



Séquence n° 3

Système de régulation



Fiches de synthèse mobilisées :

Fiche n°3 Systèmes de régulation.



Sommaire des activités

| | | |
|--------------|---|----|
| ACTIVITÉ 1 : | Détection d'un niveau d'eau et signal d'avertissement | 1 |
| ACTIVITÉ 2 : | Régulation tout ou rien d'un niveau d'eau | 4 |
| ACTIVITÉ 3 : | Critères de performance d'une régulation d'un niveau d'eau | 8 |
| ACTIVITÉ 4 : | Caractéristique statique de la maquette de régulation de niveau..... | 11 |
| ACTIVITÉ 5 : | Programmation et étude d'une régulation proportionnelle de niveau | 13 |

ACTIVITÉ 1 : Détection d'un niveau d'eau et signal d'avertissement

On dispose d'un réservoir d'eau muni d'un robinet à sa base.

À l'aide d'un microcontrôleur, on souhaite équiper ce réservoir d'une pompe permettant son remplissage et d'un système d'avertissement pour les cas où le niveau d'eau dépasserait un certain seuil.

Le fonctionnement devra être le suivant :

- lorsqu'on maintient appuyé sur le bouton A du microcontrôleur, la pompe fonctionne ;
- lorsque le niveau d'eau est supérieur au seuil de 120 mm, une lumière rouge est allumée ;
- lorsque le niveau d'eau est inférieur au seuil de 120 mm, une lumière verte est allumée.

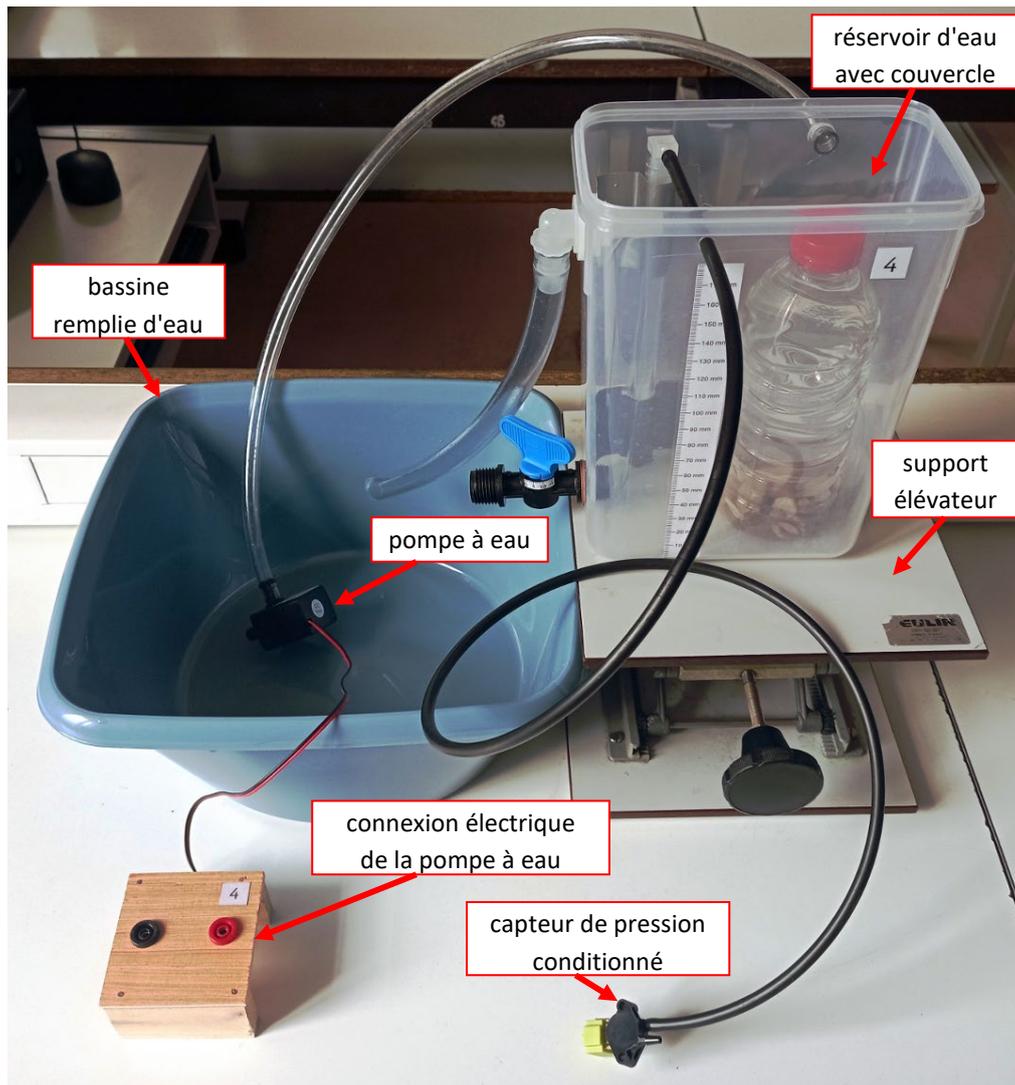


Photo de la maquette utilisée

Partie 1 : Réalisation du montage

1. Réaliser le montage correspondant à la photo ci-dessus.
Compléter comme indiqué sur le schéma électrique ci-après (en mettant le sélecteur Vcc sur 5 V).
Remarquer entre autres que la borne du capteur avec une encoche est reliée à la broche 2 du microcontrôleur
et que la borne S du relais est reliée à la broche 8 du microcontrôleur.

