



OPTO-ÉLECTRONIQUE

Travaux Pratiques

Semestre 5

Mettre en œuvre des montages de photodétection

Bloc 3

Mise en œuvre de montages de photodétection

A l'issue des séances de TP et de TD concernant le bloc 3, les étudiant·es seront capables de **mettre en œuvre des montages de photodétection** et de comparer leurs performances fréquentielles et temporelles.

Les sujets de TD ne sont pas inclus dans ce document.

Ce sujet est disponible au format électronique sur le site du LEnSE - <https://lense.institutoptique.fr/> dans la rubrique Année / Première Année / Opto-Electronique S5 / Bloc 3.

Pour cela, ils-elles seront capables de :

- Réaliser un circuit d'émission
 - Caractériser un montage de photodétection (simple, suiveur, transimpédance, transimpédance avec filtrage)
 - Choisir et adapter les éléments d'un montage de photodétection en fonction d'une application donnée
-

Liste des missions

Mission 3.1 Réaliser un circuit d'émission à LED

Mission 3.2 Mettre en œuvre et caractériser un circuit de photodétection simple

Mission 3.3 Mettre en œuvre et caractériser un circuit de photodétection incluant un montage suiveur

Mission 3.4 Mettre en œuvre et caractériser un circuit de photodétection de type transimpédance

Mission 3.5 Mettre en œuvre et caractériser un circuit de photodétection de type transimpédance amélioré

Mission 3.6 Choisir et adapter un montage de photodétection à une application donnée

Liste des autres ressources

- Montage transimpédance : modélisation
- Fiche : Diode / LED / Photodiode
- Fiche : Photodétection
- Fiche : Analyse Harmonique / Ordre 2

Mission 3.1 / Réaliser un circuit d'émission à LED

Durée conseillée : 60 min / Séance 3 ou 4

Objectif de la mission

On se propose de **réaliser un circuit d'émission** d'un flux lumineux pour **transmettre un signal sinusoïdal** et de valider son fonctionnement.

Ressources

Vous pouvez utiliser la fiche résumée suivante :

— **Fiche : Diode / LED / Photodiode**

LED Rouge

On utilisera une LED rouge de type **Kingbrighth L-1503ID** ($V_f = 2\text{ V}$, $I_{fmax} = 25\text{ mA}$).

Mise en oeuvre

→ Q Proposer un montage permettant de faire fonctionner la LED dans sa zone d'émission. Comment choisir la résistance de protection de la LED ?

→ Q Quelle forme de tension appliquée ? Comment régler les différents appareils de mesure pour éviter de dégrader la LED et garantir un flux lumineux sinusoïdal ?

→ M Réaliser le montage.

→ Q Proposer une méthode pour valider le bon fonctionnement de votre montage (sans utiliser de système basé sur la mesure du flux lumineux...).

→ M Valider le fonctionnement du montage.

Livrables

Une **fiche de manipulation** en ligne (partagée dans le cahier de laboratoire) rappelant :

- les choix technologiques réalisés (schémas de câblage et valeur des composants)
- le choix des réglages des instruments (schémas de mesure)
- les courbes obtenues

Une **analyse** du résultat obtenu.

Mission 3.2 / Mettre en œuvre et caractériser un circuit de photodétection simple

Durée conseillée : 90 min / Séance 3 ou 4

Objectif de la mission

On se propose de **réaliser un circuit de photodétection "simple"** et de **caractériser ses performances dynamiques** (réponse en fréquence notamment).

Ressources

— **Fiche : Photodétection**

Circuit à étudier

On se propose d'analyser le circuit ci-contre, avec $R_{PHD} = 100 \text{ k}\Omega$.

→ **Q** Quel est le lien entre V_S et I_{photo} ?
Puis entre I_{photo} et le flux lumineux capté par la photodiode Φ_e ?

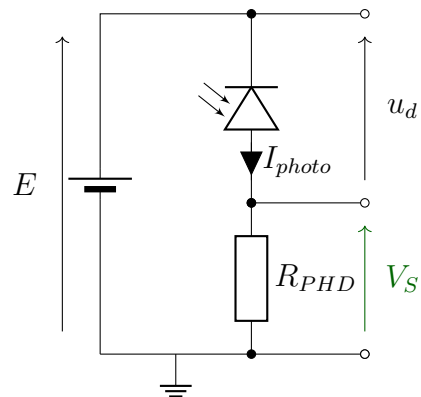
→ **Q** Si le flux lumineux reçu est sinusoïdal, quelle sera la forme de la tension de sortie V_S ? Quelles sont les limites en amplitude de ce montage ?

→ **M** Réaliser le montage. Placer-le devant le montage d'émission réalisé dans la mission 3.1.

→ **M** Relever les formes du courant I_f dans la LED et de la tension V_S pour diverses valeurs de fréquence du signal d'entrée.

→ **Q** Quel est l'impact de E sur la tension de sortie V_S ?

→ **Q** Quelle est la forme théorique de la réponse en fréquence de ce montage ?



Réponse en fréquence

→ **M** Tracer l'allure rapide de la réponse en fréquence en gain de ce système pour des fréquences allant de 100 Hz à 1 MHz.

→ **M** Faire une mesure de la bande-passante du montage.

- M Reproduire les deux précédentes étapes pour des valeurs $R_{PHD} = 10\text{ k}\Omega$ et $R_{PHD} = 1\text{ M}\Omega$.
- Q Quel est alors l'impact de R_{PHD} sur les performances du montage ?

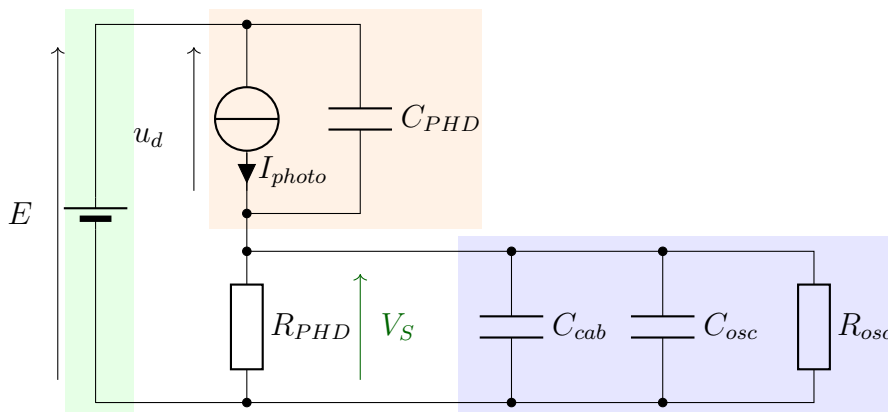
Réponse indicielle

- M Tracer la réponse indicielle de ce système pour les 3 valeurs de résistance proposées précédemment : $R_{PHD} = 10\text{ k}\Omega$, $R_{PHD} = 100\text{ k}\Omega$ et $R_{PHD} = 1\text{ M}\Omega$.
- M Mesurer le temps de réponse à 95% dans chacun des cas.
- Q Comparer les résultats obtenus avec les mesures de bande-passante.

