Thierry ROCACHER, INSA, DGEI

Introduction à l'électronique analogique, AOP (Amplificateur Opérationnel)

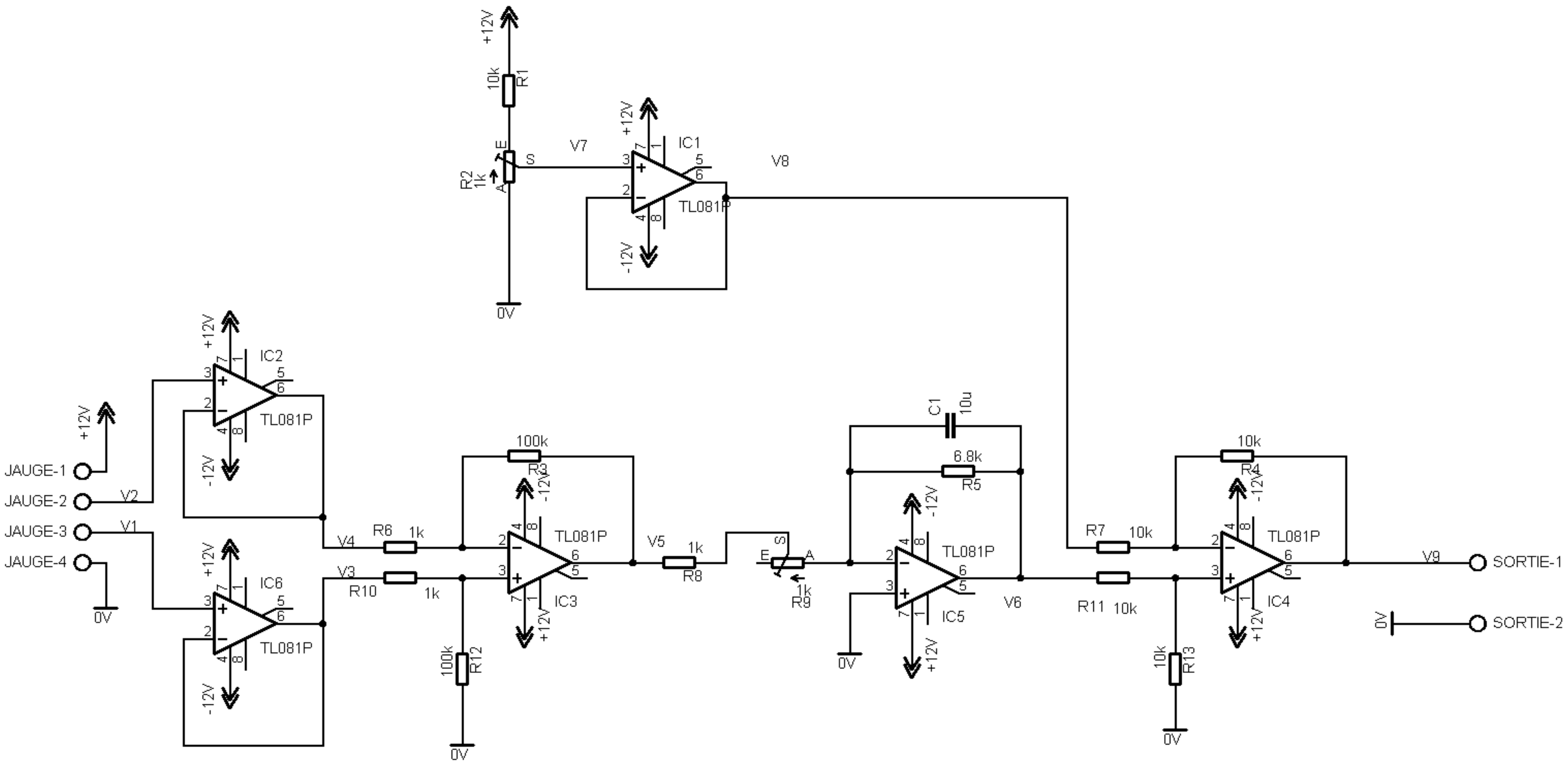
Organisation du cours :

- 2 séances de 1h15

Plan :

- (Révisions) – *Les composants passifs, leur loi physique*
- (Révisions) – *Loi des noeuds, loi des mailles*
- (Révisions) – *Le régime harmonique*
- *L'amplificateur opérationnel*
- *L'adaptation d'impédance en tension*
- *Tracé des réponses en fréquence : diagramme de Bode*

Exemple de schéma électronique analogique à AOP



Analyse du capteur et de l'électronique de traitement analogique

Deux approches pour analyser un montage d'électronique analogique

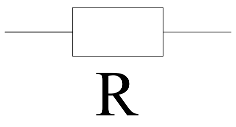
- L'approche directe en **<u>représentation temporelle</u>** (u(t), i(t)...). On utilise les lois classiques (Loi d'Ohm, loi des mailles.... Cette approche est efficace en ***régime continu*** (fréquence nulle), et pour étudier les ***régimes transitoires***. Elle est également très pratique pour traiter des montages composés uniquement d'éléments ne dépendant pas de la fréquence (résistances, AOP considéré parfait)

- L'approche en **<u>représentation fréquentielle</u>** (u(jω), i(jω)...). Les lois classiques (loi d'Ohm « généralisée ») sont utilisables de la même manière. On adopte cette méthode pour étudier aisément les ***régimes harmoniques***

- ***Révision de ces approches nécessaires ????***

(Révisions) – *Les composants passifs, leur loi physique*

La résistance



C'est le composant élémentaire de base qui, en électronique, va permettre de régler des courants, de construire des tensions à partir d'une source de tension (pont diviseur de tension). C'est la brique élémentaire des circuits à amplificateur opérationnel.