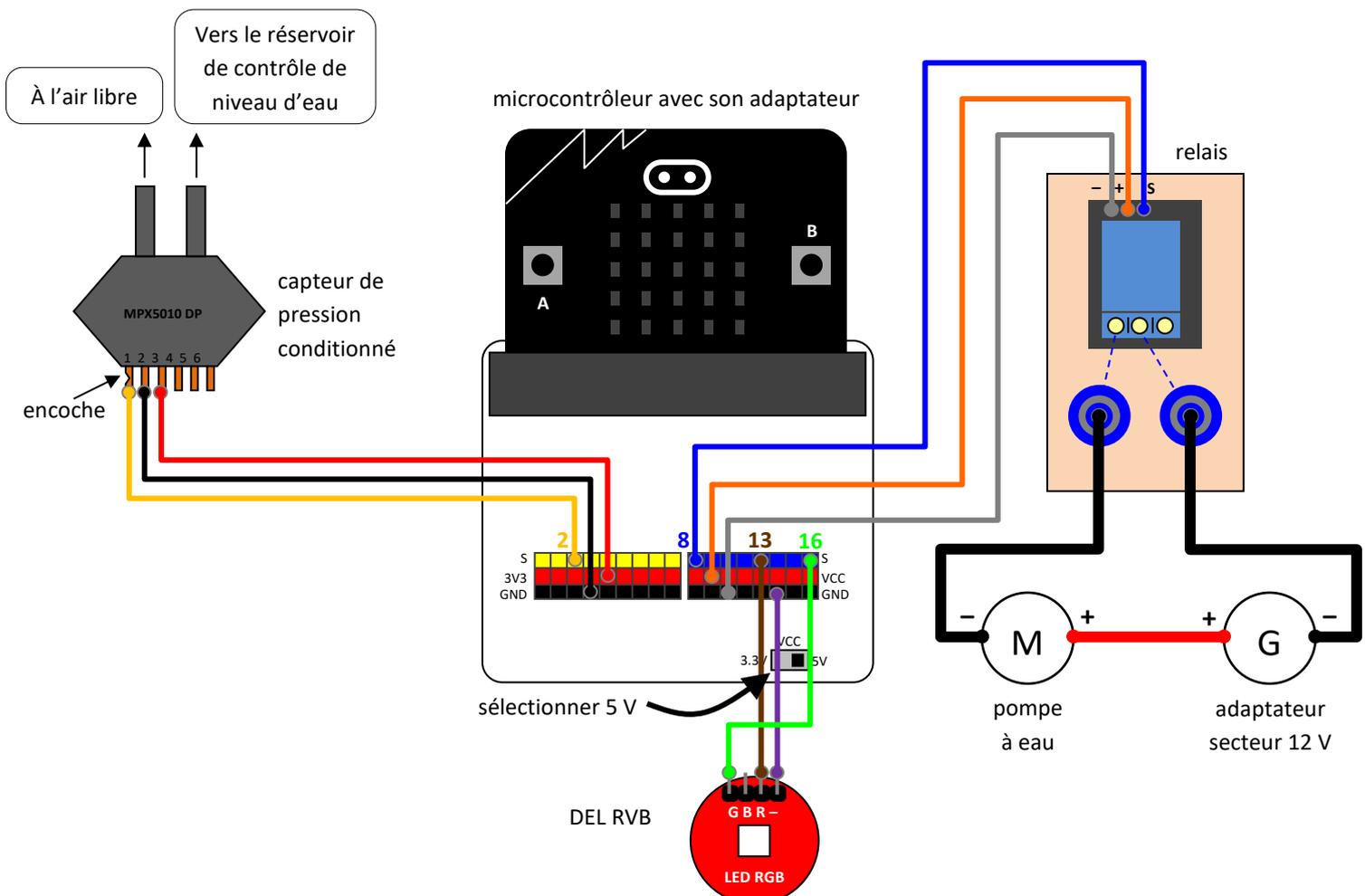


Schéma électrique du montage

Partie 2 : Détermination de la hauteur d'eau correspondant à 120 mm d'eau

2. Avec le logiciel Mu, flasher le programme "*hauteur_et_valeur_numerique*" sur le microcontrôleur. Lorsque le programme est flashé, démarrer le REPL (Read, Evaluate, Print and Loop) qui permet d'envoyer les instructions vers le microcontrôleur (en cliquant sur l'icône "REPL" du logiciel Mu). Redémarrer le microcontrôleur avec le bouton "RESET" situé à l'arrière de la carte à microcontrôleur. Remarquer que des informations apparaissent en temps réel en bas de la fenêtre du logiciel Mu.
3. Le capteur de niveau utilisé délivre une tension de sortie comprise entre 0 et 3,3 V. Le microcontrôleur est chargé de la conversion de cette tension en nombre N par l'intermédiaire de l'entrée analogique 2. Le programme précédent permet de lire cette valeur numérique. Proposer un protocole pour déterminer la valeur numérique correspondant à un niveau d'eau de 120 mm et réaliser ce protocole. À la fin, fermer le REPL (en cliquant sur l'icône "REPL" du logiciel Mu).

Partie 3 : Programmation du microcontrôleur pour générer un signal d'avertissement

4. Avec le logiciel Mu, charger le programme "*signal_d_averissement*" correspondant à votre niveau en programmation. Puis double-cliquer sur l'onglet portant son nom pour l'enregistrer sur votre clé USB (ou dans *Documents*) afin ne pas perdre le programme d'origine.
5. Là où il est écrit "COMPLETER", modifier le programme pour qu'il corresponde au fonctionnement attendu en introduction (modifier aussi la valeur numérique correspondant au seuil de 120 mm de hauteur d'eau déterminée à la question 3) en s'aidant éventuellement d'une documentation sur Python pour micro:bit.
6. Flasher le programme sur le microcontrôleur.



Vérifier le bon fonctionnement du programme et le modifier si nécessaire.
Vérifier aussi le bon fonctionnement du système lorsqu'il n'est plus relié à l'ordinateur.

7. Compléter les pointillés de l'algorithme ci-dessous pour qu'il corresponde au programme précédent.

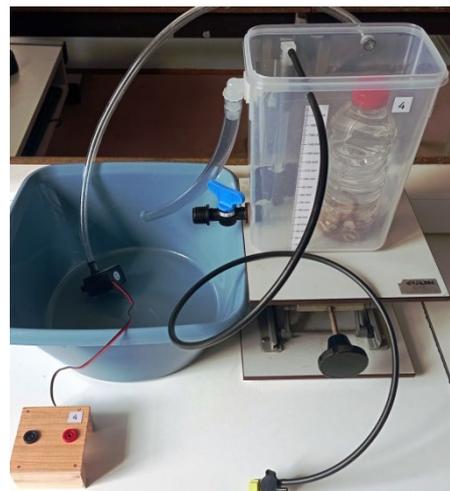
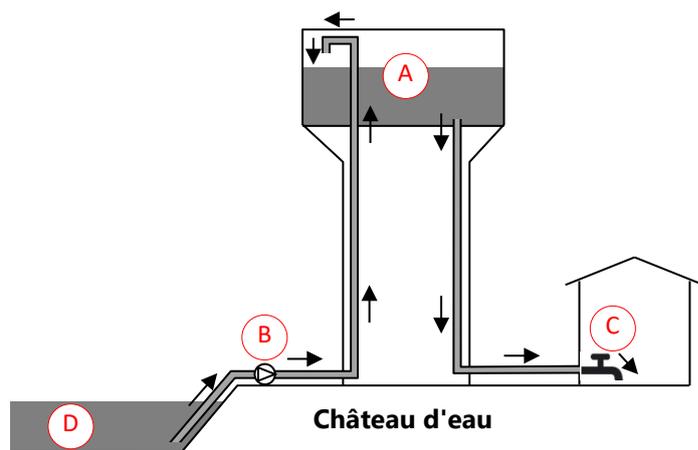
```
seuil ← ...  
Tant que Vrai Faire  
  Si valeur du capteur de niveau > seuil Alors  
    allumer ...  
    éteindre ...  
  Sinon  
    ...  
    ...  
  Fin Si  
  Si ...  
    allumer ...  
  ...  
  ...  
  attendre 0,2 s  
Fin Tant que
```

ACTIVITÉ 2 : Régulation tout ou rien d'un niveau d'eau

Partie 1 : Introduction

On dispose d'une maquette pouvant simuler un château d'eau dont on veut maintenir la hauteur d'eau constante pour avoir une pression constante chez l'utilisateur. On souhaite que, quelle que soit l'ouverture du robinet de puisage, le niveau d'eau puisse être maintenu constant :

- à 70 mm dans un premier temps ;
- à 130 mm dans un second temps, après un appui sur un bouton de commande.

