

Pré-requis :

Les notions fondamentales de l'électricité (courant, tension, lois)

Les diodes et les fonctions logiques

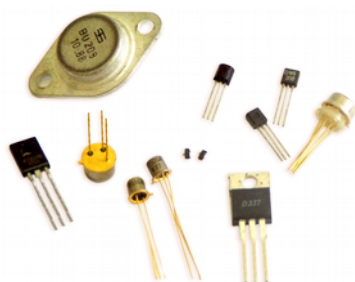
Compétences visées :

Être capable de mettre en œuvre un montage simple à base de transistor bipolaire

Plan du chapitre :

- I. Historique
- II. Symboles et constitution du transistor bipolaire
- III. Fonctionnement en amplification
- IV. Fonctionnement en commutation
- V. Types de boîtiers
- VI. Puissance
- VII. Les autres types de transistor
- VIII. Exercices

I. Historique



Le transistor est un composant électronique actif utilisé principalement comme amplificateur ou comme interrupteur commandé.

Il a été découvert en décembre 1947 par les américains John Bardeen, William Shockley et Walter Brattain, chercheurs de la compagnie Bell Téléphone. Ces chercheurs ont reçu pour cette invention le prix Nobel de physique en 1956.

Le transistor remplaça alors le tube électronique (appelé aussi tube à lampe): photo à droite



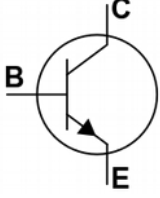
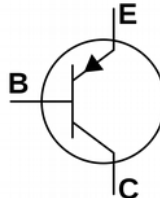
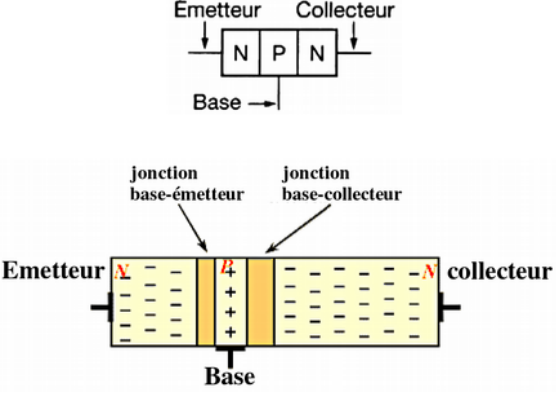
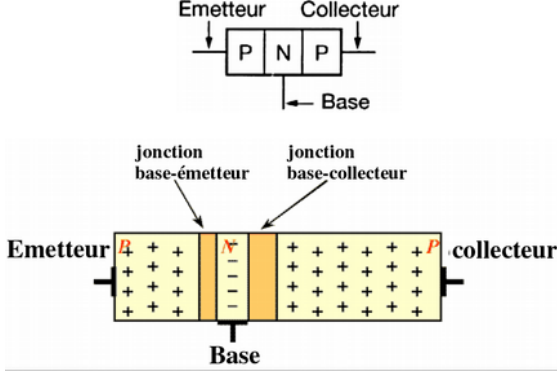
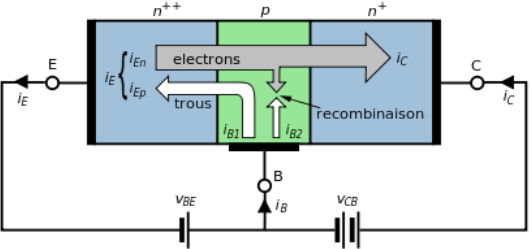
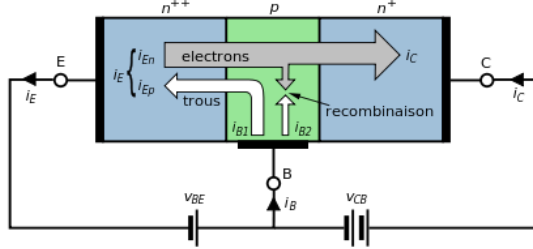
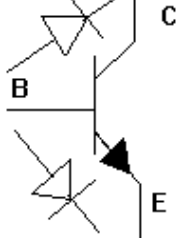
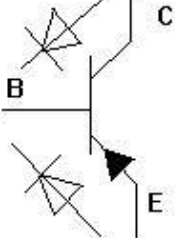
Les transistors ont permis la réalisation de portes logiques (NAND, NOR,) de microprocesseurs et leur miniaturisation a décuplé les utilisations.

Exemple de miniaturisation : nombre de transistors dans les microprocesseurs Intel

- 1971 : 4004 : 2 300 transistors
- 1978 : 8086 : 29 000 transistors
- 1982 : 80286 : 275 000 transistors
- 1989 : 80486 : 1,16 million de transistors
- 1993 : Pentium : 3,1 millions de transistors
- 1995 : Pentium Pro : 5,5 millions de transistors
- 1997 : Pentium II : 27 millions de transistors
- 2001 : Pentium 4 : 42 millions de transistors
- 2004 : Pentium Extreme Edition : 169 millions de transistors
- 2006 : Core 2 Duo : 291 millions de transistors
- 2008 : Core 2 Quad : 410 millions de transistors
- 2010 : Intel Core i7, 1 170 000 000 transistors (1 milliard 170 millions)
- 2012 : Intel Core i3/i5/i7 (Ivy Bridge) 1 400 000 000 transistors
- 2015 : 15-core Xeon Ivy Bridge-EX 4 310 000 000 transistors (4 milliards 310 millions)

II. Symboles et constitution du transistor bipolaire

Un transistor bipolaire est constitué de 2 jonctions PN (ou diodes) montées en sens inverse. Selon le sens de montage de ces diodes on obtient les 2 types de transistors bipolaires :

NPN	PNP
	
	
Sous l'effet de la polarisation en direct de la jonction B-E, avec un courant de base I_B, on obtient un courant collecteur I_C dont la valeur sera notamment fonction des conditions de polarisation de la jonction B-E. Ce courant I_C peut être nettement plus important que le courant de base I_B, c'est l'effet transistor.	
	
On ne peut considérer le transistor comme l'association de deux diodes mais la représentation suivante peut parfois aider :	
	

Remarque : la flèche indique toujours l'émetteur et le sens de circulation du courant.

Remarque 2 : c'est l'effet "transistor" qui permet au courant de traverser la diode en sens inverse.

III. Fonctionnement en amplification

Exemple avec un transistor bipolaire npn :

Quand on fait circuler un petit courant dans la base (I_B) du transistor, un courant plus important circule du collecteur vers l'émetteur (I_C).