Les caractéristiques d'une résistance :

- Sa valeur en Ohm (Ω)
- Sa limite de puissance

(Révisions) – *Les composants passifs, leur loi physique*

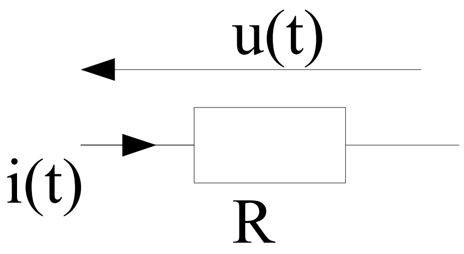
Loi d'Ohm

Elle permet d'établir la relation entre le ***courant*** et la ***tension*** au bornes d'une ***résistance***.
Elle peut être énoncée comme suit :

*La tension **instantanée** u(t) aux bornes d'une résistance R est reliée au courant **instantané** i(t) traversant cette résistance R, par la relation :*

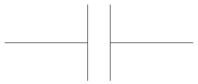
$$\boxed{u(t)=R.i(t)}$$

utilisant la convention des sens suivant :



(Révisions) – *Les composants passifs, leur loi physique*

Le condensateur



C

Un condensateur est composé de deux armatures et d'un diélectrique entre les deux. Selon l'application, on peut comprendre le condensateur de manière différente :

Il peut être vu comme une *réserve* d'électrons. En d'autres termes, losqu'un courant pénètre par une de ses armatures, les électrons transportés s'y accumulent. La tension aux bornes du condensateur croît puisque C.U=Q. C'est une vision énergétique, donc plutôt associée à l'électronique de puissance.
Un condensateur, en **courant continu** (fréquence nulle) est un **circuit ouvert** (ce qu'évoque le symbole). Par contre, à fréquence très élevée, c'est le contraire. Il se comporte comme un court-circuit. Ces remarques sont à la base des filtres.

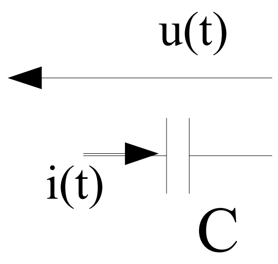
Les caractéristiques d'un condensateur :

- Sa **valeur** en Farad (µF, nF, pF)
- Sa **limite en tension** (si la tension aux bornes des armatures dépasse une valeur limite, le diélectrique claque)

(Révisions) – *Les composants passifs, leur loi physique*

Loi tension / courant aux bornes d'un condensateur

La relation qui relie tension, courant, pour un condensateur de capacité C, s'obtient en analysant très simplement le circuit suivant :



$$u(t)=q(t)/C$$

Et par définition, $$i(t)=\frac{d\,q(t)}{dt}$$

La relation fondamentale recherchée est donc :

$$u(t)=\frac{1}{C}\int i(t)\,dt \quad \text{ou encore :} \quad i(t)=C\frac{du(t)}{dt}$$

(Révisions) – *Les composants passifs, leur loi physique*

La bobine (self)

L

La self (peu utilisée, sauf en électronique de puissance et en radio), est constituée d'un fil bobiné. Cette bobine peut être portée par un noyau (ce qui augmente sa valeur).
C'est un élément qui « donne de l'inertie au courant ». Autrement dit, elle freine les variations de courant (comme un véhicule plus ou moins lourd met du temps à prendre de la vitesse). Bien sûr, une fois le courant établi, il ne peut être coupé instantanément (comme la vitesse d'une voiture). Ces remarques valent aussi pour le condensateur, mais alors, c'est la tension qui est « inertielle », non le courant. C'est la vision de l'électronique de puissance.
La self est un fil enroulé (voir symbole). A **fréquence nulle** (courant continu), les boucles n'ont aucun effet, la self est un **court-circuit**. Par contre à fréquence très élevée, dûe à ses nombreuses spires (effet du champ magnétique, auto-induction), le courant ne peut augmenter rapidement et la self se comporte alors comme un circuit ouvert.

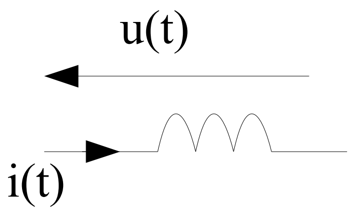
Les caractéristiques d'une self :

- Sa valeur en Henry (mH, µF, nF)
- Sa résistance de perte (on parle souvent de *facteur de qualité*)
- Sa limite en courant

(Révisions) – *Les composants passifs, leur loi physique*

Loi tension / courant aux bornes d'une self

La loi qui relie tension et courant dans une self, provient de la *loi de Faraday* qui précise que la tension aux bornes d'une bobine est égale à la variation de flux pénétrant la bobine.

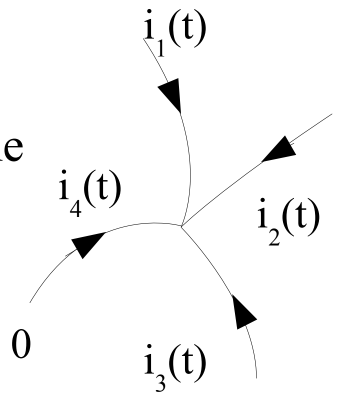


$$u(t) = L\frac{di(t)}{dt} \qquad \text{ou encore :} \qquad i(t) = \frac{1}{L}\int u(t)\,dt$$

(Révisions) – *Loi des noeuds, loi des mailles*

Loi des noeuds

Un noeud est le point de rencontre de plusieurs fils. La loi précise que la somme des courants **instantanés** qui affluent de chaque fil est nulle. Cela suppose que chaque courant se dirige vers le noeud.



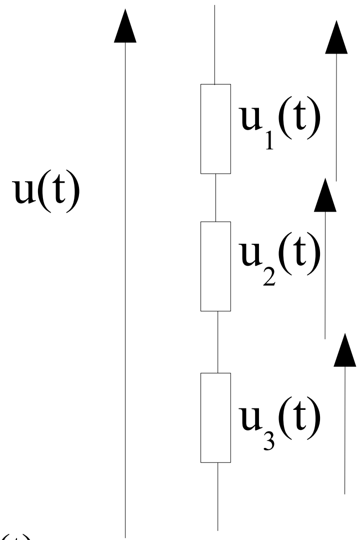
$$i_1(t)+i_2(t)+i_3(t)+i_4(t) = 0$$

Loi des mailles

Une maille est une boucle qui contient plusieurs dipôles en série. La loi précise que la somme des tensions **instantanées** aux bornes de chaque dipôle est nulle. Cela suppose que les tensions sont toutes fléchées dans le même sens.

