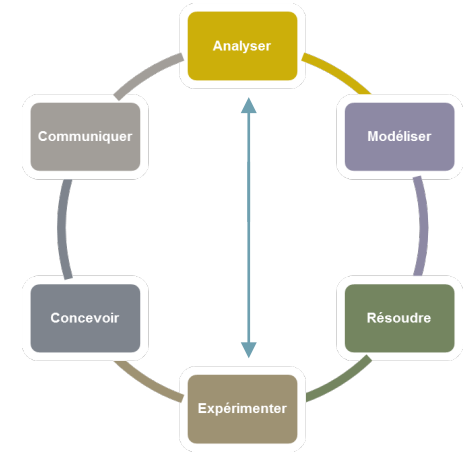


## TP CPGE S1

# MODÉLISATION ACAUSALE SPINTRONICS



- Analyser : Comprendre la dualité électricité/mécanique
- Expérimenter : Effectuer des montages élémentaires électroniques avec des éléments Spintronics.

*Attention : Il n'y a aucun câblage électrique dans ce tp.  
Nécessite du matériel spécifique.*



## Objectifs

L'objectif est de comprendre le fonctionnement, à l'aide de montages mécaniques, des montages électroniques élémentaires **qui seront étudiés en détail** en 1<sup>ère</sup> et 2<sup>ème</sup> année.

*Remarque générale : le matériel proposé est fragile. Merci de le respecter. Toute utilisation non conforme sera sanctionnée par une exclusion immédiate de la salle.*

Les systèmes qui évoluent au cours du temps sont, de manière simpliste, modélisés par des équations faisant intervenir des variables temporelles et leurs dérivées par rapport au temps (on parle d'équations différentielles / temps).

On rappelle qu'une vitesse linéaire  $v(t)$  (en m/s) est la dérivée / temps de la position  $x(t)$ , ce qui se note :

$$v(t) = \frac{dx(t)}{dt} = \dot{x}(t)$$

En conséquence modéliser un montage électronique revient à écrire une ou des équations différentielles.

Equations que l'on peut obtenir aussi en mécanique ou en hydraulique.

L'électronique n'étant pas facile à appréhender (qui a déjà vu un électron se déplacer ?), Spintronics permet donc d'écrire les équations de l'électronique à l'aide de la mécanique et ainsi d'appréhender les lois élémentaires de l'électricité et de l'électronique. Bien entendu les bases de temps électricité vs mécanique ne sont pas comparables, mais néanmoins cela permet de comprendre quels rôles jouent les différents composants dans un circuit.

# Sommaire

Sujets	Éléments étudiés
Dualité électricité/mécanique	Résistance
Le pont diviseur de tension	Voltmètre (+ jonction Spintronics)
Le pont de Wheatstone	Simulateur Spintronics
Le pont de Graetz	Diode
La commande d'une bobine	Bobine
Le hacheur série	Transistor
Le filtrage	Condensateur

*De manière arbitraire, dans ce sujet, les variables associées à l'électricité sont choisies en minuscules et bleues et celles associées à la mécanique du solide en MAJUSCULES et VERTES.*



# ANALYSER

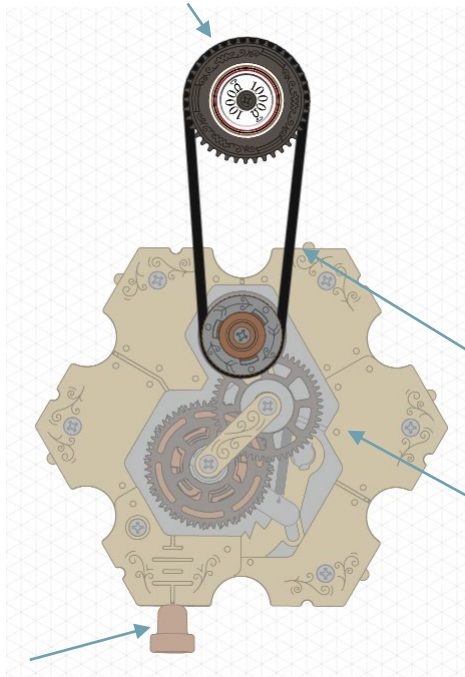
---

Comprendre la dualité électricité/mécanique

# Le premier montage initiatique

## 1 Mise en place d'une « résistance »

- Faites tourner à la main l'élément « résistance » : son comportement est-il constant en fonction de la vitesse angulaire que vous appliquez ? Votre difficulté à faire tourner l'élément s'appelle un couple.
- Effectuez le montage et tester-le avec plusieurs valeurs de résistance. Que remarquez-vous ?

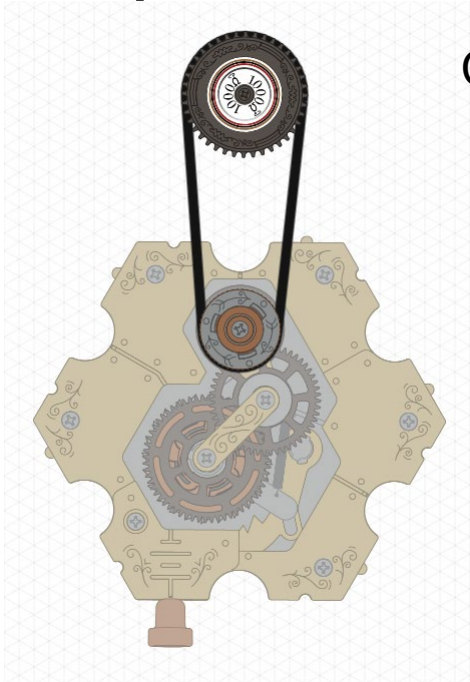


**2** Mise en place d'une chaine : arrangez-vous pour que la chaine soit très légèrement tendue (mais pas trop sinon trop de frottement)  
On conseille de la mettre au niveau 1 (le plus bas).

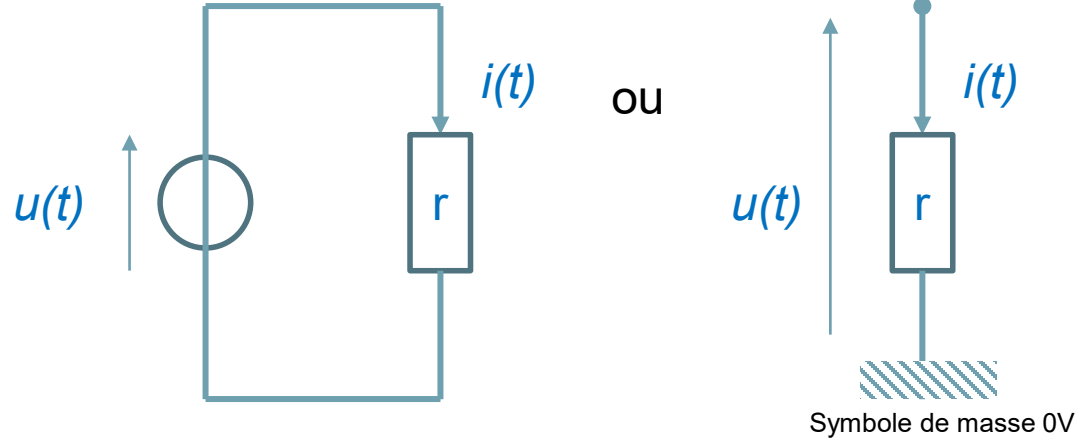
Bloc alimentation

**3** Ficelle à tirer : inutile d'aller au bout à chaque test (**ne pas tirer à vide !**)

# Le premier montage initiatique



Ce montage a un comportement dynamique équivalent à :



