
LABORATOIRES ELECTRONIQUES TP4

ANNEXES

PRÉAMBULE

Vous trouverez les caractéristiques physiques et le pin out de la led et de la photodiode dans les datasheets des composants. Pour des questions d'approvisionnement il est possible que le type de ces composants soit différents de celui du schéma, si les caractéristiques techniques peuvent être différentes, le sens de connexion et le principe de fonctionnement restent identiques.

PHOTODIODE

Sans rentrer dans les détails physiques du fonctionnement de ce genre de composant voyons d'un point de vue électrique comment nous devons l'utiliser. On distingue deux modes de fonctionnement pour des composants : le mode « photovoltaïque » et le mode « photodiode » qui nous intéresse ici.

MODE PHOTOVOLTAÏQUE

Sans polarisation (sans alimentation DC externe) la diode fonctionne comme une cellule solaire, et génère une tension à ses bornes dépendante de l'intensité du flux arrivant sur la jonction et de la charge associée.

MODE PHOTODIODE OU PHOTOCONDUCTEUR

Le composant est cette fois-ci polarisé en sens inverse (d'où le -15V sur l'anode). Ici c'est un courant inverse qui est généré en fonction de l'intensité du flux reçu. Pour la compréhension du phénomène nous pouvons considérer notre photodiode comme une source de courant dont l'intensité est modulée par l'intensité du flux auquel elle est exposée.

Pour plus d'informations sur ces composants vous pouvez vous reporter à la page web suivante :

<https://www.digikey.fr/fr/articles/the-basics-of-photodiodes-and-phototransistors-and-how-to-apply-them>

CONVERSION I-U

Notre convertisseur I->U ressemble alors au circuit suivant, la photodiode étant remplacée par une source de courant pulsée qui simulera son comportement. Le niveau du pulse de courant est fixé à 2uA pour la simulation et la polarisation est respectée, c'est-à-dire que le courant circule dans le sens des flèches rouges figurant sur le schéma.

PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

Nous supposons l'amplificateur idéal.

- Nous savons que l'AO va maintenir une tension de 0V entre ses entrées « + et - » (les bornes 2 et 3) grâce au montage en contre réaction. L'entrée 3 étant polarisée au GND il s'ensuit que l'entrée 2 est au même potentiel (0V). Ce point est communément appelé masse virtuelle, car il se comporte comme une masse sans y être connecté.
- Le courant issu de la source de courant (la photodiode) ne peut pas passer par l'entrée « - » de l'AO, (impédance d'entrée infinie).
- Le seul chemin restant est celui qui s'établit via la contre réaction (via R1)

- En passant par $R1$ le courant $I1$ crée une tension proportionnelle à $U=R1I1$.
- Il en résulte que la tension à la sortie, en vertu du sens du courant et par rapport au 0V de la masse virtuelle vaut $U_{out} = R1I1$ soit ici $U_{out} = 1e6 * 2e-6 = 2$ [V].