Le courant de base est multiplié par un coefficient β

$$I_C = \beta \times I_B$$

Remarque :

le courant I_E (ici courant sortant de l'émetteur) = $I_C + I_B$. Dans notre chapitre nous partirons du principe que $I_E = I_C$ (car I_B est très inférieur à I_C donc on le négligera au niveau de I_E) :

$$I_E \approx I_C$$

Quelques remarques :

- Ce coefficient β est appelé gain en courant du transistor
- Il est souvent noté H_{fe} dans les documentations techniques
- Il est parfois aussi appelé coefficient d'amplification statique en courant.
- En général β se situe entre 30 et 300.
- Le montage est alimenté par 2 tensions : U_E et 12V (V_{CC})
- Si le courant I_B est continu, le courant I_C est continu
- Si le courant I_B est alternatif, le courant I_C est alternatif (si I_B est un signal sonore comme de la musique, I_C est le même signal sonore mais plus fort)

Exemple de calculs dans un montage amplificateur :

On veut obtenir un courant I_C de 225mA.

Sachant que $U_E = 5V$ et que $\beta = 100$, calculez la résistance R_B nécessaire au montage.

On fait la maille d'entrée :

$$V_{BE} + (R_B \times I_B) - U_E = 0$$

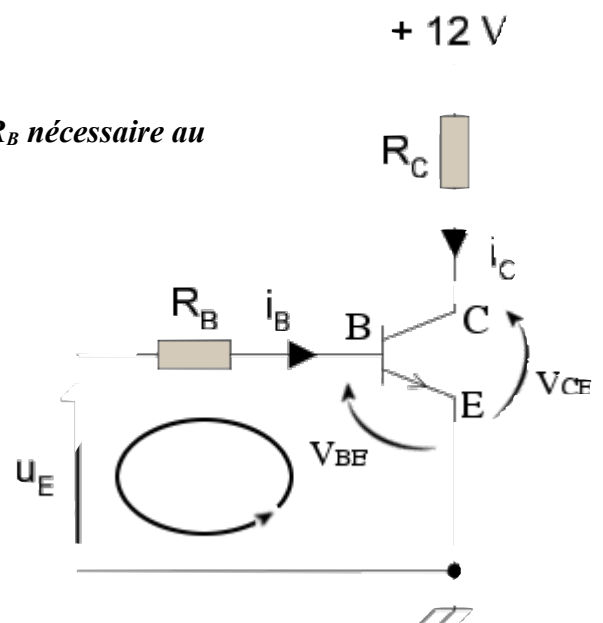
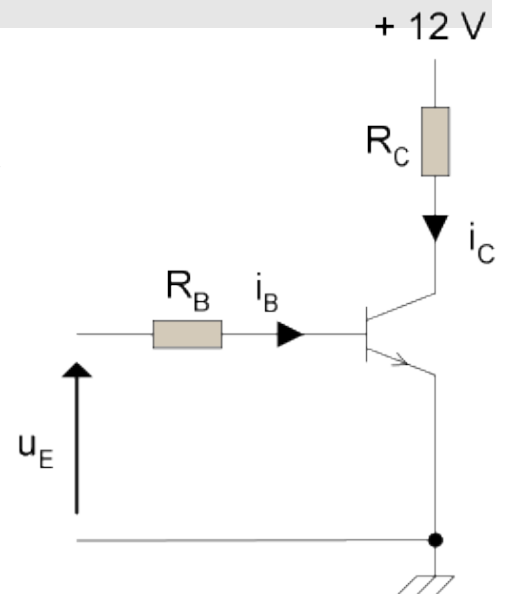
Une remarque : V_{BE} est la tension aux bornes de la diode présente entre la base et l'émetteur. Quand cette diode conduit, c'est à dire quand le transistor conduit, cette tension vaut à peu près 0,7V. La vraie valeur se trouve dans la documentation technique du transistor).

Calcul de I_B :

$$I_B = I_C / \beta = 225 \cdot 10^{-3} / 100 = 2,25 \cdot 10^{-3} = 2,25 \text{mA}$$

Dans la maille d'entrée, la seule inconnue est R_B donc

$$R_B = (U_E - V_{BE}) / I_B = (5 - 0,7) / 2,25 \cdot 10^{-3} = 1911 \Omega$$



Remarque : en amplification, V_{CE} n'est pas une valeur constante et n'est pas facile à connaître.

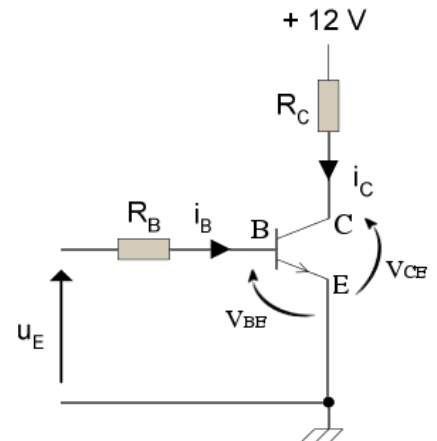
IV. Fonctionnement en commutation

Le transistor en commutation est utilisé afin d'ouvrir ou de fermer un circuit (c'est une sorte d'interrupteur commandé). Ainsi il peut commander une LED, un relais, un moteur, etc... On considère généralement le circuit de sortie du transistor comme un interrupteur qui est commandé soit par une tension, soit par un courant suivant le type de transistor choisi.

Un transistor pourra avoir donc 2 états : soit il conduit soit il est bloqué.