**Question 1 :** Sur le système mécanique, à quoi peut bien correspondre la tension  $u(t)$  et l'intensité  $i(t)$  ?\*

**A retenir :**  $u(t)$  est appelée variable d'effort,  $i(t)$  variable de flux

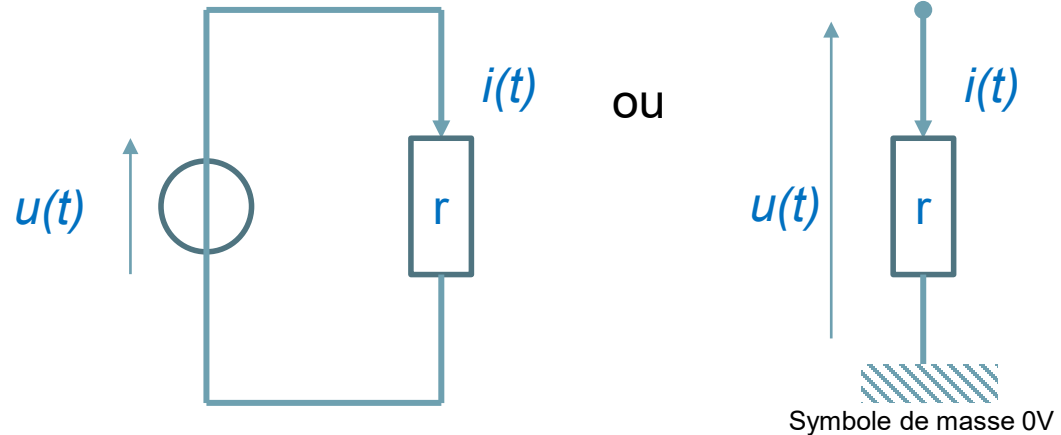
\* Ne pas rester bloqué à cette question demandant plutôt de l'intuition.

# Le premier montage initiatique donc première loi !

La relation liant la tension  $u(t)$  et l'intensité  $i(t)$  aux bornes de la résistance  $r$  est **la loi d'Ohm** :

$$u(t) = r \cdot i(t)$$

- $u(t)$  en volt [V]
- $i(t)$  en ampère [A]
- $r$  en ohm [ $\Omega$ ]



Symbole de masse 0V

Donc l'élément Spintronics doit répondre à la même relation. En effet mécaniquement :

$$\begin{aligned} V(t) &= R \cdot W(t) \\ C(t) &= R \cdot F(t) \\ C(t) &= \mu \cdot W(t) \end{aligned}$$

Avec  $V(t)$  vitesse linéaire de la chaîne [m/s],  $W(t)$  vitesse angulaire du pignon [rad/s],  $C(t)$  couple chaîne sur roue dentée en [N.m],  $F(t)$  force de traction dans la chaîne [N],  $R$  le rayon du pignon [m] et  $\mu$  coefficient de frottement visqueux angulaire [N.m.s].

**Question 2** : Retrouvez l'équivalent de la loi d'Ohm en mécanique soit  $F(t) = f_{eq} V(t)$ .

# Correspondance Electronique/Mécanique 1

	Elément électrique	Elément mécanique de translation	relation mathématique
Variable de flux $V_f$	Intensité en ampère [A]		
Variable d'effort $V_e$	Tension en volt [V]		
	$r$ résistance en ohm [ $\Omega$ ]	$f_{eq}$ frottement visqueux linéaire [ $N.s.m^{-1}$ ]	

*Prévoir de la place sous ce tableau qui va grossir au cours de la séance.  
Les cases grisées ne sont pas à remplir.*

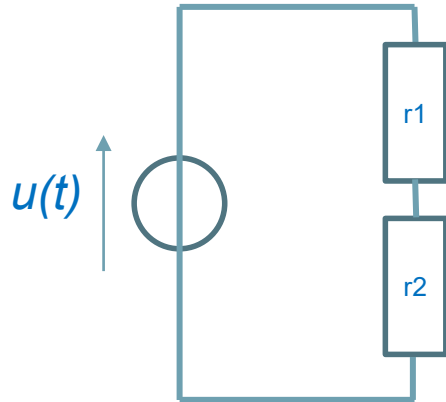
**Question 3 :** Remplissez le tableau. La relation mathématique demandée relie  $V_f$  avec  $V_e$  à l'aide d'une constante arbitrairement notée  $k_r$ .



# Les résistances en série

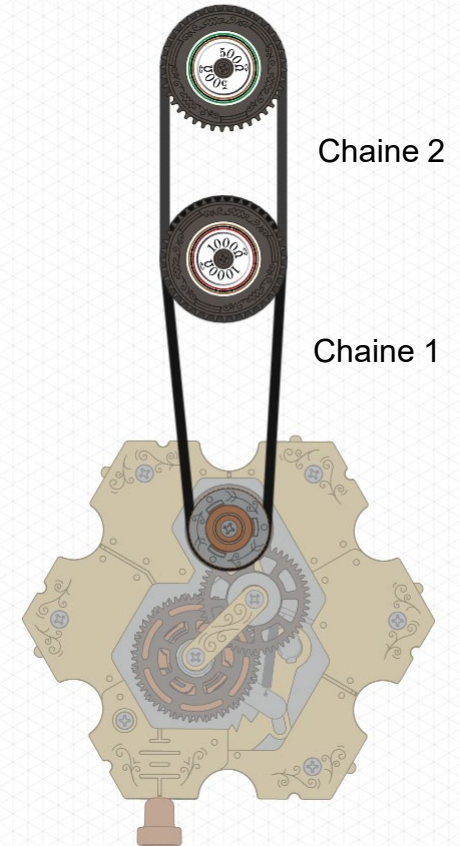
- Effectuez le montage suivant. Testez et observez les vitesses des chaines (ou angulaires des pignons).

**Question 4 :** Que remarquez-vous à propos des intensités électriques traversant les résistances. Est-il aisé d'observer la tension à leurs bornes ?



Pour observer la tension aux bornes des résistances (on parle aussi de dipôles), il faut placer un voltmètre en parallèle du circuit et donc créer une jonction électrique (ou nœud).

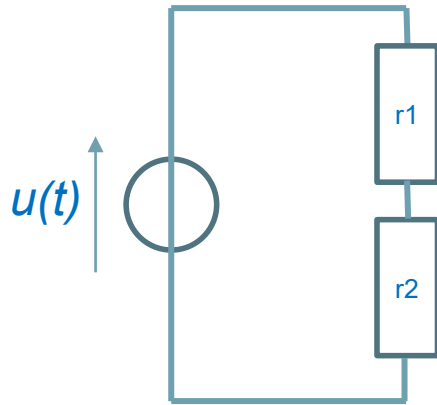
Chaines un peu tendues mais pas trop !



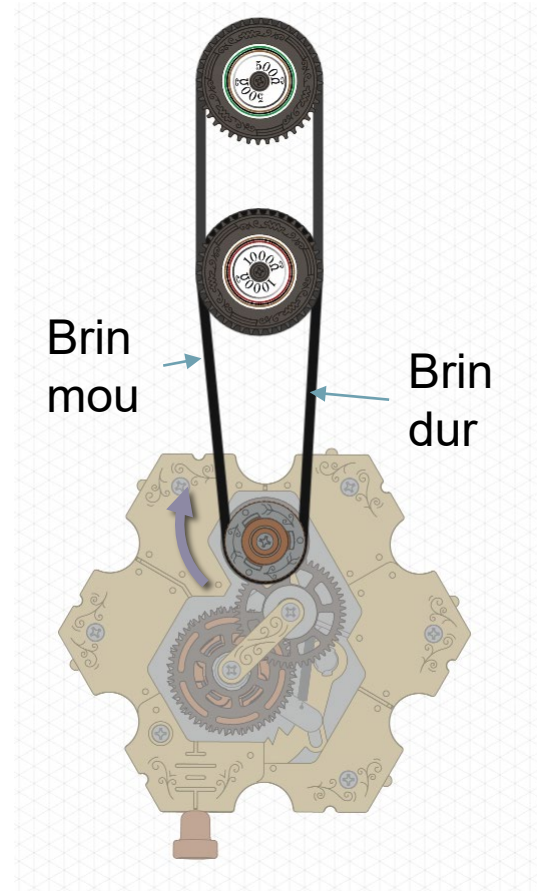
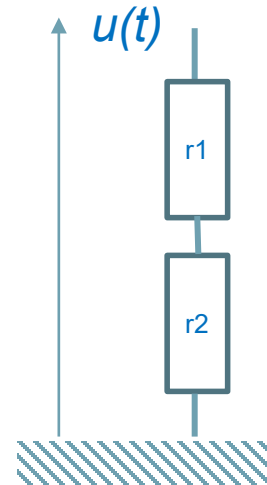
*Remarque : ce montage peut se faire aussi avec une seule grande chaine.*