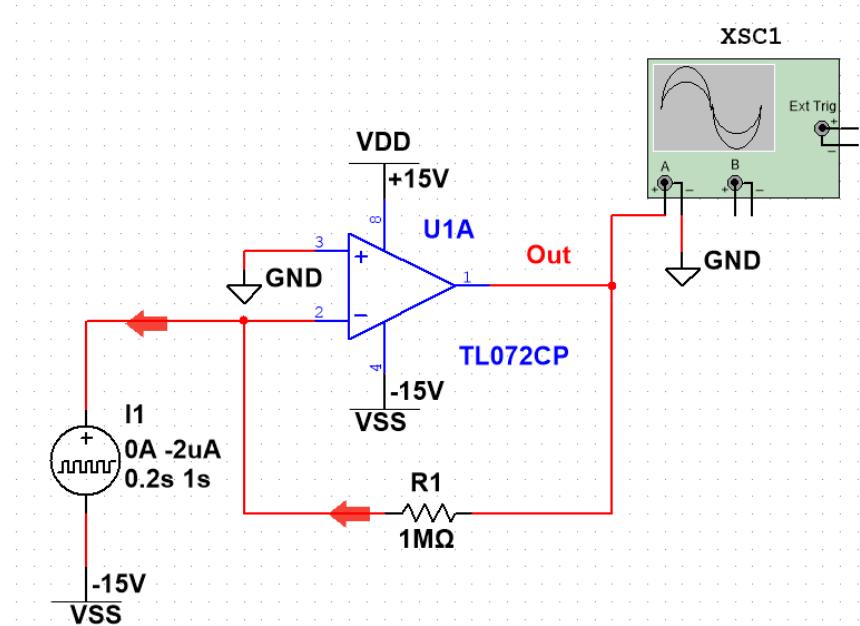


FIGURE 1 CONVERTISSEUR I-U

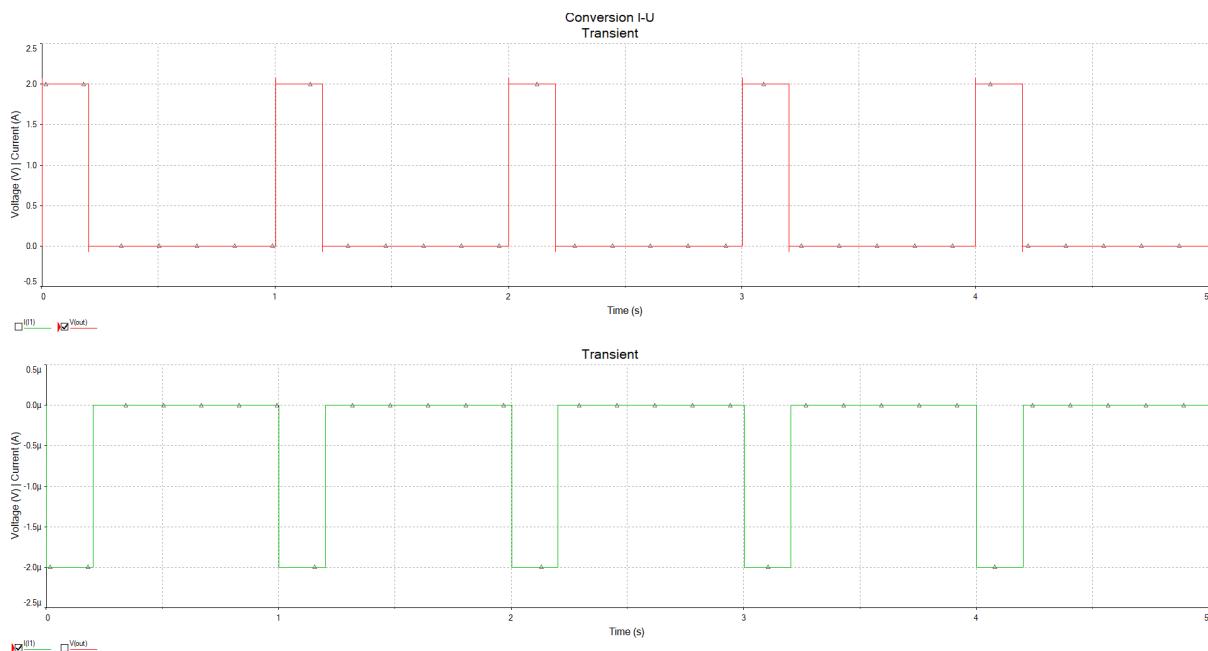


FIGURE 2 SIMULATION CONVERTISSEUR I-U

DÉTECTEUR DE PULSATIONS CARDIAQUES

SCHÉMA

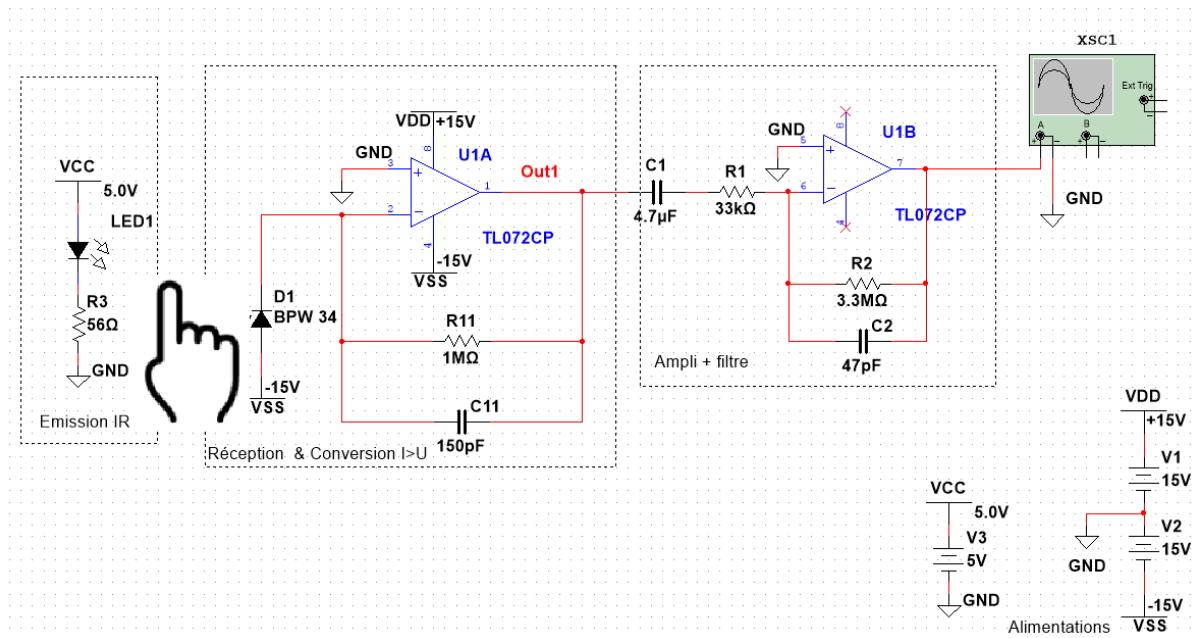


FIGURE 3 DETECTEUR DE PULSES CARDIAQUES

Le principe de conversion I-U reste identique sur ce montage, seul est adjoint un second étage servant à amplifier le signal issu du premier étage en plus d'introduire un filtrage supplémentaire.

