of AC Voltage True rms (M-3860D)

1. 40Hz to 20KHz for 400mV, 4V, 40V & 200V
2. 40Hz to 1KHz for above 200V to 750V

1.1 Mesure de la résistance interne d'entrée du voltmètre

En se servant d'une pile de 1,5V et d'une boîte de substitution de résistances, mesurer la résistance interne d'entrée R_i (impédance) du voltmètre sur les gammes mV et V. Commenter les résultats.



Principe du diviseur de tension: si $R_i = R \rightarrow U_R = U_{R_i} = U_2$

$$U_2 = \frac{1}{2} U_1$$

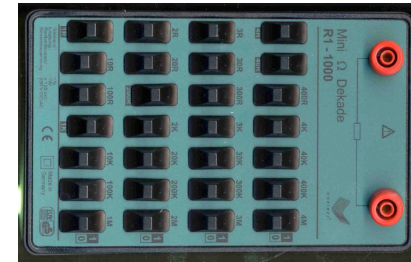
1.1 Mesure de la résistance interne d'entrée du voltmètre



U_1 [V]

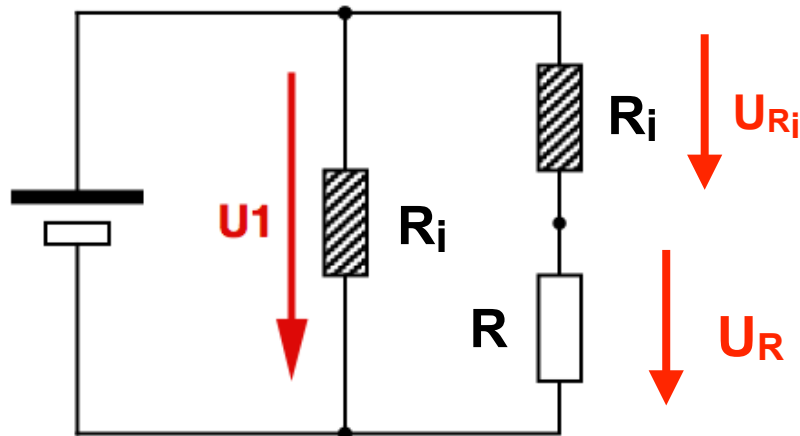
R_i [Ω]

R_i [Ω]

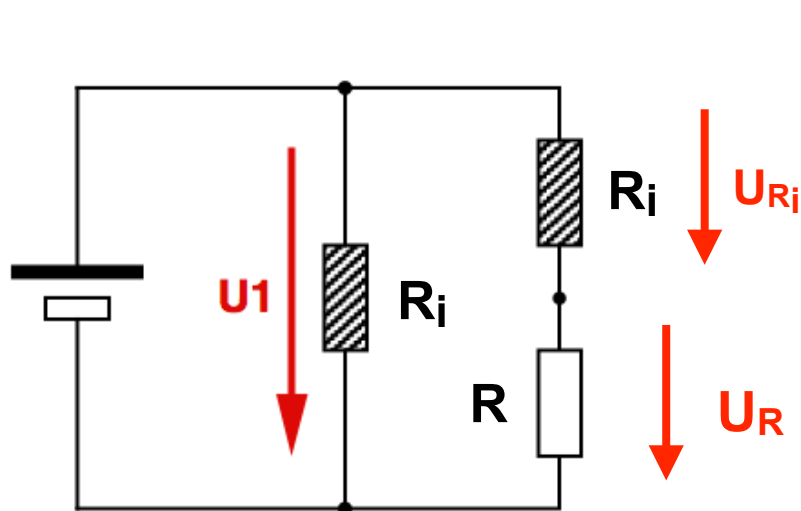
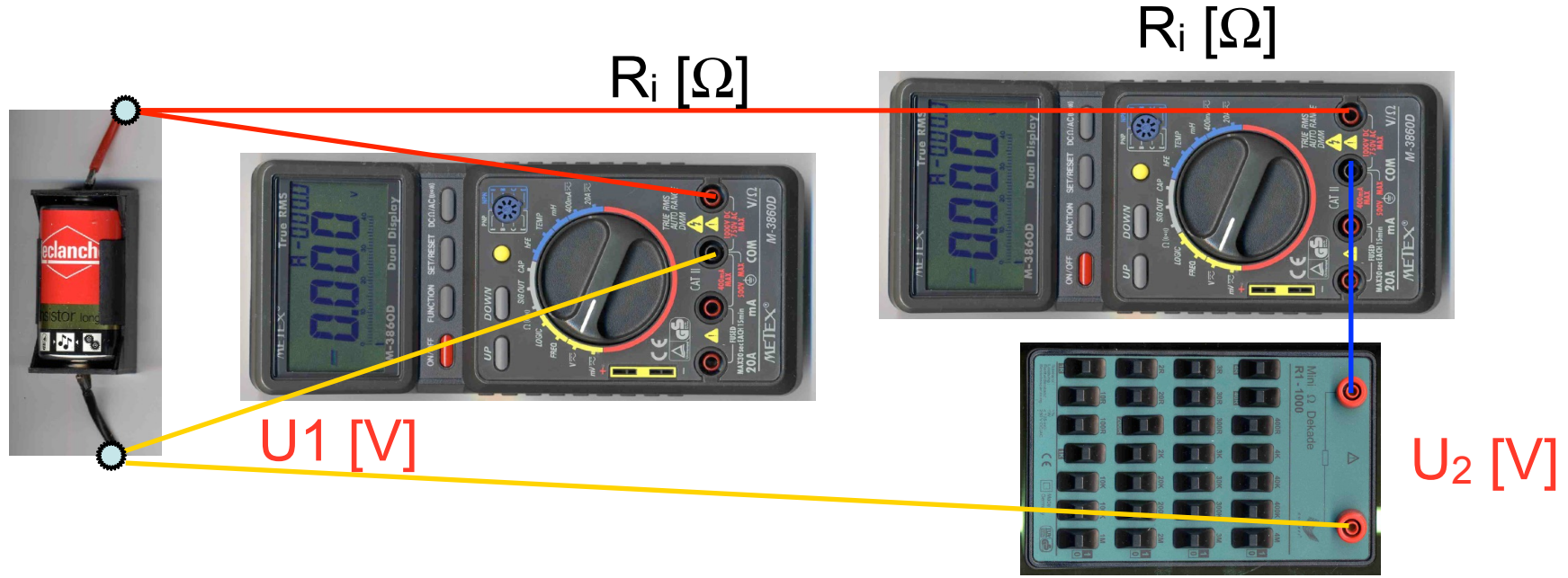