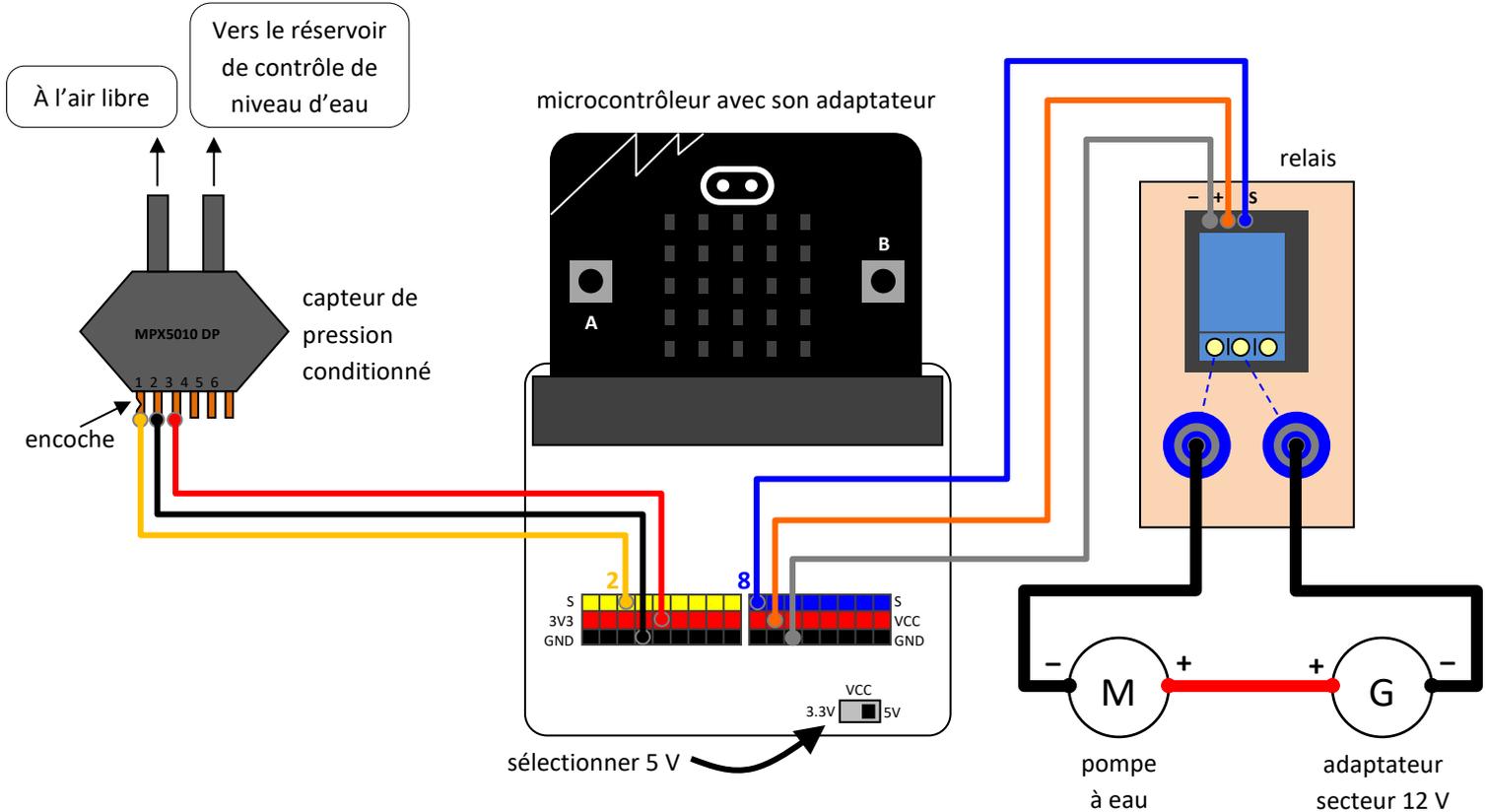


1. Indiquer la lettre du schéma du château d'eau qui correspond à :
 bac d'alimentation du château d'eau ; robinet de puisage ;
 réservoir de contrôle de niveau ; pompe.
2. Placer aussi ces quatre mêmes lettres sur la photo de la maquette.

Partie 2 : Réalisation du montage

3. Réaliser le montage de la maquette en utilisant, pour la partie électrique, le schéma suivant (en mettant le sélecteur Vcc sur 5 V).

Remarquer entre autres que la borne du capteur avec une encoche est reliée à la broche 2 du microcontrôleur et que la borne S du relais est reliée à la broche 8 du microcontrôleur.



Partie 3 : Étalonnage du capteur de niveau

4. Avant de réaliser l'acquisition des mesures, il est indispensable d'étalonner le capteur de pression. La pression variant avec le niveau d'eau dans la cuve, on souhaite exploiter le capteur de pression pour afficher le niveau d'eau. Autrement dit, on souhaite déterminer expérimentalement une relation entre le niveau d'eau et la valeur numérique du capteur de pression. Pour cela :

- Flasher le programme "*etalonnage_tor*" sur le microcontrôleur avec le logiciel Mu ;
- Démarrer le REPL (en cliquant sur l'icône "REPL" du logiciel Mu) lorsque le programme est flashé ;
- Redémarrer le microcontrôleur avec le bouton "RESET" situé à l'arrière de la carte à microcontrôleur ;
- Ouvrir le robinet puis suivre les indications situées en bas de la fenêtre du logiciel Mu (entre autres, noter les valeurs de a et de b nécessaires pour la suite).

Grâce à l'étalonnage, on connaît les valeurs de a et de b qui permettent de calculer le niveau d'eau (en mm) avec la relation $\text{niveau} = a \times \text{valeur numérique du capteur de pression} + b$;

- À la fin, fermer le REPL (en cliquant sur l'icône "REPL" du logiciel Mu).

Partie 4 : Algorithme

5. À partir du travail précédent, écrire un algorithme permettant de maintenir un niveau égal au seuil de 70 mm.

Partie 5 : Réponse à des changements d'ouverture du robinet de puisage

Après que le capteur ait été étalonné, l'acquisition peut être réalisée :

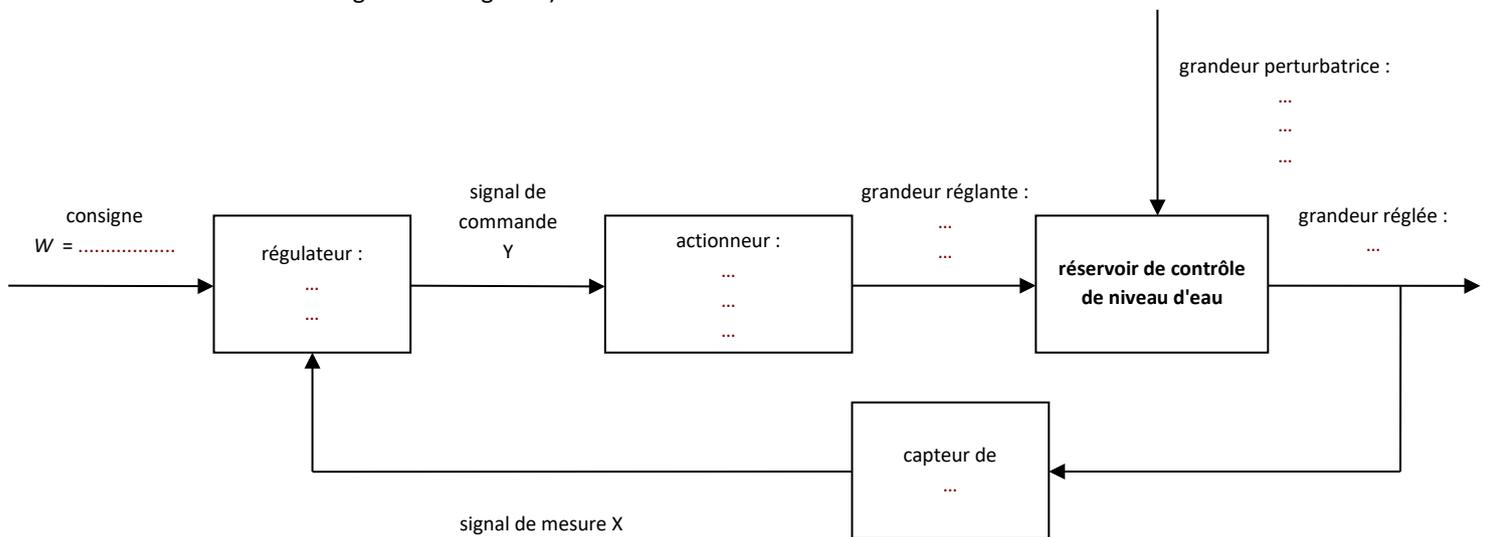
6. Ouvrir le robinet de puisage d'un angle égal à 10,5 (unités arbitraires).