GAIN & FILTRAGE

Cette partie du circuit est réarrangée en vue d'une simulation, sur le principe il fonctionne exactement comme le second étage de la figure 3.

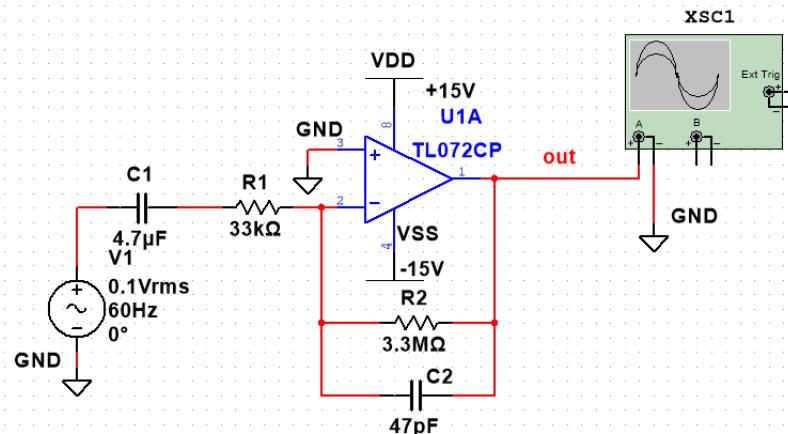


FIGURE 4 FILTRE REARRANGÉ POUR LA SIMULATION

FONCTION DE TRANSFERT

Nous désirons réaliser un filtre de type passe bande avec un gain de 100 en bande passante, une fréquence de coupure basse de $f_1=1$ [Hz] et une fréquence de coupure haute de $f_2=1$ [kHz]. Ainsi la fonction de transfert dessinée avec les asymptotes devrait avoir la forme suivante

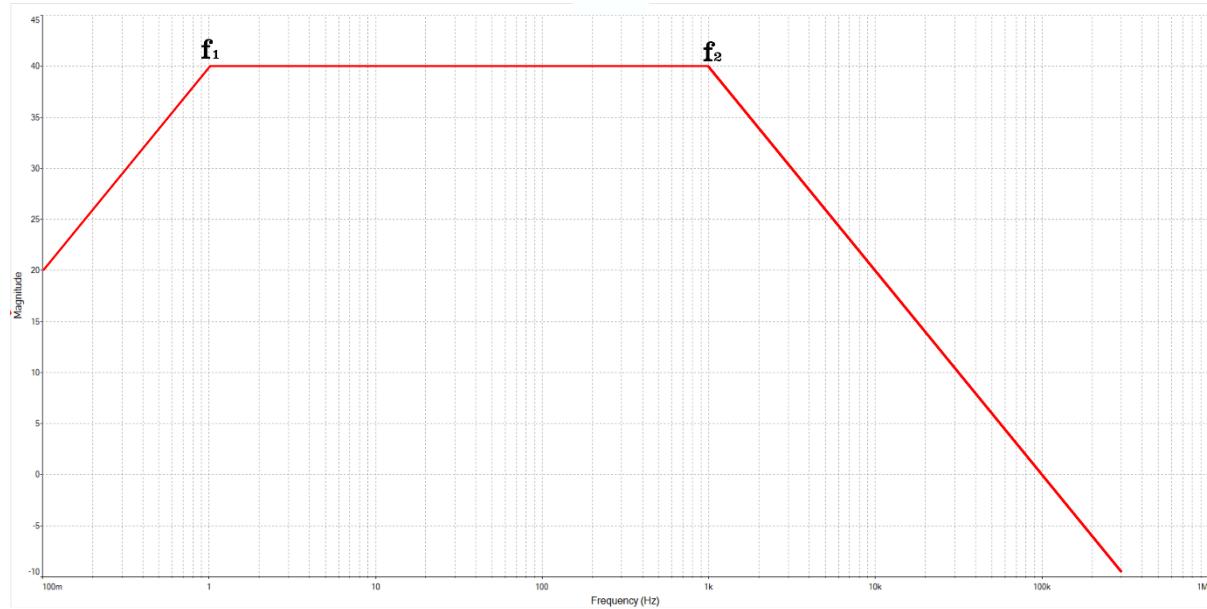


FIGURE 5 GABARIT DU FILTRE 2ÈME ÉTAGE

D'un point de vue électrique nous pouvons considérer le schéma équivalent suivant, avec Z_1 l'impédance résultant de la mise en série de la capacité C_1 et de la résistance R_1 et Z_2 celle résultant de la mise en parallèle de C_2 et de R_2 .

