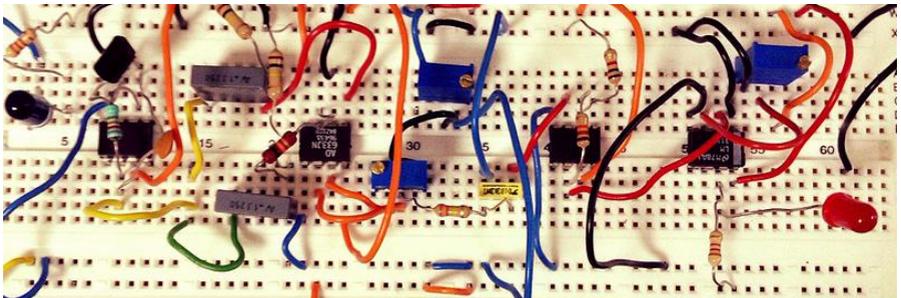


## Enseignement Expérimental

### Électronique pour le Traitement de l'Information

1A S5



Cycle Ingénieur - 1ère année - Palaiseau  
Année universitaire 2018-2019  
Version du 3 septembre 2018

<http://lense.institutoptique.fr/>



# Travaux Pratiques ETI - Semestre 5

<b>Calendrier</b>	<b>v</b>
<b>Modalités &amp; Évaluation</b>	<b>vii</b>
<b>Thème 1 - Découvrir les outils de l'expérimentateur en électronique</b>	<b>1</b>
1 Câbler, mesurer, piloter	3
2 Des photons dans tous les sens	17
<b>Thème 2 - Photodétection</b>	<b>27</b>
1 Diodes et photodiodes	29
2 Circuits de photodétection	39
<b>Thème 3 - Analyseur de spectre</b>	<b>47</b>
1 Composantes fréquentielles	49
2 Analyseur de spectre à balayage	59



# Calendrier

TP ETI 1A - 2018-2019							
PLANNING							
Semaine	Date	Horaire	Groupe 1	Groupe 2	Groupe 3	Groupe 4	Groupe 5
37	lun. 10 sept.	RENTREE					
38	lun. 17 sept.	8h30			Outil Elec 1		
	mar. 18 sept.	8h30	Outil Elec 1				
	mer. 19 sept.	8h30					Outil Elec 1
39	lun. 24 sept.	8h30			Outil Elec 2		
	mar. 25 sept.	8h30	Outil Elec 2				
	mer. 26 sept.	8h30					Outil Elec 2
40	lun. 1 oct.	8h30				Outil Elec 1	
	mar. 2 oct.	8h30		Outil Elec 1			
	jeu. 4 oct.		Remise des synthèses Th1		Remise des synthèses Th1		Remise des synthèses Th1
41	lun. 8 oct.	8h30				Outil Elec 2	
	mar. 9 oct.	8h30		Outil Elec 2			
42	lun. 15 oct.	8h30			Photodétection 1 + examen		
	mar. 16 oct.	8h30	Photodétection 1 + examen				
	mer. 17 oct.	8h30					Photodétection 1 + examen
	jeu. 18 oct.			Remise des synthèses Th1		Remise des synthèses Th1	
43	lun. 22 oct.	8h30			Photodétection 2+ examen		
	mar. 23 oct.	8h30	Photodétection 2+ examen				
	mer. 24 oct.	8h30					Photodétection 2+ examen
44	lun. 29 oct.	VACANCES					
45	lun. 5 nov.	EXAM					
46	lun. 12 nov.	8h30				Photodétection 1 + examen	
	mar. 13 nov.	8h30		Photodétection 1 + examen			
	jeu. 15 nov.	8h30	Remise des synthèses Th2		Remise des synthèses Th2		Remise des synthèses Th2
47	lun. 19 nov.	8h30				Photodétection 2+ examen	
	mar. 20 nov.	8h30		Photodétection 2+ examen			
48	lun. 26 nov.	8h30			Analyseur Spectre 1		
	mar. 27 nov.	8h30	Analyseur Spectre 1				
	mer. 28 nov.	8h30					Analyseur Spectre 1
	jeu. 29 nov.			Remise des synthèses Th2		Remise des synthèses Th2	
49	lun. 3 déc.	8h30			Analyseur Spectre 2		
	mar. 4 déc.	8h30	Analyseur Spectre 2				
	mer. 5 déc.	8h30					Analyseur Spectre 2
50	lun. 10 déc.	8h30				Analyseur Spectre 1	
	mar. 11 déc.	8h30		Analyseur Spectre 1			
	jeu. 13 déc.		Remise des synthèses AS		Remise des synthèses AS		Remise des synthèses AS
51	lun. 17 déc.						
	mar. 18 déc.	8h30		Analyseur Spectre 2			
	mer. 19 déc.	8h30				Analyseur Spectre 2	
52	lun. 24 déc.						
1	lun. 31 déc.						
2	jeu. 10 janv.			Remise des synthèses AS		Remise des synthèses AS	

Version du 3 septembre 2018.

Vérifiez systématiquement votre emploi du temps sur Synapses



**IMPORTANT : REGLEMENT DU LENSE**

Le règlement du L'EnSE est disponible en ligne

<http://lense.institutoptique.fr/reglement/>

Merci de prendre le temps de le lire.

Au cours de chaque semestre, deux notes sanctionnent votre travail :

- Une **note par binôme** d'évaluation du travail de synthèse,
- Une **note individuelle** d'examen pratique.

Les notes de travaux pratiques d'ETI du semestre 5 sont prises en compte dans l'unité d'enseignement *Traitement de l'information 1* (5N-019-SCI | 8 ECTS). La note de synthèse contribue à 20% à la note finale de l'unité d'enseignement, celle de l'examen individuel contribue à 15%.

Pour le semestre 6, dans l'unité d'enseignement *Traitement de l'information 2* (6N-058-SCI | 4 ECTS), l'examen contribue à hauteur de 20% de la note, la synthèse à hauteur de 30%.

## 1. Cahier de manipulation

Il est indispensable que vous teniez à jour un *cahier de manipulation* par binôme. Ce cahier est la mémoire de tous les circuits et les mesures que vous avez réalisés. Il vous sera utile pour rédiger les synthèses et pour les séances de TP suivantes, y compris au deuxième semestre ou lors des examens.

Les enseignant·e·s s'assureront que vous disposez bien d'un tel cahier à chaque séance même si il n'est pas évalué, ce document reste un document interne au binôme.

Ce cahier devra prendre la forme d'un espace de travail partagé sur le *nuage* de l'Institut d'Optique (<https://cloud.institutoptique.fr>).

**Il est important est que chaque membre du binôme puisse accéder à l'ensemble des documents lors de chaque séance.**

## 2. Synthèses

Nous attendons de vous dans cette synthèse une véritable analyse des résultats de mesures relevés ou observés en cours de séance.

### 2.1. Objectifs et contraintes

Pour rédiger une synthèse, il faut toujours partir des objectifs visés et des contraintes imposées, contraintes sur le format, le contenu et aussi sur la date de remise.

**Les objectifs de ce travail de synthèse** sont :

1. Améliorer votre compréhension des concepts et de vous approprier les savoirs-faire (pouvoir dire : ça, je sais faire!),
2. vous entraîner à la présentation scientifique, élément qui fait partie à part entière de toute formation scientifique,
3. permettre aux enseignant·e·s de suivre la progression dans les apprentissages et d'évaluer par une note le travail effectué et les connaissances acquises.

**Des conseils :** ce sont les deux premiers objectifs qui doivent être gardés en tête lors de la rédaction, la note qui en découle n'est qu'une conséquence (heureuse!) de leur réussite! Plus précisément :

1. **il faut rédiger la synthèse en imaginant que l'on s'adresse non pas à l'enseignant·e mais à une tierce personne** (un·e élève à l'autre bout du monde par exemple) qui souhaite faire les mêmes types d'expériences mais avec un matériel différent.
2. il faut avoir l'ambition d'**expliquer et non pas seulement de décrire**.

**Les contraintes de format** sont fixées à :

- 4 pages maximum pour chacun des thèmes traités au premier semestre : *Outils de l'électronique, Photodétection et Analyseur de Spectre*,
- 8 pages maximum pour le thème *Systèmes embarqués* du deuxième semestre,

au format .pdf, remis après la dernière séance du thème selon le calendrier de la page v.

La contrainte de pages maximum donne des indications du niveau de détails attendu pour les explications, forcément ici limité. La synthèse

est donc plus courte que l'ensemble des notes et relevés de mesure pris en séance, le délai donne le temps de trier, organiser et commenter celles-ci.

**La problématique** à traiter est imposée, elle ne reprend pas forcément l'ensemble des notions abordées, elle n'est divulguée qu'à la fin de la dernière séance.

## 2.2. Contenu. Structure. Mise en forme.

**Peut figurer dans une synthèse** tout ce qui peut aider à la réalisation et à la compréhension des phénomènes étudiés : circuit, relevés de mesure, courbes et surtout commentaires. Présenter des erreurs que vous avez commises et la correction que vous avez apportée est aussi tout à fait acceptable !

**Ne doit pas figurer** une courbe ou une image sans légende, le brochage d'un composant, la couleur de la table, etc.

**Toute image ou courbe** doit être accompagnée d'une légende (titre, axes horizontal et vertical avec unités) et doit être citée dans le corps du texte (s'il n'y a rien à en dire, ce n'est sans doute pas la peine de la faire figurer!).

**Structure du document** Le document doit impérativement comporter :

- vos noms, avec votre numéro de binôme,
- le titre,
- une ou deux phrases d'introduction,
- une conclusion.

et il doit être paginé (numéros de page/ nombre total de pages).

La contrainte de format doit être suivie ! Suivre les contraintes n'est pas forcément un frein à la créativité, au contraire, cela oblige parfois à explorer d'autres façons de faire, moins évidentes mais plus enrichissantes !

**Quelques conseils dans l'utilisation d'un traitement de texte** (Microsoft Word, Libre Office Writer ou LaTeX ou ...).

- La taille de la police doit être au minimum de 12 pts,
- les marges peuvent être réduites par rapport à celles définies par défaut par le logiciel,
- l'organisation sous deux colonnes peut permettre d'avoir un texte plus dense,

- utiliser le correcteur orthographique,
- placer des figures dans un tableau de 2 lignes, la 2ème ligne contenant le titre, peut faciliter la mise en page.

### Exporter au format .pdf

Word : Menu Fichier / Enregistrer sous ... et choisir le format .pdf dans la fenêtre suivante.

Writer: Menu Fichier / Exporter au format pdf

**Dépôt** Merci de respecter les consignes suivantes :

- Certifiez l'originalité de votre travail en faisant figurer la mention : *Nous attestons que ce travail est original, que nous citons en référence toutes les sources utilisées et qu'il ne comporte pas de plagiat.*
- **Vérifiez que vos noms et le numéro de votre binôme figurent sur la première page de votre compte-rendu avant de la transformer en .pdf.**
- Assurez-vous que le nombre maximum de pages est respecté.
- Renommez le fichier .pdf selon le format :  
G5B12MonNomEtCeluiDeMonBinomeSyntheseAS.pdf pour le binôme 12 du groupe 5.

Les synthèses doivent être déposées sur le site Libres Savoirs aux dates précisées dans le calendrier (page v).

**Attention : un point de moins par jour de retard !**

### 2.3. En résumé : checklist

- Les conditions expérimentales des résultats "affichés" sont-elles définies?
- Les mesures réalisées sont-elles analysées?
- Les figures sont-elles analysées? Si ce n'est pas le cas, sont-elles utiles?
- Les figures sont-elles numérotées?
- Les figures ont-elles des titres?
- Les axes des figures sont-ils renseignés?
- Les noms des auteurs sont-ils écrits?
- Les pages sont-elles numérotées?
- Le fichier porte-t-il un nom du type :  
G5B12MonNomEtCeluiDeMonBinomeSyntheseAS.pdf?
- Le fichier est-il au format PDF?

### 2.4. Évaluation des synthèses

Une synthèse de qualité répond à la problématique posée sous la forme d'un véritable article scientifique.

Elle répond à la problématique posée si :

- les circuits/schémas/ relevés de mesures donnent des éléments pertinents en réponse à la problématique.
- les interprétations des résultats sont correctes.

La forme est de bonne qualité si :

- le plan est apparent et pertinent,
- les figures sont correctement présentées (axes / légendes/ unités) et citées dans le texte,
- elle fournit des données en quantité raisonnable (pas toutes les mesures, mais en nombre suffisant)
- elle suit les consignes de format (noms, plagiat, nombre de pages, introduction, etc.)

Une échelle de notation indicative est la suivante :

- |       |  |
|-------|--|
| 0/20  | Note attribuée en cas d'absence non justifiée ou de plagiat.   |
| 5/20  | Note sanction pour un rendu indigent (une page sans mise en forme ...c'est arrivé!)  |
| 8/20  | Consignes non respectées. Echelles des graphes systématiquement manquantes, conditions expérimentales non précisées. ...                               |
| 11/20 | Des informations sont données, présentées correctement mais l'exploitation des mesures est incorrecte.   |
| 15/20 | Démarche claire avec quelques erreurs d'interprétations. Présentation de bonne qualité.  |
| 20/20 | Document du niveau d'un article scientifique. Toutes les mesures sont correctes, bien expliquées et exploitées pour répondre à la problématique posée. |

### 3. Cartes conceptuelles

Les cartes conceptuelles demandées ont pour contraintes (outre la question à laquelle elles doivent répondre) d'être lisibles après impression (couleur) sur une feuille A4.

**Quelques indications** Une carte conceptuelle est de bonne qualité si elle répond à la problématique posée avec

- un choix de “boîtes-concepts” pertinent et en nombre raisonnable (entre 5 et 15)
- des liens entre les concepts utilisant des verbes d'action, et donnant une information correcte
- une organisation graphique (disposition, couleur des boîtes, sens de lecture multiples) donnant du sens,
- une exploitation des mesures réalisées pour argumenter.

**Évaluation** Une échelle de notation indicative :

**Boîtes-concepts :**

- A** Intitulés cohérents avec la problématique et en nombre raisonnable
- B** nombre ou intitulé des boîtes mal choisi
- C** nombre et intitulé des boîtes mal choisi

**Liens :**

- A** tous présents (avec verbe) et tous corrects
- B** quelques liens manquants ou incorrects
- C** Peu de liens utiles ou justes

**Structure :**

- A** Utilisation de codes de couleur et de forme clairs et utiles, lecture facile de la carte. Répond à la problématique.
- B** De bonnes idées mais ensemble pas abouti.
- C** Uniforme et/ou illisible.

**Illustrations :**

- A** Des résultats de mesures et des schémas de circuits illustrent la carte et aident à comprendre.
- B** Peu d'illustrations utiles.
- C** Aucun résultat ou schéma.

## 4. Examen individuel

Un examen pratique a lieu chaque semestre. Il dure une heure et teste vos capacités expérimentales :

- maîtrise du matériel de laboratoire,
- protocoles et précautions pour des mesures simples,
- choix raisonné de composants.