# Les résistances en série

La chaîne par principe est reliée au pignon moteur (alimentation) par le brin « dur », celui qui tire, et le brin « mou ». On peut représenter le schéma électrique plutôt de la manière suivante :



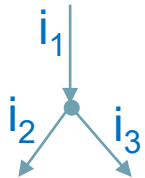
2 schémas  
électriques  
équivalents



# La jonction : loi des nœuds

Le loi des nœuds en électricité s'exprime comme suis (pour 3 branches) :

$$i_1(t) = i_2(t) + i_3(t) \quad i_j \text{ l'intensité dans la branche } j \text{ (fil } j)$$



Il faut donc trouver un système mécanique qui donnerait :

$$V_1 = V_2 + V_3 \text{ avec } V_j \text{ la vitesse de la chaine } j.$$

Ceci est réalisé à l'aide d'un montage à roues dentées appelé train épicycloïdal nommé ici jonction.

Une étude cinématique permet de démontrer que :

$$W_3 + 2.W_2 = 3.W_1 \text{ avec } W_n \text{ la vitesse angulaire du niveau } n / \text{ socle.}$$

Le niveau 3 est celui du haut (petit roue).



- Bloquez la grande roue (niveau 1) et faites tourner une des autres.

**Question 5 :** Est-ce cohérent avec la relation des vitesses précédentes ? Même question en bloquant le niveau 2 puis le 3.

# La jonction : loi des nœuds

Une étude cinématique permet de démontrer que :

$W_3 + 2.W_2 = 3.W_1$  avec  $W_n$  la vitesse angulaire du niveau  $n$  / socle.

On rappelle que  $V_n = R_n.W_n$  avec  $R_n$  le rayon de la roue de niveau  $n$ .

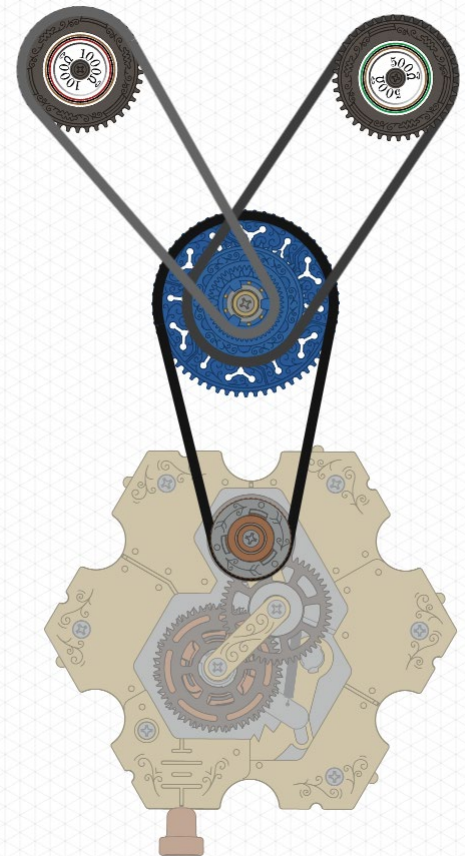
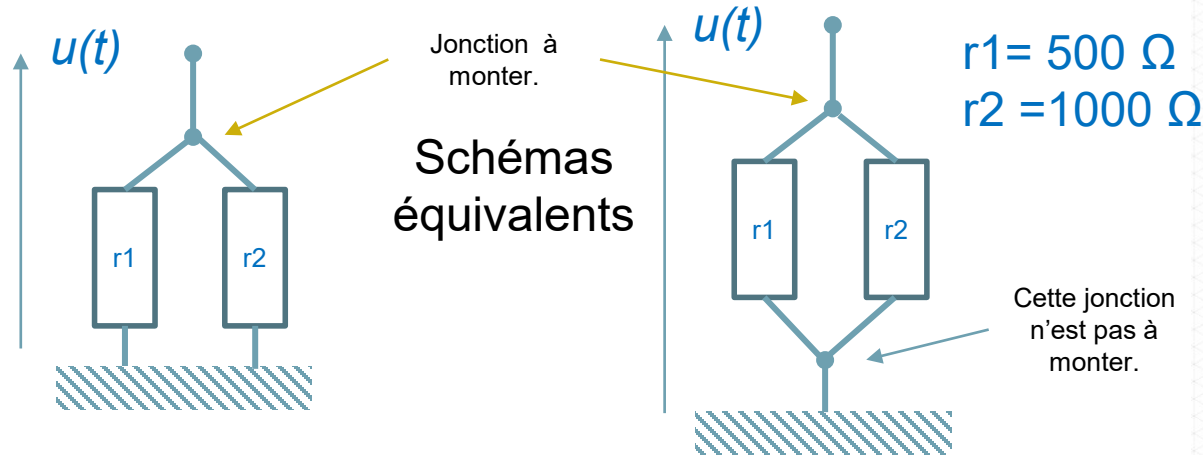
On remarque que  $R_2 = 2.R_3$  et  $R_1 = 3.R_3$ . ( $R_3$  rayon petite roue du haut)



**Question 6 :** Ecrivez la relation entre les  $V_n$ ,  $n \in \{1,2,3\}$ .  
Concluez par rapport à la loi des nœuds.

# Les résistances en parallèle

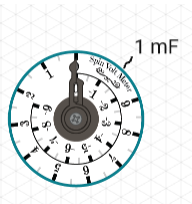
Compte tenu du concept de transmission par chaines, la jonction doit être vue comme une création de divergence mécanique ou parallélisme électrique.



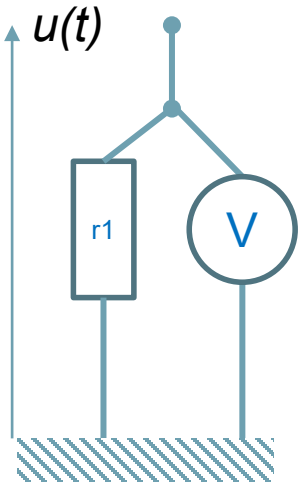
- Effectuez le montage et observez les vitesses des chaines.

**Question 7 :** La roue « résistance la plus faible » tourne t-elle plus vite que l'autre ?

# Le voltmètre



- Le « voltmètre » Spintronics est le module avec une aiguille (on verra plus loin de quoi il est composé). Pour mesurer la tension aux bornes d'un récepteur (une résistance par exemple), il faut placer le voltmètre en parallèle.



- Effectuez le montage en choisissant **r1** à « 500 ou 1000  $\Omega$  » ; pivotez l'élément voltmètre et mettez les aiguilles à 0 ; alimentez votre montage et mesurez la « tension » aux bornes du dipôle.

**Question 8 :** Ce résultat est-il dépendant de **r1** ? Ce résultat est-il constant au cours du temps ? Est-ce que la chaîne liée au « voltmètre » tourne ? Quel courant le traverse alors ? Concluez sur la valeur de la résistance d'un voltmètre.