Reconnaissant un montage inverseur nous savons que le gain de cet ampli peut s'écrire comme :

$$\underline{H}(j\omega) = -\frac{Z_2(j\omega)}{Z_1(j\omega)}$$

avec

$$\underline{Z}_1(j\omega) = R_1 + \frac{1}{j\omega C_1} = \frac{1 + j\omega R_1 C_1}{j\omega C_1}$$

et

$$\underline{Z}_2(j\omega) = \frac{\frac{1}{R_2 j\omega C_2}}{\frac{1}{R_2} + \frac{1}{j\omega C_2}} = \frac{R_2}{1 + j\omega R_2 C_2}$$

En remplaçant dans $\underline{H}(j\omega)$ et en réarrangeant on obtient

$$\underline{H}(j\omega) = -\frac{\underline{Z}_2}{\underline{Z}_1} = -\frac{R_2}{1 + j\omega R_2 C_2} \cdot \frac{j\omega C_1}{1 + j\omega R_1 C_1} = -\frac{R_2}{R_1} \cdot \frac{1}{1 + j\omega R_2 C_2} \cdot \frac{j\omega R_1 C_1}{1 + j\omega R_1 C_1}$$

En posant $\omega_1 = \frac{1}{R_1 C_1}$ et $\omega_2 = \frac{1}{R_2 C_2}$ on peut écrire

$$\underline{H}(j\omega) = -\frac{R_2}{R_1} \cdot \frac{1}{1 + j\frac{\omega}{\omega_2}} \cdot \frac{j\frac{\omega}{\omega_1}}{1 + j\frac{\omega}{\omega_1}}$$

Où nous pouvons reconnaître différents blocs que nous avons l'habitude de tracer

- a) $-\frac{R_2}{R_1}$ est un gain constant sur toute la plage de fréquence sa valeur en dB vaut $G_{DC} = 20 \cdot \log \frac{R_2}{R_1}$. Pour mémoire, le signe « - » indique un changement de phase de 180° et n'apparaît que sur le Bode de phase.
- b) $\frac{1}{1+j\omega R_2 C_2}$ est une fonction de transfert passe-bas avec un pôle en $\omega_2 = \frac{1}{R_2 C_2}$ [rad/s] que nous exprimons plus volontiers sous sa forme de fréquence $f_2 = \frac{1}{2\pi R_2 C_2}$ [Hz]
- c) $\frac{j\omega R_1 C_1}{1+j\omega R_1 C_1}$ est une fonction de transfert de type passe-haut ayant comme pulsation de coupure $\omega_1 = \frac{1}{R_1 C_1}$ [rad/s] et donc une fréquence de coupure $f_1 = \frac{1}{2\pi R_1 C_1}$ [Hz].

CONTRAINTEs

Sur le bloc a) en termes de contraintes nous désirons un gain DC de 100 (valeur absolue). S'agissant d'un rapport de résistances beaucoup de valeurs peuvent répondre à cette attente. Nous choisissons de fixer la valeur de la résistance la plus élevée **R₂=3.3 [MΩ]**, donc

$$R_1 = \frac{R_2}{G_{DC}} = \frac{3.3 \cdot 10^6}{100} = 33 \text{ [kΩ]}$$

Les blocs b) et c) vont permettre de fixer les limites du filtre passe bande, la valeur de la fréquence basse étant fixée par f_1 , et celle de la fréquence de coupure haute par f_2 .

Connaissant maintenant les valeurs des résistances, il reste à déterminer les valeurs des capacités associées au fréquence de coupure.

Ainsi

$$C_1 = \frac{1}{2\pi R_1 f_1} = \frac{1}{2\pi \cdot 33 \cdot 10^3} \cong 4.8 \text{ [uF]} \text{ (val. Normalisée 4.7uF)}$$

Et

$$C_2 = \frac{1}{2\pi R_2 f_2} = \frac{1}{2\pi \cdot 3.3 \cdot 10^6} \cong 48 \text{ [pF]} \text{ (val. Normalisée 47pF)}$$

TRACÉ THÉORIQUE DU BODE D'AMPLITUDE

On peut passer au tracé théorique des asymptotes de notre diagramme de Bode en amplitude