Il n'est pas demandé de compte-rendu de manipulation. Vous avez accès aux synthèses et à votre cahier de manipulation.

Vous serez convoqué.e-s en demi-groupe selon le calendrier de la page v.

Une échelle de notation indicative est la suivante :

- |       |   |
|-------|---|
| 0/20  | Note attribuée en cas d'absence non justifiée   |
| 5/20  | Pas de circuit ni de mesure réalisé, même avec aide.  |
| 8/20  | Une mesure réalisée avec aide.  |
| 11/20 | Un circuit et/ou mesure réalisé(es), avec aide. Quelques erreurs dans les explications.   |
| 15/20 | Circuits et mesures réalisés de manière autonome. Quelques erreurs dans les explications.                                       |
| 20/20 | Ensemble des circuits et mesures réalisés de manière autonome dans le temps imparti. Explications pertinentes données à l'oral. |

## 5. Points de pénalité

Des points de pénalité peuvent être attribués sur les notes de synthèses aux binômes n'ayant pas rangés leur poste de travail à l'issue des séances de TP.



## TP ETI - 1AS5- Thème 1

---

# Découvrir les outils de l'expérimentateur en électronique

---

Ce thème se décompose en 2 séances qui vous amèneront à découvrir les outils disponibles en électronique pour pouvoir développer et tester des applications.

Vous verrez lors de la première séance l'utilisation de **cartes de prototypage** de type Nucléo, très utilisée pour montrer la faisabilité d'un projet et vous réaliserez un **gradateur de LED télécommandé**.



Vous apprendrez également, dans la seconde séance, à utiliser les **appareils de base de l'électronique** en mettant en œuvre un émetteur puis un récepteur de signaux lumineux (visibles puis infrarouges).

### Objectifs

---

- Lire une documentation technique
- Connaître les outils à disposition de l'électronicien/opticien pour :
  - Caractériser un signal et le visualiser (oscilloscope / multimètre - tension crête, tension efficace, courant, puissance)
  - Caractériser un composant (GBF / oscilloscope - caractéristique statique, comportement fréquentiel)
- Découvrir les cartes de prototypage rapide de type NUCLÉO

### Préparation

---

Le TP 2 possède des questions notées **Px** à préparer avant la séance.

### Rendu

---

Synthèse dont le sujet vous sera divulgué lors de la deuxième séance.



## Câbler, mesurer, piloter



ARMmbed

Dans cette séance, vous allez être amenés à utiliser une carte de prototypage rapide Nucléo L476RG. Un ensemble de tutoriels est disponible à l'adresse suivante : <http://lense.institutoptique.fr/nucleo/>

L'ensemble des programmes utilisés lors de cette séance sont dans le répertoire S:\EITI\TP ETI\Theme1.

### Après cette séance, vous saurez...

- Câbler un circuit sur une plaquette de prototypage,
- Mesurer un signal à l'aide d'un oscilloscope,
- Réaliser une application simple autour des cartes Nucléo.

## Sommaire

<b>1</b>	<b>Piloter une LED en tout ou rien</b>	<b>4</b>
1.1	Prise en main de la carte	4
1.2	Exemple de test	5
1.3	Piloter une LED externe en tout ou rien	6
1.4	Récupérer une information numérique	7
<b>2</b>	<b>Piloter la luminosité d'une LED</b>	<b>8</b>
2.1	Puissance lumineuse	8
2.2	Moduler la largeur d'une impulsion	8
<b>3</b>	<b>Acquérir une donnée analogique</b>	<b>10</b>
3.1	Câbler un potentiomètre	10
3.2	Programme de test	11
3.3	Débugger son programme	12
3.4	Moduler la luminosité de la LED avec un potentiomètre	12
<b>4</b>	<b>Piloter la luminosité d'une LED à distance</b>	<b>13</b>
4.1	Capteur numérique infrarouge	13
4.2	Utiliser une bibliothèque de fonctions pour Nucléo	13
4.3	Programme de test du capteur	14
4.4	Commander à distance la luminosité d'une LED	15

## Espaces numériques de travail

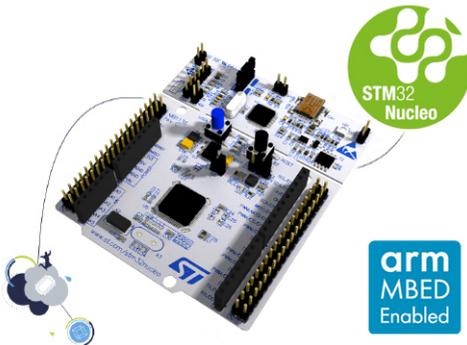
Afin de gérer au mieux l'ensemble de vos fichiers informatiques, le service informatique de l'Institut d'Optique a mis en place plusieurs outils différents :

- un compte **Windows** dans lequel est monté **votre propre espace personnel de fichiers** qui se trouve dans le répertoire `U : \` (quelque soit le poste de l'Institut d'Optique où vous vous connectez);
- un service de **partage de fichiers** (owncloud) où il est très facile de **partager des répertoires** de travail avec n'importe qui de l'Institut d'Optique (pratique pour les compte-rendus de TP...) disponible depuis n'importe quelle plateforme connectée à Internet à l'adresse : <https://cloud.institutoptique.fr>

**M** ⇨ Créer un répertoire de travail pour les TP d'ETI dans votre espace personnel (`U : \`)

**M** ⇨ Copier le répertoire `S : \EITI\TP ETI\Theme1` et coller-le dans votre nouveau répertoire de travail.

## 1. Piloter une LED en tout ou rien



Afin de pouvoir piloter l'allumage ou l'extinction d'une LED, nous allons utiliser une **carte de prototypage**, incluant une unité de calculs capable d'interagir avec l'environnement grâce à des broches d'entrées/sorties spécifiques. On appelle ces calculateurs des **microcontrôleurs**. Les cartes **Nucleo** de *STMicroelectronics* que nous allons utiliser par la suite sont conçues au-

tour de microcontrôleur ARM STM32 de la société *STMicroelectronics*.

Pour pouvoir développer une application à l'aide de cette carte de prototypage, il faut utiliser une interface de développement spécifique. Celle-ci se trouve en ligne à l'adresse : <https://os.mbed.com/> puis en cliquant sur **Compiler**.

## 1.1. Prise en main de la carte

**M** ⇨ Connecter la carte `Nucleo` au câble USB.

**M** ⇨ Suivre le tutoriel **Créer un projet sous MBED**<sup>1</sup>.

Vous devriez alors avoir créé votre compte sur le site de MBED et créé un premier projet sur le modèle `Blinky LED test`....

## 1.2. Exemple de test

Nous allons à présent tester le premier programme associé à ce projet. Il s'agit du code suivant :

```
1  #include "mbed.h"
2
3  DigitalOut myled(LED1);
4
5  int main(){
6      while(1){
7          myled = 1;    // LED is ON
8          wait(0.2);    // 200 ms
9          myled = 0;    // LED is OFF
10         wait(1.0);    // 1 s
11     }
12 }
```

**M** ⇨ Suivre le tutoriel **Tester ma première application sur Nucléo**.

**M** ⇨ Téléverser le programme binaire (fichier `.bin`), obtenu après la compilation, sur la carte `Nucleo`.

**Q1** Que se passe-t-il sur la carte ?

**Q2** Que signifie la ligne 3 du programme précédent ?

**M** ⇨ Modifier les valeurs des paramètres des deux fonctions `wait` puis recompiler le code et téléverser-le sur la carte.

**Q3** Que se passe-t-il sur la carte ?

---

1. Disponible en ligne à l'adresse : <http://lense.institutoptique.fr/nucleo/>

### 1.3. Piloter une LED externe en tout ou rien

L'intérêt principal des cartes Nucléo est qu'il est possible de **contrôler et de commander un système** externe par application de signaux générés à l'aide du programme contenu sur la carte.

Pour cela, il faut utiliser les entrées/sorties numérotées sur la carte. Dans l'exemple suivant (voir figure 1.1), nous utiliserons la sortie numéro **D10** de la carte pour pouvoir piloter une LED.

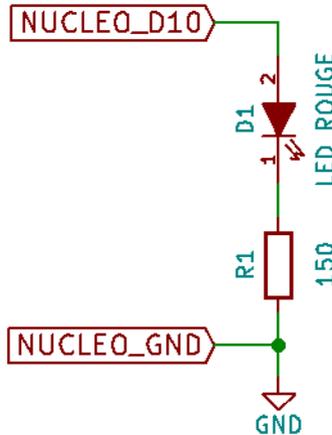


FIGURE 1.1 – Schéma de câblage de la LED. Réalisé avec le logiciel *KiCad* (gratuit et multiplateforme).

**M** ⇨ Brancher la résistance  $R_1 = 150 \Omega$  et une LED rouge à la sortie **D10** de la carte Nucléo comme indiqué dans le schéma précédent (figure 1.1).

**M** ⇨ Modifier le programme pour que la broche 10 de la carte Nucléo soit configurée en sortie<sup>2</sup> et que cette sortie bascule toutes les 100 ms. Compiler le programme et téléverser-le sur la carte.

**M** ⇨ Visualiser la tension sur la broche D10 de la carte à l'aide d'un oscilloscope.

**Q4** Que se passe-t-il si on visualise le signal en mode AC au lieu du mode DC de l'oscilloscope? Quel mode est-il préférable?

2. Vous pourrez vous inspirer du tutoriel **Piloter une LED**, disponible en ligne à l'adresse : <http://lense.institutoptique.fr/nucleo/>

## 1.4. Récupérer une information numérique

Ces cartes de prototypage sont également capables de **récupérer des informations numériques** de l'extérieur. Nous allons voir ici comment câbler un bouton poussoir et connaître son état (appuyé ou relâché) à l'aide d'une carte Nucléo.

Pour cela, on se propose d'étudier le montage suivant :

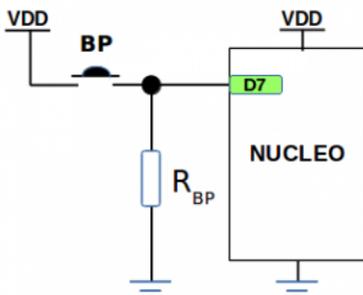


FIGURE 1.2 – Câblage d'un bouton-poussoir sur une carte Nucléo.

**Q5** Quel est le niveau logique obtenu sur l'entrée **D7** lorsque le bouton-poussoir (noté BP) n'est pas enfoncé? Quel est le niveau logique obtenu sur cette même entrée lorsque le bouton-poussoir est enfoncé? Quel est le rôle de la résistance  $R_{BP}$ ?

**M**  $\rightsquigarrow$  Câbler ce montage en utilisant une résistance  $R_{BP} = 10\text{ k}\Omega$ .

**M**  $\rightsquigarrow$  Modifier le projet précédent en ajoutant l'initialisation de la broche **D7** de la carte en entrée numérique<sup>3</sup>. Compiler le programme et téléverser le sur la carte.

**M**  $\rightsquigarrow$  Modifier votre programme pour que la LED branchée sur la sortie **D10** s'allume lorsque le bouton-poussoir est enfoncé, et s'éteint sinon.

**M**  $\rightsquigarrow$  Modifier votre programme pour qu'il allume la LED sur un appui du bouton-poussoir et qu'il l'éteigne lors d'un second appui sur le bouton-poussoir.

3. Vous pourrez vous inspirer du tutoriel **Récupérer une information numérique** disponible en ligne à l'adresse : <http://lense.institutoptique.fr/nucleo/>

## 2. Piloter la luminosité d'une LED

### 2.1. Puissance lumineuse

La puissance lumineuse (en W) fournie par une LED est directement proportionnelle au courant électrique qui la parcourt.

Pour pouvoir **moduler l'intensité lumineuse** d'une LED (utile pour pouvoir transmettre de l'information par la lumière par exemple), il est donc nécessaire de moduler le courant qui la traverse. Pour cela, il existe plusieurs méthodes :

- utiliser une source de tension continue et un potentiomètre, permettant de faire varier le courant traversant la LED ;
- utiliser une source de tension modulée qui permet de moduler le courant.

Nous allons nous intéresser ici à la seconde solution, dans un cas bien particulier : l'application d'un **signal modulé en largeur d'impulsion**.

### 2.2. Moduler la largeur d'une impulsion

On se propose à présent d'étudier le programme suivant :

```

1 #include "mbed.h"
2
3 PwmOut ma_sortie_pwm(D10);
4
5 int main() {
6     double rc = 0;
7     ma_sortie_pwm.period_ms(10);
8     while(1){
9         rc += 0.1;
10        if(rc > 1) rc = 0;
11        ma_sortie_pwm.write(rc);
12        wait_ms(200);
13    }
14 }
```

**M** ↪ Créer un nouveau projet sous MBED (basé sur le modèle Blinky LED test...). Remplacer l'intégralité du code contenu dans le fichier main.cpp par le code précédent. Compiler le programme et téléverser-le sur la carte.

**Q6** Que se passe-t-il sur la LED ?

**M** ↪ Visualiser l'évolution de la différence de potentiel appliquée sur la LED (broche D10 de la carte Nucleo) à l'aide de l'oscilloscope.

**Q7** Quelle est la fréquence du signal de sortie? Voit-on clignoter la LED?

**M**  $\rightsquigarrow$  Modifier le paramètre de la fonction **period\_ms**. Compiler le programme et téléverser-le sur la carte.

**Q8** Quelle est la période minimale à appliquer sur la sortie **D10** pour que la LED se mette à clignoter?

**Q9** Quelle est la **valeur moyenne** du signal  $V_0$  donné à la figure 1.3?

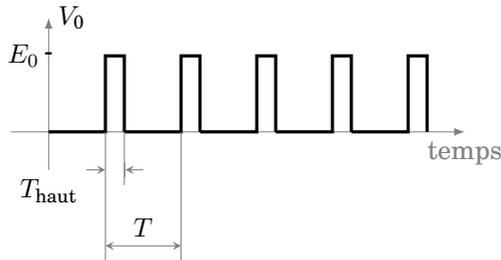


FIGURE 1.3 – Signal rectangulaire

**M**  $\rightsquigarrow$  Visualiser l'évolution du courant traversant la LED (broche D10 de la carte Nucleo) à l'aide de l'oscilloscope.

**Q10** Que peut-on dire de la puissance lumineuse?

#### REMARQUE

Ce type de commande, appelée **modulation de largeur d'impulsions** (MLI ou *Pulsed-Width Modulation* - PWM) est très couramment utilisé pour le contrôle d'applications "lentes" telles que l'éclairage, la commande de moteurs (courant continu ou alternatif)...

### 3. Acquérir une donnée analogique

En plus des **entrées/sorties numériques** (ici numérotées D0 à D15)<sup>4</sup>, les microcontrôleurs présents sur les cartes de prototypage possèdent souvent des **entrées analogiques** (ici numérotées A0 à A5).

Ces entrées analogiques permettent de récupérer **une tension comprise** entre 0 et 3.3 V et de la convertir dans une valeur numérique sur **12 bits** sur ces cartes Nucléo (soit entre 0 et 4095) où 0 V correspond à une valeur convertie de 0 et 3.3 V à une valeur convertie de 4095.