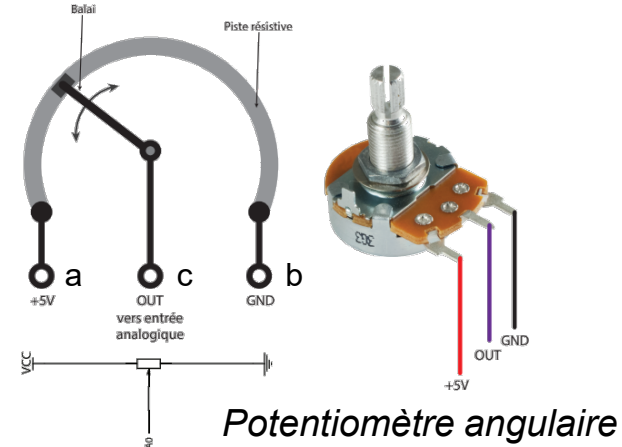
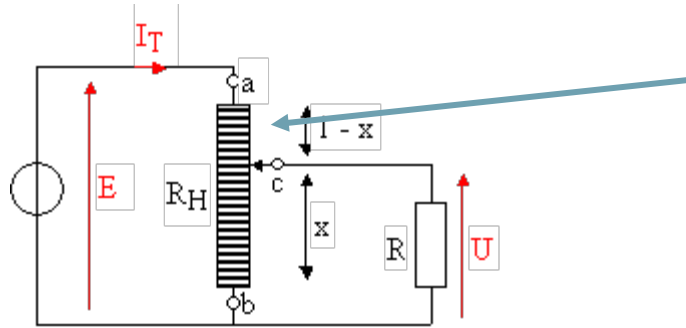
# EXPÉRIMENTER 1

---

- Effectuer des montages élémentaires électroniques avec des éléments Spintronics : le montage diviseur de tension

# Le montage diviseur de tension

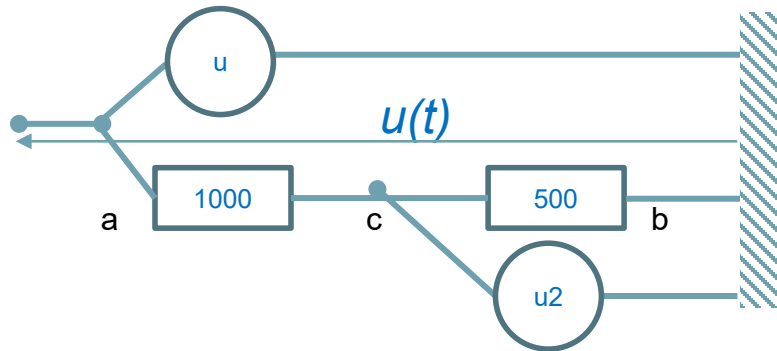
- Ce montage est utilisé en fonction acquérir en plaçant une résistance variable en série d'une autre, avec une alimentation en tension stabilisée. La mesure de la tension aux bornes de la résistance variable est proportionnelle à la valeur de la résistance et donc fournit une information.
- Ex : potentiomètre linéaire ou angulaire : la résistance dépend de la position d'un curseur.





# Le montage diviseur de tension

- Ce montage est utilisé en fonction acquérir en plaçant une résistance variable en série d'une autre, avec une alimentation en tension stabilisée. La mesure de la tension aux bornes de la résistance variable est proportionnelle à la valeur de la résistance et donc fournit une information.
- Ex : potentiomètre linéaire ou angulaire : la résistance dépend de la position d'un curseur.



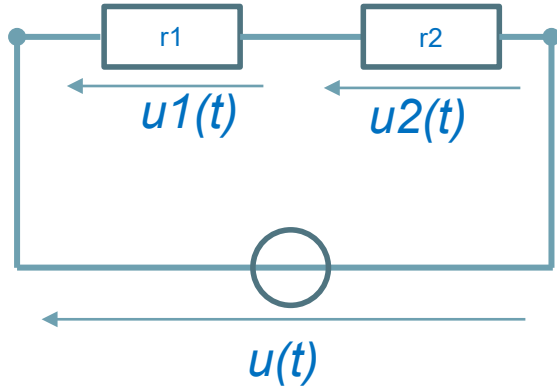
- Effectuez le montage correspondant.
- Testez et relevez les valeurs des tensions. (quitte à tapoter un peu dessus).

**Question 9 :** Relevez  $u$  et  $u_2$ .

- Freinez légèrement avec vos doigts la résistance 500 et observez la tension à ces bornes.

# Le montage diviseur de tension : loi des mailles

- Nous allons vérifier la loi des mailles :  $u(t) = u1(t) + u2(t)$



**Question 10** : Sachant que le courant est constant (et non perturbé par la présence des voltmètres), en utilisant la loi d'Ohm aux bornes de chaque dipôle, exprimez  $u2(t)$  en fonction de  $r1$ ,  $r2$  et  $u(t)$ .

**Question 11** : Faites l'application numérique avec  $r1=1000\ \Omega$  et  $r2=500\ \Omega$  et vérifiez la conformité avec les mesures précédentes.

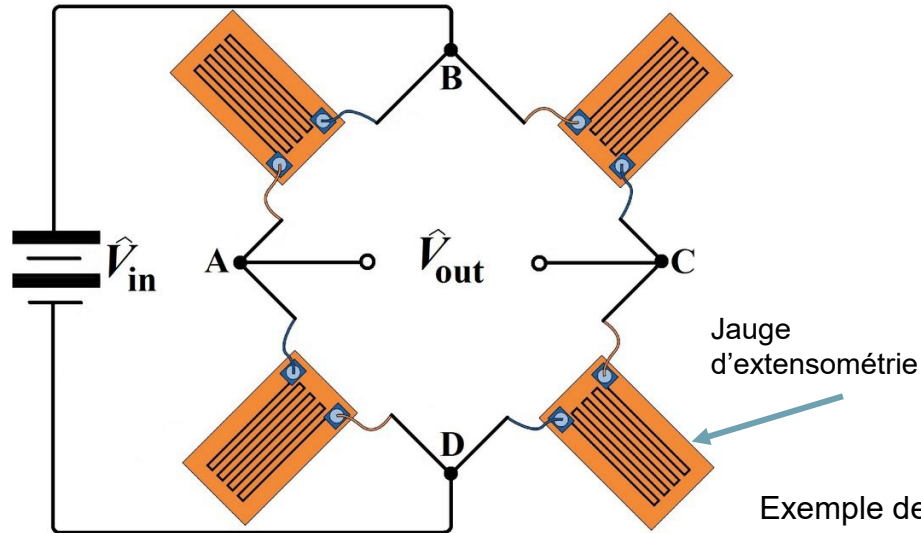
# EXPÉRIMENTER 2

---

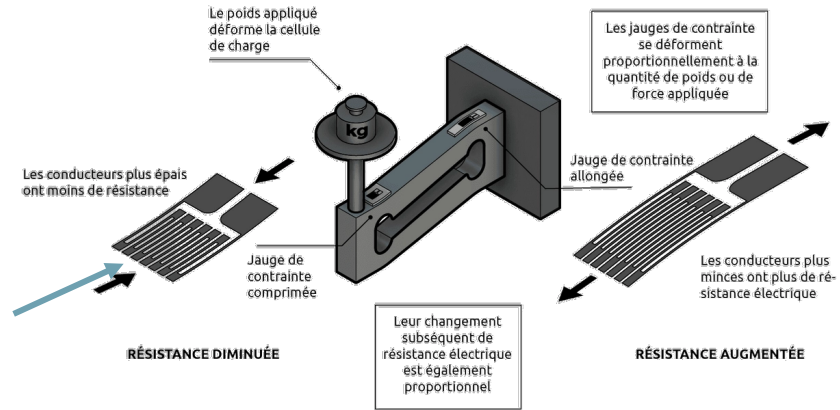
- Effectuer des montages élémentaires électroniques avec des éléments Spintronics : le pont de Wheatstone

# Le pont de Wheatstone (pont de résistances)

Ce montage est l'association de 4 résistances en série deux par deux sur deux branches parallèles. Un pont simple contient 3 résistances identiques et une 4<sup>ème</sup> modifiable. Un pont complet contient les 4 résistances variables. Il s'agit en général d'un élément dont la ou les résistance(s) varie(nt) en fonction d'un paramètre. (un effort ou une pression).