Modélisation

Afin d'expliquer le phénomène observé précédemment, il est possible d'affiner le modèle utilisé pour l'étude du montage précédent en prenant en compte les éléments "perturbateurs".

Voici le modèle plus complet du montage étudié précédemment.



- Q A quoi correspondent les différents éléments présents ?
- Q A partir des mesures réalisées précédemment, comment remonter aux valeurs du modèle précédent ? Donner les valeurs des différents éléments qu'il est possible de calculer.

Livrables

Une **fiche de manipulation** en ligne (partagée dans le cahier de laboratoire) rappelant :

- les protocoles de mesure et de réglage (schémas de mesure, de câblage)
- les tableaux de mesures et les courbes obtenues

Une **analyse** du résultat obtenu, en particulier le lien entre le gain, la bande-passante du montage, le temps de réponse et la valeur de R_{PHD} .

Un **tableau comparatif** de ces différents éléments pour les 3 valeurs de R_{PHD} .

Mission 3.3 / Mettre en œuvre et caractériser un circuit de photodétection incluant un montage suiveur

Durée conseillée : 60 min / Séance 5

Objectif de la mission

On se propose d'améliorer les performances dynamiques du montage précédent en ajoutant un **montage suiveur** (basé sur un amplificateur linéaire intégré) entre le montage simple et les éléments de mesure (oscilloscope).

On souhaite également **vérifier les performances dynamiques** (réponse en fréquence notamment) de ce nouveau montage et conclure sur l'intérêt de l'ajout d'un étage suiveur.

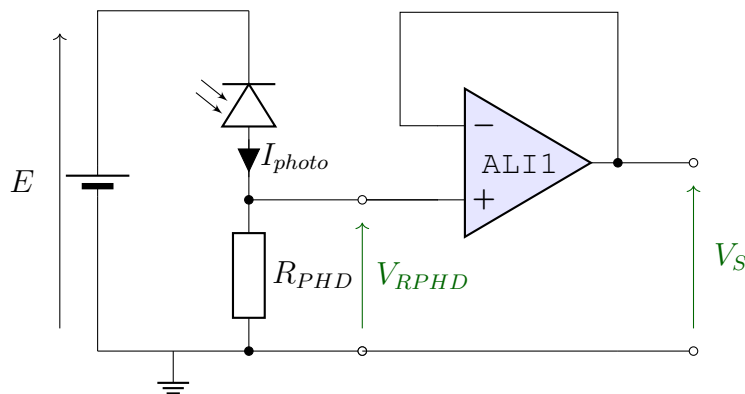
Ressources

Vous pouvez utiliser les fiches résumées suivantes :

- Photodétection
- Amplificateur Linéaire Intégré
- Filtrage du premier ordre

Circuit à étudier

On se propose d'analyser le circuit ci-dessous, avec $R_{PHD} = 100 \text{ k}\Omega$. L'amplificateur linéaire intégré sera alimenté à l'aide d'une alimentation symétrique $+10\text{V} / -10\text{V}$.



→ Q Quel est le lien entre V_S et V_{RPHD} ? Puis entre V_S et I_{photo} ? Puis entre I_{photo} et le flux lumineux capté par la photodiode Φ_e ?

→ Q Quelle est la forme théorique de la réponse en fréquence de ce montage ?

Réponse en fréquence

- M Tracer l'allure rapide de la réponse en fréquence en gain de ce système pour des fréquences allant de 100 Hz à 1 MHz.
- M Faire une mesure de la bande-passante du montage.
- M Reproduire les deux précédentes étapes pour des valeurs $R_{PHD} = 10\text{ k}\Omega$ et $R_{PHD} = 1\text{ M}\Omega$.
- Q Quel est alors l'impact de R_{PHD} sur le montage ?
- Q Quel est l'apport du montage suiveur ?

Livrables

Une **fiche de manipulation** en ligne (partagée dans le cahier de laboratoire) rappelant :

- les protocoles de mesure et de réglage (schémas de mesure, de câblage)
- les tableaux de mesures et les courbes obtenues

Une **analyse** du résultat obtenu, en particulier le lien entre le gain, la bande-passante du montage, le temps de réponse et la valeur de R_{PHD} .

Une **analyse comparative** du montage de photodétection simple (mission 3.2) et d'un montage suiveur (mission 3.3), précisant l'intérêt d'utiliser un tel montage.

Mission 3.4 / Mettre en œuvre et caractériser un circuit de photodétection de type transimpédance

Durée conseillée : 90 min / Séance 5

Objectif de la mission

On se propose d'étudier le **montage transimpédance**, un circuit très fréquemment utilisé pour la photodétection pour ses performances dynamiques. Ce montage est basé sur un amplificateur linéaire intégré également et permet d'augmenter la bande-passante des montages vus précédemment.

On souhaite donc **vérifier les performances dynamiques** (réponse en fréquence notamment) de ce nouveau montage et conclure sur son intérêt.

Afin de faciliter la compréhension des phénomènes mis en jeu dans ce montage, vous pouvez vous reporter à la ressource : **Montage transimpédance : modélisation**.