Autre énoncé, moins officiel...mais plus efficace

Lorsque plusieurs dipôles sont en série, la tension **instantanée** aux bornes de l'ensemble est égale à la somme des tensions **instantanées** aux bornes de chaque dipôle.



$$u(t) = u_1(t)+u_2(t)+u_3(t)$$

(Révisions) – *Le régime harmonique*

Le régime harmonique

La plupart des systèmes électroniques analogiques sont caractérisés en régime sinusoïdal (harmonique). Par exemple, une des caractéristiques d'un amplificateur HiFi est sa bande passante (20Hz-20 kHz), qui précise en gros que l'amplificateur peut traiter convenablement (atténuation de -3dB maximum) toute sinusoïde comprise entre 20 Hz et 20kHz.

L'ensemble des lois vues précédemment dans le domaine **temporel**, peuvent s'appliquer directement dans le domaine **fréquentiel**. Il suffit de remplacer les tensions (ou courant) u(t) par **u(jω)**.
u(jω) est une grandeur **complexe** qui représente la grandeur u de forme **sinusoïdale**. Le **module** représente l'**amplitude** de la sinusoïde et la **phase** représente le **déphasage** par rapport à l'origine des temps.

Exemple sur la loi des mailles : $u(j\omega) = u_1(j\omega)+u_2(j\omega)+u_3(j\omega)$

(Révisions) – *Le régime harmonique*

Le régime harmonique

La loi d'Ohm vue pour la résistance ainsi que les lois qui régissent self et condensateurs, peuvent s'unir en une seule loi dans le domaine fréquentiel, que nous appellerons **loi d'Ohm généralisée.**

$u(t)=R.i(t)$ devient $u(j\omega)=R.i(j\omega)$

$u(t)=\frac{1}{C}\int i(t)dt$ devient $u(j\omega)=\frac{1}{jC\omega}.i(j\omega)$

$u(t)=L\frac{di(t)}{dt}$ devient $u(j\omega)=jL\omega.i(j\omega)$

Impédance complexe

Loi d'Ohm généralisée :

Chacun des trois éléments obéït à une même loi : le rapport entre tension et courant dans la **<u>représentation complexe</u>** est égale à **l'impédance complexe**.

(Révisions) – *Le régime harmonique*

Impédance complexe

- Pour une résistance, l'impédance complexe est : R
- Pour un condensateur, l'impédance complexe est : $\frac{1}{jC\omega}$
- Pour une self, l'impédance complexe est : $jL\omega$

Avantage de cette formulation :

- C'est une Loi d'Ohm directement exprimée dans le domaine fréquentiel, idéale pour traiter du régime harmonique
- Les 3 relations tension / courant s'expriment sans opérateur d'intégration ou dérivation, mais directement sous forme de produit : énorme simplification (plus d'équation différentielle)

Inconvénient de cette formulation :

- Elle permet de traiter uniquement les situations de régime sinusoïdal **permanent**. Elle ne permet pas de détailler les régimes transitoires.

(Révisions) – *Le régime harmonique*

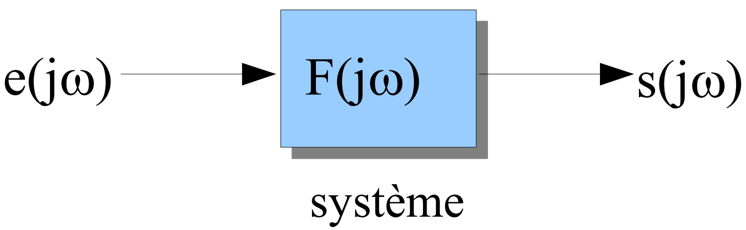
La notion de fonction de transfert

Tout circuit à base de composants passifs et amplificateur opérationnel (contre-réactionné sur son entrée -) est dit ***linéaire***. Cela signifie plusieurs choses :

- La sortie est la somme des effets produits par chacune des entrées (d'où le Th de superposition) :
  $s(j\omega) = \lambda_1.e_1(j\omega) + \lambda_2.e_2(j\omega)$
- Une sinusoïde en entrée donne une sinusoïde en sortie (souvent déphasée et amplifiée ou atténuée)

Définition de la fonction de transfert (domaine des fréquences) :

Tout **système linéaire** peut se représenter par une « boîte » avec une ou plusieurs entrées, une ou plusieurs sorties :



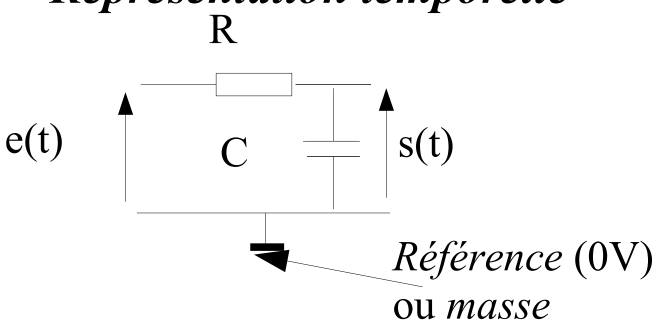
F(jω) est la **fonction de transfert** du système. C'est le **nombre complexe** qui est le rapport entre la représentation complexe de sortie et celle de l'entrée.

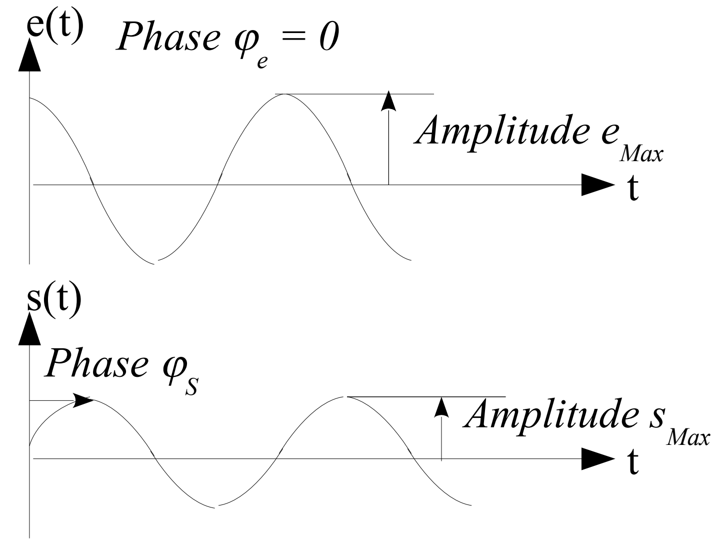
$$\boxed{F(j.\omega)=\frac{s(j.\omega)}{e(j.\omega)}}$$