U_2 [V]

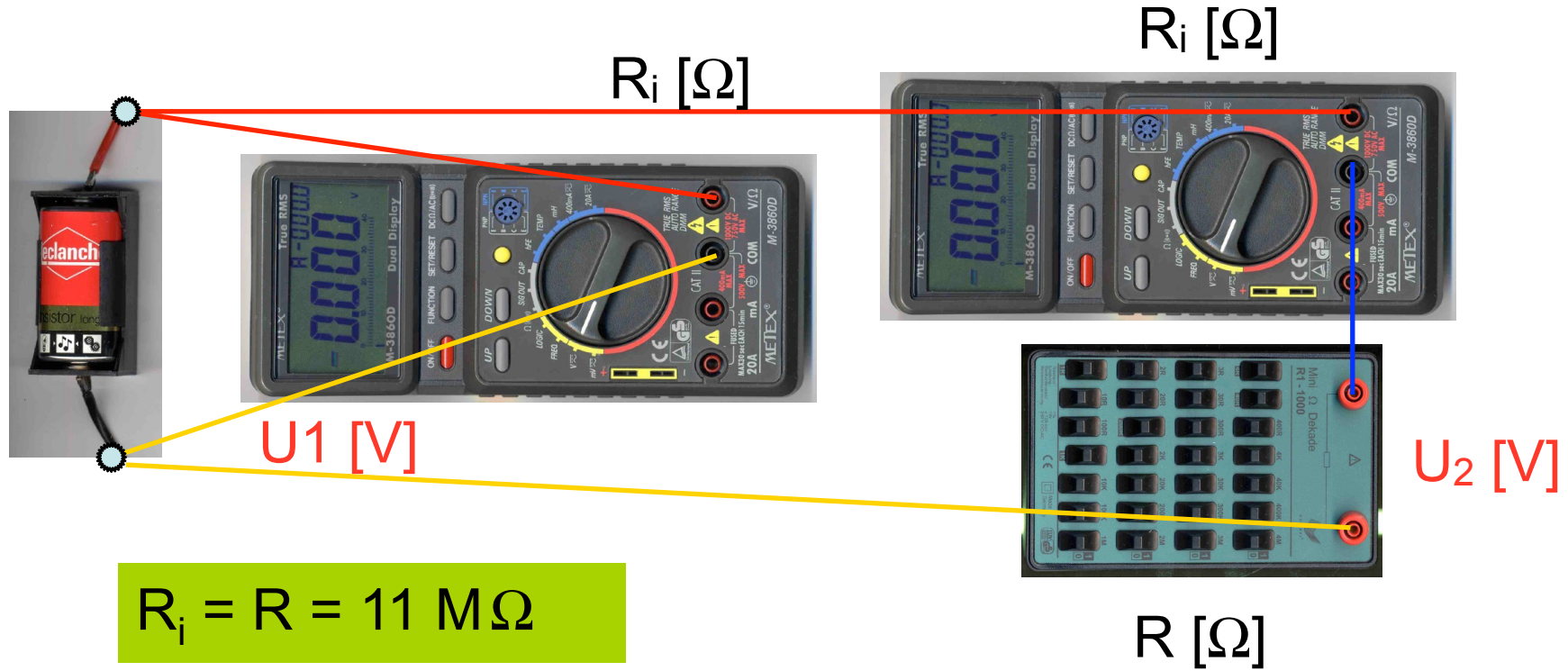
R [Ω]



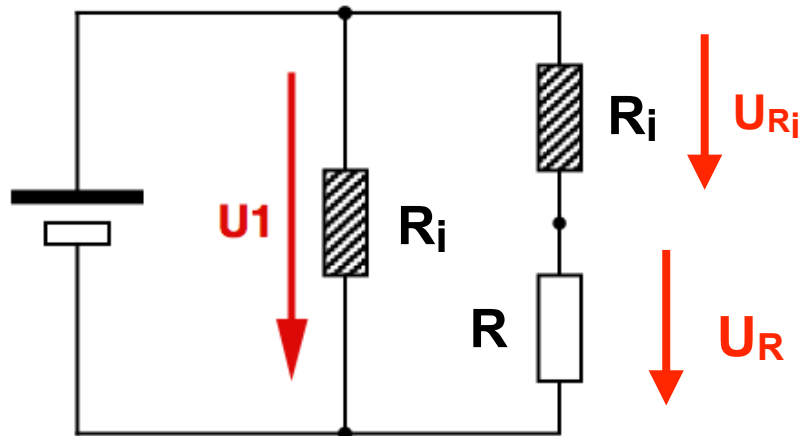
1.1 Mesure de la résistance interne d'entrée du voltmètre



1.1 Mesure de la résistance interne d'entrée du voltmètre



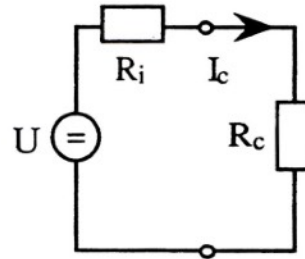
$$R_i = R = 11 \text{ M}\Omega$$



Mesure de courant

Mesure de courants continus ($I=$) ou (A_{DC})