## Déformation de la jauge de contrainte

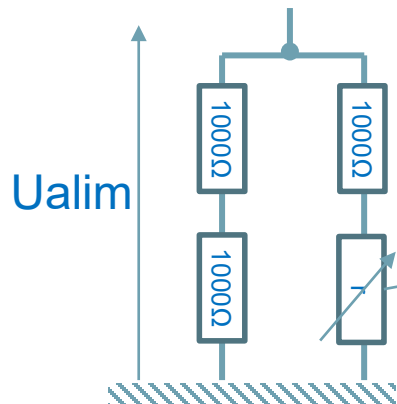


Exemple de montage en pont complet (les résistances sont variables)

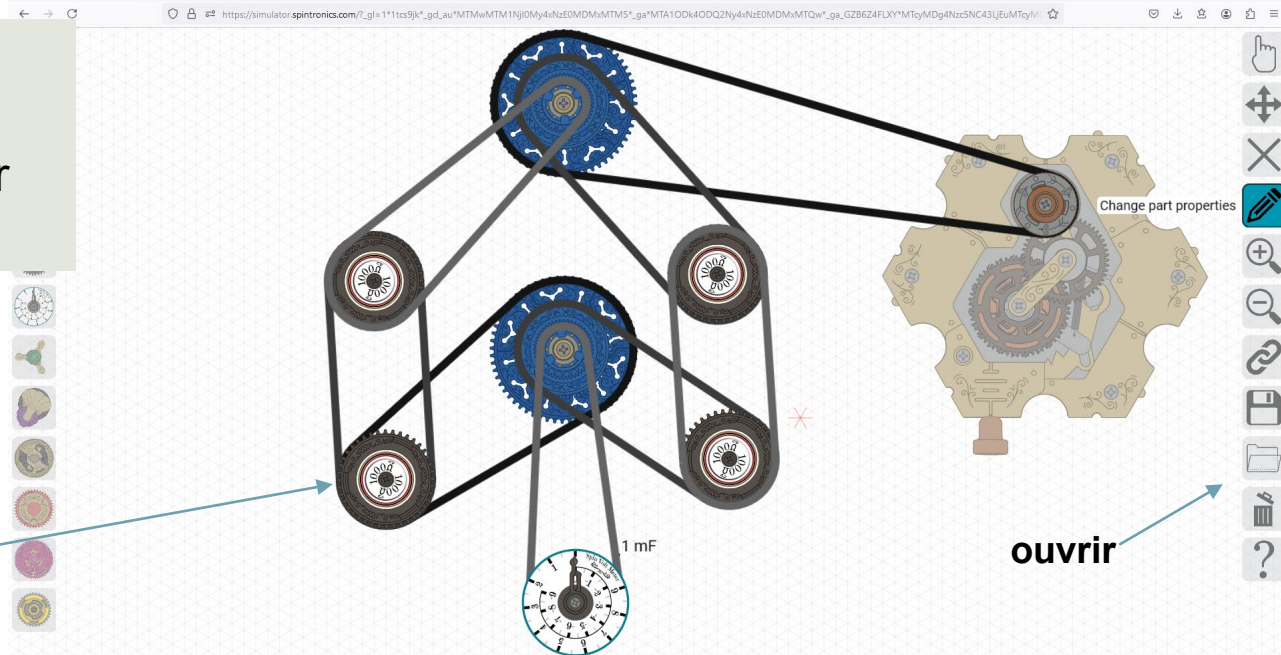
# Le pont de Wheatstone (pont de résistances)

Pour ce montage qui utilise plus de ressources, on utilisera avec profit le simulateur en ligne. <https://simulator.spintronics.com/>

- Ouvrez le fichier « Pont de Wheatstone.spin » préalablement copié sur votre espace disque.



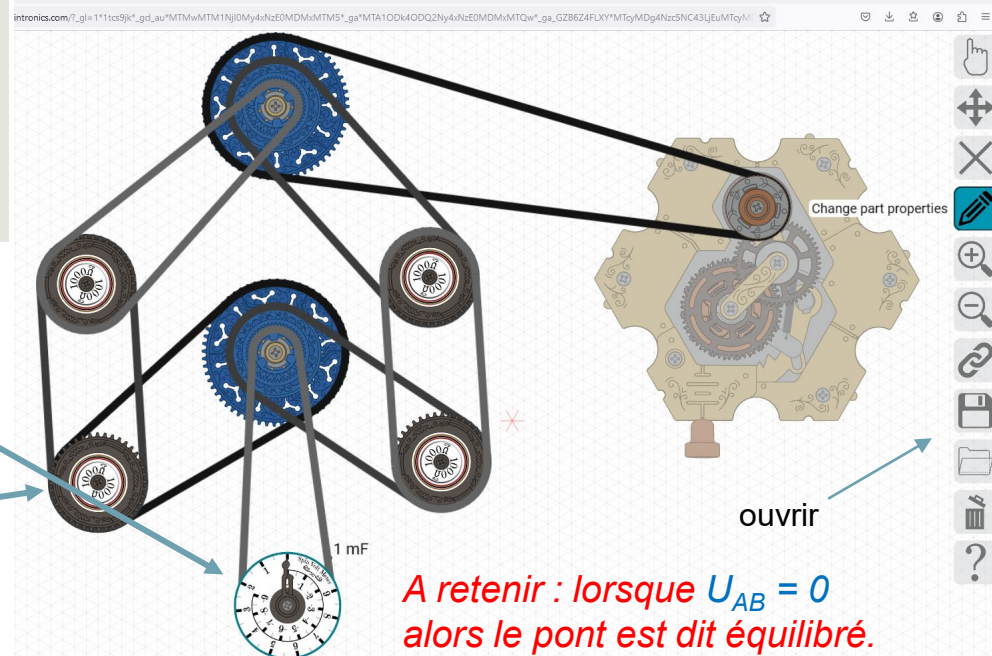
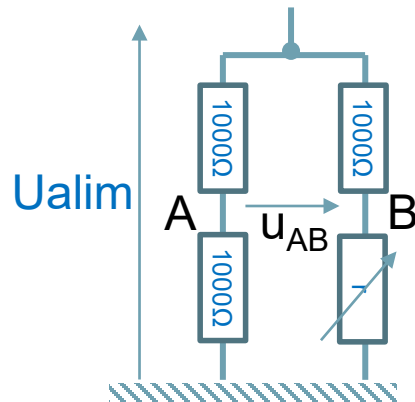
La flèche oblique signifie que cela est réglable (modifiable).



# Le pont de Wheatstone (pont de résistances)

Exemple à une seule résistance variable.

- Observez la tension  $U_{AB}$  lorsque les 4 résistances sont identiques.
- Cliquez sur le bouton « Change part properties » puis sur la résistance  $r$ , et modifiez-là . Observez la variation de  $U_{AB}$ .



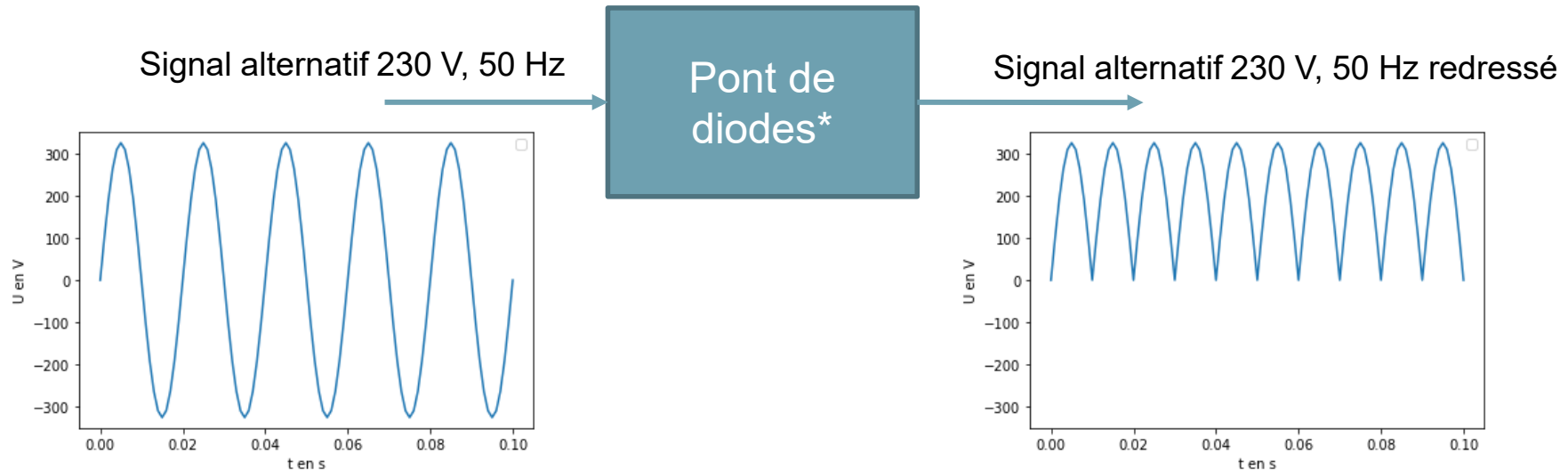
# EXPÉRIMENTER 3

---

- Effectuer des montages élémentaires électroniques avec des éléments Spintronics : le pont de Graetz

# Le pont de Graetz (pont de diodes)

Le signal électrique transporté sur de longues distances est alternatif. Le signal sur vos prises de courant est de 230 V oscillant à 50 Hz. Il est parfois utile d'obtenir un signal quasi continu. Il faut donc redresser le signal d'origine. Un pont de diodes permet cela.



