

Électricité et circuits électriques

Guide de l'étudiant

Électricité et circuits électriques

S1-APP2-TITO (GEGI et GRO)

Automne 2023 – Semaines 4 et 5

Département de génie électrique et informatique

Département de génie robotique

Faculté de génie

Université de Sherbrooke

Rédigé par Claudette Légaré, août 2017

Ce document a été produit pour le cours GEN137. Certaines parties du Guide Étudiant GEN133 ont été gardées telles quelles. Auteur Dominique Drouin.

Mis à jour par Claudette Légaré, septembre 2018

Mis à jour par Jan Dubowski, septembre 2020, 2021, 2022, 2023

TABLE DES MATIÈRES

TABLE DES MATIÈRES.....	3
1. ACTIVITÉS PÉDAGOGIQUES ET COMPÉTENCES	5
2. SYNTHÈSE DE L'ÉVALUATION.....	5
3. QUALITÉS DE L'INGÉNIEUR.....	5
4. ÉNONCÉ DE LA PROBLÉMATIQUE.....	6
5. CONNAISSANCES NOUVELLES À ACQUÉRIR.....	11
6. GUIDE DE LECTURE	12
6.1 Références essentielles	12
6.2 Document complémentaire.....	12
7. LOGICIELS ET MATÉRIEL.....	13
8. SANTÉ ET SÉCURITÉ	13
9. SOMMAIRE DES ACTIVITES	13
9.1 Semaine 1	13
9.2 Semaine 2	13
10. PRODUCTIONS À REMETTRE.....	14
10.1 Rapport.....	14
10.2 Validation.....	15
11. ÉVALUATIONS	16
11.1 Productions à remettre	16
12. POLITIQUES ET RÈGLEMENTS	17
13. PRATIQUE PROCÉDURALE 1.....	18
14. PRATIQUE EN LABORATOIRE 1	18
15. PRATIQUE PROCÉDURALE/LABORATOIRE 2.....	18
16. SECOND TUTORAT	19
17. EXAMEN FORMATIF	19
18. EXAMEN FORMATIF.....	19

LISTE DES FIGURES

FIGURE 1 : SCHEMA D'UN MICROMIROIR A MOUVEMENT ELECTROSTATIQUE.....	7
FIGURE 2 : SCHEMA DU MICROMIROIR (VUE EN COUPE SELON LE PLAN BB')	8
FIGURE 3 : SCHEMA ELECTRIQUE DE L'ALIMENTATION DU MICROMIROIR.....	9
FIGURE 4 : 74HC4051.....	9
FIGURE 5: LES INTERRUPTEURS ET LE CODE LOGIQUE	10

LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU 1 : SYNTHSE DE L'EVALUATION DE L'UNITE.....	5
TABLEAU 2 : GRILLE D'EVALUATION DU RAPPORT ET DE LA VALIDATION	16

1. ACTIVITÉS PÉDAGOGIQUES ET COMPÉTENCES

GEN 137 - Électricité et circuits électrique

1. Appliquer les lois de l'électrostatique.
2. Appliquer les lois de tensions et de courants aux circuits électriques résistifs pour calculer leurs réponses temporelles lorsqu'ils sont soumis subitement à une excitation continue.

Description officielle :

<https://www.usherbrooke.ca/admission/fiches-cours/gen137/electricite-et-circuits-electriques/>

2. SYNTHÈSE DE L'ÉVALUATION

Compétence	Rapport	Examen théorique	Examen final
GEN137-1	90	140	150
GEN137-2	60	70	90
Total:	150	210	240

Tableau 1 : Synthèse de l'évaluation de l'unité

3. QUALITÉS DE L'INGÉNIEUR

Les qualités de l'ingénieur visées par cette unité d'APP sont les suivantes.

