

TD10

---

## TD 10 / MODÉLISER UN MONTAGE TRANSIMPÉDANCE

---

### Objectifs pédagogiques

A la fin de cette thématique, les étudiant·e·s seront capables de :

- Modéliser un montage de photodétection de type transimpédance

### Activités pédagogiques

- Lectures (hors temps présentiel - en ligne)
  - ▷ TD7 du Semestre 5 : Détecter des photons
  - ▷ Fiche résumé : Analyse Harmonique / Ordre 1
  - ▷ Fiche résumé : Analyse Harmonique / Ordre 2
  - ▷ Fiche résumé : Photodétection
- Séance de **TD10**
- Séances de TP (module TP CéTI)

### Ressources Complémentaires

- Modélisations sous MATLAB ( <http://lense.institutoptique.fr/simuler/> ) :
  - ▷ Photodétection : Comparaison entre système de photodétection simple et transimpédance
  - ▷ Photodétection : Montage transimpédance / Réponse en fréquence
  - ▷ Photodétection : Montage transimpédance / Comparaison

TD10

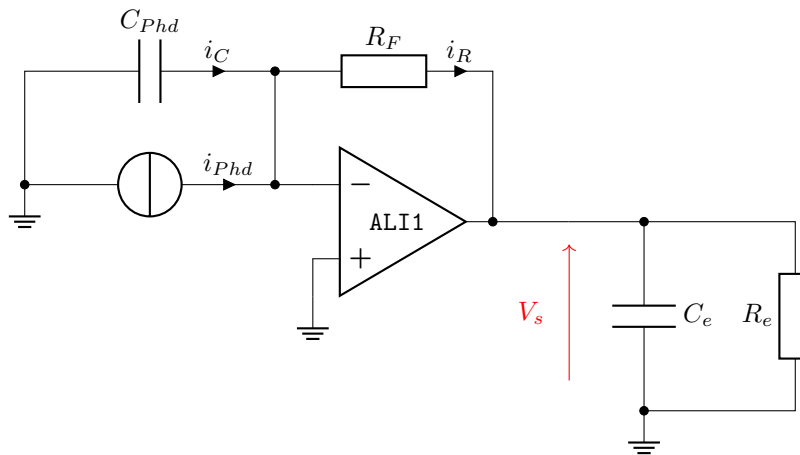
## TD 10 / MODÉLISER UN MONTAGE TRANSIMPÉDANCE

### Exercice 1 - Montage transimpédance - Etude simple

#### Notions abordées

- ▷ Modélisation d'une photodiode et d'un oscilloscope
- ▷ Intérêt de l'ALI pour un système de photodétection

On considère le montage récepteur à photodiode suivant. L'amplificateur linéaire intégré (ALI) est alimenté en  $\pm 15$  V. On note  $\Phi_{lum}(t)$  le flux lumineux reçu par la photodiode et  $k$  sa sensibilité.



1. A quoi correspondent les différents éléments de ce montage ?
2. Dans quel mode de fonctionnement est l'ALI ?
3. Exprimez la tension de sortie  $V_S(f)$  en fonction de  $i_{Phd}$  et des éléments du montage.

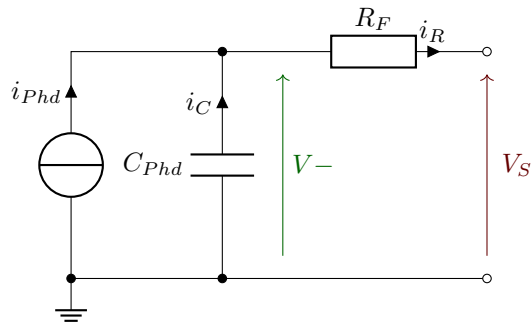
### Exercice 2 - Montage de contre-réaction

#### Notions abordées

- ▷ Filtre linéaire

On étudie le montage suivant :

1. Calculez les courants  $i_R$  et  $i_C$  en fonction des éléments du montage.
2. Quel est le lien entre  $i_R$ ,  $i_C$  et  $i_{Phd}$  ?
3. Que vaut alors  $V^-$  en fonction de  $V_S$  et  $i_{Phd}$  ?
4. Dans le cas où  $i_{Phd} = 0$ , quel est le comportement en fréquence du système entre  $V_S$  et  $V^-$  ?