\* Nommé aussi parfois pont redresseur



# Le pont de Graetz (pont de diodes)

L'élément diode permet dans Spintronics d'imposer un sens de vitesse chaîne (donc un sens de courant). En mécanique cela se nomme « roue libre ».

- Saisissez l'élément « diode » fourni. (attention fragile)

**Question 12** : Quel système mécanique avec transmission par chaîne connaissez-vous, possède cet élément ?

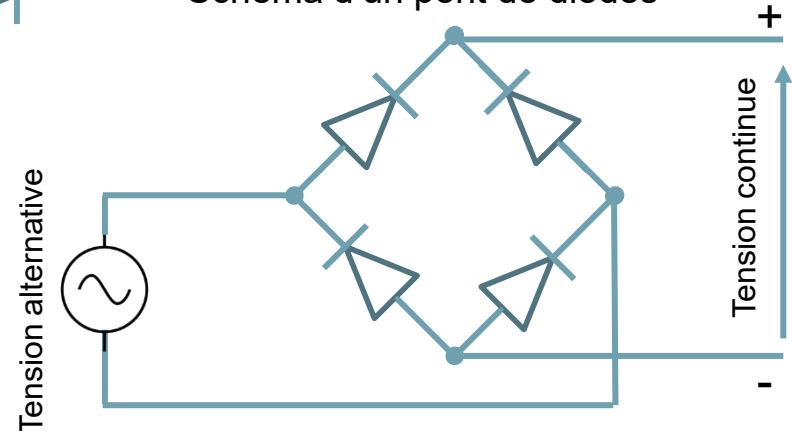


Le symbole électrique est le suivant :



Le courant *i* ne peut circuler que dans le sens de la flèche. En réalité il y a plus de subtilités qui seront étudiées plus tard en cours.

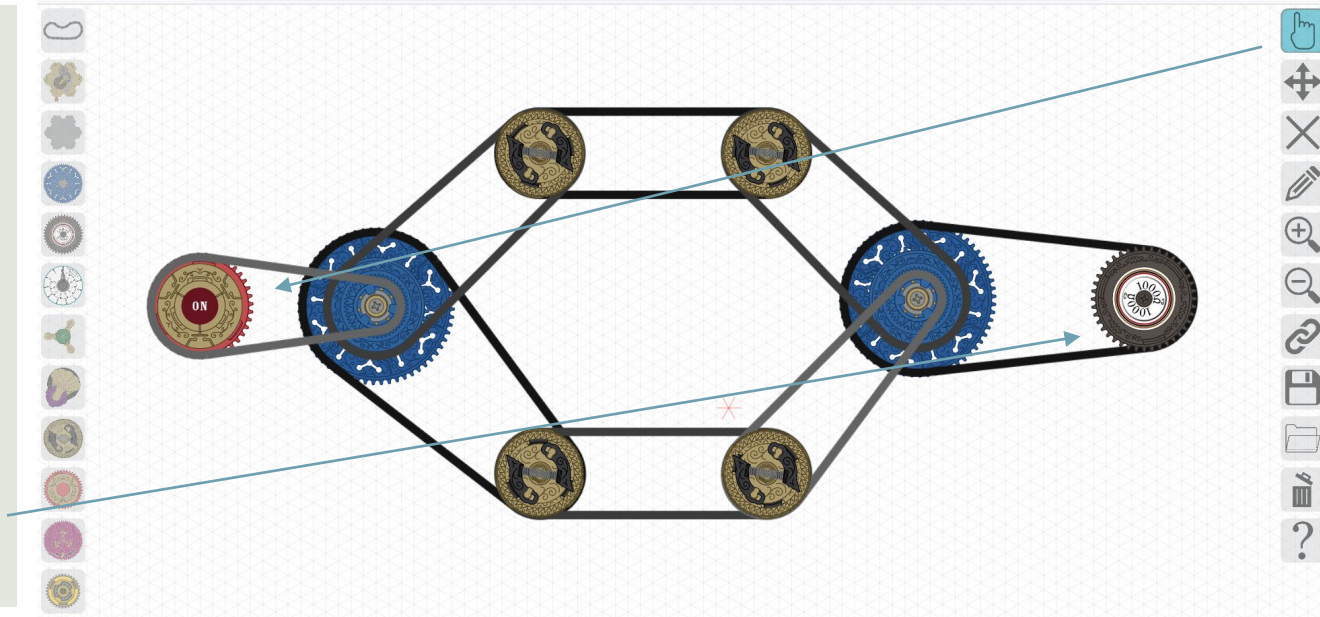
Schéma d'un pont de diodes



# Le pont de Graetz (pont de diodes)

Toujours avec le simulateur, ouvrir le fichier « Pont de diodes.spin ».

- Avec l'outil main, effectuez des petits mouvements de va-et-vient sur l'élément rouge simulant une tension alternative et observez le mouvement de la roue de sortie (résistance).



La roue de sortie tourne toujours dans le même sens. D'un point de vue électrique le courant de sortie reste positif quel que soit le signe du courant d'entrée.

# EXPÉRIMENTER 4

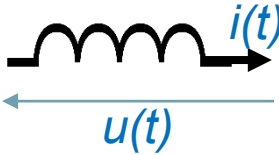
---

- Effectuer des montages élémentaires électroniques avec des éléments Spintronics : le hacheur série

# La bobine

Les électro-aimants, en particuliers ceux situés dans les moteurs à courant continu, sont constitués de bobines de fils ayant un comportement spécifique électriquement.

Le symbole électrique est :



Le modèle électrique est :  $u(t) = L \cdot \frac{di(t)}{dt}$        $L$  est l'inductance en henry [H].

Il faut trouver une relation mécanique équivalente :  $F(t) = Q \cdot \frac{dV(t)}{dt}$

**Question 13** : Que représente la variable  $\frac{dV(t)}{dt}$  ? Connaissez-vous une relation de la mécanique du solide qui conviendrait ? Que serait  $Q$  ?

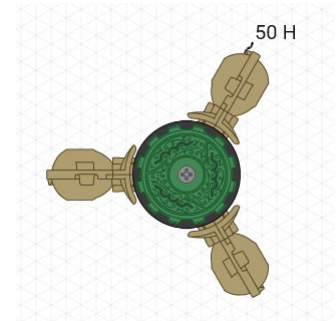
# La bobine

Bien que ce soit le mouvement des chaines qui nous intéresse, les différents éléments Spintronics utilisés ont des mouvements de rotation.

Il existe une relation de la mécanique des solides issus du principe fondamental de la dynamique (voir cours de spé) qui relie le couple  $C(t)$  avec l'accélération angulaire.

$$C(t) = I. \frac{dW(t)}{dt}$$

Avec  $C(t)$  le couple [N.m],  $W(t)$  la vitesse de rotation [rad/s],  
 $I$  le moment d'inertie / axe de rotation [kg.m<sup>2</sup>].