	Q01	Q02	Q03	Q04	Q05	Q06	Q07	Q08	Q09	Q10	Q11	Q12
Touchée	✓	✓	✓									
Évaluée	✓	✓	✓									

Les qualités de l'ingénieur sont les suivantes. Pour une description détaillée des qualités et leur provenance, consultez le lien suivant :

<https://www.usherbrooke.ca/genie/etudiants-actuels/au-baccalaureat/bcapg/>

Qualité	Libellé
Q01	Connaissances en génie
Q02	Analyse de problèmes
Q03	Investigation
Q04	Conception
Q05	Utilisation d'outils d'ingénierie
Q06	Travail individuel et en équipe
Q07	Communication
Q08	Professionnalisme
Q09	Impact du génie sur la société et l'environnement
Q10	Déontologie et équité
Q11	Économie et gestion de projets
Q12	Apprentissage continu

4. ÉNONCÉ DE LA PROBLÉMATIQUE

La compagnie **MEMS des Cantons inc.** a retenu vos services en tant qu'expert en conception de **Micro-Electro-Mechanical-System (MEMS)**. L'entreprise régionale de conception de ces micros systèmes veut diversifier ses produits et vous a mandaté pour faire l'étude de faisabilité d'une puce de **1024x768** micromiroirs pivotants activés par des forces électrostatiques. Celle-ci vous demande aussi de prévoir un circuit capable d'alimenter chacun de ces miroirs selon les angles désirés (**entre 0 et 2 degrés**)

Dans une première partie de votre mandat, on vous demande de préparer un rapport portant sur l'analyse du fonctionnement d'un miroir **MEMS** à force électrostatique. La **figure 1** présente un schéma de la conception d'un des miroirs de la micropuce. Le miroir pivote de 0 à 2 degrés selon l'axe **AA'** en appliquant une tension continue sur les plaques métalliques de chaque côté. Vous retrouverez, dans les lignes suivantes, une vue en coupe selon le plan **BB'** précisant les dimensions du dispositif.

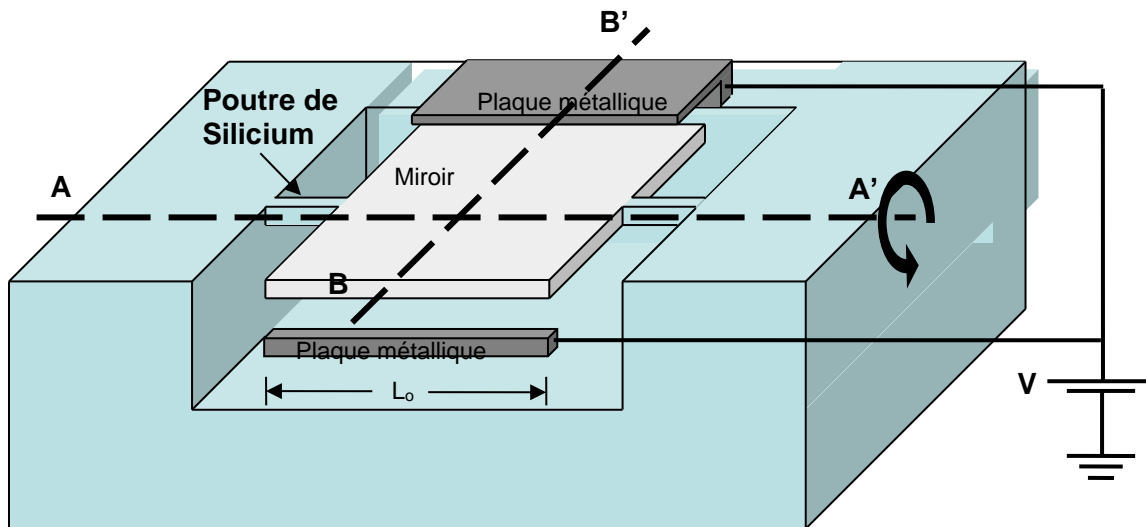


Figure 1 : Schéma d'un micromiroir à mouvement électrostatique

Au repos, le miroir est à l'horizontal et est maintenu par une poutre de silicium de chaque côté. En pivotant le miroir selon l'axe AA' , les poutres de silicium (Si) vont se tordre et offrir une résistance mécanique. Cette résistance peut être décrite par un vecteur de couple de force (T_{mec}) selon l'axe AA' . Le couple de force en fonction de l'angle de rotation (θ) est $T_{mec} = k_{\theta}\theta$, où k_{θ} est la constante de torsion (0.5 nNm/deg.). La force, exercée par les deux poutres, se calcule en divisant le couple par la longueur du bras de levier ($F_{Si} = T_{mec}/L$). En appliquant une tension sur les plaques métalliques une force électrostatique d'attraction fera pivoter le miroir de quelques degrés. Votre travail d'analyse de ce dispositif consiste à