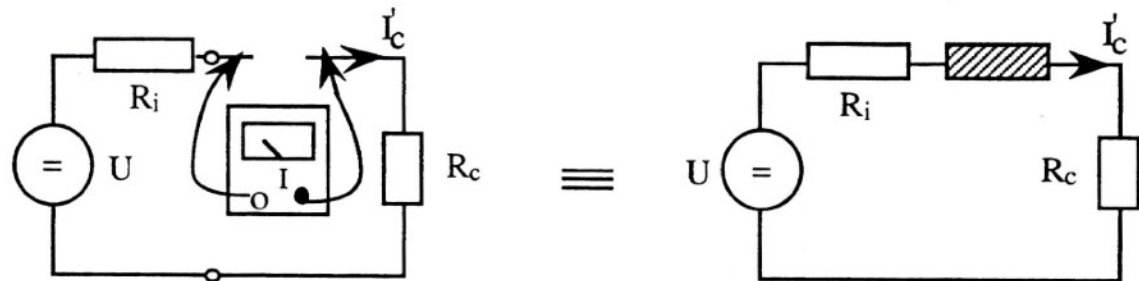
Considérons le circuit suivant, dans lequel circule un courant continu I_c :



Ce courant I_c dans la charge vaut :

$$I_c = \frac{1}{R_i + R_c} U$$

Lors de la mesure de I_c , la résistance interne de l'ampèremètre va intervenir (R_I) et va modifier la valeur mesurée I'_c :



$$I'_c = \frac{1}{R_i + R_I + R_c} U$$

Pour que la valeur mesurée ne s'écarte pas trop de la valeur réelle, il faut que la résistance interne de l'ampèremètre soit très faible

$$R_I \ll R_c \Rightarrow I'_c \approx I_c$$



Ampèremètre



MODEL	FUNCTION	RANGE	ACCURACY	RESOLUTION
M-3850D M-3860D M-3870D	DC CURRENT	* 400μA 4 mA	± 1.0% of rdg + 1 dgt	100 nA 1 μA
		40 mA 400 mA	± 0.8% of rdg + 1 dgt	10 μA 100 μA
		4 A 20 A	± 1.5% of rdg + 5 dgt	1 mA 10 mA
M-3850D M-3870D	AC CURRENT	* 400μA 4 mA	± 1.8% of rdg + 3 dgt	100 nA 1 μA
		40 mA 400 mA	± 1.5% of rdg + 3 dgt	10 μA 100 μA
		4 A 20 A	± 2.0% of rdg + 5 dgt	1 mA 10 mA
M-3860D	AC CURRENT	40 mA 400 mA	(± 2.5% of rdg + 3 dgt)	10 μA 100 μA
		4 A 20 A	± 2.0% of rdg + 5 dgt	1 mA 10 mA

Notes:

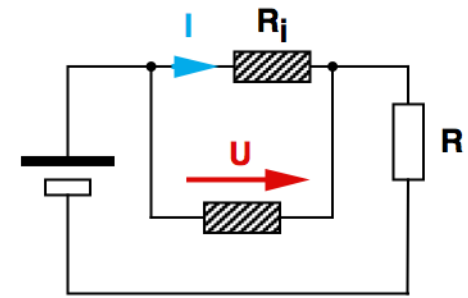
- * Not available for M-3870D and M-3860D
- Impedance of AC Current True rms for M-3860D
 - 1) 40Hz to 20KHz for 4mA/400mA.
 - 2) 40Hz to 1KHz for 20A

1.2 Mesure de la résistance interne de passage de l'ampèremètre

En se servant d'une pile de 1.5 V et de résistances de puissance de 10Ω, 100Ω et 1kΩ, mesurer la résistance interne de passage R_i (impédance) de l'ampèremètre sur les gammes mA et 20A.

Commenter les résultats.

Conseil: établir un tableau Excel.