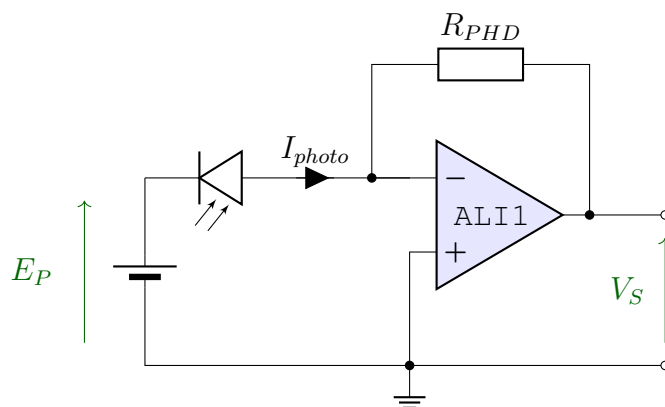
Ressources

Vous pouvez utiliser les fiches résumées suivantes :

- **Photodétection**
- **Amplificateur Linéaire Intégré**

Circuit à étudier

On se propose d'analyser le circuit ci-dessous, avec $R_{PHD} = 100 \text{ k}\Omega$. L'amplificateur linéaire intégré sera alimenté à l'aide d'une alimentation symétrique $+10\text{V} / -10\text{V}$.



→ Q Quel est le lien entre V_S et I_{photo} ? Puis entre I_{photo} et le flux lumineux capté par la photodiode Φ_e ?

Réponse en fréquence

- M Tracer l'allure rapide de la réponse en fréquence en gain de ce système pour des fréquences allant de 100 Hz à 1 MHz.
- M Faire une mesure de la bande-passante du montage.
- M Reproduire les deux précédentes étapes pour des valeurs $R_{PHD} = 10\text{ k}\Omega$ et $R_{PHD} = 1\text{ M}\Omega$.
- Q Quel est alors l'impact de R_{PHD} sur le montage ?

Réponse indicielle

- M Tracer la réponse indicielle de ce système pour les 3 valeurs de résistance proposées précédemment : $R_{PHD} = 10\text{ k}\Omega$, $R_{PHD} = 100\text{ k}\Omega$ et $R_{PHD} = 1\text{ M}\Omega$.
- M Mesurer le temps de réponse à 95% dans chacun des cas.
- Q Comparer les résultats obtenus avec les mesures de bande-passante.

Livrables

Une **fiche de manipulation** en ligne (partagée dans le cahier de laboratoire) rappelant :

- les protocoles de mesure et de réglage (schémas de mesure, de câblage)
- les tableaux de mesures et les courbes obtenues

Une **analyse** du résultat obtenu, en particulier le lien entre le gain, la bande-passante du montage, le temps de réponse et la valeur de R_{PHD} .

Une **analyse comparative** des montages de photodétection simple (mission 3.2), avec un montage suiveur (mission 3.3) et transimpédance (mission 3.4), précisant l'intérêt d'utiliser un tel montage.

Mission 3.5 / Mettre en œuvre et caractériser un circuit de photodétection de type transimpédance amélioré

Durée conseillée : 60 min / Séance 5

Objectif de la mission

On se propose de **s'affranchir d'un des défauts majeur du montage transimpédance**. On souhaite donc **vérifier les performances dynamiques** (réponse en fréquence notamment) de ce nouveau montage et conclure sur son intérêt.

Afin de faciliter la compréhension des phénomènes mis en jeu dans ce montage, vous pouvez vous reporter à la ressource : **Montage transimpédance : modélisation**.

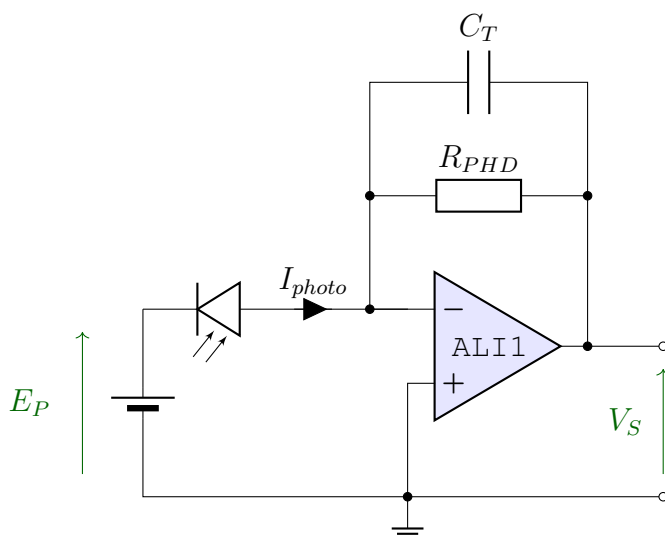
Ressources

Vous pouvez utiliser les fiches résumées suivantes :

- **Photodétection**
- **Amplificateur Linéaire Intégré**

Circuit à étudier

On se propose d'analyser le circuit ci-dessous, avec $R_{PHD} = 100 \text{ k}\Omega$. L'amplificateur linéaire intégré sera alimenté à l'aide d'une alimentation symétrique $+10\text{V} / -10\text{V}$.



→ Q Quelle valeur de C_T faut-il pour éliminer le phénomène de résonance ?

Réponse en fréquence

→ M Tracer l'allure rapide de la réponse en fréquence en gain de ce système pour des fréquences allant de 100 Hz à 1 MHz.

→ M Faire une mesure de la bande-passante du montage.

Réponse indicielle

→ M Tracer la réponse indicielle de ce système.

Livrables

Une **fiche de manipulation** en ligne (partagée dans le cahier de laboratoire) rappelant :

- les protocoles de mesure et de réglage (schémas de mesure, de câblage)
- les tableaux de mesures et les courbes obtenues

Une **analyse** du résultat obtenu.

OPTO-ÉLECTRONIQUE

Travaux Pratiques

Semestre 5

Ressources

Bloc 3

Liste des ressources

- Montage transimpédance : modélisation
- Fiche : Diode / LED / Photodiode
- Fiche : Photodétection
- Fiche : Analyse Harmonique / Ordre 2

Systèmes bouclés simples : les circuits à amplificateurs opérationnels. Exemple du transimpédance.

Fabienne BERNARD
lense.institutoptique.fr

12 novembre 2023

Pourquoi un circuit de photodétection fait-il apparaître parfois un phénomène de résonance ? Comment prédire la valeur de la fréquence de cette résonance ? Comment l'éviter ?