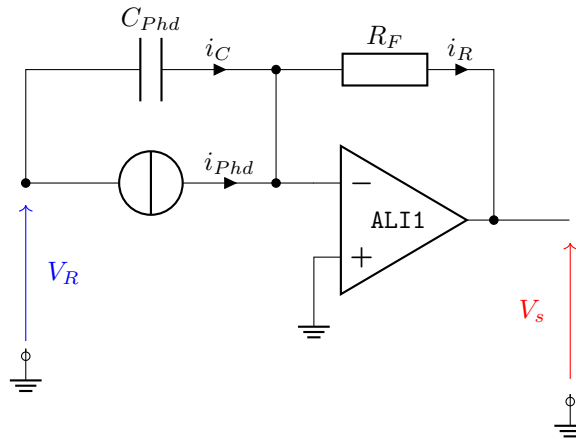


### Exercice 3 - Transimpédance et modèle du premier ordre pour l'ALI

#### Notions abordées

- ▷ Modèle de l'ALI du premier ordre
- ▷ Système linéaire

Soit le montage suivant :



On modélisera l'ALI par son modèle du premier ordre :

$$A(j \cdot \omega) = \frac{A_0}{1 + \frac{j \cdot \omega}{\omega_0}}$$

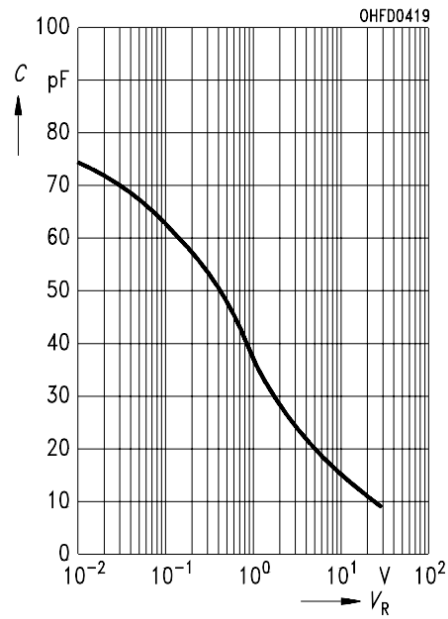
où  $A_0$  est l'amplification différentielle statique et  $\omega_0 = \frac{GBP}{A_0}$  la pulsation de coupure, avec  $GBP$  la bande-passante unitaire.

1. Que vaut  $V_S$  en fonction de  $V^+$  et  $V^-$  ?
2. Quel est le lien avec le montage de l'exercice 2 ?
3. Que vaut alors  $V_S$  en fonction de  $i_{Phd}$  ?  
On notera  $\omega_c = \frac{1}{R_F \cdot C_{Phd}}$  et  $K = \frac{A_0}{1+A_0}$ .
4. Quelle est la fonction de transfert de ce montage ?
5. Calculez les valeurs de la pulsation propre  $\omega_T$ , le facteur d'amortissement  $m_T$  et le gain statique  $G_T$  de ce système.
6. Que deviennent ces valeurs si on suppose que  $A_0 \gg 1$  ?

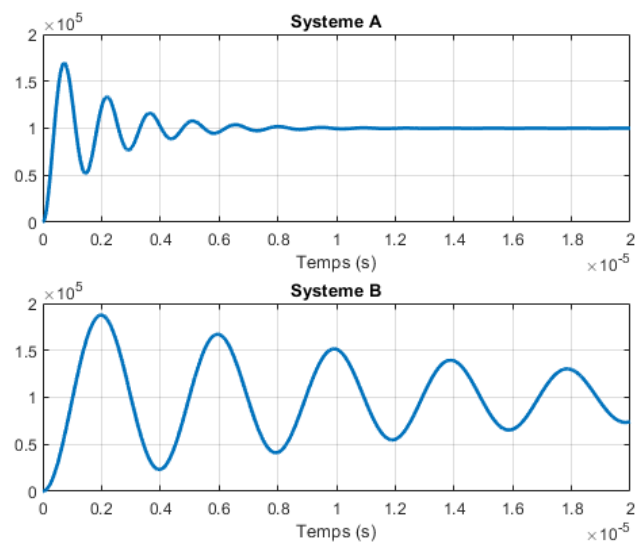
On prendra les valeurs suivantes pour la suite :

$A_0 = 2 \cdot 10^5$ ,  $GBP = 3 \text{ MHz}$ ,  $R_F = 100 \text{ k}\Omega$  et une photodiode de type SFH206 (dont une courbe caractéristique est donnée ci-après).