$U [V]$

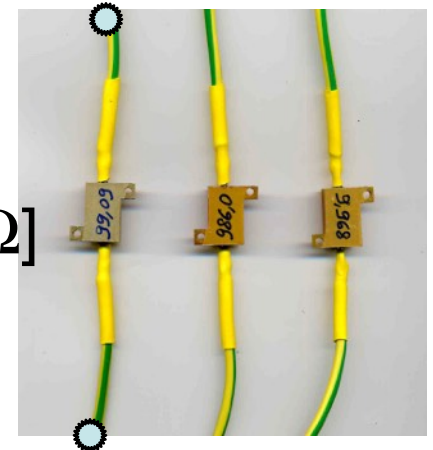


$I [A]$

$$R_i = U / I$$

$R_i [\Omega]$

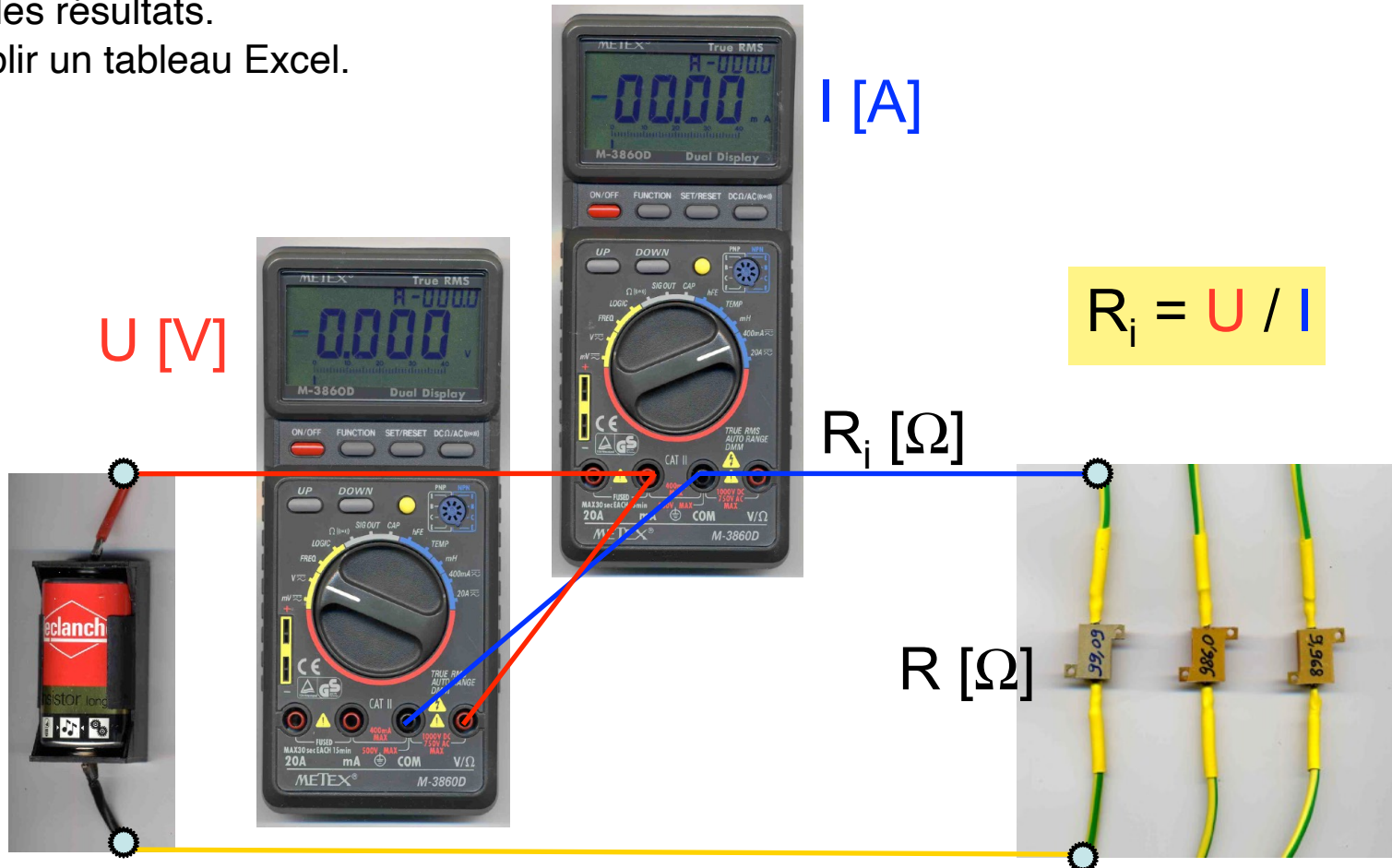
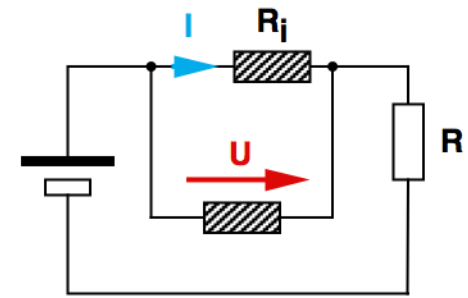
$R [\Omega]$



1.2 Mesure de la résistance interne de passage de l'ampèremètre

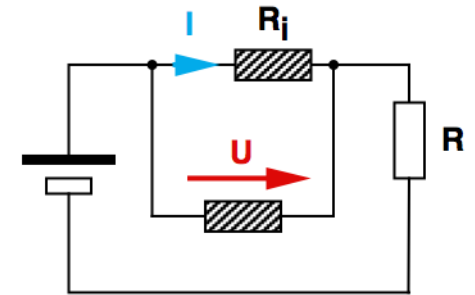
En se servant d'une pile de 1.5 V et de résistances de puissance de 10Ω, 100Ω et 1kΩ, mesurer la résistance interne de passage R_i (impédance) de l'ampèremètre sur les gammes mA et 20A. Commenter les résultats.

Conseil: établir un tableau Excel.



1.2 Mesure de la résistance interne de passage de l'ampèremètre

	Gamme 400 mA	Gamme 20 A
$R_C = 1 \text{ k}\Omega$	1,37 Ω 5,4%	non mesurable
$R_C = 100 \Omega$	1,42 Ω 3,8%	0,033 Ω 22%
$R_C = 10 \Omega$	1,43 Ω 0,73%	0,043 Ω 2,2%