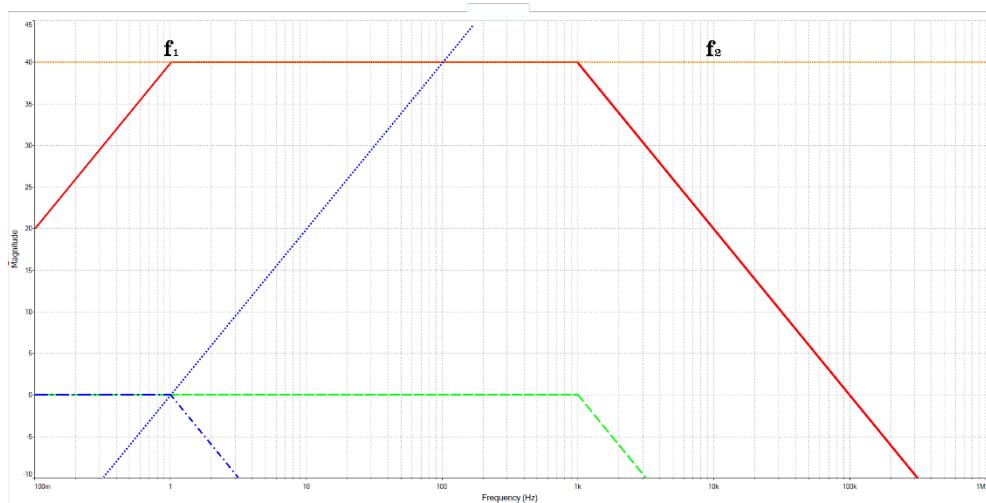


FIGURE 6 TRACÉ DIAGRAMME DE BODE FILTRE

Sur ce tracé en dB on trouve

- En orange le tracé du module de l'expression $-\frac{R_2}{R_1}$
- En bleu le tracé du module de l'expression $\frac{j\omega R_1 C_1}{1+j\omega R_1 C_1}$ avec son numérateur et son dénominateur
- En vert le tracé du module de l'expression $\frac{1}{1+j\omega R_2 C_2}$
- En rouge la somme résultante qui doit correspondre à notre gabarit.

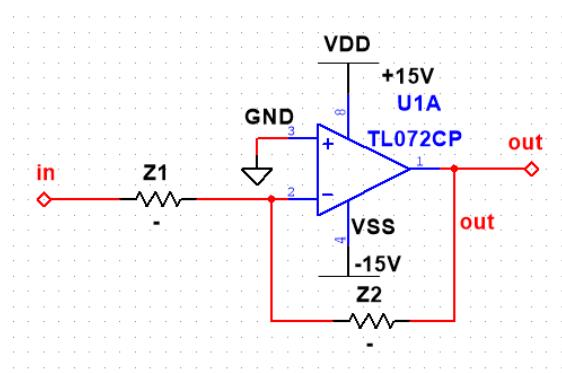


FIGURE 7 AMPLI FILTRE AVEC IMPÉDANCES SIMPLIFIÉES

SIMULATION

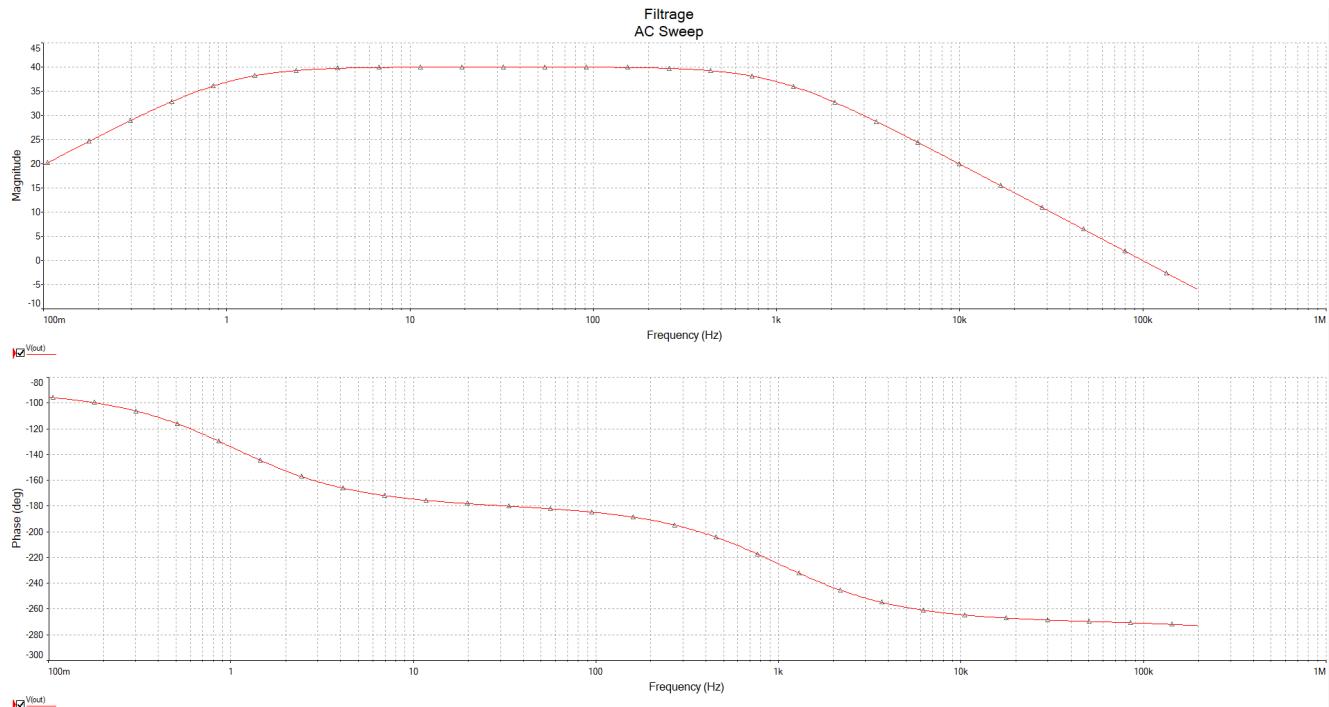


FIGURE 8 FILTRAGE BODE EN AMPLITUDE ET EN PHASE

La simulation confirme les performances du circuit avec les composants choisis.