## Capacitance



7. Que valent  $\omega_T$  et  $m_T$  pour  $V_R = 0$  V ? Pour  $V_R = 30$  V ?
8. Quelles formes ont les réponses en fréquence pour ces deux valeurs de tension de polarisation ?
9. Parmi les deux réponses indicielles suivantes, laquelle est celle pour  $V_R = 0$  V ? Pour  $V_R = 30$  V ?



TD10

## TD 10 / MODÉLISER UN MONTAGE TRANSIMPÉDANCE

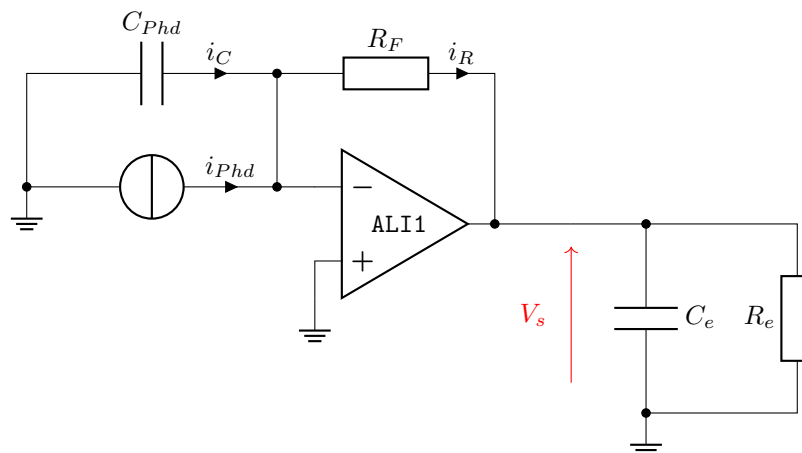
Correction

### Exercice 1 - Montage transimpédance - Etude simple

#### Notions abordées

- ▷ Modélisation d'une photodiode et d'un oscilloscope
- ▷ Intérêt de l'ALI pour un système de photodétection

On considère le montage récepteur à photodiode suivant. L'amplificateur linéaire intégré (ALI) est alimenté en  $\pm 15\text{ V}$ . On note  $\Phi_{lum}(t)$  le flux lumineux reçu par la photodiode et  $k$  sa sensibilité.



1. A quoi correspondent les différents éléments de ce montage ?

#### Réponse

$C_{Phd}$  correspond à la capacité de jonction de la photodiode.

$R_e$  et  $C_e$  correspondent à l'impédance d'entrée de l'instrument de mesure du signal  $V_S$  (un oscilloscope par exemple) et à la capacité des câbles permettant d'amener le signal vers l'appareil de mesure.

2. Dans quel mode de fonctionnement est l'ALI ?

#### Réponse

Il y a une contre-réaction négative, l'ALI fonctionne donc en mode linéaire. On peut ainsi dire que  $V_+ = V_-$ .

3. Exprimez la tension de sortie  $V_S(f)$  en fonction de  $i_{Phd}$  et des éléments du montage.

**Réponse**

Comme  $V^+ = V^-$ , la photodiode est donc polarisée avec une tension constante et la capacité se retrouve avec une différence de potentiel constante à ses bornes, ainsi  $i_c = 0$ .

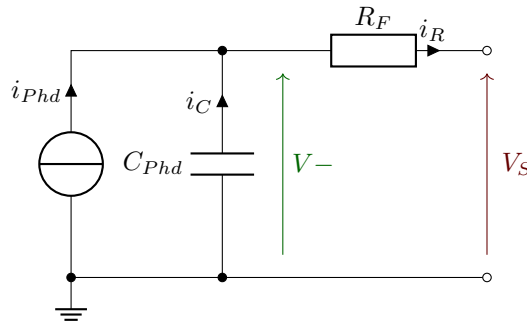
On a donc :  $V_S(f) = -R_F \cdot i_{Phd}$ .