#### 3.1. Cabler un potentiomètre

**M**  $\rightsquigarrow$  Réaliser le câblage d'un potentiomètre mono-tour de 10 k $\Omega$  pour obtenir une tension variable de 0 à  $V_{CC} = 3.3$  V (voir figure 1.4). On pourra utiliser l'alimentation de 3.3 V de la carte Nucléo (entre les broches **3.3V** et **GND**)<sup>5</sup>.

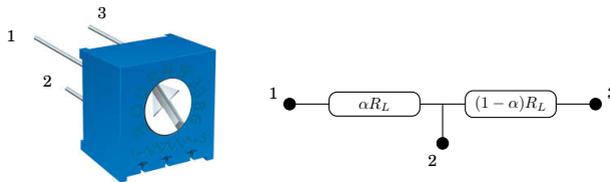
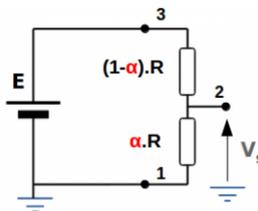


FIGURE 1.4 – Potentiomètre de résistance totale  $R_L$ , tourner la vis permet de régler le coefficient  $\alpha$  entre 0 et 100%

**M**  $\rightsquigarrow$  Vérifier que la tension obtenue est bien comprise entre 0 à 3.3 V à l'aide d'un voltmètre.



**M**  $\rightsquigarrow$  Appliquer cette tension à l'entrée A0 de la carte Nucléo.

4. Connecteurs type Arduino

5. Vous pourrez vous inspirer du tutoriel **Récupérer un signal analogique** disponible en ligne à l'adresse : <http://lense.institutoptique.fr/nucleo/>

### 3.2. Programme de test

On se propose à présent d'étudier le programme suivant :

```
1  #include "mbed.h"
2
3  AnalogIn analog_in(A0);
4  DigitalOut led(LED1);
5  Serial pc(USBTX, USBRX);
6
7  int main()
8  {
9      double meas, tension;
10     while(1) {
11         meas = analog_in.read();
12         pc.printf("Meas_=%lf_\r\n", meas);
13         tension = meas * 3.3;
14         pc.printf("Tension_=%lf_V_\r\n", tension);
15
16         if (tension > 0.5) {
17             led = 1;
18         } else {
19             led = 0;
20         }
21
22         wait(0.5);
23     }
24 }
```

**M** ↪ Créer un nouveau projet sous MBED (basé sur le modèle Blinky LED test...). Remplacer l'intégralité du code contenu dans le fichier main.cpp par le code précédent. Compiler le programme et téléverser-le sur la carte.

**Q11** Que se passe-t-il pour la LED présente sur la carte `Nucleo` lorsque vous modifier la tension de sortie du potentiomètre ?

### 3.3. Déboguer son programme

Pour pouvoir plus facilement visualiser ce qu'il se passe sur la carte, et en particulier connaître plus précisément la valeur de l'entrée analogique, nous allons utiliser un logiciel permettant d'afficher les informations envoyées par la carte (via les instructions **printf**) à travers le câble USB<sup>6</sup>.



Le logiciel que nous allons utiliser pour cela s'appelle **TeraTerm**.

Il faut tout d'abord le configurer pour qu'il affiche les bonnes informations. Après avoir lancé le logiciel, la fenêtre "*TeraTerm : New connection*" s'ouvre. Sélectionnez le mode "*Serial*" et le port correspondant à la carte Nucléo (COMxx : STLink...). Si cette fenêtre ne s'ouvre pas, vous pouvez aussi aller dans le menu *File / New connection...*

La console apparaît alors. Des messages doivent alors apparaître.

**Q12** Qu'est-ce que ce programme affiche? A quoi sert la ligne 13 du programme?

**Q13** Quel **instrument de mesure** est ainsi réalisé? Quelles sont ses limites (précision de la mesure, gamme de tension, gamme de fréquence)?

### 3.4. Moduler la luminosité de la LED avec un potentiomètre

On se propose ici d'utiliser le principe précédent pour pouvoir faire **varier la luminosité d'une LED** en fonction de la position d'un potentiomètre.

**M** ↔ Réaliser un programme qui permet de récupérer une information sur le potentiomètre branché sur l'entrée analogique A0 et de l'utiliser pour faire varier le rapport cyclique du signal de sortie sur la broche D10.

---

6. Vous pourrez vous inspirer du tutoriel **Utiliser l'affichage Série** disponible en ligne à l'adresse : <http://lense.institutoptique.fr/nucleo/>

## 4. Piloter la luminosité d'une LED à distance

Afin de pouvoir contrôler à distance l'augmentation et la diminution de la luminosité des LEDs, nous allons utiliser une **télécommande de télévision** et un **capteur infrarouge TSOP2238**. L'information est transportée par la lumière dans la bande infrarouge.



**Attention :** Ne pas relier la broche DATA du capteur à la carte Nucléo avant d'avoir compilé et téléversé une première fois le programme de démonstration.

### 4.1. Capteur numérique infrarouge

**M** ⇨ Alimenter le composant à l'aide de l'alimentation présente sur la carte Nucléo (entre **3.3V** et **GND**).



**M** ⇨ Visualiser la tension de la broche DATA du composant à l'aide de l'oscilloscope.

**Q14** Quelle est la valeur de la tension de la broche DATA lors de la mise sous tension du circuit? Comment évolue-t-elle lorsque vous utilisez une télécommande infrarouge à proximité du capteur?

**M** ⇨ Capturer l'information complète du signal transmis lors de l'appui sur une touche à l'aide de l'oscilloscope. Pour cela on règle le mode de déclenchement de l'acquisition. Enregistrer l'image correspondante.

### 4.2. Utiliser une bibliothèque de fonctions pour Nucléo

L'information que vous avez visualisée précédemment s'appelle une **trame de données**. Celle-ci est issue d'un **protocole de communication**, appelé RC5, spécifique aux télécommandes de téléviseur.

Il existe une multitude de protocoles de communication différents afin de garantir la transmission d'informations numériques d'un émetteur à un récepteur. La plupart de ces protocoles étant normalisés, il existe des **bibliothèques** déjà écrites pour un grand nombre d'entre eux (disponibles gratuitement sur Internet pour la plupart).

Nous allons voir ici comment importer la **bibliothèque** permettant de décoder les trames RC5 dans un projet MBED et comment l'utiliser. Cette bibliothèque s'appelle **RemoteIR** et elle est disponible dans le répertoire `S:\EITI\TP ETI\Theme1` de l'ordinateur (fichier archivé - zip - à ne pas décompresser).

**M** ⇨ Créer un nouveau projet sous MBED (basé sur le modèle Blinky LED test...).

**M** ⇨ Cliquer sur le bouton **Import** de l'interface de développement de MBED. Une fenêtre s'affiche alors permettant d'aller chercher des bibliothèques de fonctions.

**M** ⇨ Cliquer sur l'onglet **Upload**. Cliquer tout en bas sur **Choisir un fichier**. Dans la fenêtre qui s'ouvre sélectionner le fichier `RemoteIR.zip` du répertoire `S:\EITI\TP ETI\Theme1`.

**M** ⇨ Cliquer sur **Import!** (à gauche de l'interface). Dans la nouvelle fenêtre qui s'ouvre, sélectionner **Libraries** dans l'option `Import as`. Cliquer ensuite sur **Import**.

### 4.3. Programme de test du capteur

On se propose d'étudier le code suivant :

```

1  #include "mbed.h"
2  #include "ReceiverIR.h"
3
4  Serial pc(USBTX, USBRX);
5
6  /* IR Telecommande */
7  ReceiverIR ir_rx(D11);
8
9  /* Main Program */
10 int main(){
11     /* Remote IR */
12     RemoteIR::Format format;
13     uint8_t buf[32];
14
15     while(1){
16         if (ir_rx.getState() == ReceiverIR::Received) {
17             ir_rx.getData(&format,
18                 buf, sizeof(buf) * 8);
19             pc.printf("%d_\r\n", buf[3]);
20         }
21     }
22 }
```

**M** ⇨ Remplacer l'intégralité du code contenu dans le fichier `main.cpp` de votre projet et remplacer le par le code précédent. Compiler le programme et téléverser-le sur la carte.

**M** ↪ Connecter la sortie du capteur TSOP2238 à l'entrée numérique D11 de la carte Nucléo.

**M** ↪ Lancer le logiciel **TeraTerm**. Observer l'affichage obtenu lors de l'appui sur **différentes touches** d'une télécommande.

**Q15** Noter les valeurs transmises pour quelques touches. Vous en aurez besoin pour la prochaine étape.

#### 4.4. Commander à distance la luminosité d'une LED

On souhaite à présent pouvoir remplacer le potentiomètre utilisé dans l'application précédente par les boutons + et - de la télécommande pour pouvoir modifier la luminosité d'une LED à distance.

Il est possible de tester la valeur d'une variable en langage C et d'exécuter différentes actions en fonction de cette valeur à l'aide de la **structure de contrôle** *if ... else*.

L'exemple suivant (figure 1.5) permet de tester si une variable **a** est supérieure ou égale à la valeur 2. Si c'est le cas, alors l'action 1 est réalisée, sinon c'est l'action 2 qui est réalisée.

```
if (a >= 2){  
    action1() ;  
}  
else {  
    action2() ;  
}
```

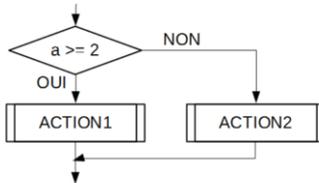


FIGURE 1.5 – Exemple d'utilisation de la structure de contrôle *if*

**M** ↪ Réaliser un programme qui, à partir de deux touches de la télécommande, permet d'augmenter et de diminuer l'intensité de la LED connectée sur la broche D10 de la carte.

**M** ↪ Compiler le programme et le téléverser sur la carte.



## Des photons dans tous les sens

Durant cette séance, vous serez amenés à mettre en œuvre un **système d'émission et de réception d'informations lumineuses** (visibles puis infrarouges).

A travers ce TP, vous apprendrez à utiliser les appareils de base de l'électronique afin de pouvoir caractériser un composant, dans le domaine continu puis dans le domaine fréquentiel, et pouvoir retrouver les informations données dans les documentations techniques des fabricants.

Les différents modes d'affichage de l'oscilloscope ainsi que l'enregistrement d'une image sur le PC et le fonctionnement du Générateur Basse Fréquence (GBF) sont expliqués dans le document annexe *Description du matériel de laboratoire*.

### Après cette séance, vous saurez...

- Câbler un circuit et son alimentation
- Mesurer des tensions et courants continus (efficaces et moyens) à l'aide d'un multimètre
- Donner les incertitudes sur vos mesures
- Appliquer un signal à l'aide d'un GBF
- Mesurer un signal à l'aide d'un oscilloscope

## Sommaire

<b>1</b>	<b>Les LED dans tous leurs états...</b>	<b>18</b>
1.1	Documentation technique	18
1.2	Caractéristique statique 'manuelle' d'une LED	19
1.3	Caractéristique statique 'automatique' d'une LED	21
<b>2</b>	<b>Et dans l'infrarouge, ça se passe comment?</b>	<b>22</b>
<b>3</b>	<b>Puissance consommée</b>	<b>23</b>
3.1	Avec l'oscilloscope	24
3.2	Avec une carte Nucléo	25

## 1. Les LED dans tous leurs états...

Dans cette section, nous nous intéresserons aux **diodes électroluminescentes (LED) visibles** et à leurs caractéristiques principales (tension maximale admissible, courant maximal admissible, émissivité...).

On rappelle l'allure de la caractéristique statique d'une LED et les notations utilisées.

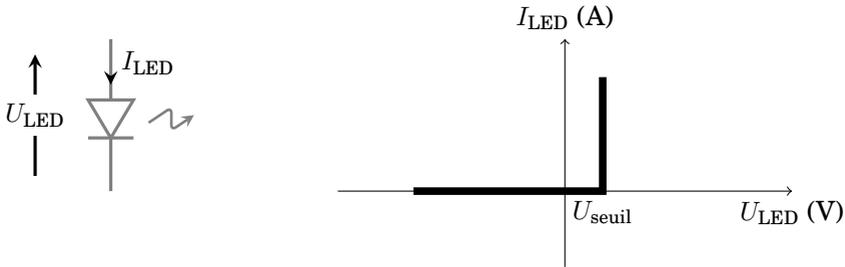


FIGURE 2.1 – Caractéristique électrique de la LED

### 1.1. Documentation technique

Afin de pouvoir utiliser ces dipôles, non linéaires et polarisés, dans de **bonnes conditions expérimentales**, il est important de se référer à la **documentation technique** du composant étudié.

**P1** Donner la traduction française et expliquer les termes suivants. Donner également leur valeur pour la diode étudiée.

- *Power dissipation*
- *Reverse Voltage / Forward Voltage*
- *DC Forward Current*
- *Luminous Intensity*
- *Viewing Angle*

**Absolute Maximum Ratings at Ta=25°C**

Parameter	Symbol	Rating	Unit
Power Dissipation	Pd	66	mW
Reverse Voltage	Vr	4	V
D.C. Forward Current	If	30	mA
Reverse (Leakage) Current	Ir	100	µA
Peak Current (1 / 10 Duty Cycle, 0.1ms Pulse Width)	If (Peak)	100	mA
Operating Temperature Range	Topr	-25 to + 85	°C
Storage Temperature Range	Tstg	-40 to +100	°C
Soldering Temperature (1.6mm from body)	Tsol	Dip Soldering: 260°C for 5sec. Hand Soldering: 350°C for 3sec.	

**Electrical & Optical Characteristics:**

Parameter	Symbol	Condition	Min.	Typ.	Max.	Unit
Luminous Intensity	Iv	If = 20mA	200	400		mcd
Forward Voltage	Vf	If = 20mA		1.8	2.2	V
Peak Wavelength	λp	If = 20mA		660		nm
Dominant Wavelength	λd	If = 20mA		643		nm
Reverse (Leakage) Current	Ir	Vr = 5V			100	µA
Viewing Angle	2 θ ½	If = 20mA		15		deg
Spectrum Line Halfwidth	Δλ	If = 20mA		20		nm

FIGURE 2.2 – Documentation technique d’une LED Rouge - Multicomp

## 1.2. Caractéristique statique ‘manuelle’ d’une LED

On se propose d’utiliser le montage de la figure 2.3 afin de tracer la caractéristique statique de la LED.

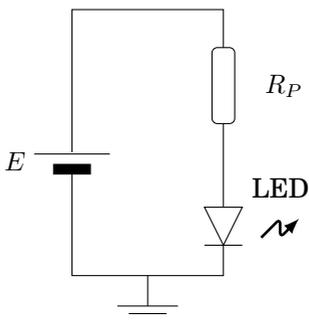


FIGURE 2.3 – Schéma du circuit de câblage d’une LED

**P2** Quelle est la tension minimale  $E$  à appliquer sur ce montage pour que la LED s’allume? Quel sera alors le sens du courant? Donner l’expression du courant circulant dans la LED. Quel est le rôle de  $R_P$ ?