Modèle du circuit sous forme de système bouclé

Le schéma d'un circuit transimpédance utilisé pour mettre en forme le signal provenant d'une photodiode est donné sur la figure ci-dessous :

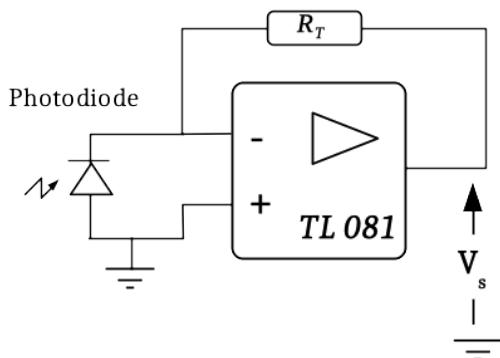
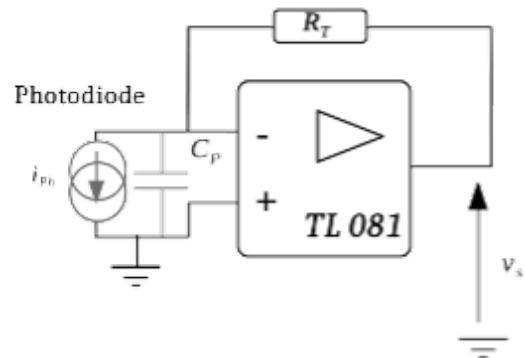


Schéma du circuit transimpédance



Modèle du circuit. La photodiode est modélisée par une source de courant et une capacité parasite C_p .

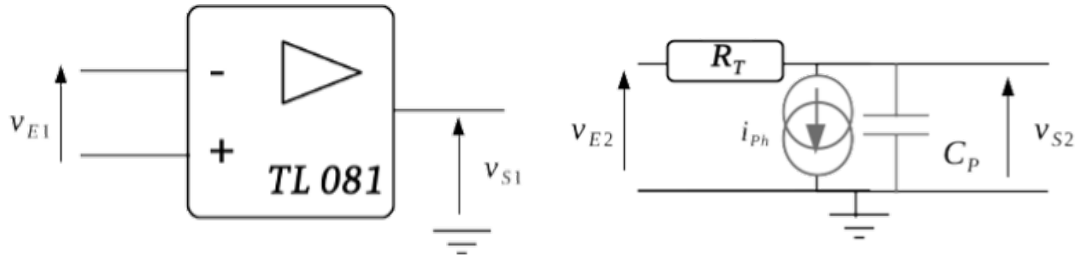
FIGURE 1 – Circuit transimpédance

Pour expliquer le phénomène de résonance qui apparaît dans ce type de circuits, il est nécessaire de ne pas se contenter du modèle de l'amplificateur "idéal". Le modèle simple de la dynamique de l'amplificateur opérationnel est celui d'un circuit passe-bas du premier ordre. L'amplificateur opérationnel peut être modélisé par un filtre passe-bas de très grand gain et de faible bande passante, sa réponse en fréquence s'écrit :

$$A(j\omega) = \frac{A0}{1 + j\frac{\omega}{\omega_0}}$$

Le produit $GBP = A0 * f_0$ est appelé *Produit Gain bande-passante* (ou *unity gain bandwidth*). Par exemple, pour un TL081, la valeur de cette grandeur est $GBP = 3 \text{ MHz}$. Le gain $A0$ est de $1,5 \cdot 10^5$ environ, et donc $f_0 = 20 \text{ Hz}$ environ (voir [documentation](#)). Pour l'étude de la résonance, on peut séparer le circuit en 2 parties, comme sur la figure 2 ci-dessous. On note :

$$\omega_c = \frac{1}{R_T C_P}$$



$$v_{S1} = \frac{A_0}{1+j\frac{\omega}{\omega_0}} \cdot v_{E1}$$

$$v_{S2} = \frac{1}{1+j\frac{\omega}{\omega_c}} \cdot v_{E2} - \frac{R_T}{1+j\frac{\omega}{\omega_c}} \cdot i_{ph}$$

FIGURE 2 – Décomposition du circuit transimpédance en deux sous-circuits

Le circuit complet est l'association des 2 circuits de la figure 2, bouclés l'un sur l'autre (Figure 3) avec :

$$v_{E2} = v_{S1}$$

$$v_{E1} = -v_{S2}$$

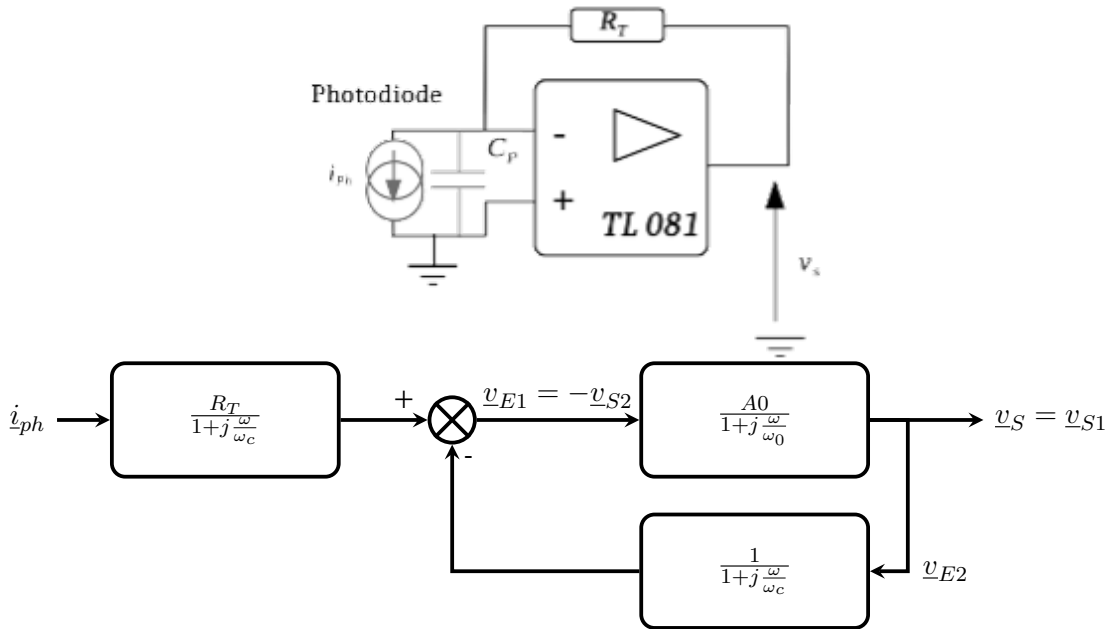


FIGURE 3 – Modèle du circuit transimpédance sous forme d'un système bouclé

Fréquence de résonance

On peut alors en calculer la réponse en fréquence :

$$v_S = \frac{R_T \cdot A_0}{\left(1 + j\frac{\omega}{\omega_0}\right) \left(1 + j\frac{\omega}{\omega_c}\right) + A_0} \cdot i_{ph}$$