Mais cette représentation ne permet pas de décrire les résultats expérimentaux obtenus, à savoir : une résonance dans la réponse en fréquence et un comportement passe-bas.

**Exercice 2 - Montage de contre-réaction****Notions abordées**

▷ Filtre linéaire

On étudie le montage suivant :



1. Calculez les courants  $i_R$  et  $i_C$  en fonction des éléments du montage.

**Réponse**

$$i_R = \frac{V^- - V_S}{R_F}$$

$$i_C = -\frac{V^-}{\frac{1}{j \cdot C \cdot \omega}}$$

2. Quel est le lien entre  $i_R$ ,  $i_C$  et  $i_{Phd}$ ?

**Réponse**

Par la loi des noeuds,  $i_{Phd} + i_C - i_R = 0$ .

3. Que vaut alors  $V^-$  en fonction de  $V_S$  et  $i_{Phd}$ ?

**Réponse**

On obtient :

$$i_{Phd} + \frac{V_S}{R_F} - \frac{V^-}{R_F} - V^- \cdot j \cdot C_{Phd} \cdot \omega = 0$$

Ce qui donne :

$$V^- = (V_S + R_F \cdot i_{Phd}) \cdot \frac{1}{1 + j \cdot R_F \cdot C_{Phd} \cdot \omega}$$

4. Dans le cas où  $i_{Phd} = 0$ , quel est le comportement en fréquence du système entre  $V_S$  et  $V^-$  ?

**Réponse**

D'après la relation précédente :

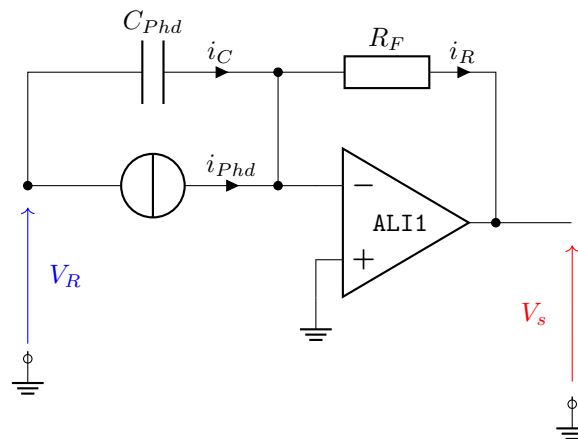
$$\frac{V^-}{V_S} = \frac{1}{1 + j \cdot R_F \cdot C_{Phd} \cdot \omega}$$

Il s'agit d'un filtre passe-bas de fréquence de coupure  $f_c = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R_F \cdot C_{Phd}}$ .

**Exercice 3 - Transimpédance et modèle du premier ordre pour l'ALI****Notions abordées**

- ▷ Modèle de l'ALI du premier ordre
- ▷ Système linéaire

Soit le montage suivant :



On modélisera l'ALI par son modèle du premier ordre :

$$A(j \cdot \omega) = \frac{A_0}{1 + \frac{j \cdot \omega}{\omega_0}}$$

où  $A_0$  est l'amplification différentielle statique et  $\omega_0 = \frac{GBP}{A_0}$  la pulsation de coupure, avec  $GBP$  la bande-passante unitaire.

1. Que vaut  $V_S$  en fonction de  $V^+$  et  $V^-$  ?

**Réponse**

$$V_S = A(p) \cdot (V^+ - V^-)$$

2. Quel est le lien avec le montage de l'exercice 2?

**Réponse**

Le montage de l'exercice 2 se retrouve dans la contre-réaction du montage transimpédance.

3. Que vaut alors  $V_S$  en fonction de  $i_{Phd}$ ?

**Réponse**

$V^+ = 0$  et  $V^-$  est la relation trouvée à la fin de l'exercice 2.

On alors :

$$V_S = -A(j \cdot \omega) \cdot (V_S + R_F \cdot i_{Phd}) \cdot \frac{1}{1 + j \cdot R_F \cdot C_{Phd} \cdot \omega}$$

Ce qui donne :

$$V_S \cdot (1 + A(j \cdot \omega)) \cdot \frac{1}{1 + j \cdot R_F \cdot C_{Phd} \cdot \omega} = -R_F \cdot i_{Phd} \cdot \frac{1}{1 + j \cdot R_F \cdot C_{Phd} \cdot \omega}$$

On notera  $\omega_c = \frac{1}{R_F \cdot C_{Phd}}$  et  $K = \frac{A_0}{1+A_0}$ .