- (i) calculer la capacité (C_p) en fonction de la distance séparant les plaques pour une plage d'angle allant de 0 à 2 degrés,
- (ii) calculer l'amplitude de la force exercée (F_{Si}) au bout du miroir par le couple T_{mec} en fonction de la distance séparant les plaques (d_p) et
- (iii) calculer le voltage (V) nécessaire pour faire défléchir le miroir en fonction de l'angle de rotation.

La **figure 2** montre le schéma du micromiroir vue en coupe selon le plan **BB'**. Toutes les dimensions nécessaires aux calculs vous sont données ici. Pour les calculs des forces et capacité, vous devez :

- 1) Supposer que les plaques sont toujours parallèles dans la plage d'angle de rotation (0 à 2deg.)
- 2) Négliger l'effet de la force gravitationnelle dans le bilan des forces sur le miroir.

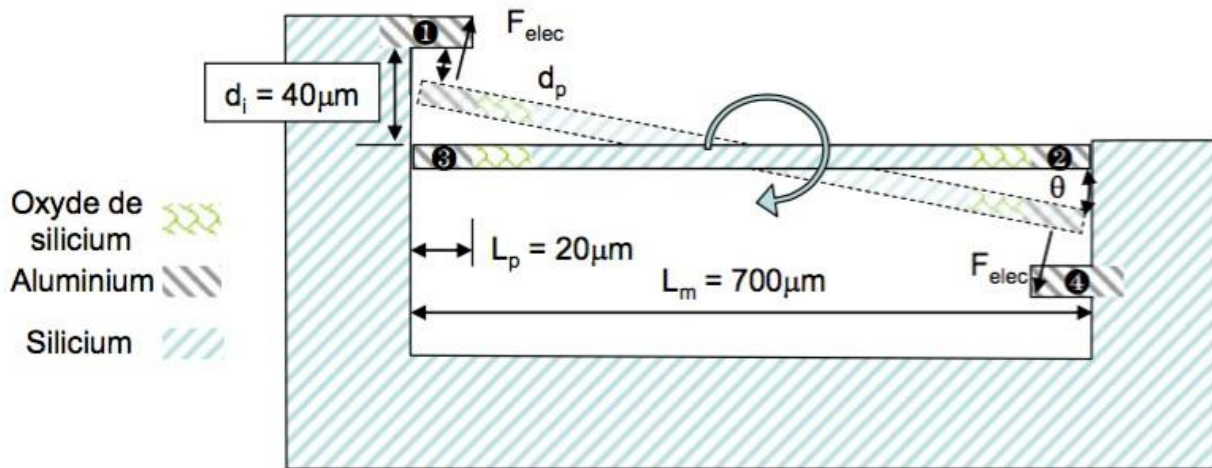


Figure 2 : Schéma du micromiroir (vue en coupe selon le plan BB')

F_{elec} = force électrostatique produite par la tension appliquée sur les plaques d'aluminium

① et ④

L_p = largeur des plaques d'aluminium ① et ④ = largeur des régions d'aluminium ③ et ② sur le miroir

L_m = largeur totale du miroir mobile

L_o = longueur du miroir = longueur des plaques ① et ④ = longueur des régions d'aluminium ③ et ② = $700\mu\text{m}$

Votre mandat consiste aussi à compléter la conception d'un circuit d'alimentation des micromiroirs (**Figure 3**).