(Révisions) – *Le régime harmonique*

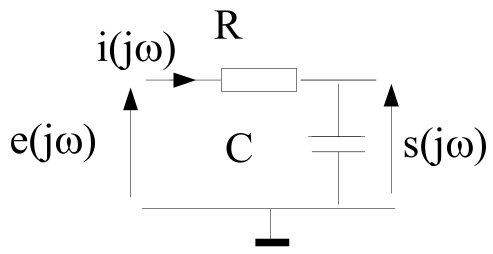
Exemple de fonction de transfert

Représentation temporelle





Représentation fréquentielle



$$i(j.\omega)=\frac{e(j.\omega)}{R+\frac{1}{j.C.\omega}}$$

$$i(j.\omega)=\frac{j.C.\omega.e(j.\omega)}{1+j.R.C.\omega}$$

$$s(j.\omega)=\frac{1}{j.C.\omega}.i(j.\omega)$$

$$\Rightarrow s(j.\omega)=\frac{e(j.\omega)}{1+j.R.C.\omega}$$

$$\boxed{F(j.\omega)=\frac{s(j.\omega)}{e(j.\omega)}=\frac{1}{1+j.R.C.\omega}}$$

Exploitation de la fonction de transfert

- ***Le module de F(jω) :***

Il traduit, à la pulsation ω, le rapport entre l'amplitude de sortie et celle d'entrée. Il est appelé l' ***amplification*** *de la fonction de transfert. Le* ***gain*** *est un terme que l'on prèfère réserver à l'amplification exprimée en dB.*

$$|F(j.\omega)|=Av(j.\omega)=\frac{s_{Max}(j.\omega)}{e_{Max}(j.\omega)}$$

- ***L'argument de F(jω) :***

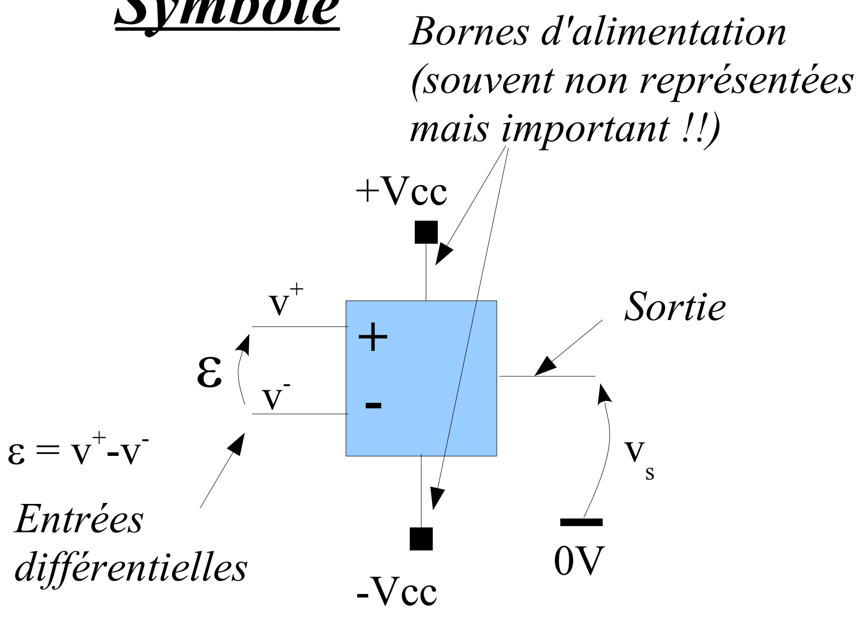
Il traduit, à la pulsation ω, la différence entre les phases de sortie et d'entrée

$$\varphi(j.\omega)=\varphi_s(j.\omega)-\varphi_e(j.\omega)$$

L'amplificateur opérationnel

- Composant ***actif***, incontournable en électronique analogique
- Permet de réaliser des ***amplificateurs de tension*** basse puissance
- Permet de réaliser des ***correcteurs analogiques*** en automatique
- Utilisé dans toute application non linéaire (Comparateur, oscillateur....)

Symbole



Limites de fonctionnement :

- Les entrées V^+ et V^- doivent être incluses (avec 1 ou 2V de marge) dans la plage [-Vcc; +Vcc]
- Les courants d'entrée sur les bornes V^+ et V^- sont nuls.
- La sortie Vs peut prendre n'importe quelle valeur dans l'intervalle]-Vcc; +Vcc[. En réalité ces bornes extrêmes ne sont jamais atteintes, il y a 1 ou 2V de perte. On a usage d'appeler ces limites +Vsat et -Vsat. L'intervalle des tensions possibles est donc en fait [-Vsat;+Vsat]

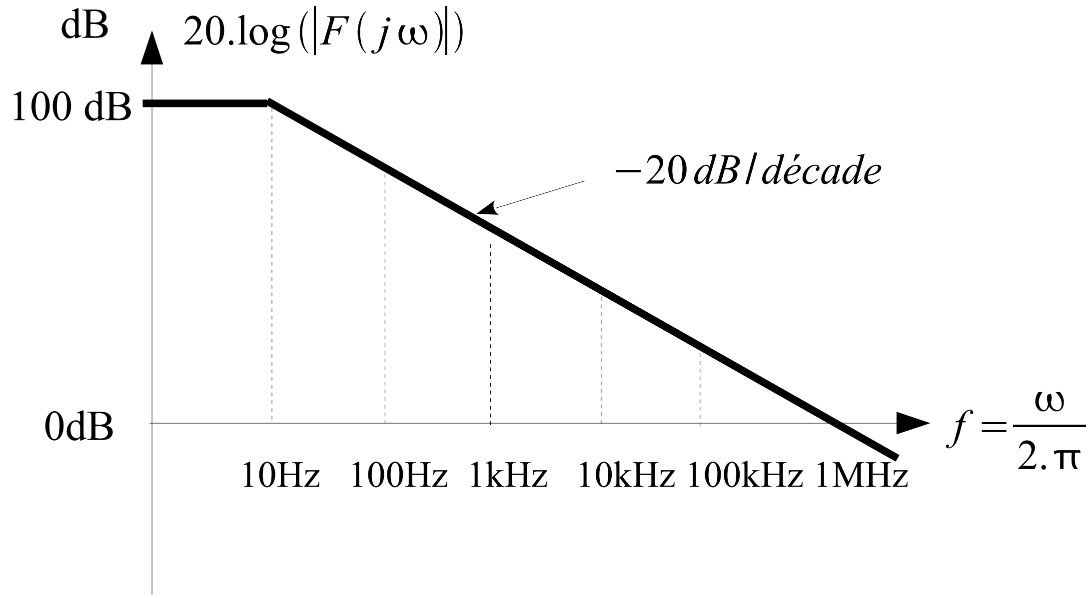
L'amplificateur opérationnel

Loi de fonctionnement

L'AOP est un amplificateur de tension faible puissance dont le facteur d'amplification (en fréquences basses) est extrêment élevé (de 100 000 à 1 000 000 !) :