4. Quelle est la fonction de transfert de ce montage?

**Réponse**

$$\frac{V_S}{i_{Phd}} = -A(j \cdot \omega) \cdot \frac{R_F}{1 + j \cdot R_F \cdot C_{Phd} \cdot \omega}$$

En développant, on obtient :

$$\frac{V_S}{i_{Phd}} = -\frac{A_0 \cdot R_F}{1 + A_0 + j \cdot \omega \cdot \left(\frac{1}{\omega_c} + \frac{1}{\omega_0}\right) + (j \cdot \omega)^2 \cdot \frac{1}{\omega_c \cdot \omega_0}}$$

On obtient au final :

$$\frac{V_S}{i_{Phd}} = -K \cdot \frac{R_F}{1 + j \cdot \omega \cdot \frac{K}{A_0} \left(\frac{1}{\omega_c} + \frac{1}{\omega_0}\right) + (j \cdot \omega)^2 \cdot \frac{K}{A_0} \frac{1}{\omega_c \cdot \omega_0}}$$

Ou

$$\frac{V_S}{i_{Phd}} = -K \cdot \frac{R_F}{1 + j \cdot \omega \cdot \frac{1}{1+A_0} \left(\frac{\omega_c + \omega_0}{\omega_c \cdot \omega_0}\right) + (j \cdot \omega)^2 \cdot \frac{1}{1+A_0} \frac{1}{\omega_c \cdot \omega_0}}$$

5. Calculez les valeurs de la pulsation propre  $\omega_T$ , le facteur d'amortissement  $m_T$  et le gain statique  $G_T$  de ce système.



## Réponse

Ce système est un système du second ordre, de type passe-bas.

$$G_T = K \cdot R_F$$

$$\omega_T = \sqrt{(1 + A_0) \cdot \omega_c \cdot \omega_0}$$

$$m_T = \frac{\omega_T}{(1 + A_0) \cdot \omega_c \cdot \omega_0} \cdot \frac{\omega_c + \omega_0}{2}$$

6. Que deviennent ces valeurs si on suppose que  $A_0 \gg 1$  ?

## Réponse

On a :  $K \approx 1$

Et ainsi :  $G_T \approx R_F$

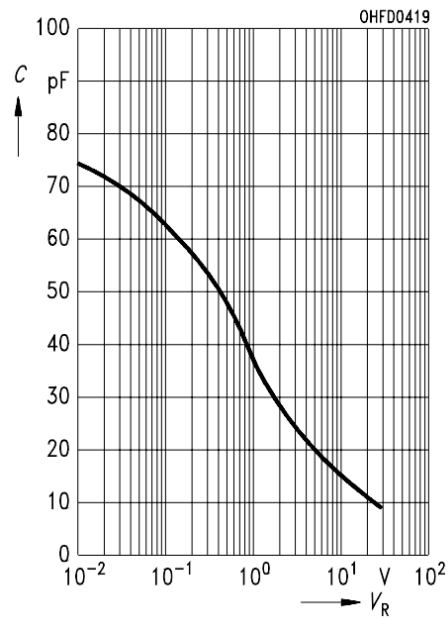
$$\omega_T \approx \sqrt{\omega_c \cdot A_0 \cdot \omega_0} = \sqrt{\omega_c \cdot \omega_{GBP}}$$

$$m_T = \frac{\omega_c + \omega_0}{2 \cdot \omega_T} \approx \frac{1}{2} \cdot \sqrt{\frac{\omega_c}{\omega_{GBP}}}$$

On prendra les valeurs suivantes pour la suite :

$A_0 = 2 \cdot 10^5$ ,  $GBP = 3 \text{ MHz}$ ,  $R_F = 100 \text{ k}\Omega$  et une photodiode de type SFH206 (dont une courbe caractéristique est donnée ci-après).