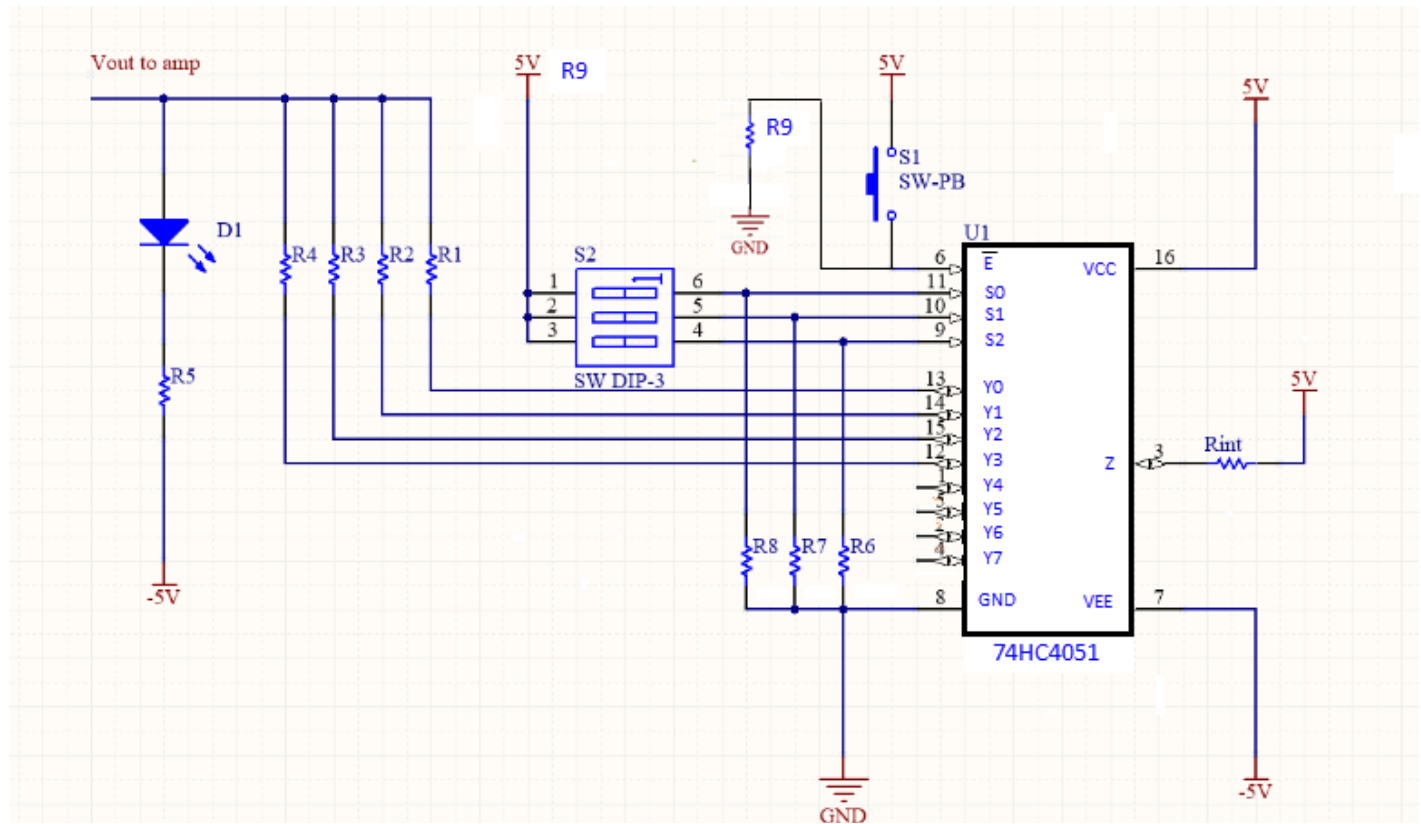


Figure 3 : Schéma électrique de l'alimentation du micromiroir

L'objectif de ce circuit d'alimentation est d'alimenter chacun des micromiroirs pour lui permettre un déplacement selon l'angle θ entre 0 et 2 degrés. Le circuit intégré 74HC4051 (Figure 4) permettra, pour une tension DC fixe à l'entrée (Z) de fournir 8 sorties différentes (Y₀ à Y₇) pour 7 angles différents. Nous utiliserons les sorties Y₀ à Y₃ pour des angles de 0.5, 1, 1.5 et 2 degrés.