Exemple : soit le montage ci-contre utilisé en commutation:

La tension U_E pourra prendre 2 valeurs (0V ou 5V)



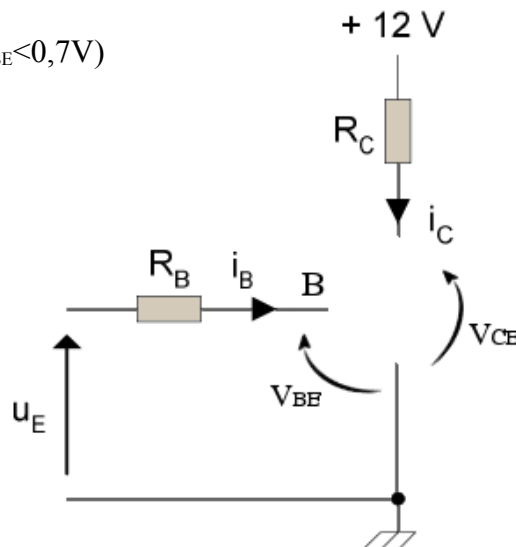
1^{er} cas : $U_E = 0V$ (0 logique)

Le transistor ne peut conduire ($I_B=0$ et $V_{BE}<0,7V$)

Alors on obtient :

$$I_C=0A$$

$$V_{CE}=12V$$



2^{ème} cas : $U_E = 5V$ (1 logique)

Le transistor va conduire ($I_B \neq 0$ et $V_{BE} \approx 0,7V$)

En fait en commutation pour que l'on soit sûr que le transistor conduise on va le **saturer**. (par exemple, si dans notre calcul on trouve qu'il faut un courant $I_B=2mA$ pour que le transistor conduise (et fasse circuler le courant I_C voulu) alors on choisira les éléments du montage pour avoir un courant de 4mA, on utilisera donc un coefficient de **sursaturation** de 2).



Quand un transistor est saturé, $V_{CE} \approx 0V$ (en général $<0,5V$. La vraie valeur se trouve dans la documentation technique du transistor).

Exemple de calculs



Principe : dans un montage électronique, on part toujours de la charge (c'est elle qui a besoin de courant et de tension). Ensuite, à partir des besoins en courant de la charge on calcule les éléments du montage.

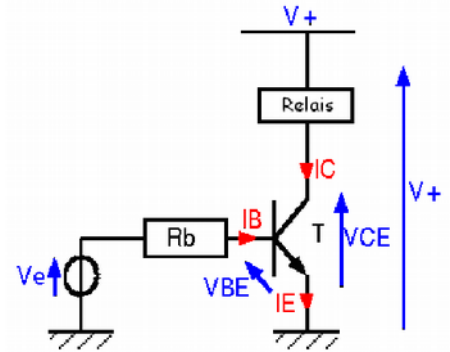
Exemple : soit le montage suivant :

Données : $V_e = 0V$ ou $10V$

La charge ici est constituée par le relais : $I_{\text{relais}} = 55mA$, $V_{\text{relais}} : 24V$

$V_{CEsat} = 0,4V$, $V_{BE} = 0,7V$, $\beta = 150$ avec sursaturation de 2

$V_+ = 24V$



On cherche à calculer le ou les éléments du montage (ici Rb)

1. Lorsque V_e sera à $0V$, $I_B = 0A$, le transistor sera bloqué, le relais (une bobine) ne sera pas actif.
2. Quand V_e sera à $10V$ il faut que le transistor conduise pour que le relais soit actif.

On part de la sortie : $I_C = I_{\text{relais}} = 55mA$

Calcul de I_B : comme $I_C = \beta \times I_B$ alors $I_B = \frac{I_C}{\beta} = \frac{55 \cdot 10^{-3}}{150} = 3,67 \cdot 10^{-4}A$

On applique un coefficient de sursaturation de 2 : $I_{Bsat} = 2 \times 3,67 \cdot 10^{-4} = 7,33 \cdot 10^{-4}A$

Équation de la maille d'entrée: $V_{BE} + V_{Rb} - V_e = 0$ c'est-à-dire $V_{BE} + (Rb \times I_{Bsat}) - V_e = 0$

Donc $Rb = \frac{V_e - V_{BE}}{I_{Bsat}} = \frac{10 - 0,7}{7,33 \cdot 10^{-4}} = 12,69k\Omega$

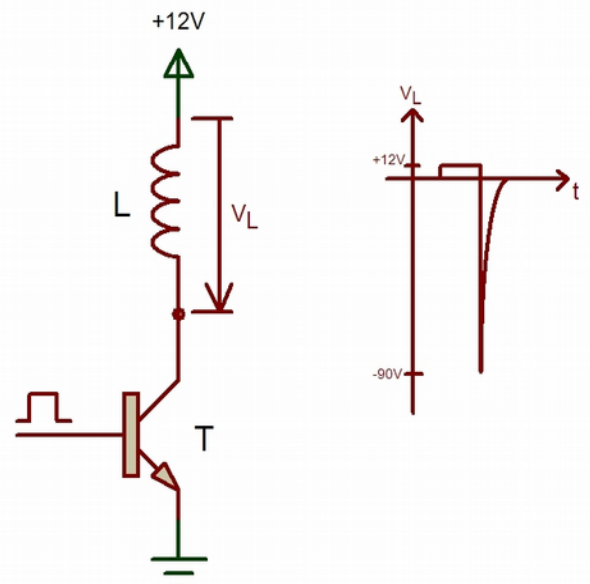


Remarque : on peut remarquer que même en commutation le transistor amplifie le courant.

Protection contre les surtensions destructives

Lorsque le transistor commande un élément inductif (bobine, moteurs, ...), il apparaît une surtension notamment à l'arrêt du transistor.

Cette tension peut faire plusieurs dizaines voire centaines de volts.



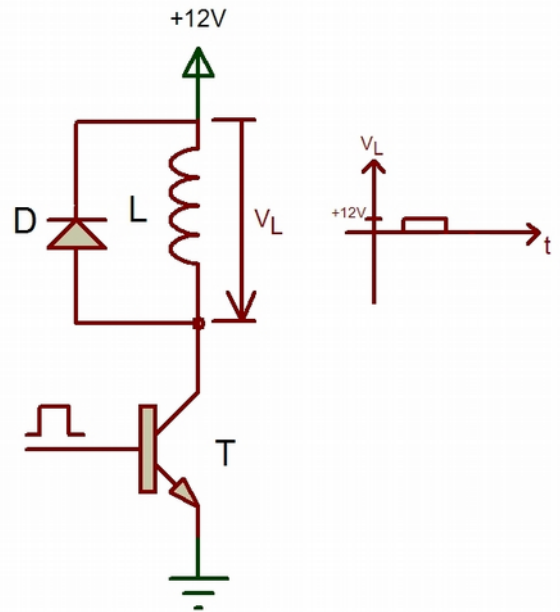
Si on ne fait rien, le transistor est détruit car le V_L se retrouve aux bornes du transistor (V_{CE}).

La solution: **la diode de roue libre**

Il s'agit d'une diode placée en inverse et en parallèle sur la source de surtension (bobine, moteur, ...).

Lorsque la surtension apparaît, la diode conduit. L'énergie se dissipe alors dans la résistance présente (fils de la bobine ou du moteur). En fait le courant créé par la bobine circule dans la boucle constituée par la diode et la bobine et il diminue jusqu'à disparaître (effet joules).