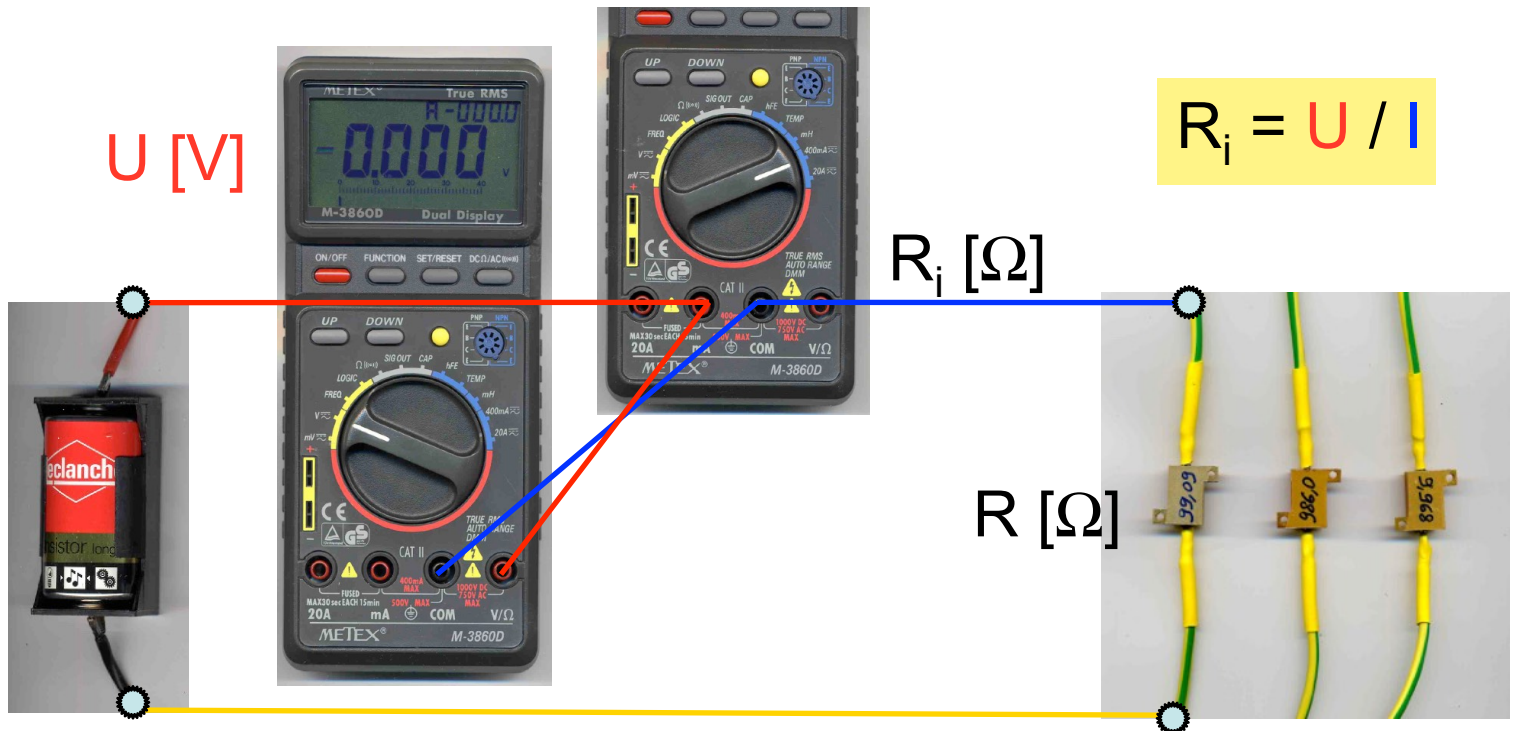


$U \text{ [V]}$

$$R_i = U / I$$

$R_i \text{ [}\Omega\text{]}$

$R \text{ [}\Omega\text{]}$



Mesure R,C,L,f,T,etc.



MODEL	FUNCTION	RANGE	ACCURACY	RESOLUTION
M-3850D M-3860D M-3870D	RESISTANCE	400 Ω 4 KΩ 40 KΩ 400 KΩ 4 MΩ	± 0.5% of rdg + 1 dgt	0.1 Ω 1 Ω 10 Ω 100 Ω 1 KΩ
		40 MΩ	± 1.0% of rdg + 2 dgt	10 KΩ
M-3850D M-3860D M-3870D	CAPACITANCE	4 nF 40 nF 400 nF	± 2.0% of rdg + 3 dgt	1 pF 10 pF 100 pF
		4 μF 40 μF 400 μF	± 3.0% of rdg + 5 dgt	1 nF 10 nF 100 nF
	* DIODE	Measures forward resistance of a semiconductor junction in KΩ at a test current of 1.5mA.		

* Not available for M-3860D/M-3870D

MODEL	FUNCTION	RANGE	ACCURACY	RESOLUTION
M-3860D M-3870D	INDUCTANCE	40 mH	± 3.0% of rdg + 20 dgt	10 μH
		400 mH	± 3.0% of rdg + 10 dgt	100 μH
		* 4 H	± 3.0% of rdg + 20 dgt	1 mH
		* 40 H	± 3.0% of rdg + 10 dgt	10 mH
M-3860D	SIGNAL OUTPUT	Generate C-MOS level signal with 8 steps of frequencies Hz 1-10-100/KHz 1-2-3-4-5		

Notes: * Inductance * Not available for M-3860D.

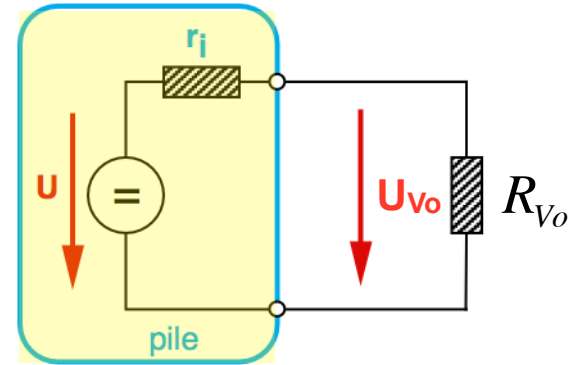
* Pulse frequency for Inductance measurement: Typical 550Hz

MODEL	FUNCTION	RANGE	ACCURACY	RESOLUTION
M-3850D M-3860D M-3870D	FREQUENCY	4 KHz	± 0.1% of rdg + 1 dgt	1 Hz
		40 KHz		10 Hz
		400 KHz		100 Hz
		4 MHz		1 KHz
		* 40 MHz		10 KHz
	TEMPERATURE	-40°C — 200°C	± (3.0% of rdg + 5 dgt)	1 °C
		200°C — 1200°C	± (3.0% of rdg + 2 dgt)	

Frequency: * Not available for M-3860D & M-3870D.

1.3 Mesure de la résistance interne d'une pile

a) mesurer **la tension à vide** U d'une pile de 1,5V.



$$U_{Vo} = \frac{R_{Vo}}{R_{Vo} + R_i} U$$

mais $R_{Vo} \gg r_i \Rightarrow U = U_{Vo}$



R_{Vo}

$U_{Vo} [V]$

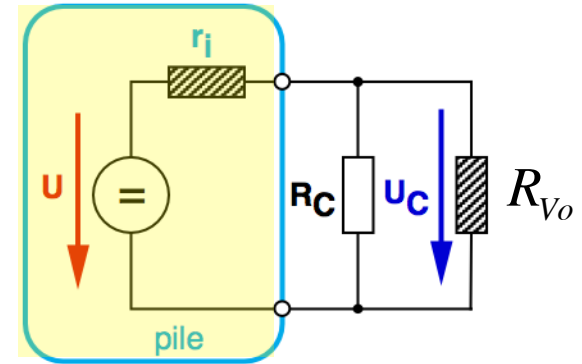
1.3 Mesure de la résistance interne d'une pile

b) mesurer la tension U_C sous charge ohmique de 10Ω , 100Ω et $1k\Omega$ (résistances de puissance!) d'une pile de 1,5V.