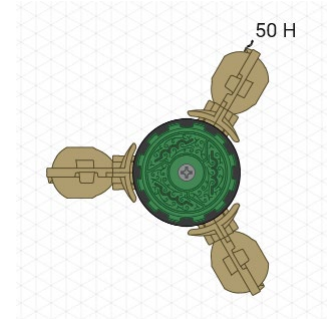


- Saisissez l'élément Spintronics qui modélise une bobine, faites-la tourner et observez son comportement temporel.

# La bobine

Pour rappel :

$$C(t) = I. \frac{dW(t)}{dt}$$
$$V(t) = R. W(t)$$
$$C(t) = R. F(t)$$



**Question 14 :** En exploitant les relations de la mécanique ci-dessus, exprimez  $Q$  en fonction de  $I$  et  $R$ .  $Q$  s'appelle une masse équivalente. Vérifiez la cohérence de vos unités.

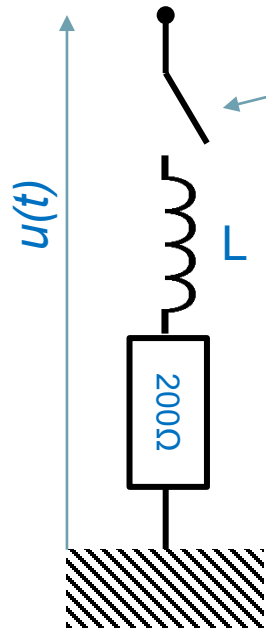
# Correspondance Electronique/Mécanique 2

	Elément électrique	Elément mécanique de translation	Relation mathématique
Variable de flux $V_f$	Intensité en ampère [A]		
Variable d'effort $V_e$	Tension en volt [V]		
	$r$ résistance en ohm [ $\Omega$ ]	$f_{eq}$ frottement visqueux linéaire [N.s]	
	Bobine d'inductance $L$ en henry [H]		

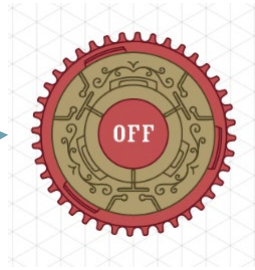
**Question 15 :** Complétez le tableau. La deuxième relation mathématique demandée relie  $V_f$  avec  $V_e$  à l'aide d'une constante arbitrairement notée  $k_L$  et  $t$ .

# Branchement d'un équivalent moteur CC

Un moteur électrique à courant continu a un schéma électrique équivalent à celui-ci (schéma électrique de l'induit).



interrupteur



*Remarque : le mouvement de rotation des boules modélisent le comportement d'une bobine.*

*La valeur de la vitesse de rotation observée n'a rien à voir avec la valeur de la vitesse de rotation du rotor d'un moteur, mais les deux sont proportionnelles à la tension.*

- Effectuez le montage en laissant off l'interrupteur. (bouton sorti)
- Activez la tension  $u(t)$  en tirant la ficelle.
- Appuyez sur le bouton (on) puis mettez sur off à nouveau.

**Question 16 :** Que constatez-vous ?

**Question 17 :** On rappelle que la tension aux bornes de la bobine s'écrit

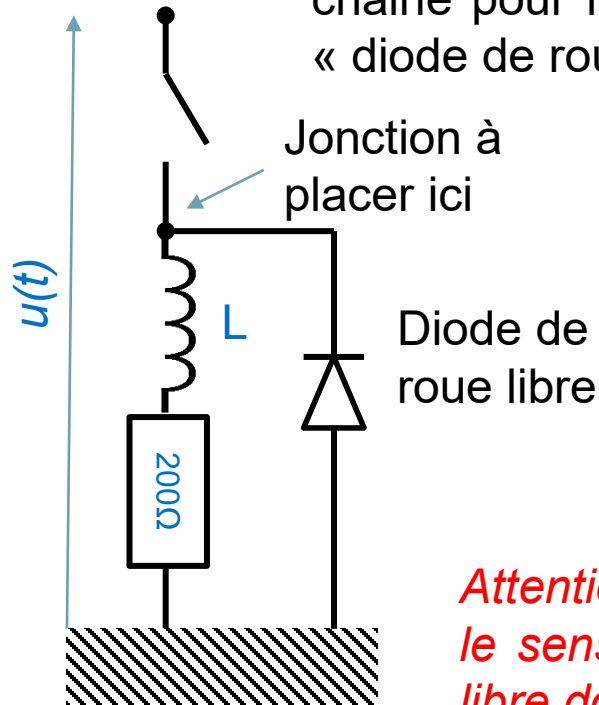
$u_L(t) = L \cdot \frac{di(t)}{dt}$ . Comment évolue  $i(t)$  lorsque l'on coupe le circuit ?

Justifiez le comportement observé précédemment.



# Branchement d'un équivalent moteur CC

Pour éviter la coupure brutale du circuit ( $i$  qui devient nul soit vitesse chaîne pour nous), on va placer une diode en parallèle du moteur dite « diode de roue libre ».

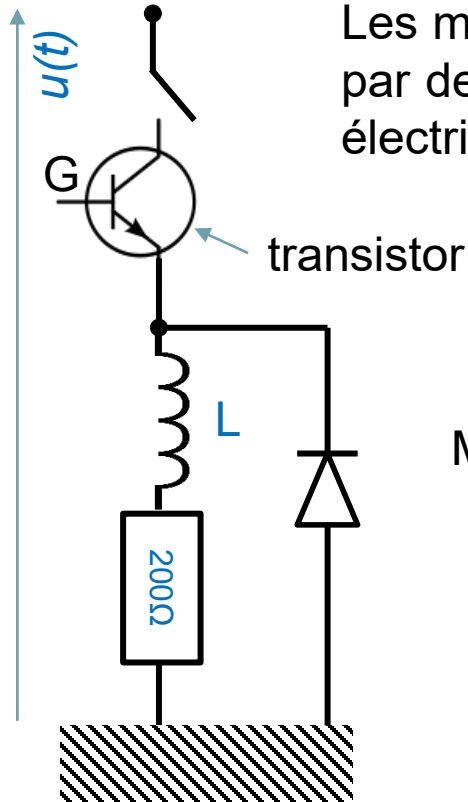


- Effectuez le montage en laissant off l'interrupteur. (bouton sorti). **La bobine  $L$  » doit être liée avec le gros pignon (niveau 1) de la jonction, « la diode » sur le pignon 2.**
  - Activez la tension  $u(t)$  en tirant la ficelle.
  - Appuyez sur le bouton puis mettez sur off à nouveau.
- Question 18 :** Que constatez-vous ?

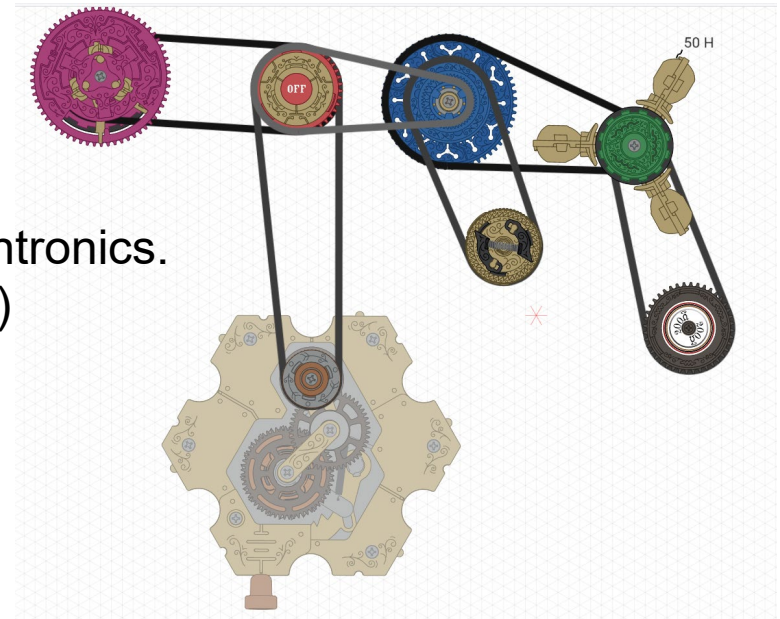
**Attention :** Lorsque vous tournez à la main l'élément bobine dans le sens horaire, en tenant le petit pignon de la jonction, la roue libre doit tourner.