La seule tension présente alors est la tension de la diode (moins de 1 volts).



Que faire si le gain du transistor est trop faible ? Une solution : Montage Darlington

Ce montage est constitué par l'association de deux transistors T1 et T2 de même type (deux PNP ou deux NPN). L'ensemble est un dispositif à trois électrodes équivalent à un transistor unique dont on va déterminer les paramètres :

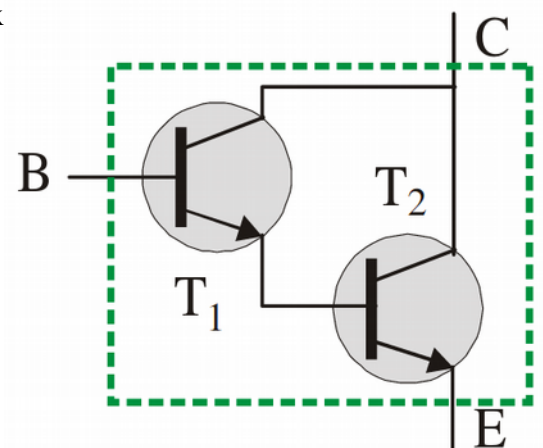
Pour le transistor T1 : $I_{C1} = \beta \cdot I_{B1}$

Pour le transistor T2 : $I_{C2} = \beta \cdot I_{B2}$

Or $I_{B2} = I_{C1}$ donc $I_{C2} = \beta \cdot I_{B2} = \beta \cdot I_{C1} = \beta \cdot \beta \cdot I_{B1}$

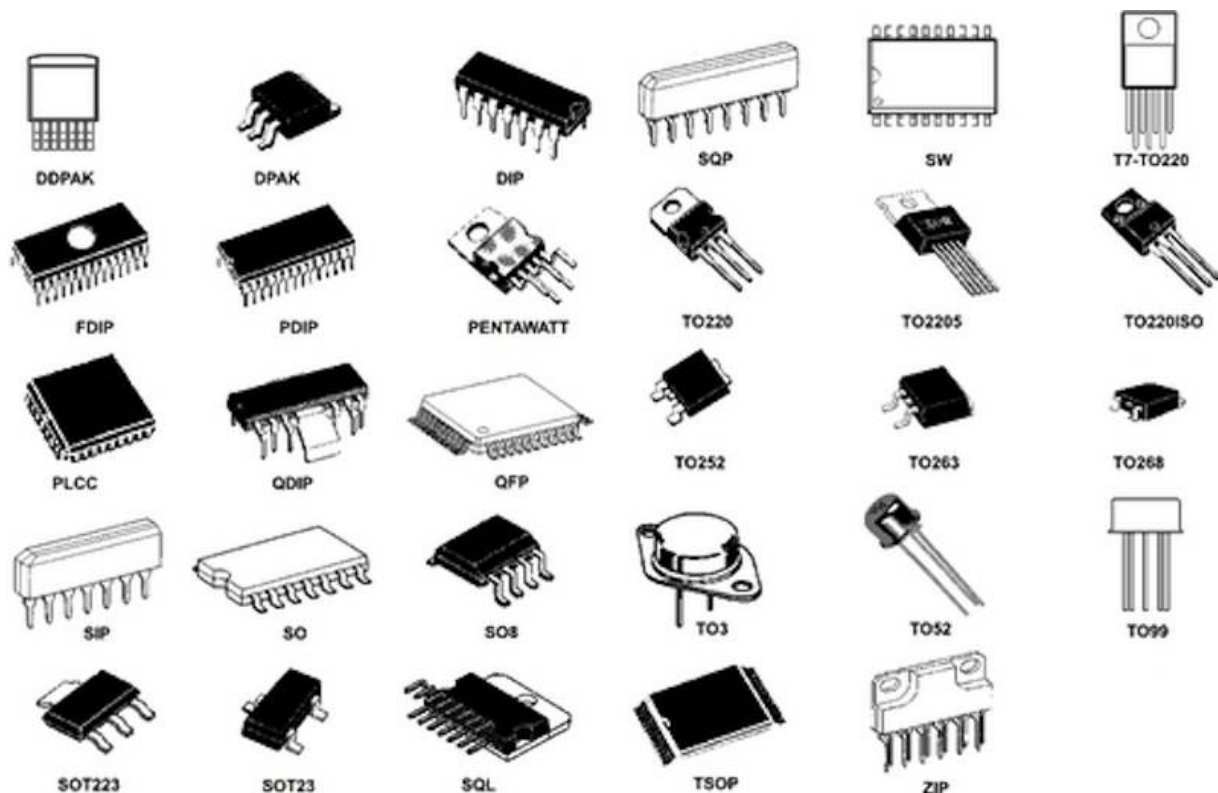
donc on obtient $I_{C2} = \beta^2 \cdot I_{B1}$

c'est à dire finalement un transistor de courant de base I_{B1} , de courant de sortie I_{C2} et de gain β^2 .



V. Types de boîtiers

Il existe de multiples formes (boîtiers) pour les transistors. Voici quelques exemples :



VI. Puissance

Les constructeurs donnent en général des valeurs à ne pas dépasser notamment au niveau de la puissance.

La puissance que dissipe le transistor : $P \approx V_{CE} \times I_C$

VII. Les autres types de transistor

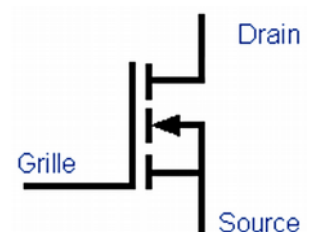
L'autre grande famille de transistors (d'invention plus récente) sont les transistor à effet de champ ou FET (Field Effect Transistors)

Dans cette technologie FET il existe les JFET (Junction Field Effect Transistors) et les MOSFET (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistors).

Dans la famille MOSFET les plus connus sont les CMOS dont il existe de nombreuses utilisations aujourd'hui.

Exemple d'un transistor MOSFET à canal N:

Pour faire conduire le transistor, il faut juste lui imposer une tension V_{gs} . Quand le transistor va conduire il n'y aura aucun courant dans la grille. Ainsi la commande ne va pas consommer d'énergie !