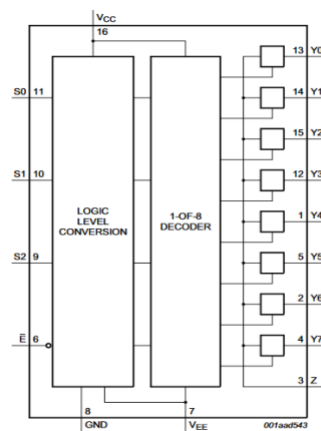


Figure 4 : 74HC4051

Les interrupteurs (**S0, S1 et S2**) utilisés selon le code logique suivant permettent de choisir la sortie selon l'angle désiré.

Table 3. Function table^[1]

Input				Channel ON
\bar{E}	S2	S1	S0	
L	L	L	L	Y0 to Z
L	L	L	H	Y1 to Z
L	L	H	L	Y2 to Z
L	L	H	H	Y3 to Z
L	H	L	L	Y4 to Z
L	H	L	H	Y5 to Z
L	H	H	L	Y6 to Z
L	H	H	H	Y7 to Z
H	X	X	X	switches off

[1] H = HIGH voltage level;
L = LOW voltage level;
X = don't care.

Figure 5 : Les interrupteurs et le code logique

Il est à noter que la patte \bar{E} (Enable) doit être à un niveau bas (**< 0.8V**) pour que les interrupteurs fonctionnent (un bouton poussoir sera utilisé pour envoyer le signal à la patte \bar{E}). Pour choisir la sortie désirée, 3 interrupteurs branchés au circuit avec une résistance à la masse (de type pull down), seront actionnés par l'utilisateur (**niveau haut >2.4V et niveau bas <0.8V**). La résistance **R9** servira aussi de pull down au bouton poussoir. La puissance maximale consommée demandée est de **0.01W**. Il faudra calculer la valeur des résistances **R6, R7, R8 et R9** pour respecter cette contrainte.

À chacune des sorties, sera branchée une configuration résistances et diode électroluminescente. Un courant maximal de **10 mA** devra circuler dans chacune de ces branches (les spécifications de la diode sont **2V/10mA**). Vous devrez choisir la valeur de chacune des résistances (**R1 à R4** ainsi que **R5**) permettant d'avoir une tension de sortie correspondant au degré désiré. Si vous en avez besoin, vous pouvez utiliser des résistances en série ou en parallèle pour arriver aux valeurs résistives nécessaires à la bonne tension de sortie.

Cette valeur de tension sera amplifiée d'un facteur **30** dans un étage constitué d'un amplificateur de tension (gain de 30), ce qui permettra d'atteindre les valeurs de tension trouvées dans la partie micromiroirs.

5. CONNAISSANCES NOUVELLES À ACQUÉRIR

Connaissances déclaratives : QUOI

- Notion mathématique de base (champ, vecteur, amplitude, direction)
- Concepts de base de l'électrostatique (charges, capacité, voltage, courant, densité de courant J , conductivité, force, intensité du champ électrique E , densité du flux électrique D , matériau diélectrique, permittivité)
- Loi de Coulomb
- Loi de Kirchhoff
- Loi d'Ohm
- Concepts de base des circuits électriques (sources d'alimentation, résistances, condensateurs, tension, courant, puissance consommée)
- Composants électroniques (résistance, condensateur)
- Multimètre
- Oscilloscope
- Plaquettes de montage

Connaissances procédurales : COMMENT

- Calculer la force entre deux charges en appliquant la loi de Coulomb
- Calculer le champ électrique E pour une distribution de charge donnée
- Déterminer l'effet d'un matériau diélectrique sur le champ électrique
- Calculer la tension pour une distribution de charges donnée
- Calculer la capacité de différentes structures
- Déterminer la résistance de différentes structures en utilisant la loi d'Ohm
- Mesurer une tension à l'aide d'un multimètre et d'un oscilloscope
- Mesurer un courant à l'aide d'un multimètre et d'un oscilloscope
- Évaluer la puissance consommée d'un circuit électronique
- Monter un circuit sur plaquette de montage