# Montage d'un hacheur série

Les moteurs électriques sont souvent commandés par des « interrupteurs » eux-mêmes commandés électriquement appelés transistors.

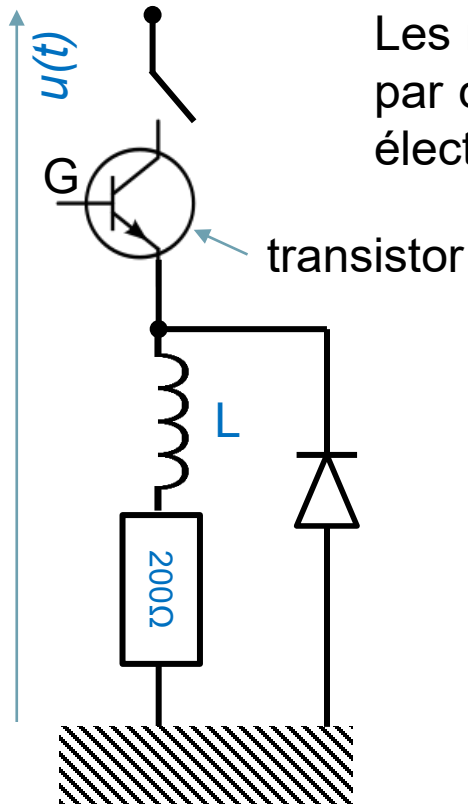


Montage équivalent en Spintronics.  
(voir diapo suivante)



# Montage d'un hacheur série

Les moteurs électriques sont souvent commandés par des « interrupteurs » eux-mêmes commandés électriquement appelés transistors.



- Prenez l'élément « transistor » et essayez de tourner la roue de niveau 1 (celle du bas).
- Recommencez en déplaçant la grande roue de commande (notée G : gate).

**Question 19 :** Que constatez-vous ?

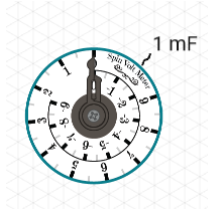
- Complétez le montage précédent à l'aide du schéma présenté. La grande roue du transistor n'est pas reliée.
- Lancez l'alimentation et appuyer sur le bouton on.
- Tournez la grande roue du transistor à la main.
- Puis effectuer des mouvements rapides **à la main** d'ouverture/fermeture du transistor et observez la bobine. Elle a un mouvement quasi continu de rotation. Vous venez d'effectuer une commande moteur par hachage.

# EXPÉRIMENTER 5

---

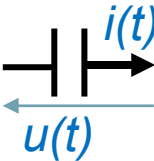
- Effectuer des montages élémentaires électroniques avec des éléments Spintronics : le filtrage

# Le condensateur



Un condensateur est un composant électronique permettant de stocker de l'énergie.

Le symbole électrique est :



Le modèle électrique est :  $u(t) - u(0) = \frac{1}{Ca} \cdot \int_0^t i(t) \cdot dt$

$Ca$  est la capacité en farad [F]

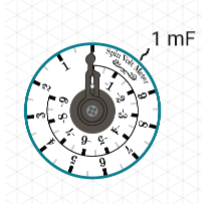
$\int_0^t i(t) \cdot dt$  est la primitive de  $i(t)$  / temps.

On suppose  $u(0) = 0$ .

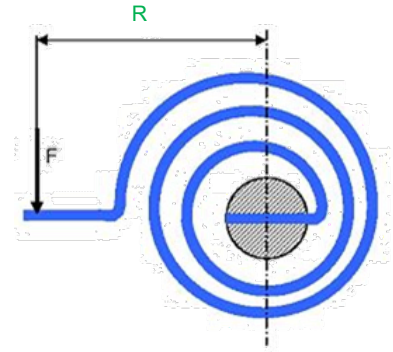
Il faut trouver une relation mécanique équivalente :  $F(t) = K \cdot \int_0^t V(t) \cdot dt$

**Question 20** : Que représente la variable  $\int_0^t V(t) \cdot dt$  (primitive de  $V(t)$  / temps) ?  
 Connaissez-vous une relation de la mécanique du solide qui conviendrait ? Que serait  $K$  ?

# Le condensateur



La relation entre l'effort résistant et la déformation d'un ressort angulaire (ressort de torsion) est :  $C(t) = K' \cdot \theta(t)$



Avec  $C$  le couple [N.m],  $\theta$  l'angle de déformation imposé au ressort [rad] et  $K'$  raideur angulaire [N.m/rad]

avec  $X(t) = R \cdot \theta(t)$   
 $C(t) = R \cdot F(t)$

On suppose qu'à vide ( $C$  ou  $F$  nuls) la position est nulle.

**Question 21** : En exploitant les relations de la mécanique, exprimez  $K$  en fonction de  $K'$  et  $R$ .  $K$  s'appelle la raideur équivalente.

On comprend que l'élément « condensateur » déforme un ressort de torsion en fonction du couple, d'où son utilisation comme dynamomètre angulaire ou encore « voltmètre Spintronics ».

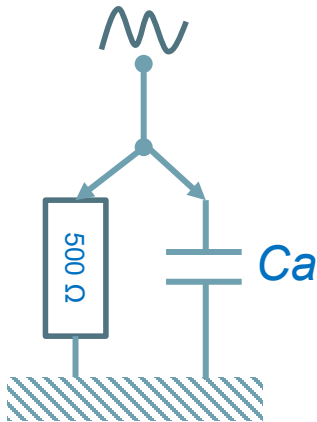
# Correspondance Electronique/Mécanique 3

	Elément électrique	Elément mécanique de translation	Relation mathématique
Variable de flux $V_f$	Intensité en ampère [A]		
Variable d'effort $V_e$	Tension en volt [V]		
	Résistance $r$ en ohm [ $\Omega$ ]	$f_{eq}$ frottement visqueux linéaire [N.s]	
	Bobine d'inductance $L$ en henry [H]		
	Condensateur de capacité $C_a$ en farad [F]		$V_e(t) = \frac{1}{K_c} \cdot \int_0^t V_f(t) \cdot dt$ ou $V_f = K_c \cdot \frac{dV_e}{dt}$

**Question 22 :** Compléter le tableau.

# Le filtre RC parallèle.

- **Attention dans ce montage, l'alimentation Spintronics n'est pas utilisée.**
- Pour simuler un courant alternatif, on remplace l'alimentation par le bouton que l'on fera osciller à la main.
- Effectuez le montage si après.



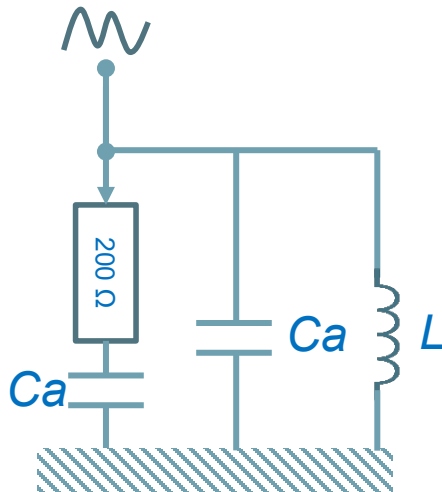
- Exercez des mouvements oscillants sur la roue motrice du bouton lentement et observez le mouvement de la roue de résistance. Observez le léger retard de rotation entre la roue de sortie et celle d'entrée.
- Exercez des mouvements alternatifs plus rapides. Observez la roue de sortie.

**Question 23 :** Avez-vous monté un filtre qui laisse passer les basses ou les hautes fréquences ?



# Le filtre passe bande.

- **Attention dans ce montage, l'alimentation Spintronics n'est pas utilisée.**
- Pour simuler un courant alternatif, on remplace l'alimentation par un bouton que l'on fera osciller à la main.
- Effectuez le montage si après.



- Exercez des mouvements alternatifs à différentes fréquences. Observez la roue de sortie.

**Question 24 :** Testez différentes fréquences d'oscillations et concluez sur l'intérêt de ce montage.