VIII. Exercices

EXERCICES AVEC RÉSULTATS

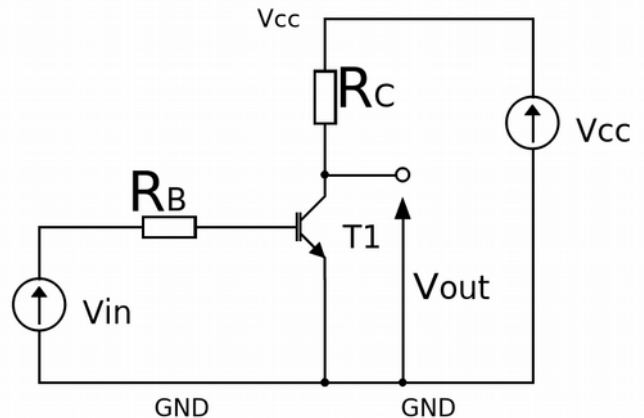
Ces exercices permettent de vérifier que le cours est maîtrisé (appris et compris).

Exercice N°0.1

Soit le montage d'un transistor en commutation ci-contre:

Données : générateur $V_{CC}=10V$, $\beta=200$, $V_{BE}=0,7V$, $V_{CEsat}=0,25V$, $R_C=500\Omega$, $R_B=14700\Omega$, $V_{in}=0$ ou $5V$. Le transistor sera saturé

1. Écrivez l'équation de la maille d'entrée (R_B , V_{in} , ...)
2. Écrivez l'équation de la maille de sortie (R_C , V_{CC} , ...)
3. Lorsque $V_{in}=0V$:
 - Donnez l'état du transistor (bloqué ou conducteur).
 - Déduisez-en la valeur de V_{CE} et de V_{out} .
4. Lorsque $V_{in}=5V$:
 - Donnez l'état du transistor (bloqué ou conducteur).
 - Déduisez-en la valeur de V_{CE} et de V_{out} .
5. Lorsque le transistor conduit calculez, à l'aide de l'équation de la maille d'entrée, la valeur du courant I_B .
6. Lorsque le transistor conduit calculez, à l'aide de l'équation de la maille de sortie, la valeur du courant I_C . (le transistor est saturé)
7. À partir de la relation entre I_C et I_B , démontrez que le transistor est bien saturé.



Résultats :

1°) $V_{in} - (R_B I_B) - V_{BE} = 0$ 2°) $V_{CC} - (R_C I_C) - V_{CE} = 0$ ou $V_{CC} - (R_C I_C) - V_{OUT} = 0$ 3°) transistor bloqué, $V_{CE} = V_{out} = V_{CC} = 10V$ 4°) transistor conduit, s'il est saturé $V_{CE} = V_{OUT} = 0,25V$ 5°) $I_B = 2,92 \cdot 10^{-4} A$; 6°) $I_C = 19,5mA$; 7°) avec la formule $I_C = \beta I_B$ on trouve un $I_B = 9,75 \cdot 10^{-5} A$. Or notre I_B est 3 fois plus grand donc le transistor est bien saturé (coefficient de sursaturation de 3).

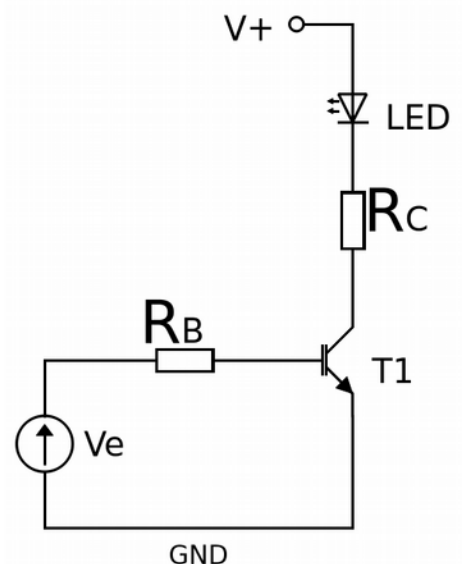
Exercice N°0.2

Soit le montage ci-contre:

Données : $V_+=12V$, $V_{DEL}=1,6V$, $I_{DELmax}=30mA$, $\beta=250$, $V_{BE}=0,7V$, $V_{CEsat}=0,3V$, $V_e=0$ ou $5V$

Le transistor sera utilisé en commutation (coefficient de sursaturation=2)

1. Lorsque $V_e=0V$, donnez l'état du transistor (bloqué ou conducteur). En déduire l'état de la diode électroluminescente.



2. Lorsque $V_e=5V$, donner l'état du transistor (bloqué ou conducteur). En déduire l'état de la diode électroluminescente.
3. Écrivez l'équation de la maille de sortie. En déduire la valeur de R_c (la LED est parcourue par son courant max).
4. Calculez I_B puis calculez I_{Bsat} .
5. Écrivez l'équation de la maille d'entrée. En déduire la valeur de R_B .

Résultats :

1°) transistor bloqué, LED éteinte car $I_c=0$ 2°) transistor conducteur, LED allumée 3°) $V_+ - V_{LED} - (R_c I_c) - V_{CEsat} = 0$ comme $I_c = 30mA$ alors $R_c = 336,67\Omega$ 4°) $I_B = 2,4 \cdot 10^{-4} A$ et $I_{Bsat} = 2,4 \cdot 10^{-4} A$ 5°) $V_e - (R_b I_{Bsat}) - V_{BE} = 0$ et $R_B = 17917\Omega$

EXERCICES SANS RÉSULTATS

Dans les exercices suivants (sauf précision complémentaire):

Transistor :