7. Avec le logiciel Mu, charger le programme "regul_tor_1seuil" puis double-cliquer sur l'onglet portant son nom pour l'enregistrer dans Documents/Systèmes_Procedés afin ne pas perdre le programme d'origine. Modifier le programme avec la consigne1 de 80 mm (le niveau d'eau voulu dans un 1^{er} temps), consigne2 = 160 mm (le niveau d'eau voulu dans un 2nd temps) et les valeurs a et b déterminées au cours de l'étalonnage. Flasher le programme sur le microcontrôleur.
8. Appuyer sur le bouton A pour démarrer la maquette et observer l'évolution du système.
9. Quand le niveau d'eau semble à peu près stabilisé, attendre une vingtaine de secondes puis changer modérément l'angle d'ouverture du robinet de puisage et observer l'évolution du système.
10. Appuyer sur le bouton B pour que le contrôleur stabilise le niveau jusqu'à la deuxième consigne. Pour arrêter la maquette appuyer sur la bouton A.
11. Le graphique représentant l'évolution temporelle des différentes grandeurs est fourni. Commenter en particulier l'évolution dans le temps de la puissance de la pompe.

Partie 6 : Schéma fonctionnel de la boucle de régulation

12. Compléter sur la feuille qui vous est fournie le schéma fonctionnel de la boucle de régulation ci-dessous en ajoutant :
 - le nom de la grandeur réglée (grandeur dont on veut maintenir la valeur constante) ;
 - le nom du type de capteur utilisé (pour mesurer la grandeur réglée) ;
 - la valeur de la consigne (valeur que l'on veut imposer à la grandeur réglée) ;
 - le nom de la grandeur réglante (grandeur sur laquelle le système automatisé agit afin de tenter d'imposer une valeur à la grandeur réglée) ;
 - le nom de la grandeur perturbatrice (grandeur non contrôlée par le système automatisé mais qui a une influence sur la grandeur réglée) ;
 - le nom de ce qui sert de régulateur (l'électronique qui compare la mesure à la consigne et indique comment il faut agir suivant la situation) ;
 - le nom de ce qui sert d'actionneur (l'ensemble d'objets qui, piloté par le signal provenant du régulateur, va modifier la grandeur réglante).



Partie 7 : Réponse à un changement brusque de niveau souhaité

13. Compléter les 5 pointillés de l'extrait de programme simplifié ci-dessous pour que la hauteur d'eau soit réglée à 70 mm.

```
# Branchement du capteur de pression sur la broche 2 du microcontrôleur  
# Branchement du contrôleur de puissance sur la broche 8 du microcontrôleur
```



```
from microbit import *

consigne = 70    # valeur de la consigne (en mm)
a = 1.35119     # coefficient a pour le calcul de la hauteur d'eau
b = -56.3035    # coefficient b pour le calcul de la hauteur d'eau

commande_pourcent = 0    # signal de commande (en %)
pin8.write_digital(0)    # met le signal de commande à 0 (éteint la pompe)

while True:
    hauteur = a * pin2.read_analog() + b    # hauteur d'eau (en mm)
    if ...
        commande_pourcent = ...
        pin8.write_digital(...)
    else:
        commande_pourcent = ...
        ...
    sleep(200)    # pause de 200 ms
```

Partie 8 : Cas d'une régulation tout ou rien à deux seuils

14. Avec la régulation TOR à 1 seuil, la pompe s'allume et s'éteint très brièvement et très souvent. Ceci entraîne une usure prématurée de l'actionneur. Pour éviter ce problème, on peut utiliser une régulation TOR à 2 seuils : pour avoir un niveau d'environ 90 mm, on fixe par exemple une consigne basse de 70 mm et une consigne haute de 110 mm.

Quel doit être l'état de la commande de la pompe si le niveau d'eau est supérieur à la consigne haute ?
Qu'en est-il si le niveau d'eau est inférieur à la consigne basse ?

15. En s'aidant de la question précédente, compléter les 6 pointillés de l'extrait de programme simplifié ci-dessous pour que la hauteur d'eau soit régulée entre 70 mm et 110 mm.

```
# Branchement du capteur de pression sur la broche 2 du microcontrôleur
# Branchement du contrôleur de puissance sur la broche 8 du microcontrôleur

from microbit import *

consigne_haute = 90    # valeur de la consigne haute (en mm)
consigne_basse = 110   # valeur de la consigne basse (en mm)
a = 1.35119           # coefficient a pour le calcul de la hauteur d'eau
b = -56.3035         # coefficient b pour le calcul de la hauteur d'eau

commande_pourcent = 0    # signal de commande (en %)
pin8.write_digital(0)    # met le signal de commande à 0 (éteint la pompe)

while True:
    hauteur = a * pin2.read_analog() + b    # hauteur d'eau (en mm)
    if ...
        commande_pourcent = ...
        pin8.write_digital(...)
    if ...
        commande_pourcent = ...
        ...
    sleep(200)    # pause de 200 ms
```



Si le capteur a déjà été étalonné lors de cette séance, l'acquisition peut être réalisée. Sinon, refaire la partie 3.

16. Ouvrir le robinet de puisage d'un angle égal à 10,5 (unités arbitraires).
17. Avec le logiciel Mu, charger le programme "*regul_tor_2seuils*" puis double-cliquer sur l'onglet portant son nom pour l'enregistrer dans votre dossier afin ne pas perdre le programme d'origine.
Modifier le programme avec les valeurs de consigne1_haute (110 mm), consigne1_basse (90 mm), consigne2_haute (170 mm), consigne2_basse (150 mm), a et b.
Flasher le programme sur le microcontrôleur.
18. Appuyer sur le bouton "RESET" situé à l'arrière de la carte à microcontrôleur
 - Appuyer sur le **bouton A** pour démarrer la maquette et l'acquisition avec le niveau d'eau voulu dans un 1^{er} temps ;
 - puis appuyer sur le **bouton B** lorsqu'il est temps de passer au niveau d'eau voulu dans un 2nd temps ;
 - puis appuyer sur le **bouton B** lorsqu'il est temps de repasser au niveau d'eau initialement voulu ;
 - enfin, appuyer sur le **bouton A** pour arrêter la maquette et l'acquisition.
19. Comparer à la régulation tout ou rien à un seuil (mesurer entre autres l'amplitude et la fréquence des oscillations dans les deux cas).