$$v_s(j\omega) = F(j\omega) \, . \, \varepsilon(j\omega).$$

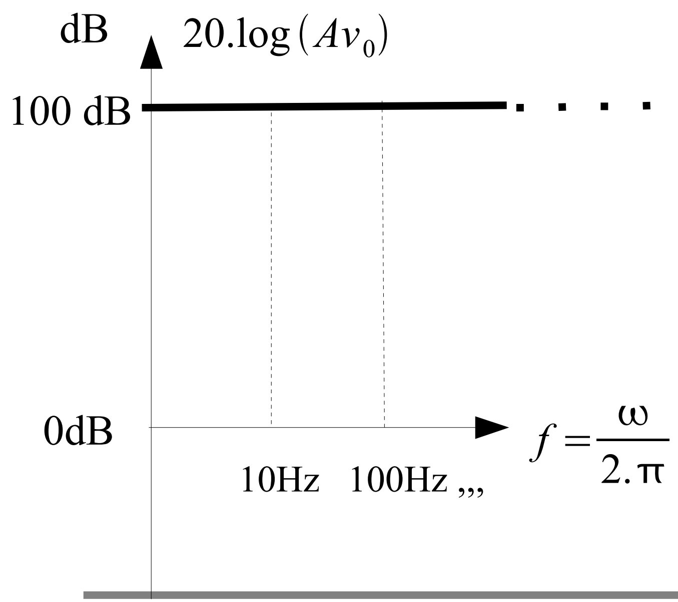
F(jω) est la fonction de transfert de l'AOP. Son **gain** est typiquement représentée ci-contre, en **dB**. Il s'agit de l'amplification exprimée en dB, c'est à dire 20.log|F(jω)|.



L'amplificateur opérationnel

Loi de fonctionnement simplifiée

L'analyse que nous allons détailler dans les pages suivantes, est très simple si l'on considère que F(jω) est ***réel et constant***, F**(jω) = cste = Av$_0$**. La représentation fréquentielle devient celle-ci :



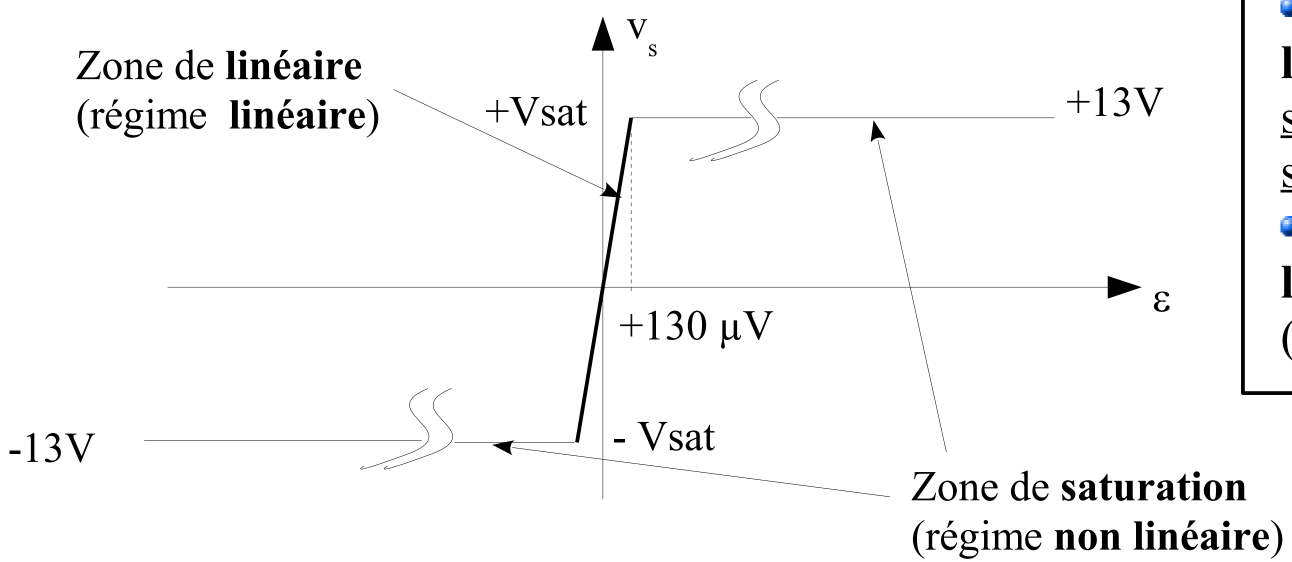
La représentation ***temporelle*** est alors très simple :
$v_s(t) = Av_0.\varepsilon(t)$, indépendante de la fréquence

NB: Av_0 vaut plus de 100 000. Supposons, que ε(t) = 1mV (c'est pas énorme...),
alors $v_s(t)$ = 100V !! La sortie ***écrête*** à +Vsat. On dit alors que l'AOP travaille en régime ***non linéaire*** puisque la relation $v_s(t) = Av_0.\varepsilon(t)$ est caduque

L'amplificateur opérationnel

Caractéristique de tension, régimes de fonctionnement

La caractéristique $v_s(\varepsilon)$ permet de bien voir les ***zones de fonctionnement*** de l'AOP. Elle s'obtient en traçant point par point la tension de sortie en fonction de ε, donc en **régime continu.**



- Un AOP fonctionne en **régime linéaire** si sa tension de sortie est <u>strictement dans l'intervalle de saturation</u>
- Un AOP fonctionne en **régime non linéaire** si sa tension de <u>sortie sature</u> (vs = +/-Vsat).