Connaissances conditionnelles : QUAND

- Reconnaître l'origine des forces dans un système électromécanique
- Choisir les matériaux appropriés en fonction de leurs propriétés physiques pertinentes pour la conception d'un système électromécanique
- Utiliser d'un multimètre
- Utiliser un bloc d'alimentation

6. GUIDE DE LECTURE

6.1 Références essentielles

Physique 2 : Électricité et magnétisme de René Lafrance (Tc Média Livres inc., 2014)

1. Chapitre 1 : pages 5-26 (22 pages)
2. Chapitre 2 : pages 34-70 (37 pages)

Physique – Tome 2 : Électricité et magnétisme de M. Périard et A. Ducharme (Cengage Learning Inc., 2012)

3. Chapitre 3 : pages 70-86 (17 pages)
4. Chapitre 4 : pages 112-132 (21 pages)
5. Chapitre 5 : pages 154-164, 168-175 (19 pages)
6. Chapitre 6 : pages 190-202 (13 pages)

6.2 Document complémentaire

Electrical Engineering: Principles and applications (Seventh edition) de Allan R. Hambley (Pearson, 2018)

1. Chapitre 1 :
À lire sections 1.1 à 1.5 (21 pages)
2. Chapitre 2 :
À lire sections 2.1, 2.2 (9 pages)
3. Chapitre 3 :
À lire sections 3.1 à 3.4 (15 pages) et 3.5 (3 pages)

Document intitulé «Initiation aux appareils de mesure» disponible sur le site WEB de l'APP2

Code de couleur des résistances Voici 2 sites à titre d'exemple :

<http://www.apprendre-en-ligne.net/crypto/passecret/resistances.pdf>

<http://www.positron-libre.com/cours/electronique/resistances/code-couleurs-resistances.php>

Série E24 des résistances :

http://logwell.com/tech/components/resistor_values.html

Fiches techniques du 74HC4051, du LM324 et de la diode électroluminescente sur le site WEB de l'APP2.

Document : « Bonnes pratiques de montage sur plaquette & Exercices de montage et mesure », sur le site Web de l'APP2

7. LOGICIELS ET MATÉRIEL

Pour cet APP, les étudiants pourront utiliser le logiciel de leur choix pour générer les graphiques du rapport

8. SANTÉ ET SÉCURITÉ

Dans le cadre de la présente activité, vous êtes réputés avoir pris connaissance des Politiques et directives concernant la santé et la sécurité. Ces documents sont disponibles sur les sites Web de l'Université de Sherbrooke, de la Faculté de génie et du département. Les principaux sont mentionnés ici et sont disponibles dans la section Santé et sécurité du site web du département : <http://www.gel.usherbrooke.ca/santesecurite/>

- Politique 2500-004 : Politique de santé et sécurité en milieu de travail et d'études
- Directive 2600-042 : Directive relative à la santé et la sécurité en milieu de travail et d'études
- Sécurité en laboratoire et atelier au département de génie électrique et du génie informatique

9. SOMMAIRE DES ACTIVITES

9.1 Semaine 1

- Première rencontre de tutorat
- Étude personnelle et exercices
- Formation à la pratique procédurale 1
- Formation à la pratique en laboratoire 1
- Formation à la pratique procédurale/laboratoire 2
- Rencontre de collaboration à la solution de la problématique

9.2 Semaine 2

- Étude personnelle et exercices
- Formation à la pratique en laboratoire : Validation pratique de la solution
- Rédaction du rapport d'APP
- Remise du rapport d'APP
- Deuxième rencontre de tutorat
- Évaluation formative théorique
- Évaluation sommative théorique

10. PRODUCTIONS À REMETTRE

10.1 Rapport

Procédure de dépôt

Dans cette unité d'APP, un rapport contenant la partie micromiroir ainsi que la partie alimentation du circuit est à remettre en format PDF par équipe de 2 étudiants. Remettez votre rapport, selon la procédure de dépôt électronique, avant **08h30** le matin du deuxième tutorat de l'APP. Il y aura une pénalité de 20% par jour de retard de dépôt.