ACTIVITÉ 3 : Critères de performance d'une régulation d'un niveau d'eau

L'activité précédente nous a montré un inconvénient de la régulation TOR

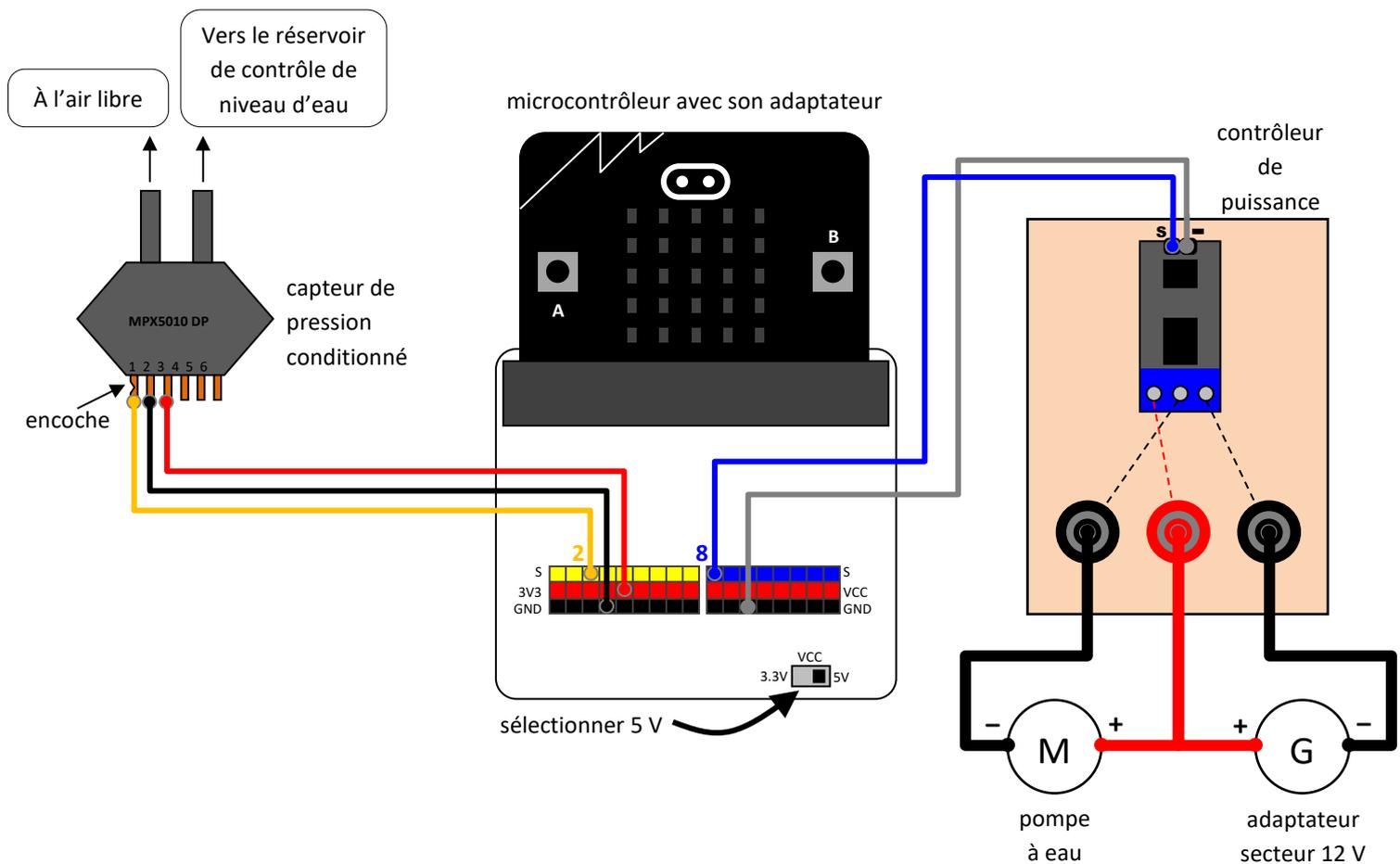
Pour augmenter la stabilité du système et moins solliciter l'actionneur, on propose une régulation PI (proportionnelle intégrale).

L'objectif est de déterminer les critères de performance de la maquette de régulation de niveau d'eau en régulation PI (proportionnelle intégrale) de gain proportionnel $g_p = 16$ et de gain intégral $g_i = 4$.

L'étude se fera avec un échelon de consigne de 70 mm à 130 mm et un robinet ouvert d'un angle égal à 10,5 (unités arbitraires).

Partie 1 : Réalisation du montage

1. Réaliser le montage de la maquette en utilisant, pour la partie électrique, le schéma suivant (en mettant le sélecteur Vcc sur 5 V).
Remarquer entre autres que la borne du capteur avec une encoche est reliée à la broche 2 du microcontrôleur et que la borne S du contrôleur de puissance est reliée à la broche 8 du microcontrôleur.



Partie 2 : Étalonnage du capteur et de la pompe

2. Avant de réaliser acquisitions et mesures, il est indispensable d'étalonner le capteur de pression et la valeur numérique seuil de démarrage de la pompe. Le programme suivant permettra de déterminer les valeurs numériques permettant d'établir la relation entre niveau et tension aux bornes du capteur mais aussi de déterminer la valeur numérique n_0 de commande de la pompe, comprise entre 0 et 1023, permettant le fonctionnement de la pompe. Pour cela :
 - Flasher le programme "*etalonnage*" sur le microcontrôleur avec le logiciel Mu ;
 - Démarrer le REPL (en cliquant sur l'icône "REPL" du logiciel Mu) lorsque le programme est flashé ;
 - Redémarrer le microcontrôleur avec le bouton "RESET" situé à l'arrière de la carte à microcontrôleur ;
 - Ouvrir le robinet puis suivre les indications situées en bas de la fenêtre du logiciel Mu (entre autres, noter les valeurs de n_0 , de a et de b nécessaires pour la suite) ;
 - À la fin, fermer le REPL (en cliquant sur l'icône "REPL" du logiciel Mu).

Partie 3 : Réponse à un changement brusque de niveau souhaité (échelon de consigne)

Après que le capteur et la pompe aient été étalonnés, l'acquisition peut être réalisée :

3. Ouvrir le robinet de puisage d'un angle égal à 10,5 (unités arbitraires).
4. Avec le logiciel Mu, charger le programme "*regul_integrale*" puis double-cliquer sur l'onglet portant son nom pour l'enregistrer dans votre dossier.
Modifier le programme avec les valeurs de n_0 , a et b déterminées au cours de l'étalonnage.
Flasher le programme sur le microcontrôleur.
5. Avec le logiciel Spyder, ouvrir le programme "*graphe_python*" et l'enregistrer dans votre dossier).
6. Appuyer sur le bouton "RESET" situé à l'arrière de la carte à microcontrôleur, attendre quelques secondes puis exécuter le programme "*graphe_python*" (à partir de l'éditeur Spyder) et attendre que la fenêtre graphique s'affiche.