On obtient l'expression d'une fonction de transfert du second ordre. Cette expression peut être réécrite :

$$v_S = \frac{R_T \cdot \frac{A_0}{A_0+1}}{1 - \frac{\omega^2}{(A_0+1)\omega_0\omega_c} + j\omega \frac{\omega_0+\omega_c}{(A_0+1)\omega_0\omega_c}} \cdot i_{ph}$$

Pour les faibles fréquences, on retrouve :

$$V_S \approx R_T \cdot I_{ph}$$

La pulsation propre de cette fonction est égale à

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

et son facteur de qualité :

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

Le gain A_0 de l'amplificateur est de l'ordre de 10^5 , sa bande passante est très faible (quelques dizaines de Hz), on peut donc légitimement faire les approximations :

$$A_0 + 1 \approx A_0 \quad \omega_0 + \omega_c \approx \omega_c$$

et obtenir ainsi des valeurs approchées de la fréquence propre du circuit transimpédance :

$$f_{\text{TransImp}} \approx \sqrt{f_c \cdot \text{GBP}}$$

ainsi que celle de son facteur de qualité :

$$Q_{\text{TransImp}} \approx \sqrt{\frac{\text{GBP}}{f_c}}$$

On voit donc que dès que la fréquence caractéristique du circuit formé par la résistance de charge R_T et de la capacité parasite de la photodiode C_P est inférieure au produit gain bande passante de l'AOP, un phénomène de résonance peut apparaître, créateur d'oscillations parasites.

Par exemple, une photodiode ayant une capacité parasite de 10 pF, câblée sur un circuit transimpédance avec une résistance de charge de 100 k Ω ($f_c = 160$ kHz) et un amplificateur opérationnel TL081 de produit gain-bande-passante GBP = 3 MHz, verra un phénomène de résonance ($Q = 4,3$; pic de 12dB) apparaître à une fréquence proche de 700 kHz.

Ajout d'un condensateur anti-résonance

Comment éviter les résonances dans un circuit de photodétection ? La méthode couramment employée est de rajouter un condensateur de faible capacité C_T en parallèle de la résistance de charge R_T selon le schéma de la figure 4 :

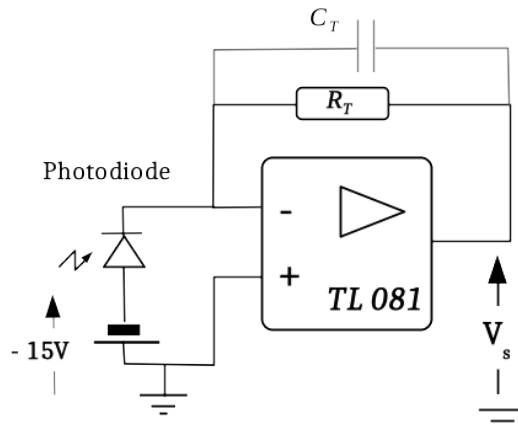


FIGURE 4 – Montage transimpédance avec condensateur de faible capacité ajouté en parallèle de la résistance de charge

Le schéma-bloc décrivant la réponse en fréquence de ce circuit est donné sur la figure 5ci dessous :

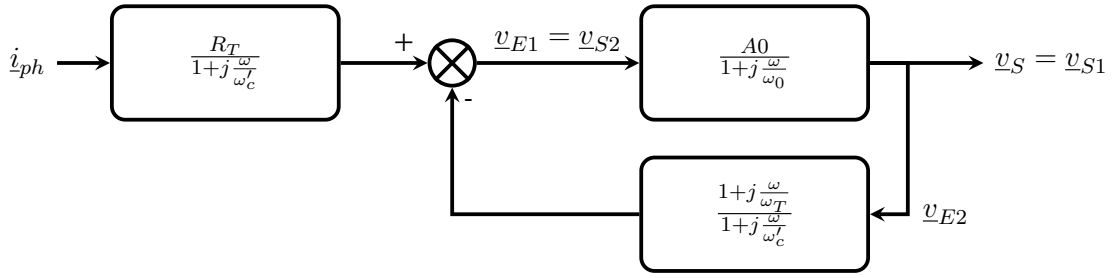


FIGURE 5 – Schéma bloc du circuit transimpédance avec condensateur anti-résonance. On note $\omega'_c = \frac{1}{R_T(C_p + C_T)}$ et $\omega_T = \frac{1}{R_T C_T}$.

Et la réponse en fréquence de ce circuit est à nouveau du deuxième ordre :

$$\underline{v}_S = \frac{R_T \cdot A_0}{\left(1 + j \frac{\omega}{\omega_0}\right) \left(1 + j \frac{\omega}{\omega'_c}\right) + A_0 \left(1 + j \frac{\omega}{\omega_T}\right)} \cdot \underline{i}_{ph}$$

La pulsation propre est faiblement modifiée :

$$\sqrt{\omega'_c \cdot (A_0 + 1) \omega_0}$$

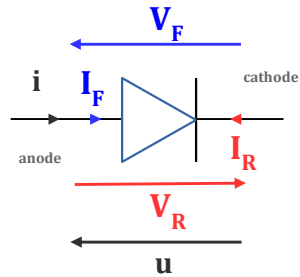
et l'expression du facteur de qualité devient plus complexe :

$$\sqrt{\frac{(A_0 + 1) \omega_0}{\omega'_c} \cdot \frac{\omega_T + A_0 \omega_0}{\omega_T}}$$

En choisissant de façon adéquate la valeur de la capacité C_T , on peut obtenir un circuit non résonant, non oscillant. En général, on prend une valeur la plus petite possible vérifiant :

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

DIODE



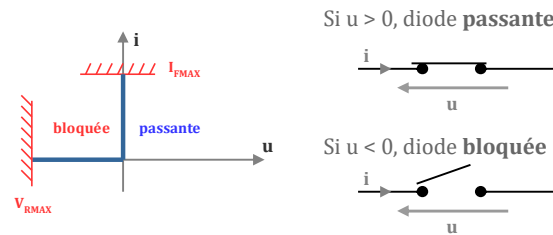
I_F : **courant direct**
souvent $I_F < I_{FMAX}$