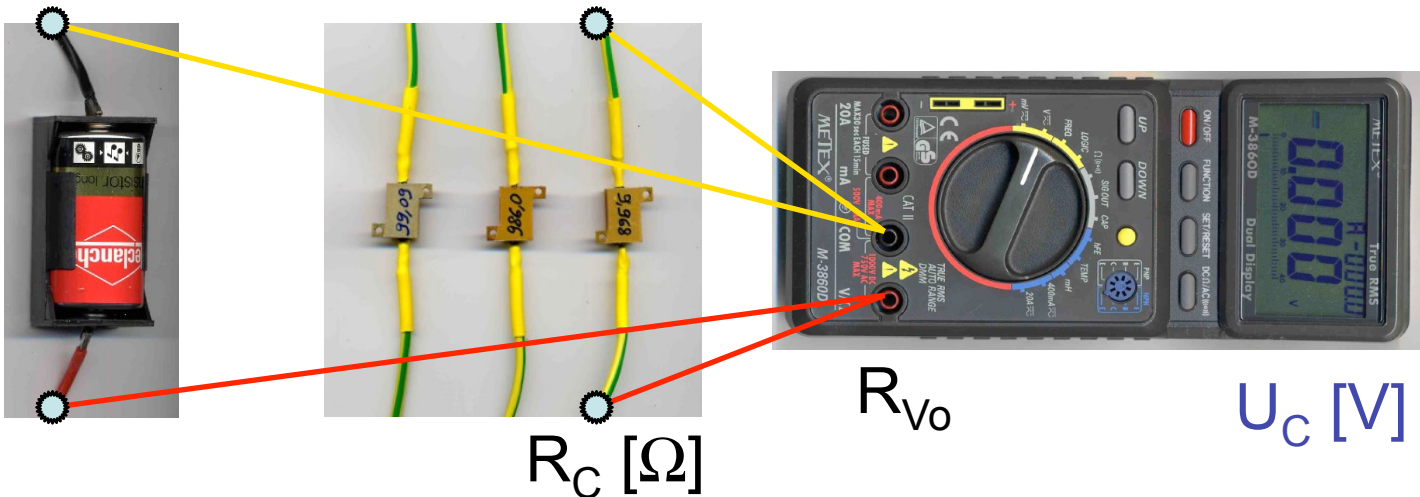
Etablir la formule de calcul de la résistance interne r_i de la pile et calculer celle-ci sous les différentes charges, comparer les valeurs obtenues avec les différentes charges, et discuter les éventuelles différences observées.

Etablir la formule du calcul d'erreur de r_i

Conseil: établir un tableau Excel.



$$U_C = \frac{R_C}{R_C + r_i} U \quad \text{car } R_{Vo} \gg R_C$$



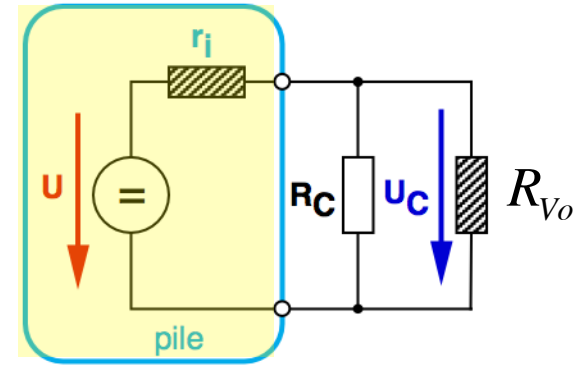
1.3 Mesure de la résistance interne d'une pile

b) mesurer la tension U_c sous charge ohmique de 10Ω , 100Ω et $1k\Omega$ (résistances de puissance!) d'une pile de 1,5V.

Etablir la formule de calcul de la résistance interne r_i de la pile et calculer celle-ci sous les différentes charges, comparer les valeurs obtenues avec les différentes charges, et discuter les éventuelles différences observées.

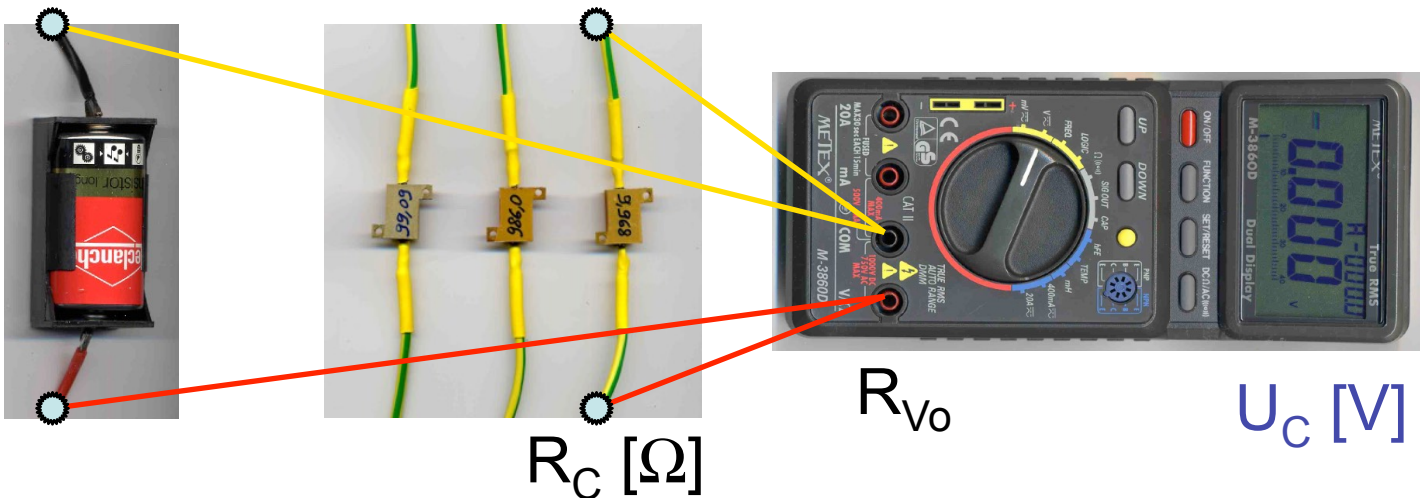
Etablir la formule du calcul d'erreur de r_i