L'amplificateur opérationnel

Méthode d'analyse des montages à AOP en régime linéaire

- Des études, dans le domaine de l'automatique, permettent d'affirmer que si un AOP est **contre-réactionné** (c'est à dire qu'il existe un ou plusieurs dipôles entre la **sortie et l'entrée -**), alors l'AOP fonctionne en régime linéaire.

- Si l'AOP fonctionne en régime linéaire, et en vertu de son gain très important, on peut affirmer que ε est compris dans un intervalle très petit ([-130µV;+130µV] dans l'exemple chiffré précédent). Dit autrement, l' **entrée ε** d'un AOP qui est **contre-réactionné**, peut être considérée **nulle**. Cette approximation est parfaitement justifiée en basse fréquence puisque le gain est fort. Aux fréquences élevées, l'approximation se justifie de moins en moins.

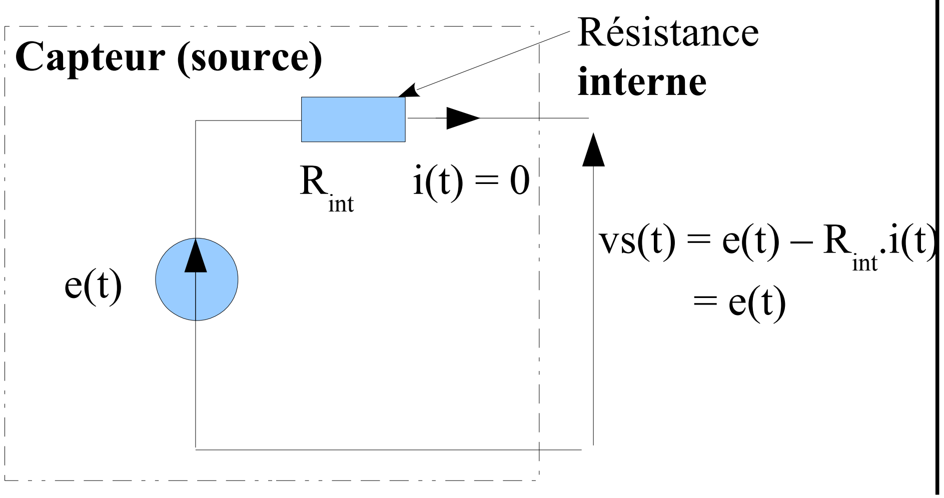
Résumé :
En fréquences basses (< 1kHz à 10 kHz) on pourra affirmer que si un AOP est en contre-réaction (sur l'entrée -), alors ε = 0.

L'adaptation d'impédance

- Expérience

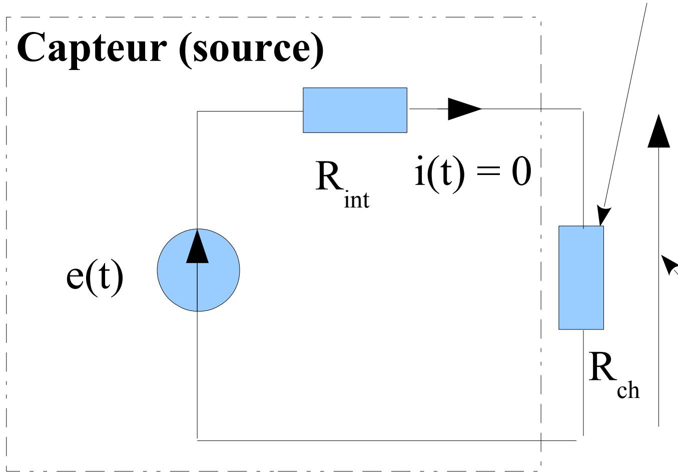
- Tout capteur ou autre dispositif électronique (**source**), lorsqu' on le branche sur un autre dispositif (**charge**), peut voir sa tension chuter. Il est alors nécessaire de s'intéresser aux problèmes ***d'adaptation d'impédance***.

Source non branchée



Source branchée

Résistance de
charge



$$v_s(t) = R_{ch} . i(t)$$

$$i(t) = \frac{e(t)}{R_{int} + R_{ch}}$$

$$v_s(t) = \frac{R_{ch}}{R_{int} + R_{ch}} . e(t)$$

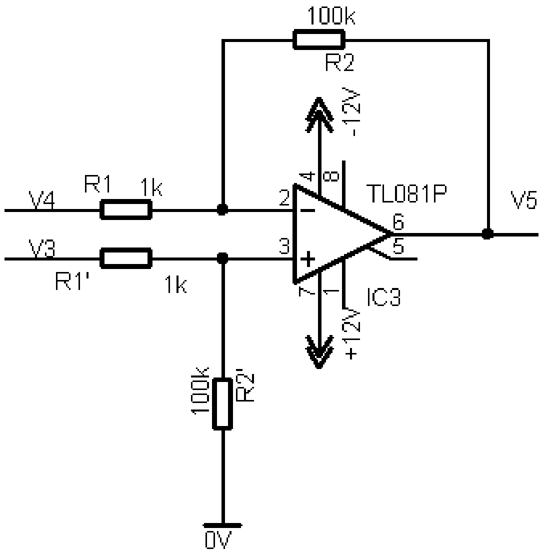
Perte due à la connexion des deux circuits

- Afin de n'avoir aucune **perte de <u>tension</u>**, lorsqu'on branche deux circuits, il faut que l'impédance interne du premier (on dit aussi son impédance de sortie), **R_{int} soit très petite devant la résistance d'entrée du second** (R_{ch} dans notre cas) :

$$\frac{R_{ch}}{R_{int} + R_{ch}} \approx 1$$

Exemple de circuit : montage soustracteur

Analyse du montage « *amplificateur de différence* » : *approche temporelle*



- Rôle : construire une différence de tension éventuellement amplifiée

- <u>Analyse</u> :

On observe une contre-réaction (entrée -) donc l'amplificateur fonctionne en régime linéaire, donc sa tension d'entrée ε(t) est nulle $V^+(t) = V^-(t)$. De plus, les courants i^+ et i^- étant nuls on peut affirmer que le courant traversant R1 est égal à celui qui traverse R2 et le courant qui traverse R1' vaut celui traversant R2'. On considère R1=R1' et R2=R2'. Par soucis de simplification d'écriture on note vi la tension vi(t).