V_F : **tension directe**
aussi appelée seuil

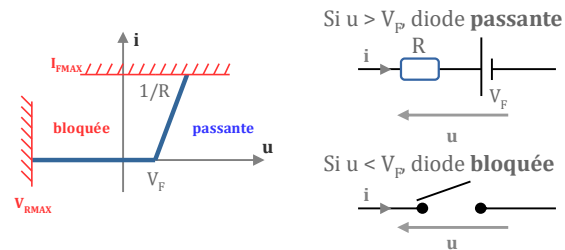
I_R : **courant inverse**

V_R : **tension inverse**
souvent $V_R < V_{RMAX}$

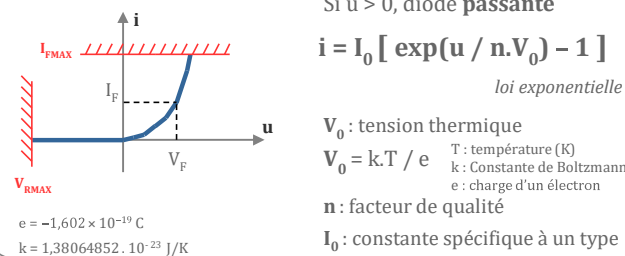
MODÈLE IDÉAL



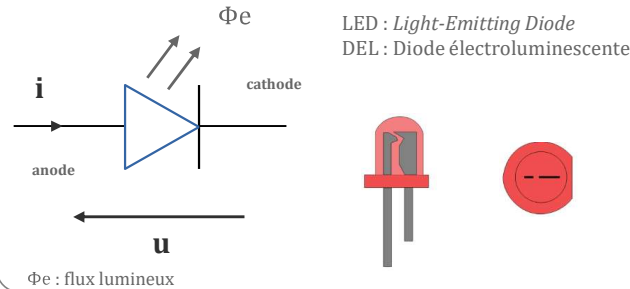
MODÈLE SIMPLE



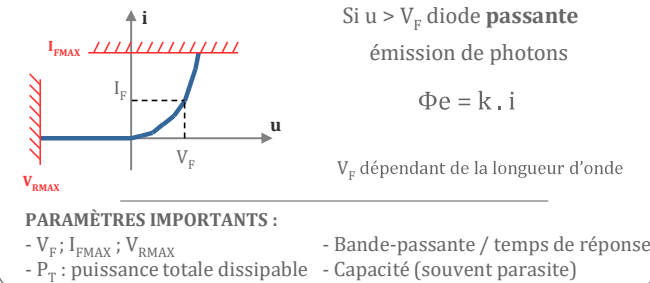
MODÈLE COMPLET



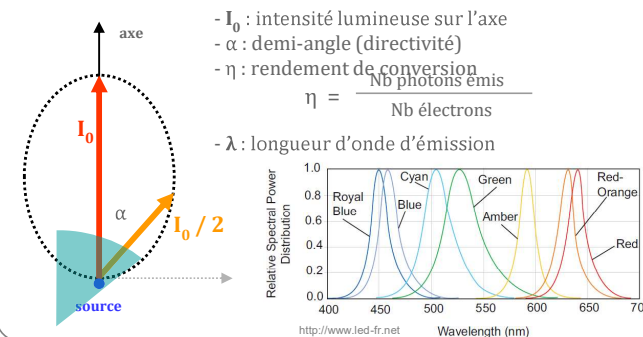
LED



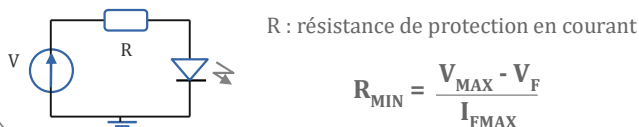
CARACTÉRISTIQUES ÉLECTRIQUES



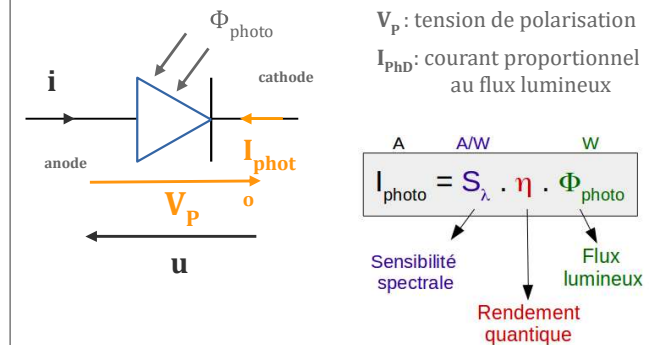
CARACTÉRISTIQUES OPTIQUES



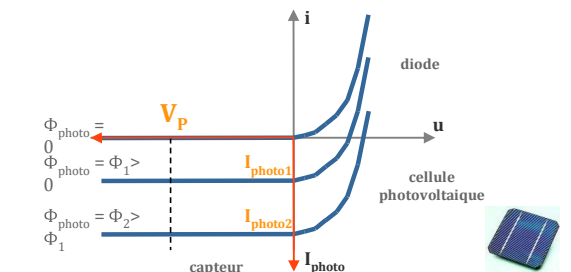
EN PRATIQUE



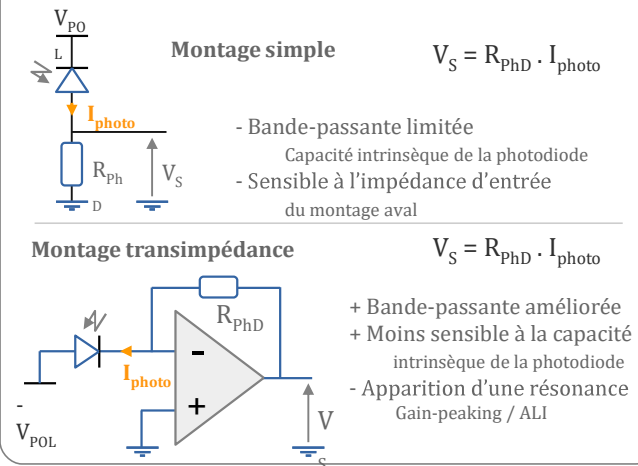
PHOTODIODE



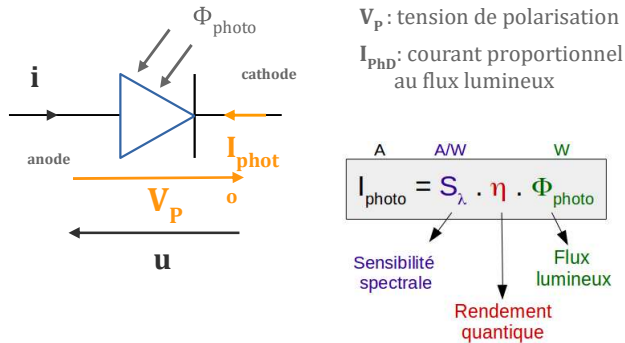
CARACTÉRISTIQUES ÉLECTRIQUES



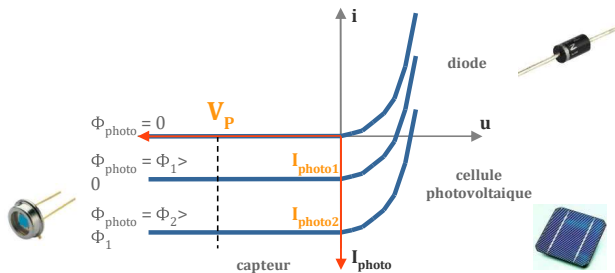
EN PRATIQUE



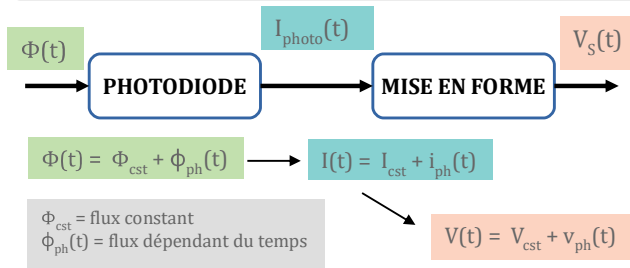
PHOTODIODE = CAPTEUR



CARACTÉRISTIQUES ÉLECTRIQUES



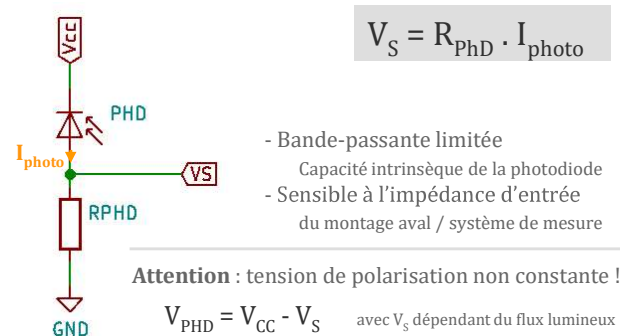
SYSTÈME DE PHOTODÉTECTION