**P3** Calculer  $R_P$  pour avoir  $I_{LED} = 20 \text{ mA}$  dans la LED pour une tension  $E = 5 \text{ V}$ .

**REMARQUE**

Il faudra attacher le plus grand soin possible à la **qualité** et à la **clarté** de vos câblages. Pour bien débuter, on utilisera impérativement ici une ligne horizontale pour la masse du montage et une autre pour la tension  $E$ . De plus la couleur des fils est fixée par convention :

rouge	$E$
noir	masse

**M**  $\rightsquigarrow$  Reproduire le schéma précédent sous KiCAD<sup>1</sup>.

**M**  $\rightsquigarrow$  Réaliser le câblage précédent sur votre platine d'essai et appliquer une tension continue  $E = 5 \text{ V}$ .

**M**  $\rightsquigarrow$  Modifier le circuit précédent selon le schéma de la figure 2.4 afin de mesurer à la fois le courant traversant le diode et la tension à ses bornes.

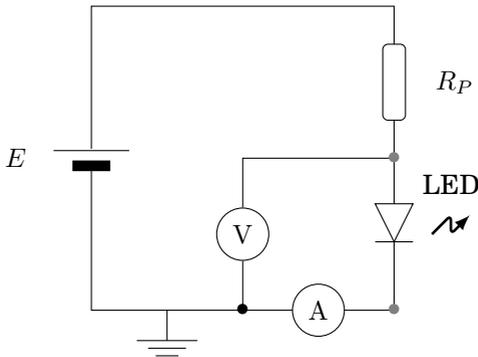


FIGURE 2.4 – Multimètre - Mesure de la tension et du courant

Le multimètre permet d'afficher **simultanément** la tension et le courant continu en utilisant la touche 2ND, puis A=.

1. Voir le tutoriel **Réaliser un schéma sous KiCAD** disponible à l'adresse [http://lense.institutoptique.fr/tp\\_eti/](http://lense.institutoptique.fr/tp_eti/)

On donne une partie de la documentation technique du multimètre utilisé.

### Précision du multimètre

---

Un extrait de la documentation du multimètre Fluke 45 :

Gammes de tension continue	Précision
100 mV - 1000 V	$\pm (0.025\% + 2 \text{ digits})$
Gammes de courant continu	Précision
100 $\mu$ A - 10 A	$\pm (0.05\% + 2 \text{ digits})$

Un extrait de la documentation du multimètre Fluke 8845 :

Gammes de tension continue	Précision
100 mV - 1000 V	$\pm (0.0035\% + 5 \text{ digits})$
Gammes de courant continu	Précision
100 $\mu$ A - 10 A	$\pm (0.05\% + 5 \text{ digits})$

---

**Q1** Donner un ordre de grandeur de l'incertitude de mesure faite avec cet appareil.

**M**  $\rightsquigarrow$  Relever la caractéristique statique  $I_{\text{LED}} = f(U_{\text{LED}})$  de la LED.

**Q2** Dans quelle zone de la caractéristique la LED s'allume-t-elle? Quelle est la valeur du seuil de conduction? Est-ce comparable à la valeur donnée dans la documentation du constructeur?

### 1.3. Caractéristique statique 'automatique' d'une LED

On se propose à présent d'utiliser le montage de la figure 2.5 afin de tracer la caractéristique statique de la LED de manière "automatique".

**M**  $\rightsquigarrow$  Régler le générateur de fonction (ou générateur basses fréquences : GBF) de telle façon à visualiser sur l'oscilloscope un signal sinusoïdal de fréquence 5 Hz, d'amplitude crête à crête 4 V et de valeur moyenne nulle.

**Q3** Dans quel mode (AC ou DC) vaut-il mieux visualiser ce signal?

**M**  $\rightsquigarrow$  Réaliser le câblage du circuit de la figure 2.5 avec  $R_I = 10 \Omega$ .

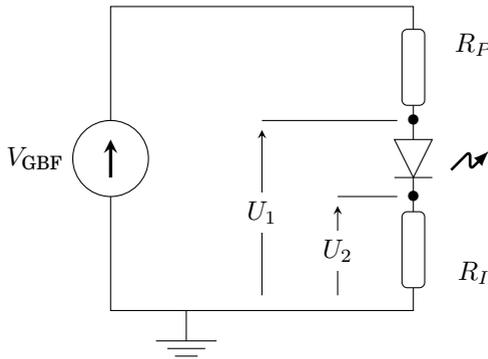


FIGURE 2.5 – Circuit de mesure de la caractéristique d’une diode à l’oscilloscope

**M**  $\rightsquigarrow$  Visualiser les tensions  $U_1$  et  $U_2$  à l’aide de l’oscilloscope. Enregistrer une image sur le PC.

**Affichage en mode XY de l’oscilloscope**

- Utiliser le bouton `Display`
- puis `Page 2/2`, enfin `Format` pour passer de YT à XY

**M**  $\rightsquigarrow$  Visualiser à présent ces mêmes tensions en mode XY. Enregistrer une image sur le PC.

**Q4** Que trace alors l’oscilloscope? Que se passe-t-il si on augmente la fréquence du signal du GBF à 50 Hz? A 10 kHz?

**Q5** Pourquoi prendre une résistance  $R_I$  aussi faible?

**2. Et dans l’infrarouge, ça se passe comment?**

Dans cette section, on s’intéresse à présent à une diode électroluminescente infrarouge (IR) de type TSAL6100 fabriquée par la société Vishay.

**Q6** Donner les caractéristiques principales de cette diode à partir de sa documentation technique (à chercher sur Internet) pour pouvoir réaliser le même montage que dans la figure 2.3 en remplaçant la LED rouge

par la LED IR. Calculer en particulier la valeur de  $R_{LED}$  pour avoir  $I = 0,8 \cdot I_{max}$  dans la LED pour une tension  $E = 5\text{ V}$ .

**M**  $\rightsquigarrow$  Visualiser l'émission de la LED dans le proche infrarouge à l'aide des webcams (ou d'un téléphone portable), dont le capteur CCD est sensible jusqu'à des longueurs d'ondes de 1000 nm environ.

**M**  $\rightsquigarrow$  Relever la caractéristique statique de cette LED à l'aide de l'oscilloscope (en mode XY), en appliquant un signal sinusoïdal de fréquence 10 Hz, d'amplitude crête à crête 5 V et de valeur moyenne nulle à l'aide du GBF. Enregistrer une image sur le PC.

**Q7** Quelle(s) est(sont) la (ou les) différence(s) par rapport à la caractéristique statique de la LED Rouge ?

### 3. Puissance consommée

À l'aide d'une carte Nucléo, on souhaite connaître la **consommation électrique** d'un émetteur à LED (ici une LED rouge standard) embarqué sur un robot.

On propose le schéma suivant :

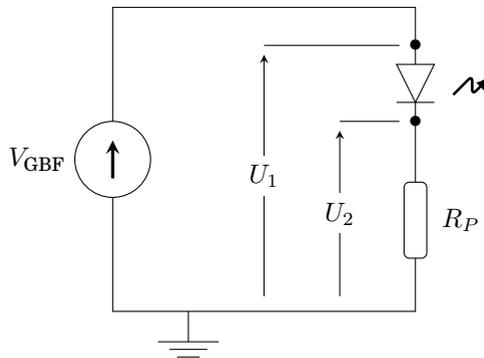


FIGURE 2.6 – Mesure de puissance consommée

**Q8** Comment obtient-on la mesure du courant ? Comment déterminer la puissance consommée par l'ensemble (LED+ résistance de protection) ? L'énergie consommée ?

Le signal  $V_{GBF}$  sera dans un premier temps un signal carré de fréquence 500 Hz, de valeur moyenne égale à 3 V et de valeur crête à crête de 1 V.

**Q9** Dans ces conditions, dans quelle zone de la caractéristique de la LED se trouve-t-on? Que peut-on dire de l'évolution du flux lumineux émis par la LED?

### 3.1. Avec l'oscilloscope

Dans un premier temps, nous utiliserons l'oscilloscope pour mesurer l'image du courant traversant la LED et la tension aux bornes de l'ensemble LED+ résistance.

La tension  $U_1$  pouvant dépasser la tension maximale admissible par la carte Nucléo (prochaine étape), on souhaite accéder à la mesure de la tension  $U_1$  en passant par un pont diviseur de tension par 2.

On propose le montage de la figure 2.7 .

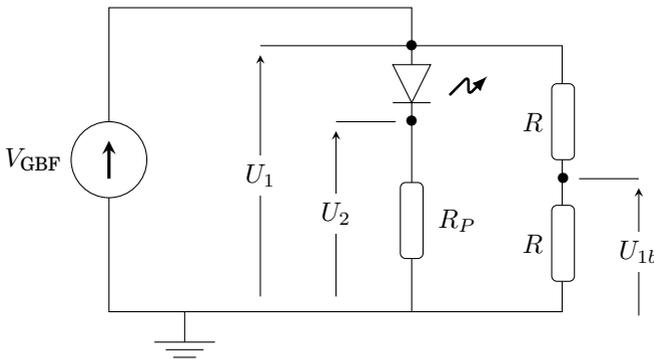


FIGURE 2.7 – Mesure de puissance consommée

On veut déterminer une valeur convenable pour la résistance  $R$ . On se propose de tester ce montage avec 3 valeurs distinctes pour  $R$ .

**M**  $\rightsquigarrow$  Relever les valeurs des tensions  $U_1$  et  $U_{1b}$  pour des valeurs de résistance :

1.  $R = 10 \Omega$
2.  $R = 10 \text{ k}\Omega$
3.  $R = 1 \text{ M}\Omega$

**Q10** Présenter l'ensemble des résultats sous forme de tableau.

**Q11** Quelle solution doit être privilégiée?

**Q12** Quelle est la valeur de l'impédance d'entrée de l'oscilloscope? Celle de l'impédance de sortie du GBF?

**Q13** Expliquer les différents résultats obtenus pour les trois solutions proposées.

### 3.2. Avec une carte Nucléo

On souhaite mesurer l'énergie consommée par cet ensemble LED+résistance à l'aide d'une carte Nucléo.

**M**  $\rightsquigarrow$  Remplacer le générateur de fonction par une alimentation continue de 4 V.

**M**  $\rightsquigarrow$  Écrire un programme qui permette de récupérer deux valeurs analogiques (image du courant sur l'entrée A0 et image de la tension sur l'entrée A1 par exemple) et qui affiche sur le moniteur série les deux valeurs mesurées toutes les 500 ms<sup>2</sup>.

**M**  $\rightsquigarrow$  Compiler le programme et le téléverser sur la carte Nucléo.

**M**  $\rightsquigarrow$  Réaliser des mesures afin de déterminer la résistance d'entrée de la carte Nucléo et choisir les valeurs des résistances  $R$ .

**M**  $\rightsquigarrow$  Modifier le programme précédent afin qu'il affiche sur le moniteur série également la puissance consommée toutes les 500 ms. Compiler le programme et le téléverser sur la carte Nucléo.

**M**  $\rightsquigarrow$  Compléter le programme précédent pour qu'il affiche sur le moniteur série l'énergie consommée.

---

2. Vous pourrez vous inspirer des tutoriels **Récupérer un signal analogique** et **Déboguer son programme et utiliser l'affichage série**, disponibles en ligne à l'adresse : <http://lense.institutoptique.fr/nucleo/>



## TP ETI - 1AS5- Thème 2

---

# Photodétection

---

Ce thème se décompose en 2 séances durant lesquelles vous étudierez un des **capteurs optiques** les plus répandus, la **photodiode**, et les **circuits électroniques de mise en forme** du signal associés.

### Objectifs

---

- Mettre en oeuvre des composants de l'optronique (LED, Photodiode)
  - Concevoir des circuits d'émission et de réception
- Connaître les outils à disposition de l'électronicien/opticien (suite) pour :
  - Caractériser un système en fréquence (GBF / oscilloscope - comportement fréquentiel)

### Préparation

---

Les deux TP de ce thème possède des questions notées **Px** à préparer avant chacune des séances.

### Rendu

---

Un travail de synthèse des deux séances de TP, associé à une carte conceptuelle, dont le sujet vous sera divulgué lors de la deuxième séance.



## Diodes et photodiodes

Durant cette séance, vous analyserez la caractéristique d'une photodiode usuelle et l'influence du flux reçu.

Cette étude permettra de comprendre la nécessité de polariser en inverse la photodiode pour l'utiliser dans le montage de base de photodétection dont vous caractériserez la sensibilité et la bande passante.

### Après cette séance, vous saurez...

- Caractériser un capteur optique :
  - Caractéristique statique
  - Modèle *petits signaux* d'une photodiode
- Caractériser un système de photodétection :
  - Sensibilité
  - Bande passante

## Sommaire

<b>1</b>	<b>Préparation</b> . . . . .	<b>30</b>
1.1	Photodiode SFH206K . . . . .	30
1.2	LED TSAL6100 . . . . .	30
<b>2</b>	<b>Caractéristique statique de la photodiode</b> . . . . .	<b>30</b>
<b>3</b>	<b>Circuit de photodétection</b> . . . . .	<b>31</b>
3.1	Analyse de la sensibilité du circuit de photodétection . . . . .	32
3.2	Bande-passante du circuit de photodétection . . . . .	33
3.3	Modélisation du circuit de photodétection . . . . .	36
3.4	Câbles coaxiaux et capacités parasites . . . . .	36

# 1. Préparation

## 1.1. Photodiode SFH206K

**P1** Rechercher et relever dans la documentation technique du constructeur (*datasheet*) de la photodiode SFH206K les éléments suivants :

- $\lambda_{S_{\max}}$  : la longueur d'onde correspondant à la sensibilité maximale et la valeur de cette sensibilité spectrale maximale en A / W.
- $\eta$  : le rendement quantique pour cette longueur d'onde

**P2** Rechercher les définitions de la sensibilité spectrale et du rendement quantique d'une photodiode.

**P3** Relever dans la documentation les valeurs :

- $V_R$  de la tension inverse maximale
- $P_{\text{tot}}$  de la puissance maximale
- $V_F$  de la tension directe pour un courant de 100 mA (pour un flux reçu nul).

**P4** En déduire l'ordre de grandeur du courant direct maximum admissible.

**P5** Chercher les définitions (et leur traduction en anglais) ainsi que les unités des grandeurs suivantes, caractérisant une source directive :

- flux lumineux total émis,
- intensité lumineuse sur l'axe,
- angle d'émission à mi-hauteur.

## 1.2. LED TSAL6100

**P6** Relever dans la documentation de la LED TSAL6100 les valeurs :

- $V_R$  de la tension inverse maximale
- $I_{\max}$  du courant direct maximal
- $\lambda_p$  de la longueur d'onde d'émission et la largeur spectrale
- $F_e$  du flux lumineux total émis pour un courant de 100 mA
- $I_e$  de l'intensité sur l'axe
- $\phi_e$  de l'angle d'émission à mi-hauteur

Vérifier que ces trois dernières valeurs sont cohérentes entre elles.

**P7** La photodiode SFH206K sera-t-elle sensible à la longueur d'onde d'émission de la LED choisie? Quel est l'ordre de grandeur de la bande passante de la LED?