Sur la page web de l'unité 2, vous trouverez un lien (dans la section « **Autres informations** », **Dépôt des travaux**) qui vous mène à la page principale pour les dépôts électroniques des travaux des différentes sessions. Choisissez la bonne session et le bon APP. Vous pourrez ensuite sélectionner votre fichier à déposer et le copier dans ce répertoire. Le nom de votre fichier doit absolument être formé des CIP des deux signataires du rapport, séparés d'un trait d'union (par exemple, **levg1234-souj1204.pdf**). De plus, le système n'acceptera pas le dépôt si le CIP de la personne faisant le dépôt n'est pas dans le nom du fichier.

Note : Vous trouverez aussi la page web pour les dépôts électroniques en passant par la page du département (<http://www.usherbrooke.ca/gelecinfor/>). Cliquez sur Intranet (vous devrez au passage vous authentifier avec votre CIP), puis sur Dépôt des Travaux dans la section Liens complémentaires.

Contenu du rapport

Le rapport doit suivre les consignes suivantes (suivre le modèle disponible sur la page WEB de l'APP) :

Partie micromiroir

1. Résumé de la problématique avec les spécifications recherchées
2. Diagramme des forces mécaniques et électrostatiques exercées sur le miroir du MEMS
3. Démonstration de la mise en équation de la relation du voltage (**V**) en fonction de la distance inter plaque (**d_p**)
4. Présentation graphique des courbes du voltage (**V**), de la capacité (**C_p**), et de la force mécanique (**F_{si}**) en fonction de l'angle de rotation (**θ**)

Partie alimentation

1. Faire le montage du circuit d'alimentation des micromiroirs
2. À partir de la courbe de voltage trouvée dans la partie 1, donner la tension nécessaire pour les degrés de **0 à 2** par incrément de **0.5** degré) après la division par **30** (mesures faites avant l'étage d'amplification)
3. Donner le calcul théorique de la valeur des résistances requises pour le circuit logique (**R₆ à R₉**)
4. Donner le calcul théorique de la valeur des résistances requises à la sortie du multiplexeur (**R₁ à R₅**).
5. Inclure un tableau contenant les valeurs théoriques et mesurées des résistances et ainsi que les valeurs de tension aux sorties du multiplexeur (**Y₀ à Y₃**).
6. Donner une explication des différences rencontrées.

(N.B : Toutes les présentations graphiques et schémas doivent être bien identifiés et clairs en utilisant les unités appropriées ainsi que des titres signifiants)

10.2 Validation

Lors de la validation, la fonctionnalité du circuit sera vérifiée ainsi que les valeurs des tensions correspondant aux différents degrés demandés pour le micromiroir. Le cahier de laboratoire pourra être regardé pour vérification des différents calculs nécessaire à la fonctionnalité. La grille d'évaluation sera disponible sur le site web lors de la semaine de validation.

11. ÉVALUATIONS

11.1 Productions à remettre

L'évaluation des productions à remettre portera sur les compétences figurant dans la description des activités pédagogiques. La pondération des différents éléments est indiquée dans le Tableau 2.

Évaluation	GEN137-1	GEN137-2
Rapport d'APP2 et validation	90	60
Micromiroir		
1. Résumé de la problématique	5	---
2. Diagramme des forces	4	---
3. Mise en équation	45	---
4. Graphiques des résultats	36	---
Alimentation		
1. Validation pratique		30
2. Validation des tensions de sortie nécessaires		5
3. Calcul théorique des résistances du circuit logique		5
4. Calcul théorique des résistances de sortie		5
5. Tableau des valeurs obtenues		10
6. Explication des résultats		5
Qualité du rapport		
Total	90	60

Tableau 2 : Grille d'évaluation du rapport et de la validation

:

L'évaluation du rapport d'APP contribue à l'évaluation des éléments de compétence de l'unité. Il s'agit donc d'une évaluation sommative, c'est-à-dire que le résultat de l'évaluation sera consigné au dossier scolaire de l'étudiant et utilisé dans le calcul de sa note finale. Toutefois, pour permettre à l'étudiant d'apprendre de ses erreurs, son rapport corrigé lui sera remis, avec une grille lui permettant d'apprécier son niveau de compétence.