FONCTION DE TRANSFERT GLOBALE

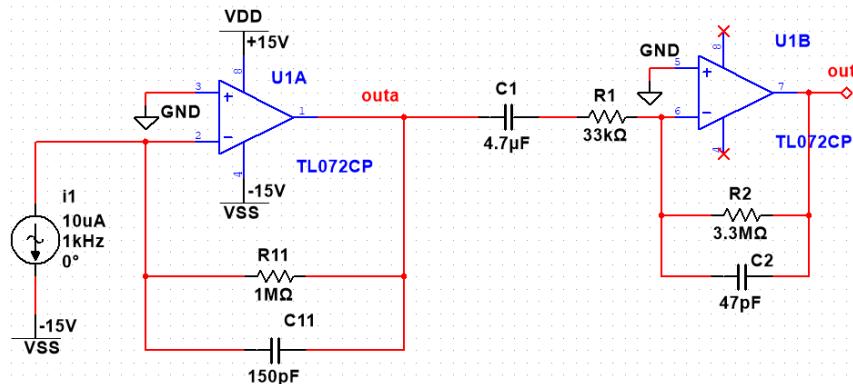


FIGURE 9 PULSES CARDIAQUES SYSTEME

Le schéma ci-dessous est réarrangé pour être simulé. Nous avons établi la fonction de transfert du filtre (2ème étage) mais qu'en est-il du convertisseur I-U

La fonction de transfert du 1^{er} étage vaut :

$$H_{11}(j\omega) = \frac{u_{outa}(j\omega)}{i_1(j\omega)} = \frac{R_{11}}{1 + j\omega R_{11} C_{11}}$$

Remarquez au passage que la fonction de transfert possède une unité [V/A].

La fréquence de coupure associée au pôle est alors

$$f_{c11} = \frac{1}{2\pi R_{11} C_{11}} = \frac{1}{2\pi \cdot 1 \cdot 10^6 \cdot 150 \cdot 10^{-12}} = 1 \text{ [kHz]}$$

On retrouve sur les diagrammes ci-dessous le résultat de la simulation AC du circuit complet. Les courbes vertes sont relatives au premier étage, tandis que les courbes rouges sont relatives au système complet.

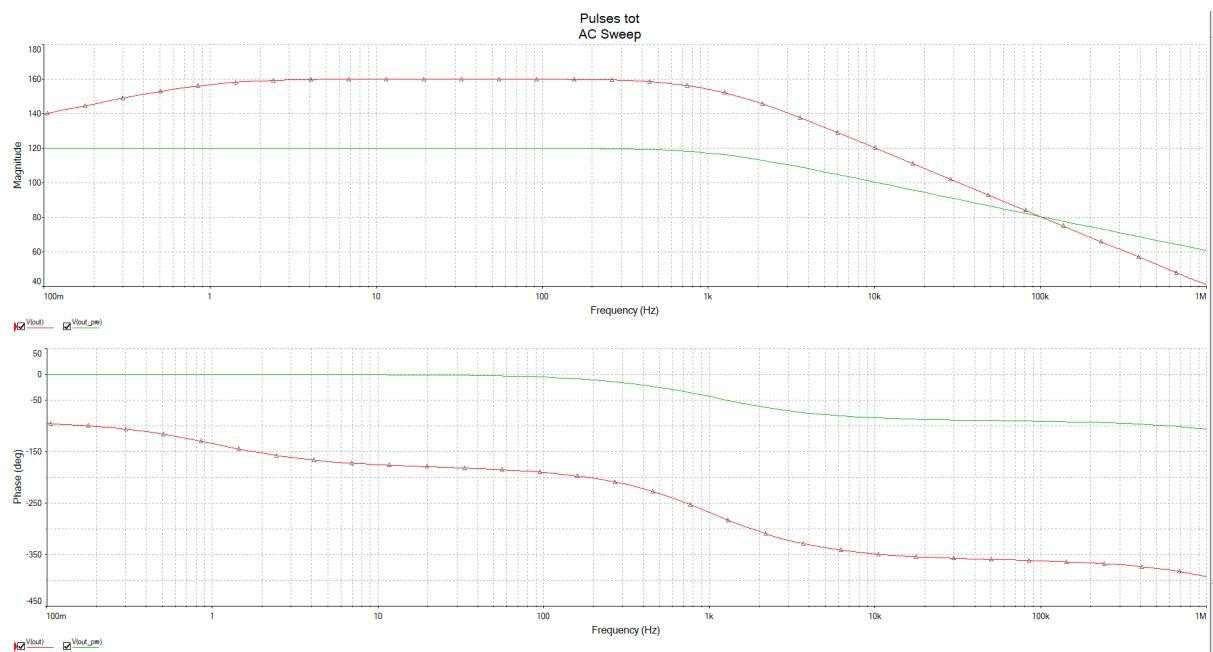


FIGURE 10 SIMULATION AC SYSTÈME COMPLET

Remarquez une fois passée la fréquence de 1kHz comme la courbe rouge plonge avec une pente de -40 dB/décade, les pôles des deux étages étant situés à la même fréquence leurs actions s'additionnent.