## 2. Caractéristique statique de la photodiode

On souhaite tracer la caractéristique statique ( $I_{\text{PhD}} = f(U_{\text{PhD}})$ ) de la photodiode SFH206K sur l'écran de l'oscilloscope, on propose le circuit de la figure 1.1.

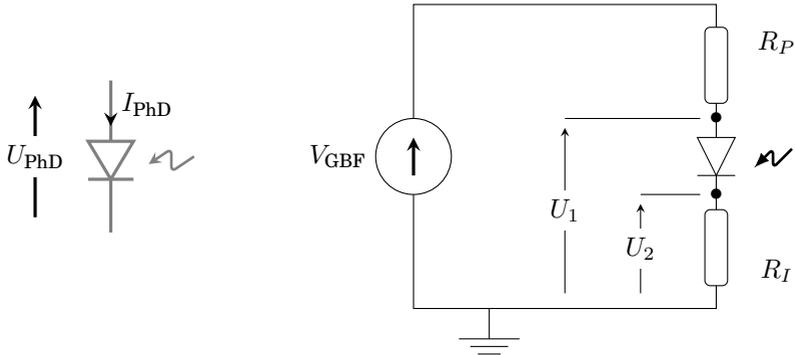


FIGURE 1.1 – Définition des grandeurs  $I_{\text{PhD}}$  et  $U_{\text{PhD}}$  et circuit de mesure de la caractéristique d'une photodiode

**Q1** Calculer  $R_P$  pour avoir  $I = 0,8 \times I_{\text{max}}$  dans la photodiode pour une tension maximale du GBF de 5 V

**M**  $\rightsquigarrow$  Relever la caractéristique statique de cette photodiode à l'aide de l'oscilloscope (en mode XY), en appliquant un signal sinusoïdal de fréquence 5 Hz, d'amplitude 4 V et de valeur moyenne nulle à l'aide du GBF. Enregistrer une image sur le PC.

**M**  $\rightsquigarrow$  Modifier l'éclairement reçu par la photodiode à l'aide de la lampe de bureau et observer la modification des caractéristiques statiques obtenues (on pourra utiliser la persistance de l'affichage de l'oscilloscope). Enregistrer une image sur le PC.

**Q2** Comment est modifiée la caractéristique de la photodiode en fonction du flux reçu? Identifier sur la caractéristique la région utile pour l'utilisation de la photodiode comme photodétecteur.

## 3. Circuit de photodétection

La **photodiode** fournit un courant inverse proportionnel au flux lumineux qu'elle reçoit. Il n'est pas facile de mesurer directement un courant. Aussi, nous allons utiliser un système de conversion de ce courant vers une tension, plus simple à mesurer avec les outils à notre disposition.

On propose alors le circuit de la figure 1.2.

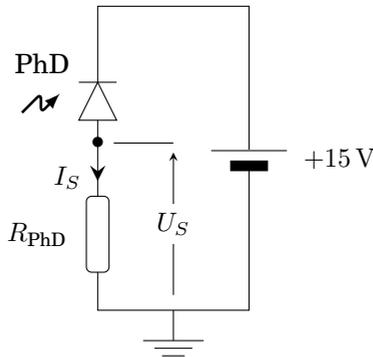


FIGURE 1.2 – Utilisation d'une photodiode comme capteur de flux lumineux.

On prendra  $R_{\text{PhD}} = 100 \text{ k}\Omega$  dans un premier temps.

**M**  $\rightsquigarrow$  Visualiser la tension  $U_S$  à l'aide de l'oscilloscope.

**Q3** Que se passe-t-il lorsqu'on cache le détecteur? Lorsqu'on approche la lampe de bureau? Quelles sont les valeurs limites du signal? Et si on utilise une résistance  $R_{\text{PhD}} = 10 \text{ k}\Omega$ ?

### 3.1. Analyse de la sensibilité du circuit de photodétection

La **sensibilité d'un capteur** (et de son circuit de mise en forme associé) lie la valeur récupérée en sortie à la grandeur mesurée en entrée.

La photodiode est un détecteur quantique, c'est à dire qu'en moyenne sur 100 photons reçus,  $\eta$  électrons sont produits,  $\eta$  définit le rendement quantique.

**Q4** Donner l'expression du courant de détection en fonction du nombre de photons reçus par seconde. Quelle est l'énergie d'un photon? Exprimer le courant de détection en fonction de la puissance optique reçue  $\Phi$  (en W).

**Q5** En déduire que la sensibilité de la photodiode s'exprime en A/W selon :

$$S = \eta \cdot \frac{q}{hc} \cdot \lambda$$

où  $h$  est la constante de Planck ( $h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$ ) et  $q = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$  est la charge élémentaire de l'électron.

**Q6** Si le rendement quantique ne dépend pas de la longueur d'onde, la photodiode est-elle plus sensible au signal optique rouge ou vert ?

**Q7** D'après la documentation constructeur quelle est la sensibilité en A/W de la photodiode à 900 nm ? Quelle est alors la sensibilité de ce système de détection en V/W ?

### 3.2. Bande-passante du circuit de photodétection

La rapidité d'un capteur (ici l'ensemble du circuit de photodétection) est définie par son **temps de réponse** et par sa **bande passante**. Pour mesurer la bande passante d'un système de photodétection, on propose le schéma de la figure 1.3.

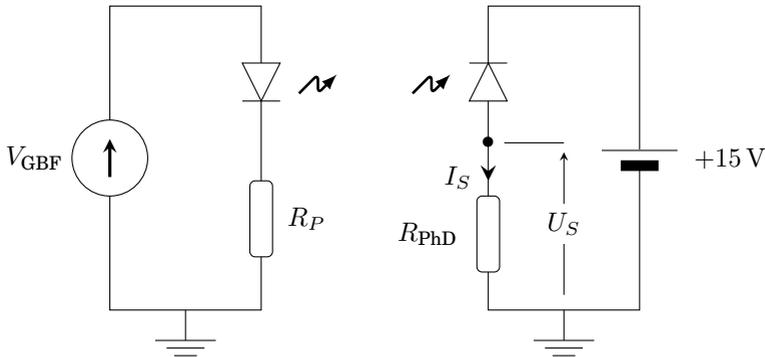


FIGURE 1.3 – Transmission optique LED /Photodiode IR

On cherche ici à mesurer les performances du circuit de détection. Il ne faut donc pas être limité par le circuit d'émission. Dans notre cas, la bande passante de la LED est de l'ordre du MHz. Nous allons donc voir que le détecteur a une bande passante plus faible.

**Q8** Calculer la valeur de la résistance  $R_P$  qui permet de limiter le courant dans la LED TSAL6100 à 80% de son courant maximal, pour une tension appliquée par le GBF de l'ordre de 10 V et réaliser le circuit de la figure 1.3 .

**M**  $\rightsquigarrow$  Appliquer un signal  $V_{GBF}$  sinusoïdal, de fréquence 1 kHz, d'amplitude crête à crête de 1 V et de valeur moyenne de 3 V.

**M**  $\rightsquigarrow$  Orienter les deux diodes face à face pour optimiser le flux reçu par la photodiode.

**M**  $\rightsquigarrow$  Visualiser simultanément la tension délivrée par le GBF,  $V_{\text{GBF}}$ , et la tension  $U_S$  de sortie du montage détecteur à l'oscilloscope.

**Q9** Proposer une méthode pour évaluer la réponse en fréquence de ce détecteur.

**Q10** Quelle est la bande-passante théorique de ce système de photodétection ?

**M**  $\rightsquigarrow$  Relever le **diagramme de Bode** en amplitude et en phase de ce système. Mesurer sa bande passante à  $-3\text{dB}$ .

**Q11** Le circuit de détection est-il un filtre passe-haut, passe-bas, passe-bande ?

On souhaite à présent vérifier que la bande passante est constante quelque soit la sensibilité du détecteur. Pour cela, on se propose de réaliser le même type de mesure que précédemment avec 3 valeurs différentes de résistances :

- $R_{\text{PhD}} = 10 \text{ k}\Omega$
- $R_{\text{PhD}} = 100 \text{ k}\Omega$  (mesures précédentes)
- $R_{\text{PhD}} = 10 \text{ M}\Omega$

**M**  $\rightsquigarrow$  Effectuer les mêmes mesures que précédemment (tension crête à crête et bande passante) pour ces 3 valeurs de résistance.

**Q12** Conclure sur le lien entre la bande passante et la sensibilité pour ce détecteur.

Il existe également une méthode automatique pour obtenir l'allure de la réponse en fréquence du système. On peut utiliser le balayage en fréquence du GBF.

### Balayage en fréquence du signal du GBF

Utiliser le menu  du GBF et régler :

1.  ici aux environs de 100 Hz
2.  à 100 kHz
3.  pour une variation logarithmique entre ces deux valeurs
4.  ici à 0,1 s
5. Pour synchroniser l'oscilloscope, utilisez la sortie `Sync`, qui fournit un signal rectangulaire de même période que le balayage, connectée à l'entrée `EXT`.

**M** ~ Visualiser simultanément la tension délivrée par le GBF et la tension de sortie du montage détecteur à l'oscilloscope, pour l'une des valeurs de résistances précédentes.

**Q13** Retrouve-t-on bien le comportement attendu? Est-il possible avec cette méthode de déterminer la bande passante de ce système?

### 3.3. Modélisation du circuit de photodétection

La plupart des systèmes peuvent être décomposés en deux modèles distincts : le **modèle pour les signaux continus** et le **modèle "petits signaux"**, pour l'étude en fréquence. Ces deux comportements se superposent et peuvent être traités séparément.

Ainsi, les photodiodes utilisées dans le détecteur peuvent être modélisées par une source de courant en parallèle avec une capacité parasite,  $C_p$ . Ce modèle électrique équivalent est décrit sur la figure 1.4.

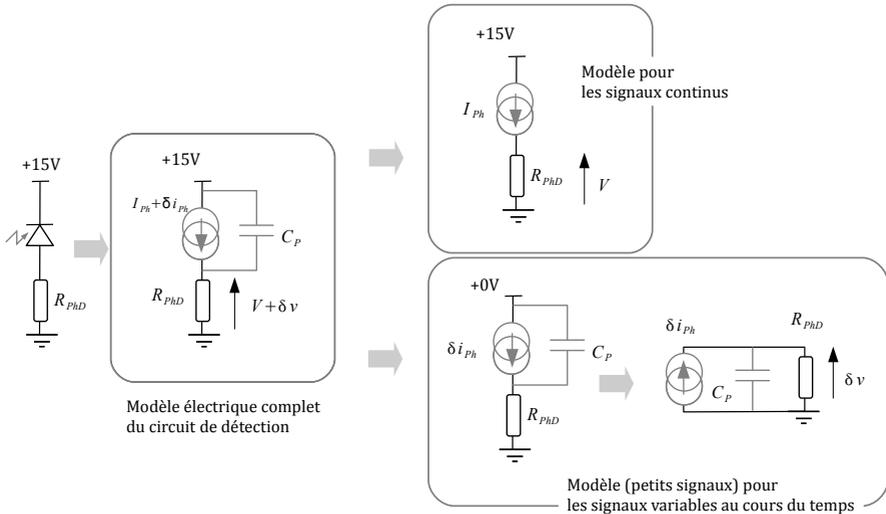


FIGURE 1.4 – Modèles électriques du circuit de détection

**Q14** A l'aide du modèle petits signaux expliquer les mesures. Comment varie la bande passante du montage avec la résistance de charge ?

**Q15** Les mesures de bande passante précédentes sont-elles cohérentes avec ce modèle ?

### 3.4. Câbles coaxiaux et capacités parasites

Les câbles coaxiaux utilisés en TP ont une capacité linéique de 110 pF / m. Cette capacité du câble apparaît en parallèle de la capacité parasite de la photodiode dans le modèle petits signaux précédent.

**Q16** Déduire de vos mesures la valeur de la capacité parasite,  $C_p$ , de la photodiode. Comparer à la valeur de la capacité de la photodiode donnée

dans la documentation.

Un moyen radical de s'affranchir de la capacité linéique des câbles pour obtenir des bandes passantes importantes est de réaliser le montage de la figure 1.5. Dans cette configuration, et sous la condition que la résistance de charge soit adaptée à la résistance caractéristique du câble, la capacité linéique du câble n'intervient plus dans la limitation de la bande passante. La plupart des oscilloscopes rapides (de bande passante supérieure à  $100\text{ MHz}$ ) possède ce type d'entrée dites  $50\ \Omega$ . Vous utiliserez donc ce montage très simple, diode polarisée en inverse et résistance de charge  $50\ \Omega$ , dans un très grand nombre de TP d'optique de 2ème et 3ème année (téléométrie, laser pulsés,...).

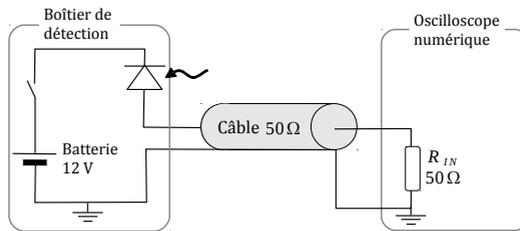


FIGURE 1.5 – Montage d'adaptation  $50\ \Omega$ . (Non utilisé dans ce TP)



## Circuits de photodétection

Au cours de cette seconde séance de TP sur les systèmes de photodétection, on s'intéresse aux **circuits électroniques de pré-amplification** associés aux photodiodes.

Ces circuits ont pour but de **convertir le courant** inverse délivré par une photodiode en une tension suffisamment grande pour être mesurée convenablement. L'objectif principal est d'augmenter la bande passante du capteur réalisé au cours du TP précédent, tout en conservant une sensibilité suffisante.

### Après cette séance, vous saurez...

- Réaliser et caractériser un système à **amplificateur linéaire intégré (ALI)** :
  - Limitations des ALI
  - Diagramme de Bode
- Réaliser et caractériser un montage **transimpédance**
  - Choix des éléments
  - Réponse en fréquence

## Sommaire

<b>1</b>	<b>Amplificateur linéaire intégré</b> . . . . .	<b>40</b>
<b>2</b>	<b>Alimentation symétrique</b> . . . . .	<b>41</b>
<b>3</b>	<b>Circuit suiveur de tension</b> . . . . .	<b>42</b>
<b>4</b>	<b>Montage transimpédance</b> . . . . .	<b>43</b>
4.1	Transimpédance . . . . .	43
4.2	Influence de la tension de polarisation . . . . .	44

## 1. Amplificateur linéaire intégré

Les **amplificateurs linéaires intégrés** (ALI) ou **amplificateurs opérationnels** (AOP) sont des composants actifs très largement utilisés dans le domaine de l'électronique pour **amplifier et mettre en forme** les signaux provenant de capteurs.

Nous allons étudier ici les deux principales limitations d'un AOP (ou circuit à AOP) en régime linéaire :

- la **bande passante** qui est la limitation en fréquence du circuit à AOP ;
- le **slew-rate** ou vitesse de balayage maximale.