7. Comme indiqué sur la fenêtre graphique, appuyer sur le **bouton A** pour démarrer la maquette.
8. On souhaite enregistrer la réponse du système à un échelon de consigne. Quand doit-on appuyer sur le bouton B pour changer de consigne ? Après validation par le professeur, réaliser cette action.
9. Quand doit-on appuyer sur le bouton A pour arrêter la maquette et l'acquisition ? Après validation par le professeur, réaliser cette action.
10. Le fichier (au format texte) contenant les résultats de l'acquisition se trouve dans le même dossier que le programme "*graphe_python*" et se nomme *regulniv00*. Avant de l'utiliser et/ou de démarrer une nouvelle acquisition, le renommer en remplaçant *00* par *Plperformance* et le numéro de la maquette (et conserver ce fichier en vu des activités expérimentales des prochaines semaines).
À partir du tableur-grapheur Regressi, ouvrir le fichier (au format texte) contenant les résultats de l'acquisition.

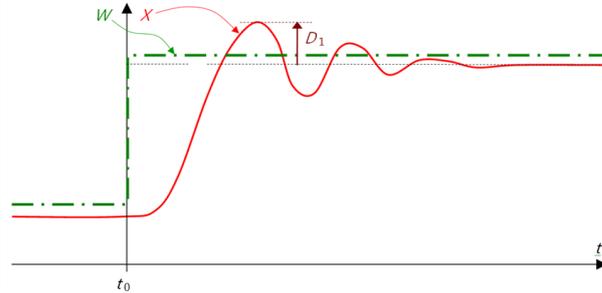
Partie 4 : **Mesure des critères de performance de la régulation**

L'objectif de cette partie est de déterminer les critères de performance de la régulation, définis dans le Document 1.

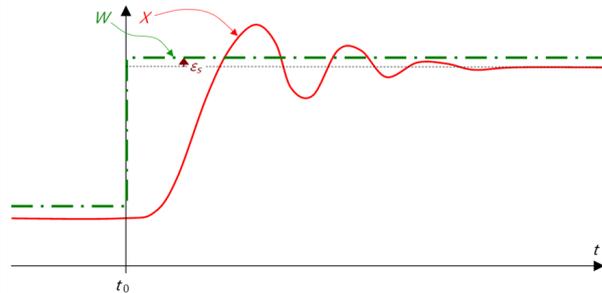
11. À l'aide du graphique obtenu à la question 10, évaluer la stabilité de cette régulation en mesurant graphiquement la valeur du premier dépassement D_1 .
12. Évaluer la précision de cette régulation en mesurant graphiquement l'écart statique ε_s .
13. Évaluer la rapidité de cette régulation en mesurant graphiquement le temps de réponse t_r à 5 %.

**DOCUMENT 1 : Critères de performance****Critère 1 : stabilité**

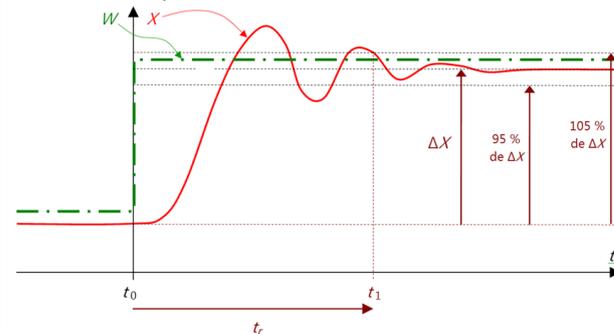
La valeur du premier dépassement D_1 est l'écart maximum atteint entre la grandeur de sortie (X ou G_m) et sa valeur en régime permanent : $D_1 = X_{\max} - X_{\infty}$ ou $D_1 = G_{m\max} - G_{m\infty}$

*Premier dépassement D_1* **Critère 2 : précision**

L'écart statique ε_s est la différence entre la valeur de la consigne W et la valeur de la grandeur de sortie (X ou G_m) en régime permanent : $\varepsilon_s = W_{\infty} - X_{\infty}$ ou $\varepsilon_s = W_{\infty} - G_{m\infty}$

*Écart statique ε_s* **Critère 3 : rapidité**

t_r , le temps de réponse à 5 %, est la durée entre l'échelon de consigne et le moment où la grandeur de sortie (X ou G_m) reste comprise entre 95 % et 105 % de sa variation ΔX ou ΔG_m (c'est la durée pour que le signal soit stabilisé, à 5 % près).

**ACTIVITÉ 4 : Caractéristique statique de la maquette de régulation de niveau**

L'objectif est de déterminer la réaction de la maquette de régulation de niveau pour différentes valeurs du signal de commande fixées par l'opérateur (le niveau d'eau n'est alors plus régulé mais évolue librement).

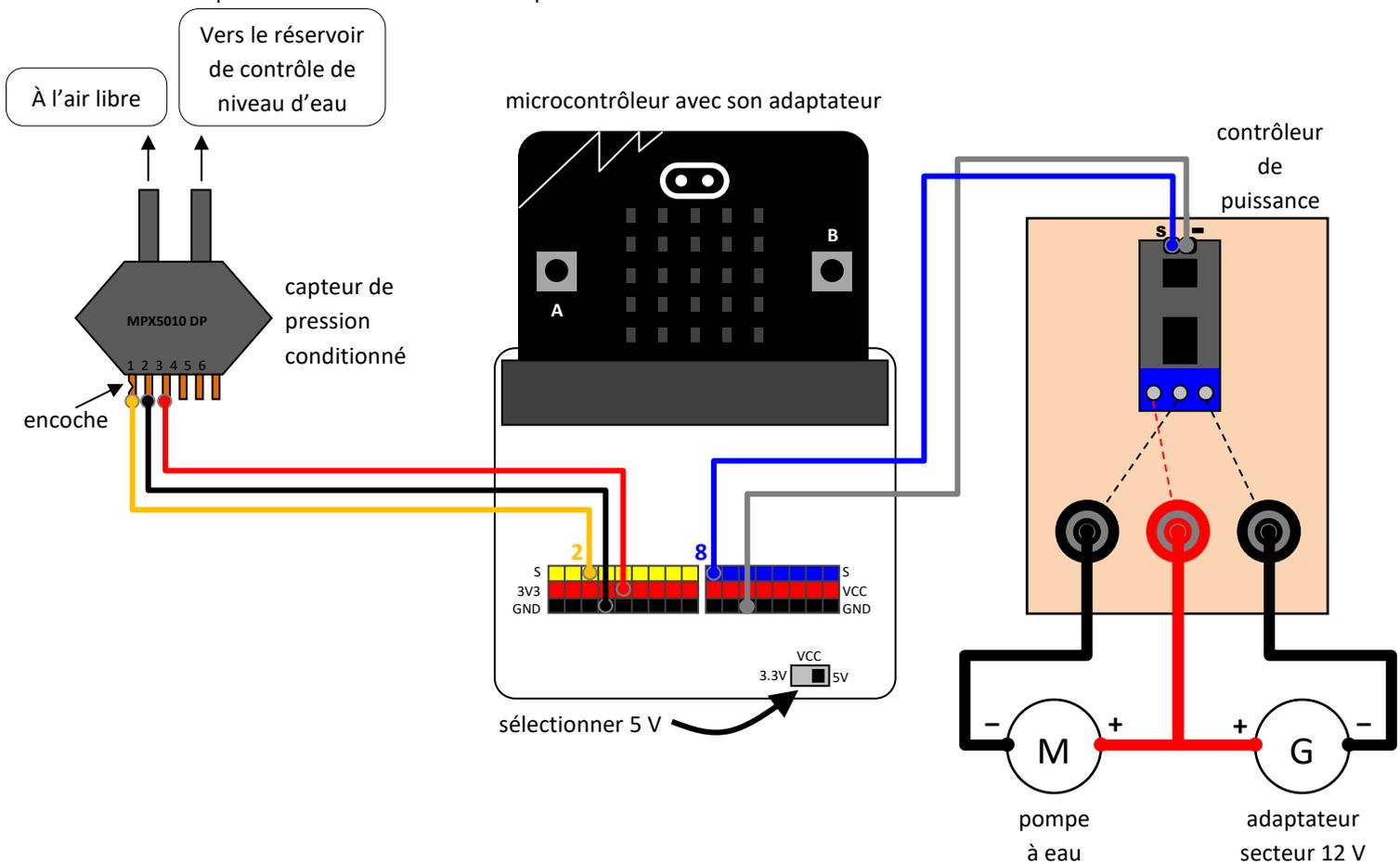
On pourra ainsi déterminer le signal de commande nécessaire pour obtenir un niveau d'eau attendu.