$$\frac{V4-V^-}{R1}=\frac{V^--V5}{R2} \Rightarrow V^-.(R1+R2)=V4.R2+V5.R1 \Rightarrow V^-=\frac{V4.R2+V5.R1}{R1+R2} \quad (1)$$

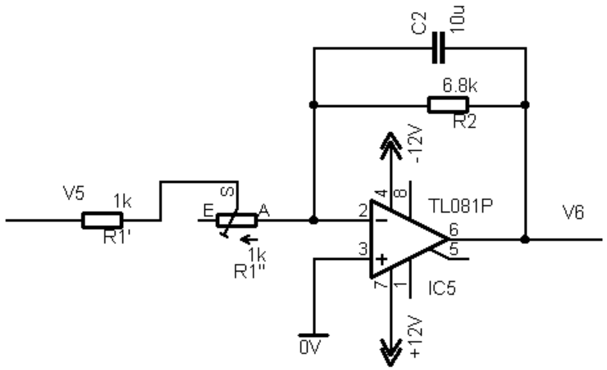
$$V^+=\frac{R2}{R1+R2}.V3 \quad (2)$$

$$V^+=V^- \text{ (1) et (2)} \Rightarrow \frac{V4.R2+V5.R1}{R1+R2}=\frac{R2}{R1+R2}.V3 \Rightarrow \boxed{V5=\frac{R2}{R1}.(V3-V4)}$$

- En jouant sur R1 et R2 on fixe le facteur d'amplification

Exemple de circuit : montage filtre passe-bas actif

Analyse du montage « amplificateur inverseur »



- Rôle : Amplifier une tension et en plus apporter un filtrage passe-bas
- Analyse 1 : approche temporelle, **fréquence nulle C2 est « ouvert »** on le supprime de l'analyse : première approche, **simplicité**

On observe une contre-réaction (entrée -) donc l'amplificateur fonctionne en régime linéaire, donc sa tension d'entrée ε(t) est nulle $V^+(t) = V^-(t) = 0$. On appellera R1 la somme R1'+R1".

$$\frac{V5}{R1} = \frac{0 - V6}{R2} .$$

NB: $i^- = 0$

$$\boxed{V6 = \frac{-R2}{R1} . V5}$$

- En jouant sur R1', donc sur R1, on règle le gain de l'étage

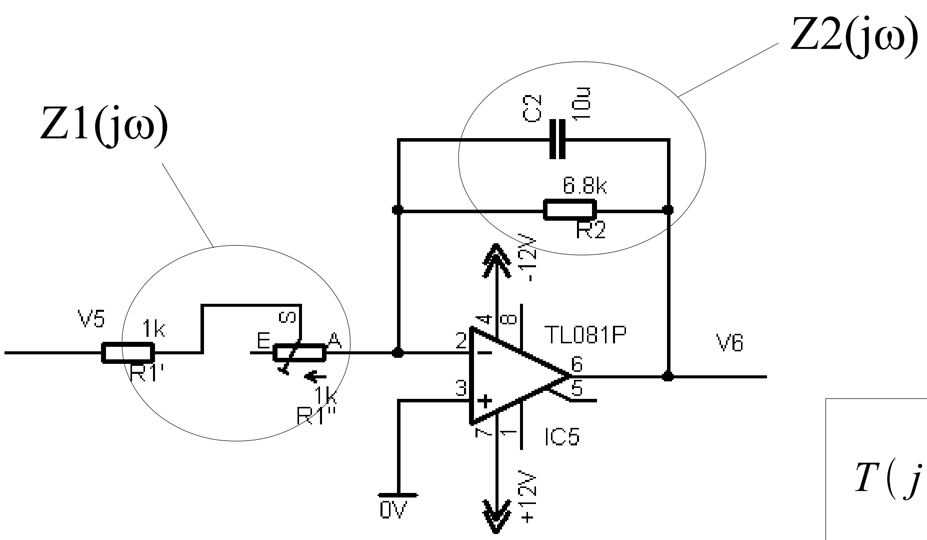
- Analyse 2 : approche fréquentielle, on tient compte de C2.

Le raisonnement découle du précédent, mais on remplace les tensions v5 et v6 par v5(jω) et v6(jω) et on remplace les impédances R1 et R2 par les impédances complexes, que l'on notera Z1(jω) et Z2(jω).

$$\frac{V5(j\omega)}{Z1(j\omega)} = \frac{0 - V6(j\omega)}{Z2(j\omega)} \qquad \frac{V6(j\omega)}{V5(j\omega)} = T(j\omega) = \frac{-Z2(j\omega)}{Z1(j\omega)}$$

Exemple de circuit : montage filtre passe-bas actif

Analyse du montage « amplificateur inverseur »



- Détermination de T(jω) en fonction des éléments du circuits :

$$Z2(j\omega)^{-1} = \frac{1}{R2} + j.C2.\omega = \frac{1 + j.R2.C2.\omega}{R2}$$

$$Z2(j\omega) = \frac{R2}{1 + j.R2.C2.\omega} \qquad Z1(j\omega) = R1$$

$$\boxed{T(j\omega) = \frac{-R2}{R1} \cdot \frac{1}{1 + j.R2.C2.\omega}}$$

- On va montrer que cette fonction de transfert est un filtre qui préserve les basses fréquences et qui atténue les hautes fréquences : filtre ***passe-bas***. Il permet de rejeter les ***bruits électroniques***

- Tracer de la ***réponse en fréquence*** du filtre : Le diagramme de Bode

Tracé des réponses en fréquences : diagramme de Bode

- Le diagramme de Bode se décompose en deux tracés

  - Le tracé du **gain**, c'est à dire du module de la fonction de transfert considérée, exprimé en **décibel** (dB).

    $$Av(j.\omega)=|F(j.\omega)| \qquad Gv(j.\omega)=20.\log(Av(j.\omega)) \quad \text{(dB)}$$