## Capacitance



7. Que valent  $\omega_T$  et  $m_T$  pour  $V_R = 0 \text{ V}$  ? Pour  $V_R = 30 \text{ V}$  ?

## Réponse

Pour  $V_R = 0 \text{ V}$ , on a  $C_{Phd} = 75 \text{ pF}$ .

On a alors :  $\omega_c = 133.3 \text{ krd/s}$  ( $f_c = 21.2 \text{ kHz}$ ),  $\omega_T = 1.58 \text{ Mrd/s}$  ( $f_T = 252 \text{ kHz}$ ) et  $m_T = 0.04$ .

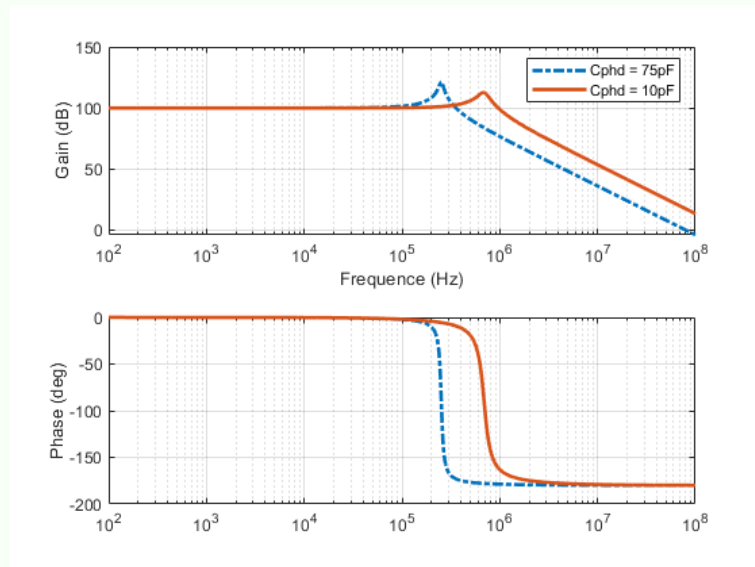
Pour  $V_R = 30 \text{ V}$ , on a  $C_{Phd} = 10 \text{ pF}$ .

On a alors :  $\omega_c = 1 \text{ Mrd/s}$  ( $f_c = 159 \text{ kHz}$ ),  $\omega_T = 4.34 \text{ Mrd/s}$  ( $f_T = 690 \text{ kHz}$ ) et  $m_T = 0.115$ .

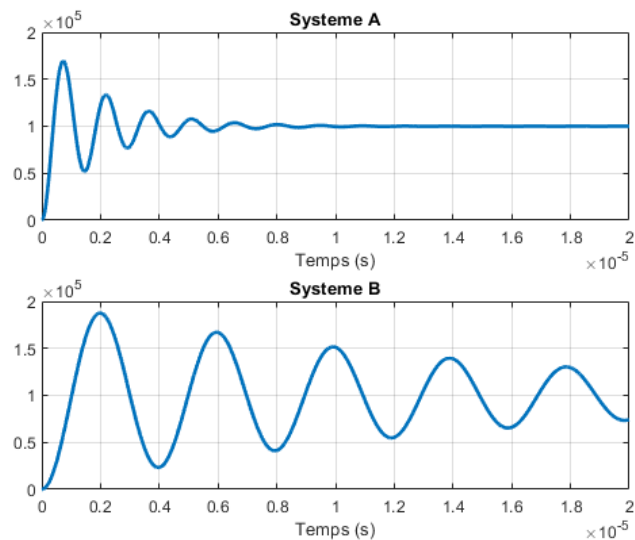
8. Quelles formes ont les réponses en fréquence pour ces deux valeurs de tension de polarisation ?

## Réponse

Réponse en fréquence d'un second ordre avec résonance.



9. Parmi les deux réponses indicielles suivantes, laquelle est celle pour  $V_R = 0 \text{ V}$  ? Pour  $V_R = 30 \text{ V}$  ?



**Réponse**

Le système A correspond à un facteur d'amortissement plus important que le système B.

On peut donc supposer que le système A correspond à  $V_R = 30 \text{ V}$  et le système B à  $V_R = 0 \text{ V}$ .

On pourrait aussi comparer les fréquences des oscillations. Celle du système A est plus grande que le système B. Cela concorde également avec la réponse précédente.