L'étude se fera avec un robinet ouvert d'un angle égal à 10,5 (unités arbitraires).

Partie 1 : Réalisation du montage

1. Réaliser le montage de la maquette (avec le même numéro de maquette que lors de l'activité expérimentale précédente sur les critères de performance de la régulation de niveau d'eau) en utilisant, pour la partie électrique, le schéma suivant (en mettant le sélecteur Vcc sur 5 V).

Remarquer entre autres que la borne du capteur avec une encoche est reliée à la broche 2 du microcontrôleur et que la borne S du contrôleur de puissance est reliée à la broche 8 du microcontrôleur.



Partie 2 : Étalonnage du capteur et de la pompe

2. Avant de réaliser les mesures, il est indispensable d'étalonner le capteur de pression et la valeur numérique seuil de démarrage de la pompe. Pour cela :
 - Flasher le programme "*etalonnage*" sur le microcontrôleur avec le logiciel Mu ;
 - Démarrer le REPL (en cliquant sur l'icône "REPL" du logiciel Mu) lorsque le programme est flashé ;
 - Redémarrer le microcontrôleur avec le bouton "RESET" situé à l'arrière de la carte à microcontrôleur ;
 - Ouvrir le robinet puis suivre les indications situées en bas de la fenêtre du logiciel Mu (entre autres, noter les valeurs de n0, de a et de b nécessaires pour la suite) ;
 - À la fin, fermer le REPL (en cliquant sur l'icône "REPL" du logiciel Mu).

Partie 3 : Réponse à un signal de commande imposé

Après que le capteur et la pompe aient été étalonnés, l'acquisition peut être réalisée :

3. Ouvrir le robinet de puisage d'un angle égal à 10,5 (unités arbitraires).
4. Avec le logiciel Mu, charger le programme "*boucle_ouverte_simple*" puis double-cliquer sur l'onglet portant son nom pour l'enregistrer sur votre clé USB (ou dans Documents) afin ne pas perdre le programme d'origine. Modifier le programme avec les valeurs de n0, a et b déterminées au cours de l'étalonnage. Modifier aussi la valeur de commande_pourcent (le signal de commande en pourcentage) en imposant la valeur 4.



Flasher le programme sur le microcontrôleur.

5. Quand le programme est flashé, démarrer le REPL (en cliquant sur l'icône "REPL" du logiciel Mu).
Redémarrer le microcontrôleur avec le bouton "RESET" situé à l'arrière de la carte à microcontrôleur.
Observer l'évolution du système et noter le niveau d'eau finalement atteint et le signal de commande.
À la fin, fermer le REPL (en cliquant sur l'icône "REPL" du logiciel Mu).

Partie 4 : Tracé de la caractéristique statique et utilisation

6. Réaliser les expériences permettant d'obtenir la valeur du niveau d'eau stabilisé pour un signal de commande valant respectivement 4 %, 12 %, 20 % et 28 % (pour un angle d'ouverture du robinet de puisage égal à 10,5 (unités arbitraires)).
À la fin, fermer le REPL (en cliquant sur l'icône "REPL" du logiciel Mu).
7. Tracer la caractéristique statique du système pour un angle d'ouverture du robinet de puisage de 10,5 (unités arbitraires) correspondant à la courbe représentative de la grandeur de la grandeur de sortie (en régime permanent) en fonction de la grandeur d'entrée.
8. À partir de la caractéristique statique du système, déterminer quel devra être le signal de commande pour maintenir un niveau de 70 mm avec un angle d'ouverture du robinet de puisage de 10,5 (unités arbitraires).
Qu'en est-il pour un niveau de 130 mm ?
9. Ces résultats sont-ils en accord avec ceux obtenus lors de l'activité expérimentale précédente sur les critères de performance de la régulation de niveau d'eau ?

ACTIVITÉ 5 : Programmation et étude d'une régulation proportionnelle de niveau

Mis à part la régulation tout-ou-rien, la régulation proportionnelle est la plus simple des régulations généralement rencontrées. Elle permet de réaliser une régulation continue plus stable que la régulation TOR et permet également d'éviter le fonctionnement discontinu de la pompe.

Dans le cas d'une régulation proportionnelle, le signal de commande Y peut prendre toutes les valeurs de 0 à 100 % et est tout simplement proportionnel à l'écart entre la consigne et la valeur actuelle de la grandeur maîtrisée G_m :