Conseil: établir un tableau Excel.



$$U_c = \frac{R_C}{R_C + r_i} U \quad \text{car } R_{Vo} \gg R_C$$

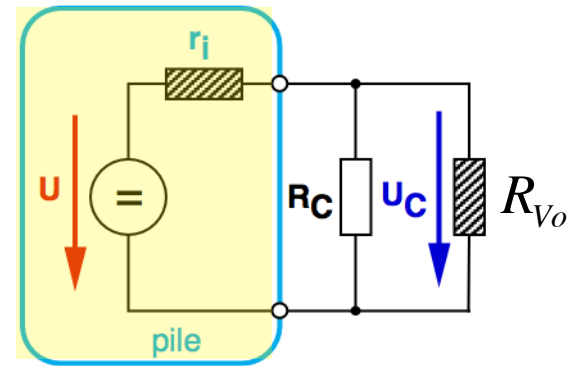
$$\Rightarrow r_i = R_C \frac{(U - U_c)}{U_c}$$



1.3 Mesure de la résistance interne d'une pile

	Pile 1,5 V $U=1,508$ V
$R_C = 1000 \Omega$	$U_C=1,507$ V
$R_C = 100 \Omega$	$U_C=1,502$ V
$R_C = 10 \Omega$	$U_C=1,454$ V

	Pile 1,5 V
$R_C = 1000 \Omega$	$r_i=0,652 \Omega$
$R_C = 100 \Omega$	$r_i=0,397 \Omega$
$R_C = 10 \Omega$	$r_i=0,369 \Omega$



$$U_C = \frac{R_C}{R_C + r_i} U$$

$$\Rightarrow r_i = R_C \frac{(U - U_C)}{U_C}$$

Discuter les éventuelles différences observées:

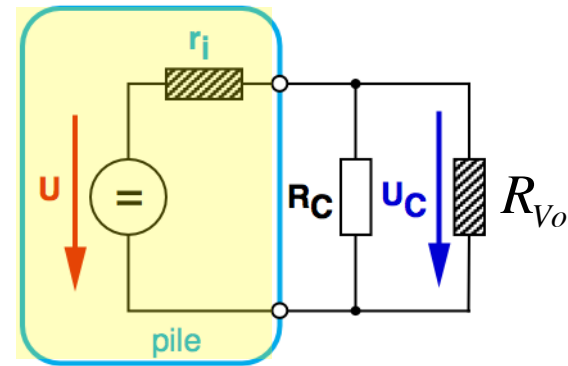
1) le modèle de la pile est trop simple, il faudrait introduire une **résistance interne** $r_i = r_i(I)$ qui dépende du courant I tiré de la pile, ce qui reviendrait à faire un *modèle non-linéaire* de la pile.

2) la **résistance interne** r_i de la pile dépend aussi du temps et de “l’histoire de la pile”, de sorte que $r_i = r_i(I, t, \text{histoire})$, ce qui complique singulièrement le problème de modélisation! On parlerait alors d’un *modèle non-markovien* de la pile.

1.3 Mesure de la résistance interne d'une pile

	Pile 1,5 V $U=1,508$ V
$R_C = 1000 \Omega$	$U_C=1,507$ V
$R_C = 100 \Omega$	$U_C=1,502$ V
$R_C = 10 \Omega$	$U_C=1,454$ V

	Pile 1,5 V
$R_C = 1000 \Omega$	$r_i=0,652 \Omega$
$R_C = 100 \Omega$	$r_i=0,397 \Omega$
$R_C = 10 \Omega$	$r_i=0,369 \Omega$



$$U_C = \frac{R_C}{R_C + r_i} U$$

$$\Rightarrow r_i = R_C \frac{(U - U_C)}{U_C}$$

Discuter les éventuelles différences observées:

- 1) le modèle de la pile est trop simple, il faudrait introduire une **résistance interne** $r_i = r_i(I)$ qui dépende du courant I tiré de la pile, ce qui reviendrait à faire un *modèle non-linéaire* de la pile.
- 2) la **résistance interne** r_i de la pile dépend aussi du temps et de “l’histoire de la pile”, de sorte que $r_i = r_i(I, t, \text{histoire})$, ce qui complique singulièrement le problème de modélisation! On parlerait alors d’un *modèle non-markovien* de la pile.

1.3 Mesure de la résistance interne d'une pile: calcul d'erreur

Calculer l'erreur de mesure sur la résistance interne à partir des erreurs de mesure sur les tensions et les résistances, en utilisant les caractéristiques du multimètre, et discuter les résultats obtenus pour ces calculs d'erreur.

Remarque: vous aurez noté que pendant la mesure avec la résistance la plus basse la variation de U_C pendant la mesure dépasse largement l'incertitude du multimètre.

$$r_i = R_C \frac{(U - U_C)}{U_C}$$

1.3 Mesure de la résistance interne d'une pile: calcul d'erreur

Calculer l'erreur de mesure sur la résistance interne à partir des erreurs de mesure sur les tensions et les résistances, en utilisant les caractéristiques du multimètre, et discuter les résultats obtenus pour ces calculs d'erreur.

Remarque: vous aurez noté que pendant la mesure avec la résistance la plus basse la variation de U_c pendant la mesure dépasse largement l'incertitude du multimètre.

$$r_i = R_c \frac{(U - U_c)}{U_c}$$

erreur sur $U - U_c \Rightarrow |\Delta U| + |\Delta U_c|$

1.3 Mesure de la résistance interne d'une pile: calcul d'erreur

Calculer l'erreur de mesure sur la résistance interne à partir des erreurs de mesure sur les tensions et les résistances, en utilisant les caractéristiques du multimètre, et discuter les résultats obtenus pour ces calculs d'erreur.