DIODE À JONCTION

D'une façon très sommaire, une diode est un dispositif passif non linéaire et polarisé. Dans les schémas elle est représentée par le symbole suivant (ici pour une diode 1N4148). Elle comporte deux accès, la cathode et l'anode. Sur les boîtiers physiques, on repère généralement la cathode au moyen d'une bande.

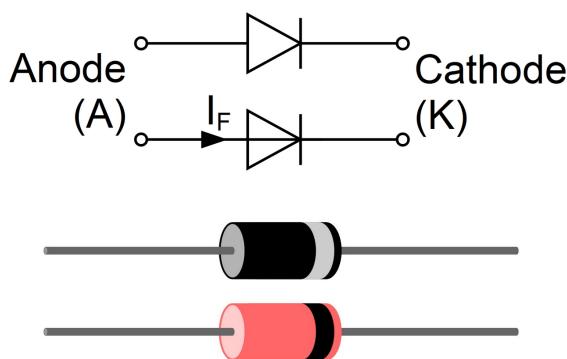


FIGURE 11 DIODE, SCHÉMA ET BOÎTIERS (WIKIPEDIA)

Par définition on appellera sens direct le sens où la diode est passants et sens indirect le sens où elle est bloquée.

DIODE IDÉALE SANS SEUIL

Commençons avec une diode idéale sans seuil. Sa caractéristique courant tension est la suivante

Caractéristique idéalisée sans seuil

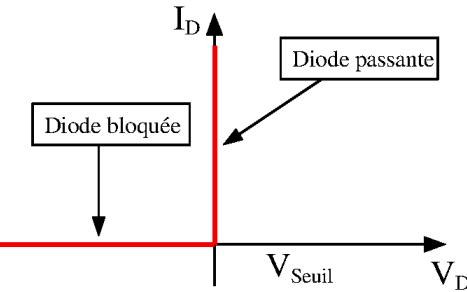
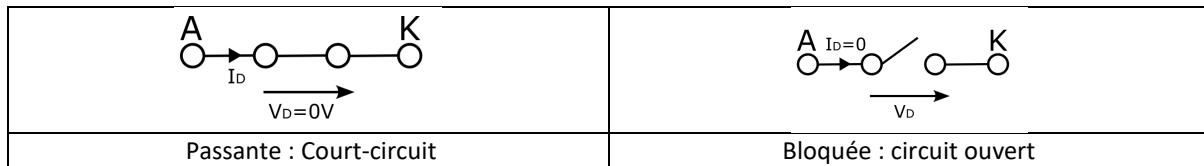


FIGURE 12 CARACTÉRISTIQUE U-I DIODE IDÉALE (WIKIPEDIA)

V_D est la tension aux bornes de la diode et I_D le courant qui la traverse. Dans ce cas de figure, aussitôt que la tension sur l'anode est supérieure à la tension sur la cathode la diode idéale se comporte comme un court-circuit. Le courant peut alors circuler librement dans le sens direct. La diode idéale passante est assimilée à un fil (court-circuit) tandis qu'une diode bloquée est assimilée à un circuit ouvert.



EVOLUTION DU MODÈLE, DIODE IDÉALE AVEC TENSION DE SEUIL

Nous approchant un peu plus du modèle réel nous allons tenir compte de la tension de seuil de la diode. Dans ce cas de figure, avant que la diode ne se comporte comme un court-circuit il faut que la tension sur l'anode soit supérieure d'une tension de valeur U_j à celle de la cathode. Dès que la diode conduit la tension V_D reste fixe à U_j la caractéristique U-I devient alors la suivante. $V_{seuil}=U_j=0.7V$ (diode silicium)

Caractéristique idéalisée avec seuil

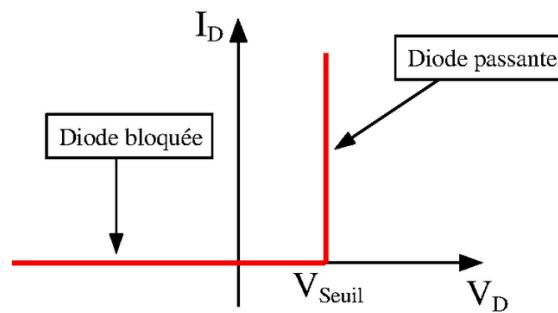
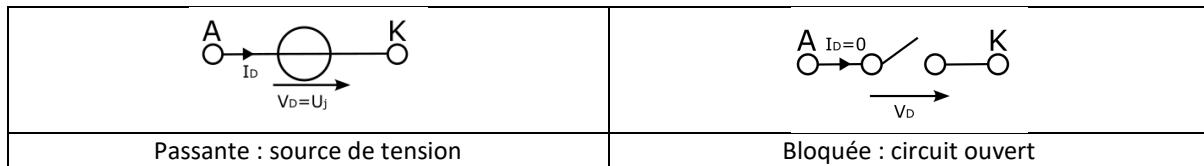