**A propos du *slew-rate*** Le *slew-rate* est une limite d'utilisation l'AOP en **régime linéaire**. Cette limitation se traduit par une déformation du signal de sortie comme illustrée par la figure 2.1.

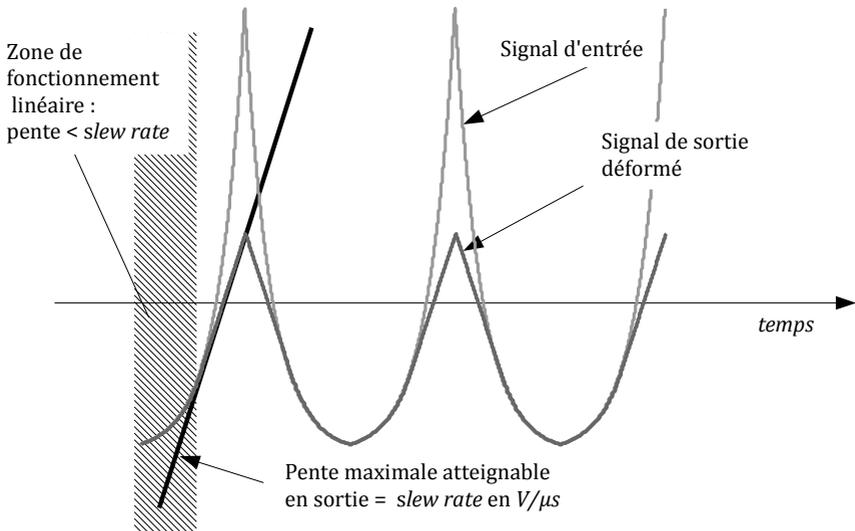


FIGURE 2.1 – Illustration de la déformation due à la limitation du slew-rate, pour un montage suiveur (gain unitaire)

Le *slew-rate*, SR, est donc quantifié par la pente maximale en  $V/\mu s$

que la tension de sortie peut atteindre.

$$SR = \max \left( \frac{dV_s}{dt} \right)$$

**Attention aux conditions de mesures, en particulier, toujours s'assurer que le signal n'est pas déformé par le *slew-rate* lorsqu'on mesure la bande passante!**

**P1** Rechercher, dans la documentation technique des composants LM741 et TL071, les valeurs des *slew-rate* et des bandes passantes pour un gain unitaire (notée aussi produit "gain  $\times$  bande passante", GBW).

**P2** Par la même occasion, noter le câblage de ces AOP et les tensions d'alimentation maximales.

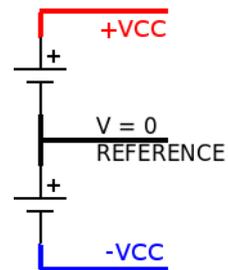
**P3** Rechercher les circuits des montages suiveur, amplificateur inverseur, amplificateur non-inverseur, transimpédance et donner l'expression des gains correspondants.

*Dans la pratique, pour mesurer une bande passante, on vérifiera toujours qu'un signal sinusoïdal de suffisamment faible amplitude en entrée donne bien un signal sinusoïdal en sortie du montage.*

## 2. Alimentation symétrique

Les amplificateurs opérationnels (AOP ou ALI) nécessitent la plupart du temps une alimentation symétrique, c'est à dire une double alimentation notée souvent  $+V_{CC}$  et  $-V_{CC}$ .

**M**  $\rightsquigarrow$  Réaliser une alimentation symétrique  $[+V_{CC} | 0 | -V_{CC}]$  (avec  $V_{CC} = 15\text{ V}$ ) à l'aide de l'alimentation continue composée de deux blocs indépendants (voir document annexe *Description du matériel* et figure ci-contre).



### 3. Circuit suiveur de tension

Afin de s'affranchir de l'influence de la capacité linéique des câbles coaxiaux (que vous avez pu étudier lors de la dernière séance), nous allons associer au circuit précédent un **montage suiveur** (figure 2.2).

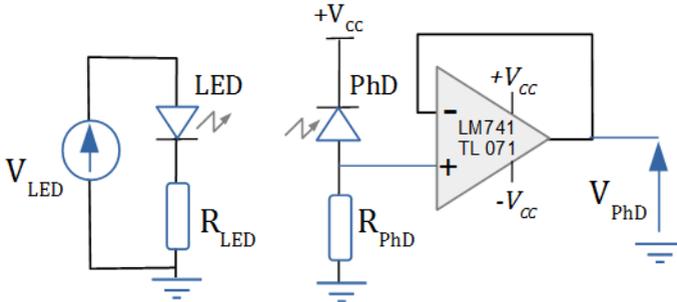


FIGURE 2.2 – Transmission optique avec montage suiveur. (L'alimentation fournissant la tension de polarisation de +15 V n'est plus représentée).

**M**  $\rightsquigarrow$  Réaliser le montage suiveur avec un amplificateur opérationnel LM741 et  $R_{\text{PhD}} = 100 \text{ k}\Omega$ .

**M**  $\rightsquigarrow$  Appliquer un signal sinusoïdal de fréquence 1 kHz, d'amplitude crête à crête de 5 V et de valeur moyenne de 3 V à l'aide du GBF sur  $V_{\text{LED}}$ .

**M**  $\rightsquigarrow$  Visualiser simultanément la tension délivrée par le GBF et la tension de sortie du montage détecteur à l'oscilloscope et vérifier que cette dernière est bien sinusoïdale.

**M**  $\rightsquigarrow$  Augmenter la fréquence du signal  $V_{\text{LED}}$  jusqu'à une fréquence de 100 kHz.

**Q1** Le signal de sortie est-il sinusoïdal? Commenter l'allure du signal en tenant compte de la valeur du *slew-rate* de l'amplificateur LM741 donnée dans la *DataSheet* et vérifier l'ordre de grandeur du *slew-rate* mesuré.

**M**  $\rightsquigarrow$  Remplacer dans le circuit précédent l'amplificateur LM741 par un TL071. Vérifier que le signal n'est plus déformé. Pourquoi?

**M**  $\rightsquigarrow$  Mesurer la bande passante du montage et commenter la valeur obtenue.

**M**  $\rightsquigarrow$  Remplacer la résistance de charge  $R_{\text{PhD}}$  par une résistance de  $1\text{ M}\Omega$ .

**Q2** Comment sont modifiées la sensibilité du montage et sa bande passante? Calculer à nouveau la valeur de la capacité parasite  $C_p$ .

## 4. Montage transimpédance

### 4.1. Transimpédance

Une autre possibilité très couramment utilisée en photodétection pour augmenter la bande passante et la sensibilité du détecteur est d'utiliser un circuit **transimpédance** (voir figure 2.3). Ce type de montage permet de convertir un courant en tension.

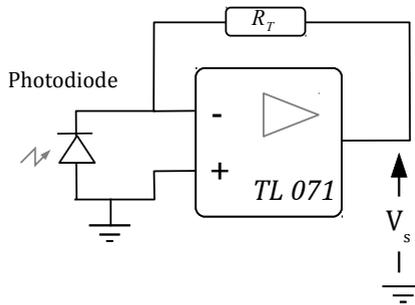


FIGURE 2.3 – Photodiode et montage transimpédance

**Q3** Dans ce montage, quelle est la tension de polarisation de la photodiode? Rechercher la valeur de la capacité parasite de la photodiode,  $C_p$ , pour cette tension dans la documentation du constructeur.

**Q4** Quelle est l'expression de la tension de sortie en fonction du courant dans la photodiode? Comparer le rôle de  $R_T$  et  $R_{\text{PhD}}$  dans les circuits des figures 2.2 et 2.3 et justifier l'appellation transimpédance.

**M**  $\rightsquigarrow$  Pour  $R_T = 100\text{ k}\Omega$ , afficher l'allure de la réponse en fréquence du capteur en utilisant le balayage en fréquence du GBF. Observer la présence d'une résonance.

**M**  $\rightsquigarrow$  Mesurer précisément la valeur de cette fréquence de résonance. Pour cela, il ne faut plus travailler en balayage fréquentiel.

Cette résonance est appelée phénomène de *gain peaking*. La valeur de la fréquence de résonance peut se calculer suivant :

$$f_{\text{peak}} = \sqrt{\frac{\text{GBP}}{2\pi R_T C_p}}$$

où **GBP**, (*Gain Bandwith Product*), est le produit gain  $\times$  bande de l'amplificateur opérationnel et  $C_p$  est la capacité parasite de la photodiode.

**Q5** Comparer la valeur calculée à la valeur mesurée.

**M**  $\rightsquigarrow$  Ce phénomène du *peaking* peut être très gênant en particulier sur des signaux non sinusoïdaux. Envoyer un signal carré sur le GBF de fréquence 1 kHz environ. Commenter et mesurer la fréquence des oscillations parasites.

## 4.2. Influence de la tension de polarisation

La capacité parasite de la photodiode diminue avec la tension de polarisation inverse appliquée. Pour augmenter la bande passante du montage, il est donc possible de polariser la photodiode en inverse, selon le montage de la figure 2.4.

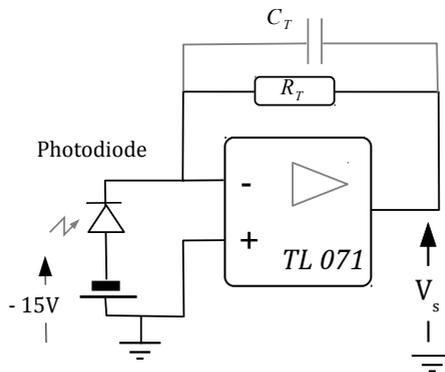


FIGURE 2.4 – Photodiode polarisée en inverse et montage transimpédance

**M**  $\rightsquigarrow$  Recherchez la valeur de sa capacité parasite de la photodiode,  $C_p$ , pour une tension inverse de 15 V, dans la documentation.

**M**  $\rightsquigarrow$  Modifier le montage afin de polariser la photodiode selon le schéma de la figure 2.4. **Attention au signe de la tension de polarisation!**

**M**  $\rightsquigarrow$  Mesurer la nouvelle valeur de la fréquence de résonance correspondant au phénomène de *gain peaking*.

**Q6** Cette valeur est-elle cohérente avec la documentation de la photodiode?

Afin de supprimer la résonance, on ajoute en parallèle avec  $R_T$  une très faible capacité.

**M**  $\rightsquigarrow$  Ajouter une capacité  $C_T$  de quelques picofarads. Commenter le résultat obtenu, mesurer la nouvelle bande passante du montage.

**Q7** On montre que la capacité  $C_T$  doit vérifier :

$$C_T > \sqrt{\frac{C_p}{\pi R_T \text{GBP}}}$$

pour supprimer le phénomène de *peaking*. Vérifier si c'est le cas pour la capacité  $C_T$  choisie.

**M**  $\rightsquigarrow$  Mesurer la bande passante obtenue avec une résistance  $R_T = 100 \text{ k}\Omega$  et étudier l'influence de la valeur de  $C_T$ .



## TP ETI - 1AS5- Thème 3

# Analyseur de spectre

Ce thème se décompose en 2 séances durant lesquelles vous réaliserez un **analyseur de spectre à balayage**. Ce type d'appareil permet de détecter et de mesurer les **différentes composantes spectrales** présentes dans un signal électrique (la photo représente un AS commercial). Un schéma de principe vous est proposé sur la figure 5.

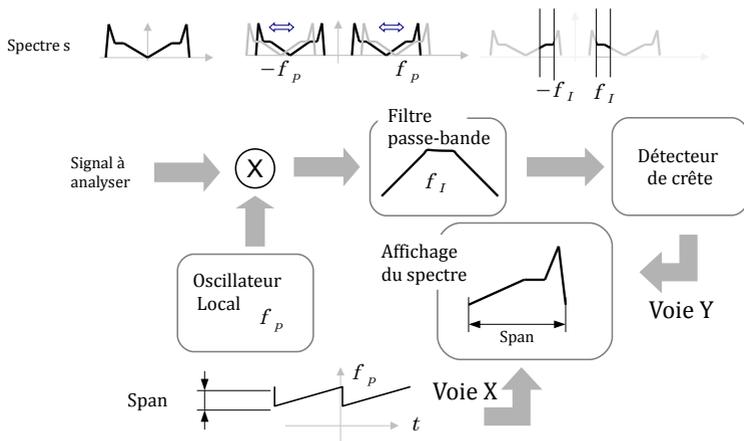
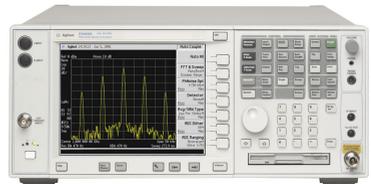


FIGURE 5 – Schéma de principe d'un analyseur de spectre à balayage

Au cours de ces 2 séances de TP, vous réaliserez chacune des fonctions séparément, avant de les assembler.

On rappelle qu'il est impératif d'apporter le plus grand soin possible à la **qualité** et à la **clarté** de vos câblages (voir la figure 6 un exemple de plaquette pas trop mal câblée).

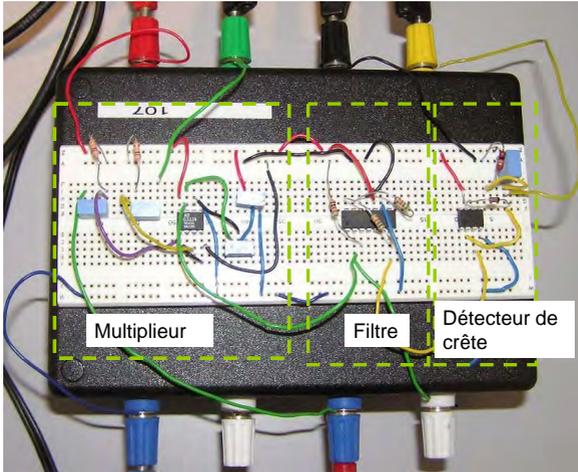


FIGURE 6 – Exemple de disposition

## Objectifs

---

- Réaliser un analyseur de spectre à balayage, constitué :
  - d'un **multiplieur**, pour effectuer un décalage en fréquence
  - d'un **filtre passe-bande**, pour sélectionner une partie des fréquences
  - d'un **détecteur de crête**, pour récupérer l'enveloppe du signal

## Préparation

---

En préparation, avant les séances de TP, vous devez analyser le fonctionnement global d'un analyseur de spectre, en vous aidant par exemple de la référence et de l'animation que vous trouverez sur le site : [http://en.wikipedia.org/wiki/Spectrum\\_analyzer](http://en.wikipedia.org/wiki/Spectrum_analyzer) et du schéma de principe de l'analyseur de spectre à balayage donné sur la figure 5.

## Rendu

---

Une synthèse des deux séances de TP, dont le sujet vous sera divulgué lors de la deuxième séance.

## Composantes fréquentielles

Durant cette séance, l'objectif de votre travail est de détecter la présence d'une composante spectrale d'un signal à une fréquence  $f_I$  fixée et de mesurer son amplitude.

Cette mesure associe ici deux fonctions de l'électronique :

1. le **filtrage** qui permet de sélectionner la fréquence d'intérêt à l'aide d'un filtre passe-bande,
2. la **détection d'enveloppe**, qui mesure l'amplitude du signal en sortie du filtre.