Remarque: vous aurez noté que pendant la mesure avec la résistance la plus basse la variation de U_C pendant la mesure dépasse largement l'incertitude du multimètre.

$$r_i = R_C \frac{(U - U_C)}{U_C}$$

$$\text{erreur sur } U - U_C \Rightarrow |\Delta U| + |\Delta U_C|$$

$$\text{erreur sur } r_i \Rightarrow \frac{\Delta r_i}{r_i} = \frac{\Delta R_C}{R_C} + \frac{|\Delta U| + |\Delta U_C|}{|U - U_C|} + \frac{|\Delta U_C|}{U_C}$$

1.3 Mesure de la résistance interne d'une pile: calcul d'erreur

Calculer l'erreur de mesure sur la résistance interne à partir des erreurs de mesure sur les tensions et les résistances, en utilisant les caractéristiques du multimètre, et discuter les résultats obtenus pour ces calculs d'erreur.

Remarque: vous aurez noté que pendant la mesure avec la résistance la plus basse la variation de U_C pendant la mesure dépasse largement l'incertitude du multimètre.

	Pile 1,5 V
$R_C = 1000 \Omega$	$r_i = 0,652 \Omega$ 900%
$R_C = 100 \Omega$	$r_i = 0,397 \Omega$ 150%
$R_C = 10 \Omega$	$r_i = 0,369 \Omega$ 21%

Incertitude nominale de $R_C = 5 \%$

$$r_i = R_C \frac{(U - U_C)}{U_C}$$

$$\text{erreur sur } U - U_C \Rightarrow |\Delta U| + |\Delta U_C|$$

$$\text{erreur sur } r_i \Rightarrow \frac{\Delta r_i}{r_i} = \frac{\Delta R_C}{R_C} + \frac{|\Delta U| + |\Delta U_C|}{|U - U_C|} + \frac{|\Delta U_C|}{U_C}$$

1.3 Mesure de la résistance interne d'une pile: calcul d'erreur

Calculer l'erreur de mesure sur la résistance interne à partir des erreurs de mesure sur les tensions et les résistances, en utilisant les caractéristiques du multimètre, et discuter les résultats obtenus pour ces calculs d'erreur.

Remarque: vous aurez noté que pendant la mesure avec la résistance la plus basse la variation de U_C pendant la mesure dépasse largement l'incertitude du multimètre.

	Pile 1,5 V
$R_C = 1000 \Omega$	$r_i = 0,652 \Omega$ 900%
$R_C = 100 \Omega$	$r_i = 0,397 \Omega$ 150%
$R_C = 10 \Omega$	$r_i = 0,369 \Omega$ 21%

Incertitude nominale de $R_C = 5 \%$

$$r_i = R_C \frac{(U - U_C)}{U_C}$$

erreur sur $U - U_C \Rightarrow |\Delta U| + |\Delta U_C|$

erreur sur $r_i \Rightarrow \frac{\Delta r_i}{r_i} = \frac{\Delta R_C}{R_C} + \frac{|\Delta U| + |\Delta U_C|}{|U - U_C|} + \frac{|\Delta U_C|}{U_C}$

Erreur relative énorme
car $U - U_C$ peut être très petit

1.3 Mesure de la résistance interne d'une pile: calcul d'erreur

Calculer l'erreur de mesure sur la résistance interne à partir des erreurs de mesure sur les tensions et les résistances, en utilisant les caractéristiques du multimètre, et discuter les résultats obtenus pour ces calculs d'erreur.

Remarque: vous aurez noté que pendant la mesure avec la résistance la plus basse la variation de U_C pendant la mesure dépasse largement l'incertitude du multimètre.

	Pile 1,5 V
$R_C = 1000 \Omega$	$r_i = 0,652 \Omega$ 900%
$R_C = 100 \Omega$	$r_i = 0,397 \Omega$ 150%
$R_C = 10 \Omega$	$r_i = 0,369 \Omega$ 21%

Incertitude nominale de $R_C = 5 \%$

$$r_i = R_C \frac{(U - U_C)}{U_C}$$

erreur sur $U - U_C \Rightarrow |\Delta U| + |\Delta U_C|$

erreur sur $r_i \Rightarrow \frac{\Delta r_i}{r_i} = \frac{\Delta R_C}{R_C} + \frac{|\Delta U| + |\Delta U_C|}{|U - U_C|} + \frac{|\Delta U_C|}{U_C}$

Erreur relative énorme
car $U - U_C$ peut être très petit

Et pourtant on mesure assez bien la résistance interne!!!

Pourquoi???

1.3 Mesure de la résistance interne d'une pile

$$r_i = R_C \frac{(U - U_c)}{U_c}$$

Et pourtant on mesure bien la résistance interne!!!

Si les voltmètres sont différents,
U et U_c sont des variables
indépendantes, d'où l'erreur sur

$$r_i \Rightarrow \frac{\Delta r_i}{r_i} = \frac{\Delta R_C}{R_C} + \frac{|\Delta U| + |\Delta U_c|}{|U - U_c|} + \frac{|\Delta U_c|}{U_c}$$

Erreur relative énorme
car $U - U_c$ peut être très petit

	Pile 1,5 V
$R_C = 1000 \Omega$	$r_i = 0,652 \Omega$ 900%
$R_C = 100 \Omega$	$r_i = 0,397 \Omega$ 150%
$R_C = 10 \Omega$	$r_i = 0,369 \Omega$ 21%

Si c'est le même voltmètre, U et U_c sont des variables non indépendantes (erreurs systématiques identiques). Il faut considérer $(U - U_c)$ comme une variable indépendante, d'où l'erreur sur

$$U - U_c \Rightarrow |\Delta(U - U_c)|$$

$$r_i \Rightarrow \frac{\Delta r_i}{r_i} = \frac{\Delta R_C}{R_C} + \frac{|\Delta(U - U_c)|}{|U - U_c|} + \frac{|\Delta U_c|}{U_c}$$

Erreur relative sur $(U - U_c)$
plus faible, de quelques %

	Pile 1,5 V
$R_C = 1000 \Omega$	$r_i = 0,652 \Omega$ 100%
$R_C = 100 \Omega$	$r_i = 0,397 \Omega$ 21%
$R_C = 10 \Omega$	$r_i = 0,369 \Omega$ 7 %