FIGURE 13 CARACTÉRISTIQUE U-I DIODE IDÉALE AVEC SEUIL (WIKIPEDIA)

Dans ce cas de figure la diode peut être assimilée dans le sens passant à une source de tension idéale dont la tension vaut U_j (0.7V dans le cas d'une diode au silicium), et dans le sens bloqué, comme précédemment un circuit ouvert.



Ce modèle est suffisant pour aborder les manipulations proposées dans ce TP. A titre d'indication voici la caractéristique réelle d'une diode.

CARACTÉRISTIQUE RÉELLE

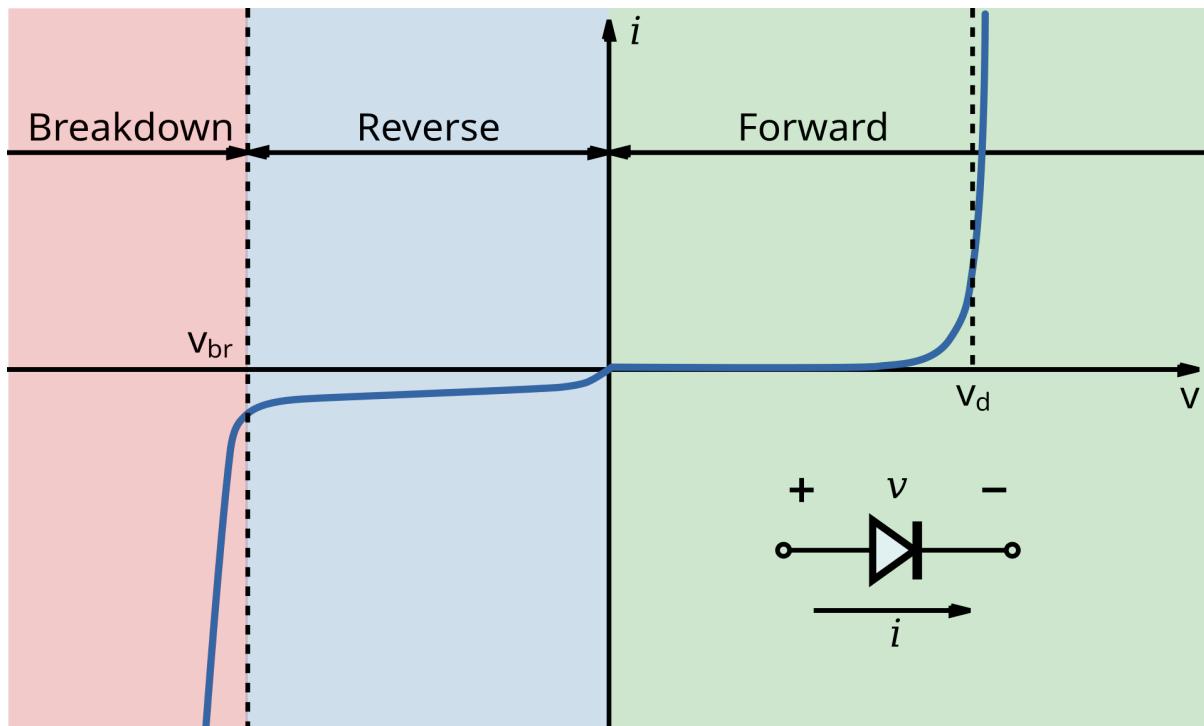


FIGURE 14 DIODE CARACTÉRISTIQUE RÉELLE (WIKIPEDIA)

On peut distinguer trois régions sur ce dessin

- **Forward** : sens direct. La tension appliquée aux bornes de la diode est positive (le potentiel sur l'anode est supérieur à celui de la cathode). La diode conduit le courant et conserve la tension V_d à ses bornes. C'est le genre de comportement que nous avons vu avec la caractéristique idéale avec seuil. La caractéristique U - I de cette région est décrite par une relation entre U et I de nature exponentielle qui sort du cadre de cette présentation succincte.
- **Reverse** : sens indirect. La tension appliquée aux bornes de la diode est négative (le potentiel de la cathode est supérieur à celui de l'anode). La diode est bloquée. On constate un léger courant de fuite.
- **Breakdown** : sens indirect. La tension appliquée aux bornes de la diode est négative (le potentiel de la cathode est supérieur à celui de l'anode) mais elle dépasse la valeur de la tension V_{br} . Attention, ce n'est plus un mode de fonctionnement normal pour ce type de diode, persister dans ce régime peut amener à sa destruction.