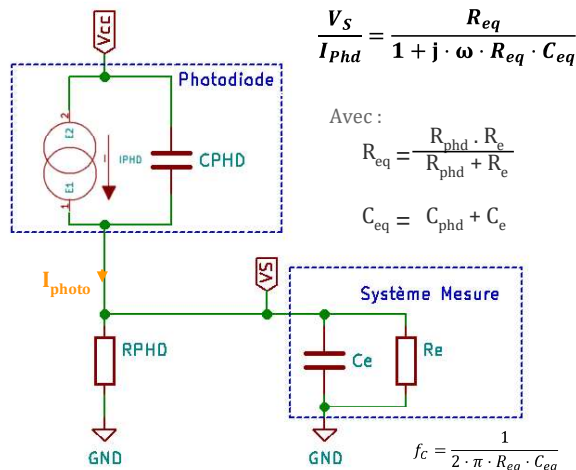
Photodiode : capteur permettant de mesurer un flux lumineux et de le convertir en courant

Mise en forme : étage de conversion d'une grandeur électrique vers une autre grandeur électrique plus facilement mesurable (amplification, filtrage...)

MONTAGE « SIMPLE »

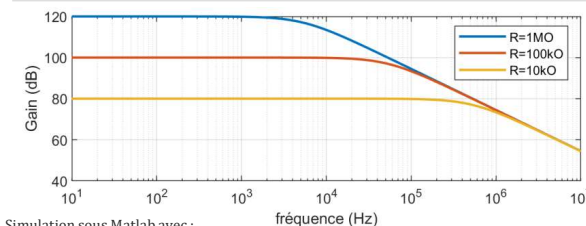


MODÈLE DU SYSTÈME DE MESURE



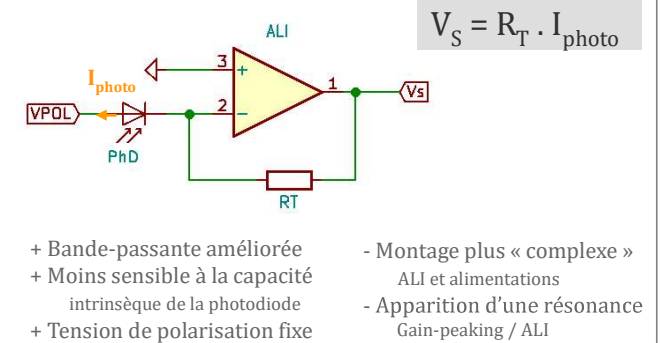
R_e : résistance d'entrée du système de mesure (oscilloscope, multimètre...)

C_e : capacité d'entrée du système de mesure (câble coaxial, oscilloscope...)

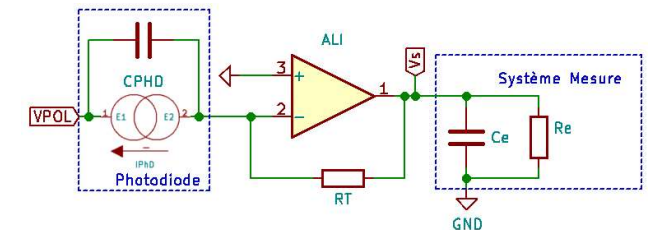


Simulation sous Matlab avec :
 $R_e = 100M / C_{nhd} = 70pF / C_e = 120pF$

MONTAGE TRANSIMPÉDANCE



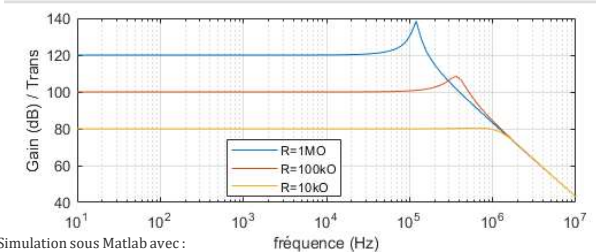
MODÈLE DU SYSTÈME DE MESURE



$$\frac{V_S}{I_{Phd}} = \frac{R_T \cdot A_0}{\left(1 + \frac{j \cdot \omega}{\omega_0}\right) \cdot \left(1 + \frac{j \cdot \omega}{\omega_c}\right) + A_0}$$