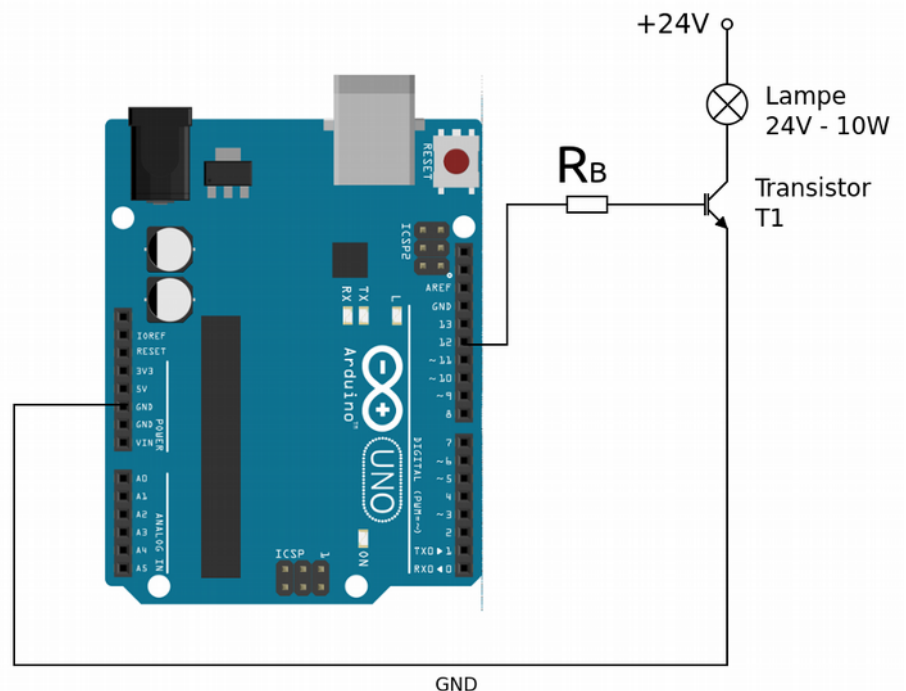
$\beta = 150$, $V_{BE} = 0,7 V$ et $V_{CEsat} = 0,2 V$. Coefficient de sursaturation = 2

Arduino UNO:

Microcontroller	ATmega328P
Operating Voltage (output)	5V
Input Voltage (recommended)	7-12V
Input Voltage (limit)	6-20V
Digital I/O Pins	14 (of which 6 provide PWM output)
PWM Digital I/O Pins	6
Analog Input Pins	6
DC Current per I/O Pin	20 mA

Exercice N°1

Soit le montage suivant :

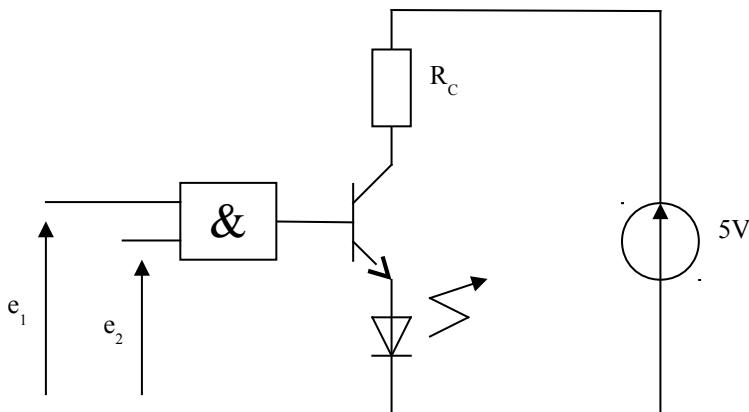


La sortie Arduino utilisée (N°12) fonctionne en tout ou rien (sortie logique)

1. *A l'aide de la puissance calculez le courant consommé par cette lampe*
2. *Relevez dans les spécifications techniques de la carte Arduino le courant max que peut fournir une sortie.*
3. *Donnez les deux raisons pour lesquelles on n'aurait pas pu brancher la lampe directement en sortie de la carte Arduino.*
4. *Expliquez pourquoi le transistor est bloqué quand la sortie Arduino est inactive.*
5. *Calculez I_B puis calculez I_{bsat} .*
6. *Écrivez l'équation de la maille d'entrée. En déduire la valeur de R_B .*

Exercice N°2

Soit le montage suivant (objectif : allumer une LED en sortie d'une porte logique):



Données: LED: $V_S=1.5V$, $I_{fmax}=20mA$

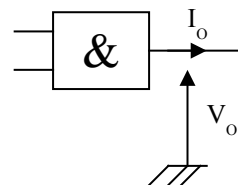
Porte ET (technologie TTL standard, $V_{CC}=5V$):