### Après cette séance, vous saurez...

- Mettre en œuvre un **filtre universel**
- Réaliser un **détecteur de crête** adapté à un signal donné
- Analyser un **signal modulé en amplitude**

## Sommaire

<b>1</b>	<b>Préparation</b> . . . . .	<b>50</b>
<b>2</b>	<b>Schéma de principe</b> . . . . .	<b>51</b>
<b>3</b>	<b>Détection crête ou d'enveloppe</b> . . . . .	<b>51</b>
	3.1 Signal de test . . . . .	52
	3.2 Détecteur de crête (ou d'enveloppe) à diode . . . . .	53
	3.3 Détecteur d'enveloppe sans seuil . . . . .	54
<b>4</b>	<b>Filtre passe-bande</b> . . . . .	<b>55</b>
<b>5</b>	<b>Circuit complet</b> . . . . .	<b>57</b>

## 1. Préparation

Nous analyserons à la fin de ce TP les composantes spectrales d'un signal carré périodique.

**P1** Rappeler les fréquences et les amplitudes des harmoniques d'un signal carré périodique de fréquence  $f_0$  et de rapport cyclique égal à 50%.

Le détecteur d'enveloppe utilise la charge et la décharge d'un condensateur,  $C$ , à travers une résistance  $R$ .

**P2** Retrouver l'expression de l'équation différentielle qui régit la charge et la décharge d'un condensateur en présence d'une résistance, ainsi que la définition et l'expression de la constante de temps,  $\tau$ .

**P3** Quelle est la relation entre la constante de temps,  $\tau$ , et temps de charge du condensateur entre 10 et 90%? La relation entre  $\tau$ , et le temps de charge de 0 à 95% de la tension maximale?

Vous serez amenés également au cours de cette séance à étudier la fonction de filtrage. Celle-ci peut être réalisée par différents types de composants électroniques. On vous propose ici d'utiliser le composant UAF42 (*Universal Active Filter*) qui est un composant dédié au filtrage actif.

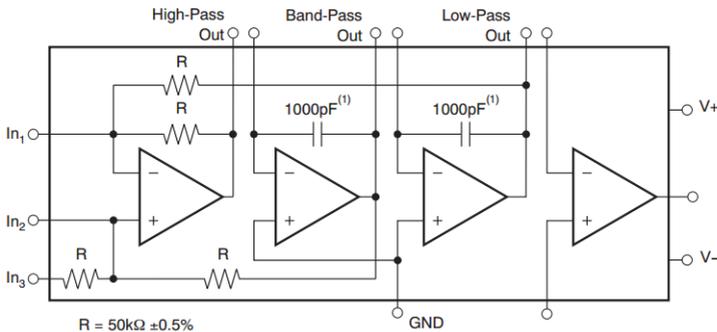


FIGURE 1.1 – Circuit UAF42.

**P4** A partir de la **documentation constructeur**, répondre aux questions suivantes :

- Quels sont les types de filtres réalisables (avec un seul composant) et leurs ordres ?
- Quelles sont les tensions d'alimentations typiques pour ce composant ? Les niveaux et la gamme de fréquence du signal d'entrée ?

Dans la suite du TP, vous pourrez également vous aider de l'*Application Bulletin* du composant UAF42 (disponible en ligne).

## 2. Schéma de principe

Le principe du dispositif que vous allez mettre en œuvre au cours de cette séance est décrit sur le schéma de la figure 1.2.

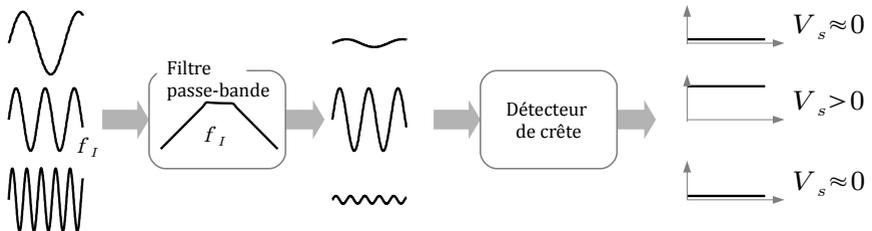


FIGURE 1.2 – Principe du dispositif à réaliser au cours du premier TP.

Vous serez amené à étudier indépendamment les deux blocs constituant cette chaîne d'acquisition : le détecteur de crête et le filtre passe-bande.

## 3. Détection crête ou d'enveloppe

Dans cette première partie, vous allez étudier le dernier composant de la chaîne d'acquisition : un **détecteur d'enveloppe**.

Pour pouvoir étudier ce montage, vous allez être amené un signal de test spécifique : un signal **modulé en amplitude**.

### 3.1. Signal de test

Pour analyser le détecteur de crête, on place en entrée un signal sinusoïdal dont l'amplitude varie lentement au cours du temps :

$$V_e(t) = m(t) \times A \cos(2\pi ft) \quad (1.1)$$

$V_e(t)$  est une tension modulée en amplitude. On appelle  $m(t)$  le *signal modulant* et  $p(t) = A \cos(2\pi ft)$  la *porteuse*. On considère, dans un premier temps, une modulation sinusoïdale  $m(t) = \frac{1}{2}(1 + a \cos(2\pi Ft))$  avec  $F \ll f$ .

#### Modulation en amplitude du signal du GBF

1. **Réglage de la porteuse.** Menu

- (a)  pour régler la fréquence  $f$ , ici de 3 kHz
- (b)  pour régler l'amplitude  $A$ , ici de quelques volts,
- (c)  vérifier qu'il n'y a pas d'offset.

2. **Réglage de la modulante.** Utiliser le menu  du GBF :

- (a)  pour obtenir une modulation en amplitude,
- (b)  la modulante est générée par le GBF
- (c)  l'amplitude de modulation (correspond au coefficient  $a$ ) à régler à 100%,
- (d)  pour régler la fréquence  $F$  de la modulante.
- (e)  pour une modulante sinusoïdale,

3. Et utiliser la sortie `Sync` qui fournit un signal rectangulaire au rythme de la modulation (lente) pour synchroniser l'oscilloscope.

**M**  $\rightsquigarrow$  Régler le GBF afin d'obtenir un tel signal modulé et l'observer à l'oscilloscope.

### 3.2. Détecteur de crête (ou d'enveloppe) à diode

Le circuit de détection d'enveloppe que l'on étudie dans un premier temps est un simple détecteur à diode (figure 1.3).

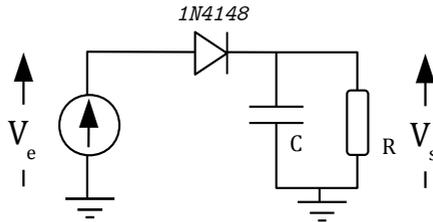


FIGURE 1.3 – Circuit détecteur de crête

**M**  $\rightsquigarrow$  Réaliser le circuit de la figure 1.3 avec  $R = 10\text{ k}\Omega$ ,  $C = 100\text{ nF}$ . Observer la tension de sortie pour des fréquences du signal d'entrée fixées à  $f = 3\text{ kHz}$  et  $F = 100\text{ Hz}$ .

**M**  $\rightsquigarrow$  Refaire l'expérience avec  $f = 3\text{ kHz}$  et  $F = 1\text{ kHz}$  puis avec  $f = 1\text{ kHz}$  et  $F = 100\text{ Hz}$ .

**Q1** En vous appuyant sur des relevés d'oscillogrammes, expliquer le fonctionnement du circuit. Quand la diode est-elle passante? Quand la diode est-elle bloquée? Comment évolue la tension de sortie dans les deux cas?

**Q2** Dans le cas général, comment choisir les composants  $R$  et  $C$  pour suivre correctement les variations d'amplitude du signal d'entrée? Pourquoi doit-on avoir  $f \gg F$ ?

**M**  $\rightsquigarrow$  Moduler l'amplitude du signal par une modulante rectangulaire, en vous replaçant à  $f = 3\text{ kHz}$  et  $F = 100\text{ Hz}$

#### Mesure d'un temps de réponse à l'aide des curseurs \_\_\_\_\_

Utiliser le menu CURSORS en mode Tracer. Placer les deux curseurs A et B sur la même courbe.

---

**Q3** Mesurer précisément la constante de temps de la décharge du condensateur par la méthode de votre choix. Comparer à la valeur attendue.

**Q4** Que se passe-t-il lors d'une variation brusque d'amplitude? Quel est le temps de réponse du détecteur de crête? Pourquoi est-il différent sur un front montant et sur un front descendant? Comment peut-on modifier ces temps de réponse?

**M**  $\rightsquigarrow$  Diminuer l'amplitude  $A$  de la porteuse autour du Volt, puis encore plus bas.

**Q5** Pourquoi le détecteur crête ne fonctionne-t-il pas pour les faibles amplitudes de signal?

### 3.3. Détecteur d'enveloppe sans seuil

Une amélioration du circuit précédent est fournie par l'ajout d'un amplificateur opérationnel selon le circuit de la figure 1.4. L'amplificateur opérationnel utilisé est un TL071.

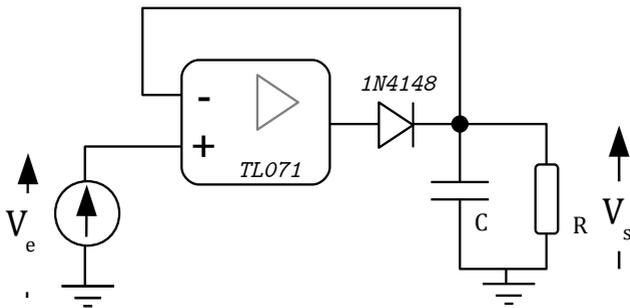


FIGURE 1.4 – Circuit détecteur sans seuil.

**M**  $\rightsquigarrow$  Réaliser le circuit de la figure 1.4, toujours avec  $R = 10\text{ k}\Omega$  et  $C = 100\text{ nF}$ .

**Q6** Comment est modifiée la tension de sortie? Vérifier que cette détection d'enveloppe fonctionne aussi pour les faibles amplitudes.

**Q7** Expliquer le principe de fonctionnement du détecteur sans seuil. Lorsque la diode est passante, quelle est la configuration de l'amplificateur opérationnel?

## 4. Filtre passe-bande

Le cahier des charges du filtre passe-bande que l'on souhaite réaliser est le suivant :

$$\begin{aligned} \text{Fréquence centrale} \quad f_I &= 3 \text{ kHz} \\ \text{Bande passante à } -3\text{dB} \quad \text{BP} &= 100 \text{ Hz} \end{aligned}$$

Le schéma du circuit, issu de la documentation technique (*application bulletin*) est celui de la figure 1.5.

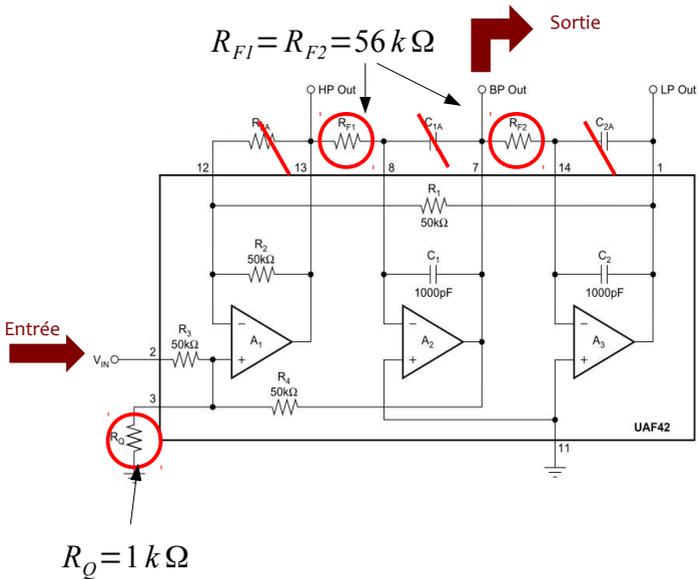


FIGURE 1.5 – Circuit UAF42. Câblage utilisé dans ce TP, tiré de l'*Application Bulletin*

On peut montrer que l'expression de la fonction de transfert du filtre est bien celle d'un filtre passe-bande, qui peut s'écrire ainsi :

$$G(j\omega) = -G_0 \cdot \frac{j \frac{\omega}{\omega_0}}{1 + j \frac{1}{Q} \frac{\omega}{\omega_0} - \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2}$$

avec  $G_0 = \frac{2R_Q}{R+2R_Q}$ ,  $Q = \frac{R+2R_Q}{2R_Q}$  et  $\omega_0 = \frac{1}{R_F C_f}$ .

**Q8** Vérifier que les valeurs choisies pour les composants  $R_Q$  et  $R_F$  (figure 1.5) permettent de répondre au cahier des charges.

**M**  $\rightsquigarrow$  Câbler le circuit. Vérifier que la réponse du filtre est bien celle attendue en modifiant la fréquence d'un signal sinusoïdal en entrée autour de la fréquence centrale. On pourra utiliser le mode *Sweep* du GBF.

**M**  $\rightsquigarrow$  Ensuite, par des mesures précises, tracer le diagramme de Bode en amplitude du filtre, une quinzaine de points au maximum suffit à tracer correctement ce diagramme. Attention à surveiller le signal de sortie à l'oscilloscope au cours des mesures, s'assurer en particulier que le signal reste bien sinusoïdal. Déterminer précisément la fréquence centrale  $f_I$  et la bande passante à  $-3\text{dB}$ ,  $\text{BP}_{-3\text{dB}}$ , du filtre obtenu.

**M**  $\rightsquigarrow$  Placer un signal impulsionnel en entrée du filtre, c'est à dire de durée plus courte que le temps caractéristique du filtre. Choisir par exemple une durée de l'impulsion égale à  $100\ \mu\text{s}$ .

**Q9** Qu'appelle-t-on réponse impulsionnelle d'un filtre? Quel est le lien entre le signal de sortie obtenu et le diagramme de Bode tracé précédemment? Pourquoi ce signal est-il oscillant? Quelle est la valeur de sa pseudo-période d'oscillation? Comparer à la fréquence centrale de votre filtre.

**M**  $\rightsquigarrow$  Revenir en mode modulation d'amplitude, mais avec une modulation carrée de fréquence de l'ordre de  $10\ \text{Hz}$ , et une porteuse sinusoïdale de fréquence exactement égale à  $f_I$ , fréquence centrale du filtre mesurée précédemment.

**M**  $\rightsquigarrow$  Déterminer le temps d'établissement à  $5\%$  lors de l'apparition brusque d'un signal sinusoïdal de fréquence  $f_I$  en entrée.

**Q10** Vérifier que ce temps d'établissement est égal à  $1/\text{BP}$ . Commenter ce résultat.

## 5. Circuit complet

**M**  $\rightsquigarrow$  Associer les deux circuits précédents et placer un signal carré de fréquence  $f_I$  en entrée de l'ensemble. Vérifier qu'en sortie de votre circuit la tension passe par un maximum pour une fréquence exactement égale à  $f_I$ . Mesurer précisément la tension correspondant à ce maximum.