En utilisant le modèle du premier ordre pour l'amplificateur intégré (A_0, w_0)

Gain-peaking : $f_T = \sqrt{f_c \cdot GBP}$ avec $f_c = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R_{pHD} \cdot C_{pHD}}$



Simulation sous Matlab avec :
 $R_e = 100M / C_{phd} = 70pF / C_e = 120pF$

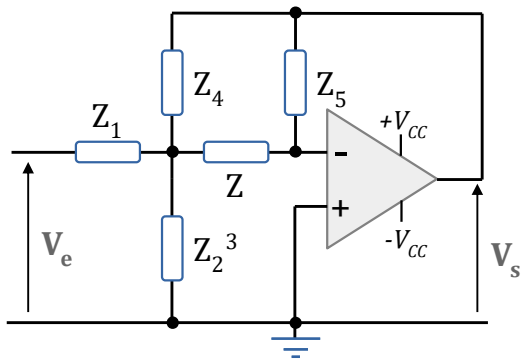
Filtrage actif / Analyse harmonique / Ordre 2

FILTRE ORDRE 2 / FORMES CANONIQUES

PARAMÈTRES

A : amplification dans la bande passante
f_c : fréquence caractéristique du filtre $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$
m : facteur d'amortissement
Q : facteur de qualité $m = 1/2Q$

STRUCTURE DE RAUCH



FONCTION DE TRANSFERT

$$T(j\omega) = \frac{Y_1 \cdot Y_3}{(Y_3 \cdot Y_4) + Y_5 \cdot (Y_1 + Y_2 + Y_3 + Y_4)}$$

TYPES / A = -1

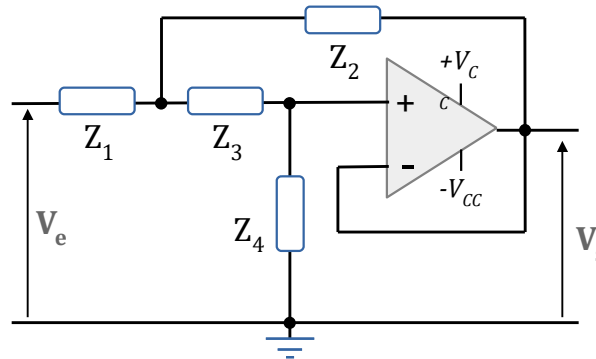
Passe-bas : $Z_1 : R / Z_2 : C_2 / Z_3 : R / Z_4 : R / Z_5 : C_5$
 $\omega_c = 1 / R \sqrt{C_2 C_5}$ $m = \frac{3}{2} \sqrt{\frac{C_5}{C_2}}$

Passe-haut : $Z_1 : C / Z_2 : R_2 / Z_3 : C / Z_4 : C / Z_5 : R_5$
 $\omega_c = 1 / C \sqrt{R_2 R_5}$ $m = \frac{3}{2} \sqrt{\frac{R_2}{R_5}}$

PASSE-HAUT

$$T_{HP}(j\omega) = \frac{A \cdot \left(j \frac{\omega}{\omega_c}\right)^2}{1 + 2 \cdot m \cdot j \frac{\omega}{\omega_c} + \left(j \frac{\omega}{\omega_c}\right)^2}$$

STRUCTURE DE Sallen-Key



FONCTION DE TRANSFERT

$$T(j\omega) = \frac{Y_1 \cdot Y_3}{(Y_1 + Y_2) \cdot (Y_3 + Y_4) + Y_3 \cdot (Y_4 - Y_2)}$$

TYPES / A = 1

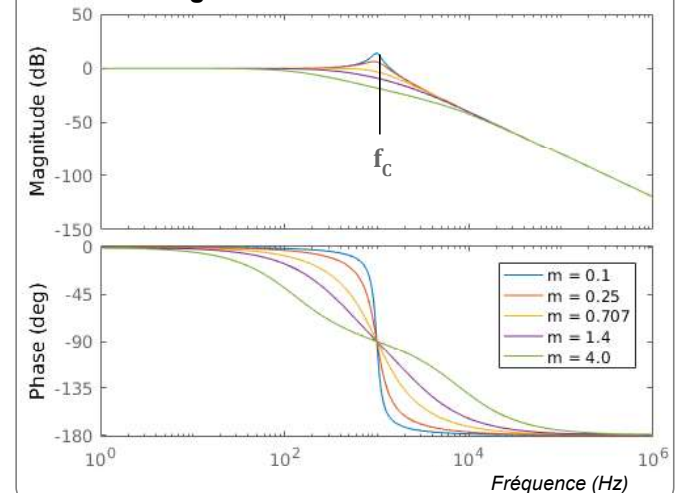
Passe-bas : $Z_1 : R_1 / Z_2 : C_2 / Z_3 : R_3 / Z_4 : C_4$
 $\omega_c = 1 / \sqrt{R_1 R_3 C_2 C_4}$ $m = \frac{C_4 (R_1 + R_3)}{2 \sqrt{R_1 R_3 C_2 C_4}}$

Passe-haut : $Z_1 : C_1 / Z_2 : R_2 / Z_3 : C_3 / Z_4 : R_4$
 $\omega_c = 1 / \sqrt{R_2 R_4 C_1 C_3}$ $m = \frac{R_2 (C_1 + C_3)}{2 \sqrt{R_2 R_4 C_1 C_3}}$

PASSE-BAS

$$T_{LP}(j\omega) = \frac{A}{1 + 2 \cdot m \cdot j \frac{\omega}{\omega_c} + \left(j \frac{\omega}{\omega_c}\right)^2}$$

Diagramme de Bode / Passe-Bas



PASSE-BANDE

$$T_{BP}(j\omega) = \frac{A \cdot 2 \cdot m \cdot j \frac{\omega}{\omega_c}}{1 + 2 \cdot m \cdot j \frac{\omega}{\omega_c} + \left(j \frac{\omega}{\omega_c}\right)^2}$$

Largeur de la bande-passante (3 dB) $\Delta\omega = 2 m \omega_c$