$$I_{OLmax} = -16mA$$

$$I_{OHmin} = 0.8mA$$

$$V_{OLmax} = 0.4V$$

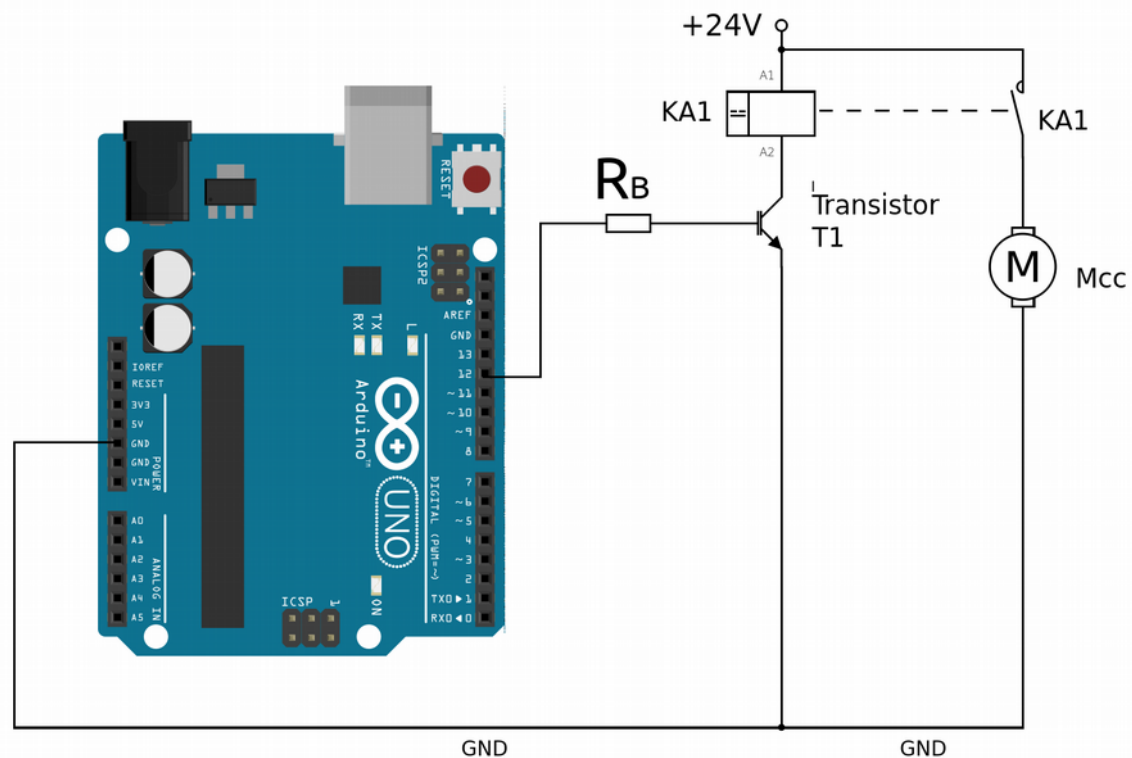
$$V_{OHmin} = 2.4V$$



1. *Pourquoi n'aurait-on pas pu mettre la LED directement à la sortie de la porte logique ?*
2. *Quand e_1 ou e_2 sont à 0, que vaut la sortie de la porte logique (niveau logique et tension). Quel est alors l'état du transistor ainsi que celui de la LED (prendre l'hypothèse que le transistor conduit et faire la maille d'entrée, calculez V_{BE} et analysez cette valeur de V_{BE} pour conclure sur l'hypothèse choisie) ?*
3. *Quand e_1 et e_2 sont au 1 logique, que vaut la sortie de la porte logique (niveau logique et tension). Quel est alors l'état du transistor (à justifier) ainsi que celui de la LED ?*
4. *A l'aide de la maille de sortie, calculez R_C sachant que $I_{LED}=20mA$ et $V_{CE}=1,4V$ (ici le transistor n'est pas saturé)*
5. *Calculez I_B . La porte peut-elle fournir ce courant. Si ce n'est pas le cas proposer une solution.*

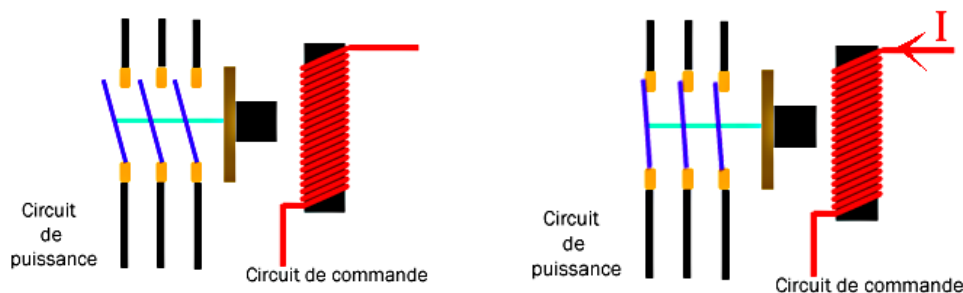
Exercice N°3

Soit le montage suivant (objectif : commander un moteur à courant continu avec une carte Arduino):



Le matériel :

- Un moteur à courant continu (à aimants permanents) : 24V / 120W
- Un contacteur (relais) KA1 :
 - bobine : 24V_{cc}, I=23mA
 - puissance : 230V / 6A
 - Fonctionnement : quand un courant circule dans la bobine (circuit de commande), celle-ci crée un champ magnétique qui fait se fermer les contacts (circuit de puissance). Quand le courant est coupé, un ressort rouvre les contacts.



La sortie Arduino utilisée (N°12) fonctionne en tout ou rien (sortie logique)

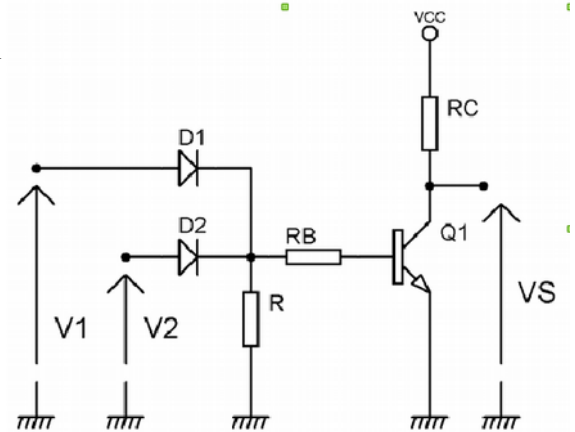
1. **Calculez le courant consommé par le moteur.**
2. **Expliquez pourquoi on n'aurait pas pu brancher le moteur directement sur la sortie Arduino.**
3. **Justifiez (calculs et explications) pourquoi on a besoin du contacteur KA1 (et que seul le transistor ne suffit pas)**
4. **Calculez la valeur de R_B. (méthode : $I_C \rightarrow I_B \rightarrow I_{Bsat} \rightarrow R_B$)**

Exercice N°4 : une fonction logique

Données : V_1 et V_2 sont soit à 0V (0 logique), soit à 5V (1 logique), $V_{CEsat}=0,1V$, $V_{CC}=5V$

1°) Complétez le tableau :

V1		V2		D1	D2	Q1	VS	
volts	logique	volts	logique	état	état	état	volts	logique
0		0						
0		5						
5		0						
5		5						



Etats possibles d'une diode :

- passante (P) ou bloquée (B)

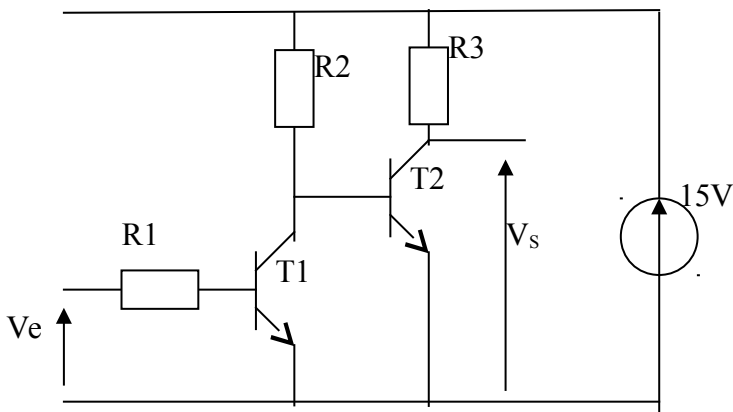
Etats possibles d'un transistor :

- conduit (C) ou bloqué (B)

2°) Quel est la fonction du montage ?

Exercice N°5

Soit le montage suivant:



Données: $R_1=15\text{ k}\Omega$, $R_2=1.6\text{ k}\Omega$, $R_3=150\Omega$

Transistors: $\beta=100$, $V_{CE/sat}=0.2V$, $V_{BE}=0.6V$

Les transistors sont utilisés ici en commutation.

Les valeurs des résistances sont calculées pour saturer les transistors.

1. Expliquer pourquoi quand $V_e=0V$, le transistor T_1 va être bloqué et le transistor T_2 saturé. En déduire V_s .
2. Quand $V_e=4.6V$, donner l'état du transistor T_1 . Quelle est alors la valeur de V_{BE} de T_2 . En déduire l'état du transistor T_2 . Que vaut alors V_s ?