**M**  $\rightsquigarrow$  Réduire la fréquence du signal d'entrée à environ  $\frac{f_I}{3}$ . Vérifier qu'en sortie de votre circuit la tension passe à nouveau par un maximum. Pour quelle fréquence exactement? Mesurer précisément la tension correspondant à ce maximum.

**Q11** Expliquer la présence de ces maxima ainsi que les valeurs des amplitudes mesurées.

**M**  $\rightsquigarrow$  Mesurer les amplitudes des harmoniques suivantes d'un signal carré.

**Q12** Comparer aux valeurs attendues demandées à la question de préparation **P1**.

**M**  $\rightsquigarrow$  Refaire ces mesures en utilisant un signal périodique triangulaire en entrée.

**Q13** Comparer au cas précédent.

**Ne pas décâbler vos circuits,  
vous les utiliserez la séance prochaine.**



## Analyseur de spectre à balayage

Durant cette seconde séance, vous réaliserez la fonction **multiplication** de deux tensions et vous **assemblerez** l'ensemble des blocs que vous avez réalisé. Vous utiliserez alors votre analyseur de spectre pour analyser le contenu spectral de signaux sonores (vous pouvez d'ailleurs amener sur une clé USB vos propres fichiers de 'sample'!).

### Après cette séance, vous saurez...

- Utiliser un **multiplieur analogique** pour faire du décalage en fréquence
- Faire une **analyse spectrale** d'un signal
- Utiliser le GBF pour faire un balayage en fréquence

## Sommaire

<b>1</b>	<b>Préparation : Décalage de fréquence</b>	<b>61</b>
<b>2</b>	<b>Décalage en fréquence</b>	<b>61</b>
2.1	Mise en œuvre d'un multiplieur	61
2.2	Décalage en fréquence à l'aide du multiplieur.	62
<b>3</b>	<b>Analyseur de spectre</b>	<b>63</b>
3.1	Signal d'étude sinusoïdal	63
3.2	Signal quelconque	64
3.3	Signal audio	64
<b>4</b>	<b>Acquisition à l'aide d'une carte Nucléo</b>	<b>66</b>
4.1	Signal de déclenchement	66
4.2	Acquisition des données et affichage	66

Lors de la première partie du TP, vous avez réalisé un dispositif, filtre et détecteur de crête, permettant de mesurer l'amplitude d'une composante spectrale à une fréquence  $f_I$ . Afin d'étudier l'ensemble des composantes spectrales d'un signal inconnu, il est possible de réaliser une série de dispositifs de ce type afin de couvrir toutes les bandes spectrales d'intérêt.

Une autre approche, et c'est celle qui nous intéresse ici, consiste à traduire le spectre du signal à étudier au cours du temps, pour 'faire passer devant le filtre' les différentes composantes spectrales du signal. C'est le principe de fonctionnement de l'analyseur de spectre à balayage rappelé par la figure 2.1 suivante.

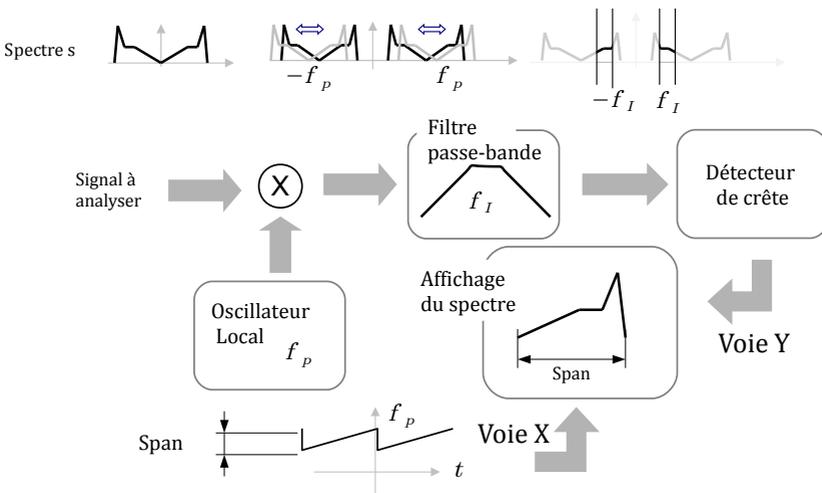


FIGURE 2.1 – Schéma de principe d'un analyseur de spectre à balayage

L'objet de cette séance est de concevoir la partie balayage en fréquence et de l'associer avec le circuit précédent pour réaliser un analyseur de spectre complet.

L'oscillateur local sera le GBF en mode *Sweep*. Le multiplieur fait l'objet de la première partie de la séance.

## 1. Préparation : Décalage de fréquence

La **fonction multiplication** est la fonction centrale dans l'analyseur de spectre.

Le multiplieur permet de faire le produit entre une tension sinusoïdale de fréquence  $f_P$  et une tension sinusoïdale de fréquence  $f_0$ .

**P1** Montrer que ce produit peut s'écrire comme la somme de deux tensions sinusoïdales. Quelles sont les fréquences de ces deux tensions sinusoïdales? Expliquer pourquoi parle-t-on, dans ce cas, de décalage en fréquence?

Pour effectuer la fonction multiplication, nous utiliserons un multiplieur analogique AD633JN d'*Analog Devices*. Ce composant est onéreux et devra être câblé avec précaution (il coûte 10 € environ pièce).

**P2** En préparation de ce TP, rechercher dans la documentation constructeur de ce composant (AD633JN datasheet) les informations suivantes :

- Préciser la fonction exacte réalisée par le composant.
- Quelles sont les valeurs typiques des tensions d'alimentation?
- Quelle est la gamme des tensions d'entrée possibles?
- Quelles sont les valeurs de la bande-passante et du slew-rate?
- Quelle est la valeur de l'impédance d'entrée?

**P3** Ce composant permet-il de travailler dans le domaine des fréquences audio (50 Hz à 10 kHz)?

## 2. Décalage en fréquence

### 2.1. Mise en œuvre d'un multiplieur

La fonction de multiplication entre deux signaux est réalisable par des composants dédiés, les multiplieurs analogiques. Cette fonction a de nombreuses applications et notamment le décalage en fréquence.

On utilise le multiplieur analogique AD633 d'*Analog Devices* étudié en préparation. On propose dans un premier temps le circuit de la figure 2.2 pour le mettre en œuvre.

**Q1** Quelle est la nature des deux filtres  $C - R$  placés en entrée du multiplieur? Quel est leur rôle?

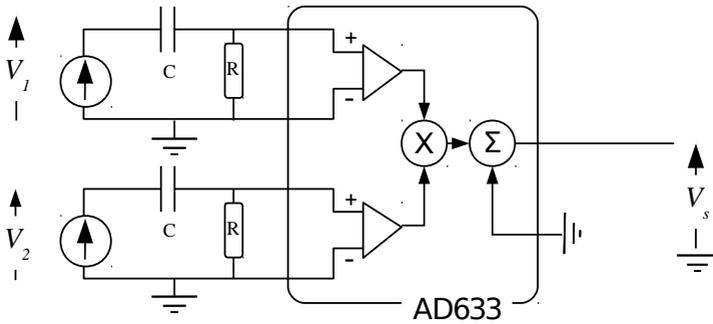


FIGURE 2.2 – Produit de deux signaux. Circuit utilisant un multiplieur AD633JN.

On propose de choisir les valeurs de ces composants de l'ordre de  $R = 100\text{ k}\Omega$  et  $C = 100\text{ nF}$ .

**Q2** Quelle est la fréquence de coupure correspondante ? Ces filtres seront-ils gênants pour l'étude de signaux audio ?

**M**  $\rightsquigarrow$  Réaliser le câblage du multiplieur afin de multiplier un signal sinusoïdal d'amplitude  $5\text{ V}$  crête à crête et de fréquence  $3\text{ kHz}$  par lui-même.

**Q3** Comparer les amplitudes des signaux d'entrée et de sortie. Vérifier que le circuit effectue bien la multiplication attendue.

## 2.2. Décalage en fréquence à l'aide du multiplieur.

On souhaite à présent multiplier deux signaux différents.

**M**  $\rightsquigarrow$  En utilisant les deux GBF, placer deux signaux sinusoïdaux d'amplitude  $5\text{ V}$  en entrée du multiplieur :

- $V_0$  à la fréquence  $f_0 = 13\text{ kHz}$
- et  $V_p$  à la fréquence  $f_p = 10\text{ kHz}$ .

**M**  $\rightsquigarrow$  Vérifier que le signal de sortie peut être vu comme la somme de deux sinusoïdes. Mesurer leurs fréquences et leurs amplitudes respectives.

**Q4** Le résultat est-il conforme à la réponse à la question de préparation **P1** ? Quel serait le résultat pour deux sinusoïdes l'une à  $500\text{ Hz}$  et l'autre à  $2,5\text{ kHz}$  ?

**Q5** Pour une tension sinusoïdale de fréquence  $f_0$  donnée, par exemple  $f_0 = 500$  Hz, quelles sont les deux fréquences  $f_p$  qui permettent d'obtenir un signal de sortie du multiplieur qui contienne une composante spectrale à la fréquence  $f_I$ ? On rappelle que  $f_I$  est la fréquence centrale du filtre que vous avez construit à la séance précédente.

**M**  $\rightsquigarrow$  Le vérifier expérimentalement.

## 3. Analyseur de spectre

### 3.1. Signal d'étude sinusoïdal

#### Premières mesures

**M**  $\rightsquigarrow$  Connecter le circuit multiplieur à l'ensemble 'filtre passe-bande + détecteur de crête' et placer à nouveau deux signaux sinusoïdaux en entrée du multiplieur :

- l'un,  $V_0$ , à la fréquence  $f_0 = 500$  Hz
- le deuxième à  $f_p = f_I - f_0$ , où  $f_I$  est la fréquence centrale du filtre passe-bande.

**M**  $\rightsquigarrow$  Vérifier, en modifiant la fréquence  $f_p$ , que le signal de sortie passe bien par un maximum à la fréquence  $f_p$  attendue.

**M**  $\rightsquigarrow$  Montrer qu'il existe un second maximum et vérifier la valeur de la fréquence  $f_p$  correspondante.

**M**  $\rightsquigarrow$  Vérifier que la valeur de ces maxima est bien proportionnelle à l'amplitude du signal  $V_0$ .

#### Balayage en fréquence avec le mode *Sweep* du GBF

**M**  $\rightsquigarrow$  Faire varier la fréquence  $f_p$  au cours du temps en utilisant le mode Sweep du GBF. Réaliser un balayage linéaire en fréquence de 100 Hz à 3 kHz en 500 ms (*Sweep Time*). Afficher le signal de sortie et le signal (*sync*) de synchronisation du GBF. Utiliser ce dernier pour synchroniser l'oscilloscope, en mode normal (et non auto).

**M**  $\rightsquigarrow$  Pour mesurer la fréquence,  $f_p$ , en abscisse, utiliser l'onglet Marker du mode *Sweep*. La valeur de la fréquence réglée pour le *marker* correspond au front descendant du signal de synchronisation. Placer le *marker* à la fréquence  $f_I$  et synchroniser l'oscilloscope sur le front descendant du signal *Sync*.

**M** ⇨ Réaliser un balayage linéaire en fréquence de 3 kHz à 6 kHz en 500 ms (Sweep Time). Afficher le signal de sortie et le signal (`sync`) de synchronisation du GBF. Utiliser ce dernier pour synchroniser l'oscilloscope, en mode normal (et non auto).

**Q6** Pourquoi observe-t-on deux fois le "même" spectre ?

**M** ⇨ Mesurer précisément la largeur des pics.

**Q7** De quoi dépend cette largeur ?

La résolution d'un analyseur de spectre est sa capacité à résoudre deux fréquences très proches. Elle est quantifiée par sa bande passante de résolution (RBW : résolution Bandwidth).

**Q8** Quelle résolution peut-on obtenir avec votre analyseur de spectre ? Par quelle partie du montage est-elle limitée ?

### 3.2. Signal quelconque

**M** ⇨ Placer à l'entrée de l'analyseur un signal  $V_0$  rectangulaire de fréquence 300 Hz.

**Q9** Expliquer l'allure des spectres obtenus. Vérifier que l'analyseur de spectre que vous avez construit permet d'obtenir les composantes spectrales du signal  $V_0$ .

**M** ⇨ Mesurer les valeurs des fréquences et des amplitudes de ces composantes spectrales de  $V_0$ .

**M** ⇨ Refaire la même étude pour un signal triangulaire et/ou un signal carré de rapport cyclique égal à 0, 25. Commenter.

### 3.3. Signal audio

Dans cette partie, on utilisera la sortie "casque" de la carte son de l'ordinateur pour mesurer les spectres de différents sons. Un câble mini Jack-RCA et un adaptateur RCA - coaxial permettent d'appliquer cette sortie audio sur votre analyseur de spectre.

**M** ⇨ Analyser les échantillons sonores issus de sons divers.

Vous pouvez utiliser des sons que vous avez préparé ou utilisez les notes d'une clarinette ou d'un saxophone, disponibles dans le répertoire `S:\EITI\TP\Theme3`. Vous pouvez aussi rechercher des sons sur internet.

**Q10** Analyser soigneusement quelques sons : fréquences, hauteur de la note, présence et amplitude des d'harmoniques, etc. Vérifier par exemple que la clarinette a préférentiellement des harmoniques impaires (tiens, pourquoi?).

## 4. Acquisition à l'aide d'une carte Nucléo

On souhaite à présent utiliser une carte Nucléo pour :

- déclencher le mode Sweep du GBF (temps de balayage de 2 s)
- acquérir les points de mesure en sortie de l'analyseur
- afficher les différents points sur le moniteur série du logiciel

### 4.1. Signal de déclenchement

Dans un premier temps, on va chercher à générer le balayage en fréquence du GBF à l'aide de la carte Nucléo et du moniteur série.

L'envoi par le moniteur série d'une lettre ('a' par exemple) vers la carte Nucléo déclenche le passage à '1' d'une sortie de cette dernière pendant 1 s.

**M** ↪ Ecrire un programme qui remplisse ce cahier des charges.

**M** ↪ Compiler le programme et téléverser-le sur la carte.

**M** ↪ Visualiser la sortie de la carte à l'aide d'un oscilloscope et vérifier le bon fonctionnement de votre programme.

### 4.2. Acquisition des données et affichage

Une fois que le balayage est lancé, on souhaite récupérer les différentes valeurs en sortie de l'analyseur et les afficher sur le moniteur série à chaque fois qu'on en fait l'acquisition.

L'acquisition sera ralentie à l'aide d'un délai de 200 ms introduit de façon logicielle..

**M** ↪ Modifier le programme précédent pour qu'il intègre ces deux nouvelles fonctionnalités.

**M** ↪ Compiler le programme et téléverser-le sur la carte.

**Q11** Les valeurs affichées sur le moniteur série sont-elles cohérentes avec l'analyse obtenue précédemment ?

**Q12** Quel est alors le pas en fréquence obtenu avec ce balayage et ce temps d'acquisition ?