Il est important de noter qu'il est de la responsabilité de l'étudiant signataire du rapport de s'assurer de l'exactitude, de la valeur de chaque élément de solution et de la qualité et de l'uniformité de l'ensemble du contenu de son rapport. N'oubliez pas que, lors de l'évaluation sommative (examen à la fin de l'unité), vous allez être évalués **de façon individuelle** sur les compétences mises en œuvre pour l'élaboration de ce rapport. Vous êtes donc réputé pouvoir résoudre de façon individuelle l'ensemble de la problématique de même que tout problème relié aux connaissances nouvelles à acquérir durant cette unité. **Même si les travaux sont remis en équipe de 2 personnes**, vous devez être en mesure de résoudre la problématique de façon individuelle pour être en mesure de réussir les examens.

12. POLITIQUES ET RÈGLEMENTS

Dans le cadre de la présente unité activité, vous êtes réputés avoir pris connaissance des politiques et règlements suivants. Ces documents sont disponibles sur le site web de l'Université de Sherbrooke ou sur le site web de la Faculté de génie

Règlements et politiques de l'Université de Sherbrooke

- Règlement des études
- Politique d'évaluation des apprentissages

Règlements et politiques facultaires

- Règlement facultaire d'évaluation des apprentissages/Programmes de baccalauréat
- Règlement facultaire sur la reconnaissance des acquis

Intégrité intellectuelle

- Déclaration d'intégrité relative au plagiat

Si vous êtes en situation de handicap, assurez-vous d'avoir communiqué avec le Programme d'intégration des étudiantes et étudiants en situation de handicap à l'adresse de courriel prog.integration@usherbrooke.ca

13. PRATIQUE PROCÉDURALE 1

Buts : Mettre en pratique les procédures requises pour résoudre les problèmes reliés aux principes physiques de base de l'électrostatique.

Problèmes de calcul force et de charges selon la loi de Coulomb

- Problèmes de calcul du vecteur d'intensité du champ électrique
- Problèmes reliés aux calculs de voltage et de capacité
- Problèmes de calculs de résistance et conductivité

La description de l'activité sera publiée sur la page de l'APP.

14. PRATIQUE EN LABORATOIRE 1

But : Mettre en pratique des concepts de base reliés aux champs électriques et aux circuits électriques

Dans cette activité, on collabore par équipe de 2.

La description de l'activité sera publiée sur la page de l'APP.

15. PRATIQUE PROCÉDURALE/LABORATOIRE 2

Buts : Mettre en pratique les procédures et mesures requises pour :

- résoudre les problèmes reliés aux circuits électriques
- faire un montage physique et mesurer les résultats

La description de l'activité sera publiée sur la page de l'APP.

16. SECOND TUTORAT

En vous référant au volume *En route vers une formation professionnelle universitaire réussie*, vous êtes invité à produire des schémas de concept qui illustrent les liens qui relient les concepts suivants :

- Charges, force électrostatique, Densité du flux électrique, intensité du champ électrique, capacité, permittivité des matériaux, voltage
- Sources d'alimentation, résistances, condensateurs, tension, courant, puissance consommée, circuits électriques

Apportez vos schémas de concepts lors du deuxième tutorat, car c'est ce dont on discutera pour faire un retour sur l'APP. Durant cette activité, il vous sera possible d'évaluer l'étendue des concepts que vous maîtrisez et de localiser les notions nécessitant d'être approfondies davantage pour atteindre le niveau de compétence désiré.

17. EXAMEN FORMATIF

L'évaluation formative est un examen écrit qui porte sur tous les éléments de compétences et de contenus de l'unité. Cet examen et sont corrigé sont déposés sur la page web de l'APP, le mercredi de la deuxième de l'APP. Les étudiants ont l'occasion de compléter leur apprentissage.

18. EXAMEN SOMMATIF

L'évaluation sommative est un examen écrit qui porte sur tous les éléments de compétences et de contenus de l'unité. C'est un examen qui se fait sans documentation (donc à livre fermé) ; toute la documentation nécessaire sera fournie lors de l'examen s'il y a lieu.