Exercice N°6

Nous allons commander un moteur à courant continu (Mcc) à l'aide d'un pont en H.

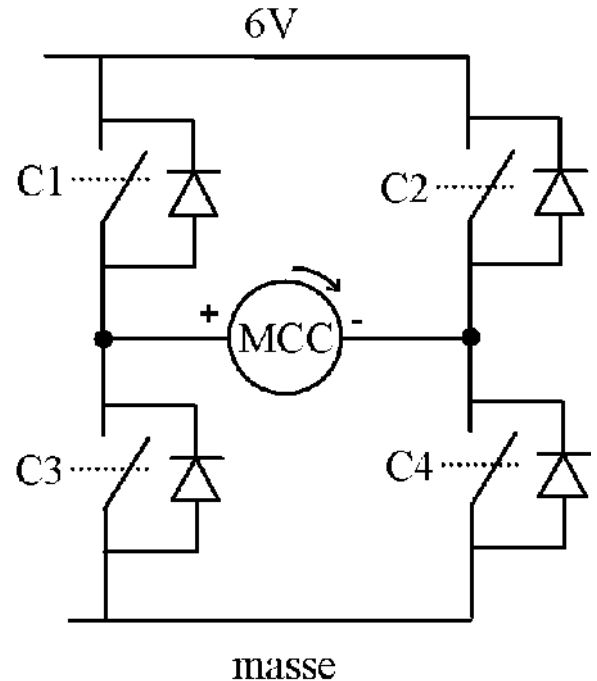
Soit le montage suivant :

Le moteur est commandé par 4 interrupteurs (C1, C2, C3 et C4)

Rappel sur le fonctionnement d'un Mcc :

- Lorsque le moteur est alimenté normalement, c'est à dire lorsque le 6V est sur le + et la masse (0V) sur le -, le moteur tourne dans le sens indiqué.
- Si on inverse, c'est à dire si la masse est sur le + et le 6V sur le -, le moteur tourne dans l'autre sens.

1. *Quels interrupteurs doit-on fermer pour que le moteur tourne dans le sens indiqué ? Faites le schéma équivalent en remplaçant les interrupteurs par leur schéma équivalent (un fil quand il est fermé, rien, c'est à dire qu'on l'enlève, quand il est ouvert).*
2. *Quels interrupteurs doit-on fermer pour que le moteur tourne dans le sens inverse ? Faites le schéma équivalent en remplaçant les interrupteurs par leur schéma équivalent (un fil quand il est fermé, rien quand il est ouvert).*
3. *A quoi servent les 4 diodes présentes sur le schéma ?*



Les contacts C1, C2, C3 et C4 peuvent être réalisés à l'aide de différentes technologies (relais, transistors, contacteurs, relais statiques, thyristors, ...). Dans la suite de l'exercice ils seront réalisés à l'aide de transistors bipolaires

Le schéma réel est le suivant :

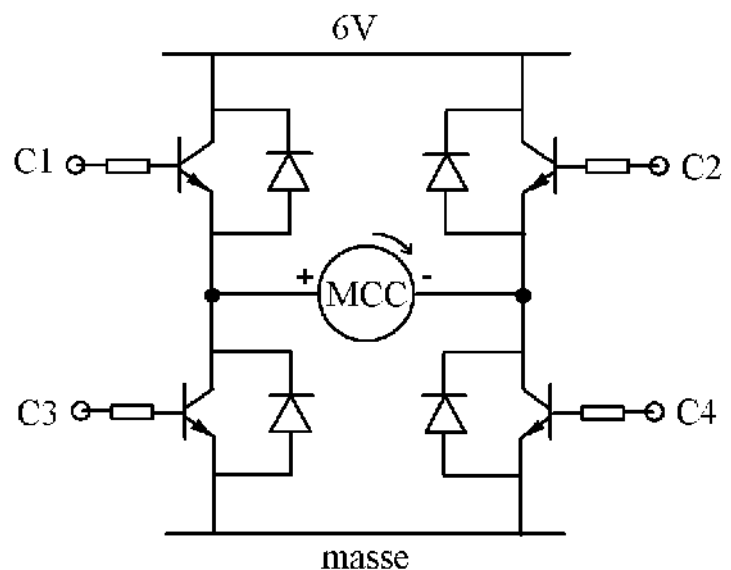
Données :

Mcc : 6V, 0.44A, 9280 tr/mn

Les transistors sont des 2N2222A. Ils seront commandés par une carte Arduino.

Bien évidemment les transistors sont utilisés en commutation avec un coefficient de sursaturation de 2.

Remarque : dans les documents techniques (datasheet) les constructeurs n'indiquent pas le gain réel du transistor mais une plage de valeurs entre lesquelles se trouve le gain réel. Pour faire les calculs on prend le cas le plus défavorable, c'est à dire la valeur la plus faible du gain.



Datasheet :

réf.	fab.	V_{ces} (V max.)	I_c max. (mA)	P_{tot} (mW max.)	h_{FE} (min./max.)	V_{cesat} (V max.)	f_t (MHz min.)
Transistors faibles signaux							
TO-18 - NPN							
2N2222A	Motorola	40	800	400	100 / 300	0,3	300
BC107B	Motorola	45	200	600	240 / 500	0,6	150
TO-18 - PNP							
BC179	STM	25	100	300	240 / 500	0,25	200 (typ)
BC478	STM	40	150	360	125 / 500	0,25	180 (typ)
BC479	STM	40	150	360	220 / -	0,25	180 (typ)
BC177	STM	50	100	300	125 / 260	0,25	200 (typ)
2N2907A	Motorola	60	600	400	100 / 300	0,4	200
BC477	STM	80	150	360	125 / 260	0,25	180 (typ)

4. Calculez le courant de base I_B des transistors lorsque le moteur est à pleine puissance.
5. Calculez la résistance présente sur la base des transistors du montage.

Le montage est commandé par une carte Arduino. Les sorties utilisées sont la 3 (marche avant) et la 5 (marche arrière)

6. Est-ce que la carte Arduino peut commander ce montage (justifiez votre réponse) ? Si ce n'est pas le cas proposez une solution (schéma, calculs, ...).

Le moteur à courant continu a maintenant comme caractéristiques : 6V, 1.8A, 11500 tr/mn

7. Démontrez que la carte Arduino ne peut pas commander ce montage.
8. Faites le schéma d'une solution :