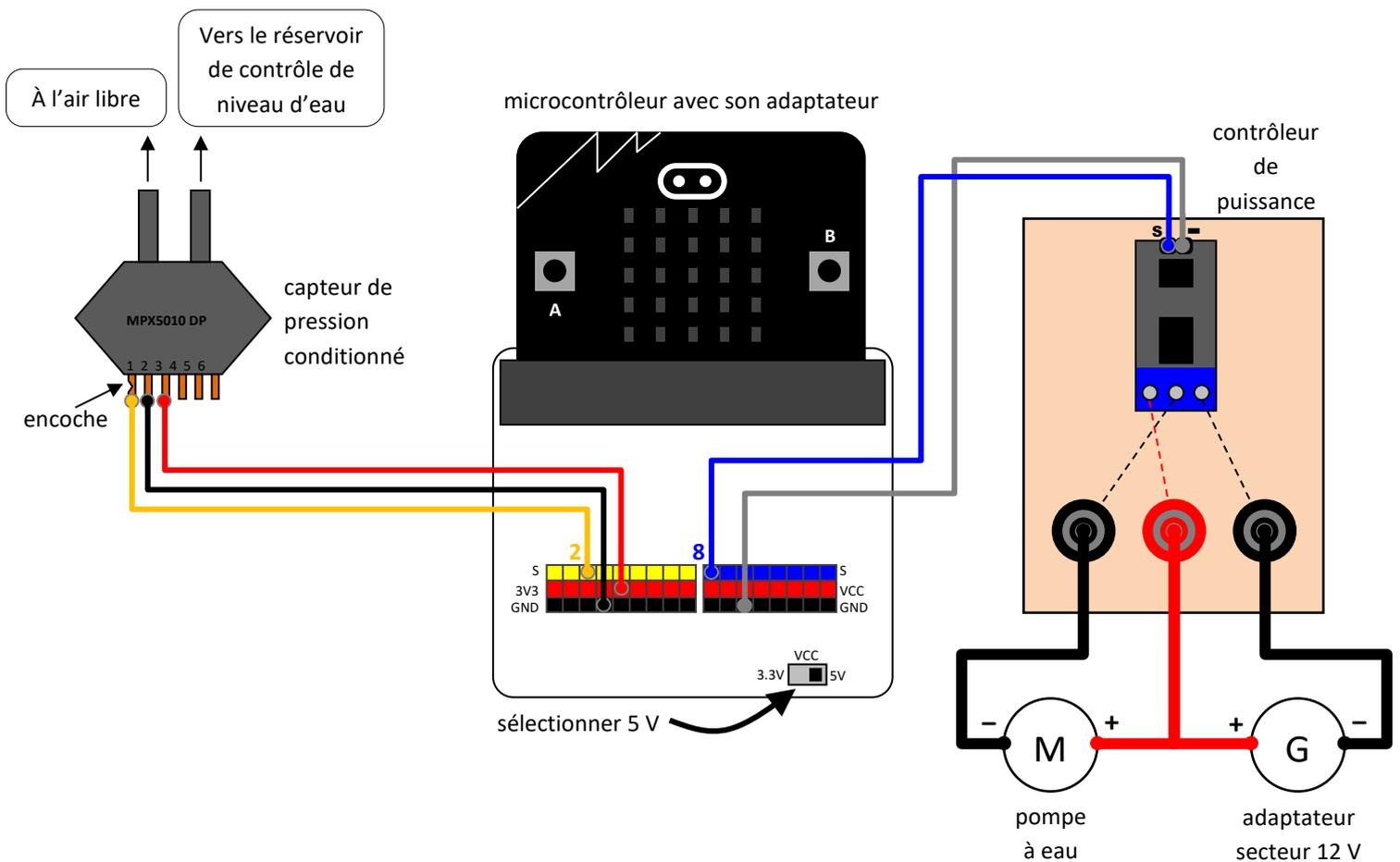
$$Y = G_p \times (\text{consigne} - G_m) \quad \text{où } G_p \text{ est le coefficient de proportionnalité, appelé gain proportionnel.}$$

Les objectifs sont :

- Programmer une régulation proportionnelle ;
- Déterminer l'effet de différents paramètres sur cette régulation.

Partie 1 : Réalisation du montage

1. Réaliser le montage de la maquette en utilisant, pour la partie électrique, le schéma électrique suivant (en mettant le sélecteur Vcc sur 5 V).
Remarquer entre autres que la borne du capteur avec une encoche est reliée à la broche 2 du microcontrôleur et que la borne S du contrôleur de puissance est reliée à la broche 8 du microcontrôleur.



Partie 2 : Étalonnage du capteur et de la pompe

2. Avant de réaliser les mesures, il est indispensable d'étalonner le capteur de pression et la valeur numérique seuil de démarrage de la pompe. Pour cela :
 - Flasher le programme "*etalonnage*" sur le microcontrôleur avec le logiciel Mu ;
 - Démarrer le REPL (en cliquant sur l'icône "REPL" du logiciel Mu) lorsque le programme est flashé ;
 - Redémarrer le microcontrôleur avec le bouton "RESET" situé à l'arrière de la carte à microcontrôleur ;
 - Ouvrir le robinet puis suivre les indications situées en bas de la fenêtre du logiciel Mu (entre autres, noter les valeurs de n_0 , de a et de b nécessaires pour la suite) ;
 - À la fin, fermer le REPL (en cliquant sur l'icône "REPL" du logiciel Mu).

Partie 3 : Programmation de la régulation proportionnelle

Dans un premier temps, l'étude se fera avec un gain proportionnel de 16, un robinet de puisage ouvert d'un angle égal à 10,5 (unités arbitraires) et une consigne de 90 mm.

3. Avec le logiciel Mu, charger le programme "*regul_proportionnelle_a_completer*" puis double-cliquer sur l'onglet portant son nom pour l'enregistrer sur votre clé USB (ou dans *Documents*) afin ne pas perdre le programme d'origine.
4. Compléter les lignes 16 à 21 avec les valeurs nécessaires.
5. Compléter la ligne 28 en s'aidant éventuellement d'une documentation sur Python pour micro:bit.
6. Sachant que la hauteur d'eau se calcule avec la formule

$$\text{hauteur d'eau (en mm)} = a \times \text{valeur numérique issue du capteur de hauteur d'eau} + b$$

 (où a et b ont été obtenus lors de l'étalonnage), compléter la ligne 29.
7. Compléter la ligne 30 en s'aidant éventuellement d'une documentation sur Python pour micro:bit.



8. Compléter la ligne 32 correspondant au calcul du signal de commande défini en introduction de cette activité expérimentale.
9. Compléter les lignes 35 et 37 en s'aidant éventuellement d'une documentation sur Python pour micro:bit.
10. Compléter la ligne 38 en s'aidant éventuellement d'une documentation sur Python pour micro:bit.
11. Régler le robinet de puisage puis flasher le programme sur le microcontrôleur.
Quand le programme est flashé, démarrer le REPL (en cliquant sur l'icône "REPL" du logiciel Mu).
Redémarrer le microcontrôleur avec le bouton "RESET" situé à l'arrière de la carte à microcontrôleur.
Observer le bon fonctionnement du système (et l'affichage de la hauteur d'eau dans le REPL) ou, en cas de problème, modifier le programme (après avoir fermé le REPL en cliquant sur l'icône "REPL" du logiciel Mu).

Partie 4 : Effet de la correction proportionnelle

12. Débrancher l'adaptateur secteur (l'alimentation électrique de la pompe) et attendre que la maquette se vide. Puis rebrancher l'adaptateur secteur, observer l'évolution du système et noter le niveau d'eau finalement atteint.
13. Que remarque-t-on ? Noter la valeur de l'écart statique.
14. Débrancher l'adaptateur secteur et attendre que la maquette se vide. Changer la correction proportionnelle en imposant un gain proportionnel de 130 puis rebrancher l'adaptateur secteur. Que remarque-t-on ?
15. Débrancher l'adaptateur secteur et attendre que la maquette se vide. Changer la correction proportionnelle en imposant un gain proportionnel de 4 puis rebrancher l'adaptateur secteur. Que remarque-t-on ?

Partie 5 : Effet de la perturbation

16. Revenir à la correction proportionnelle initiale en imposant un gain proportionnel de 16. Noter le niveau d'eau finalement atteint.
17. Changer la perturbation en imposant un angle d'ouverture du robinet de puisage de 6,5 (unités arbitraires). Que remarque-t-on ?
18. Changer la perturbation en imposant un angle d'ouverture du robinet de puisage de 14 (unités arbitraires). Que remarque-t-on ?