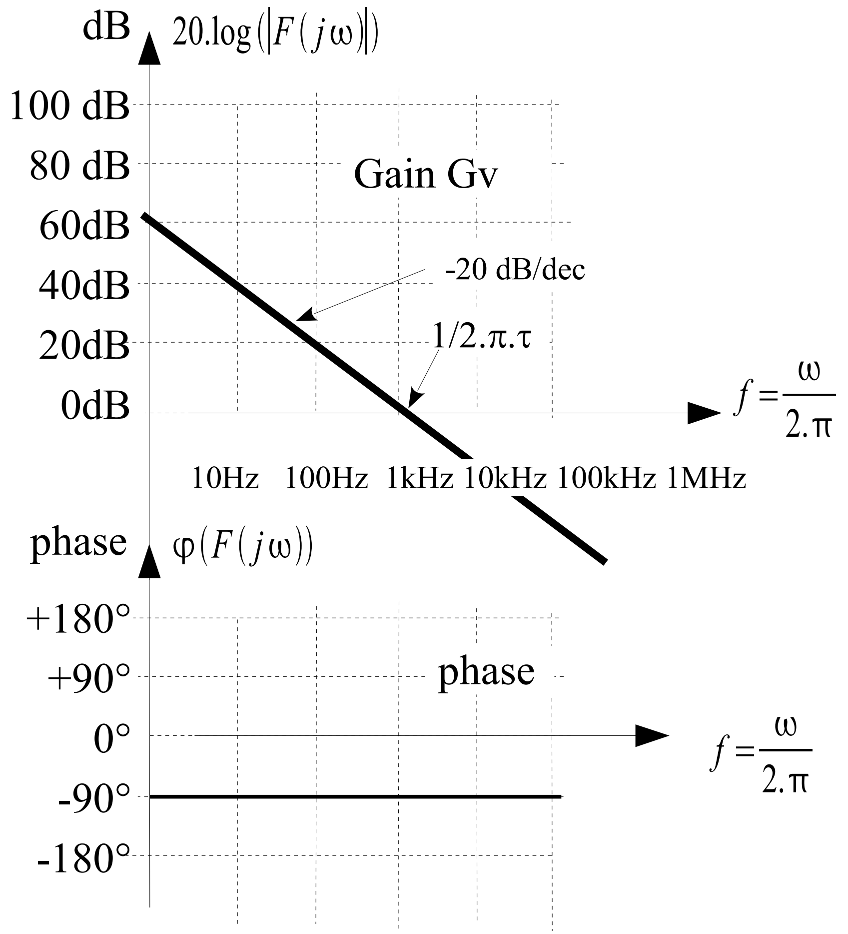
    Le **gain** d'une fonction de transfert s'obtient à partir de l'amplification en prenant le logarithme et en multipliant par 20. Le tracé possède deux axes:
    - l'un concernant les fréquences (Hz ou rad/s). La graduation est **logarithmique**
    - L'autre est gradué en dB et donne donc la valeur du gain

  - Le tracé de la **phase** de la fonction de transfert. Celui-ci est très important en automatique afin de déterminer les conditions de stabilité.

$$\varphi=arg(F(j.\omega))$$

Tracé des réponses en fréquences : diagramme de Bode

Tracé asymptotique des fonctions de transfert classique :



L'intégrateur

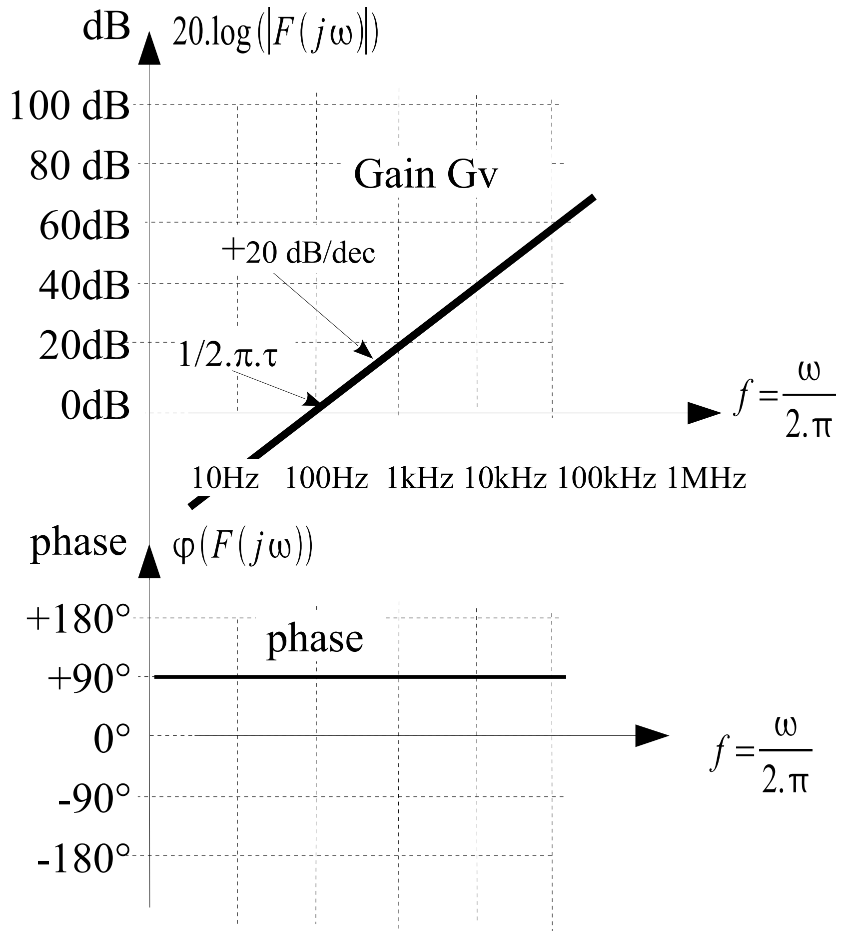
$$F(j\omega)=\frac{1}{j.\tau.\omega}$$

$$|F(j\omega)|=\frac{1}{\tau.\omega}=Av(j\omega)$$

À chaque fois que la pulsation ω (ou la fréquence f) est multipliée par 10 (une décade), alors Av(jω) est divisée par 10, ce qui veut dire que le gain Gv(jω) perd 20dB. La pente du tracé du gain est de -20dB/décade.
Pour ω = 1/ τ, Av(jω) =1, donc Gv(1/τ) = 0dB.

Tracé des réponses en fréquences : diagramme de Bode

Tracé asymptotique des fonctions de transfert classique :



Le dérivateur

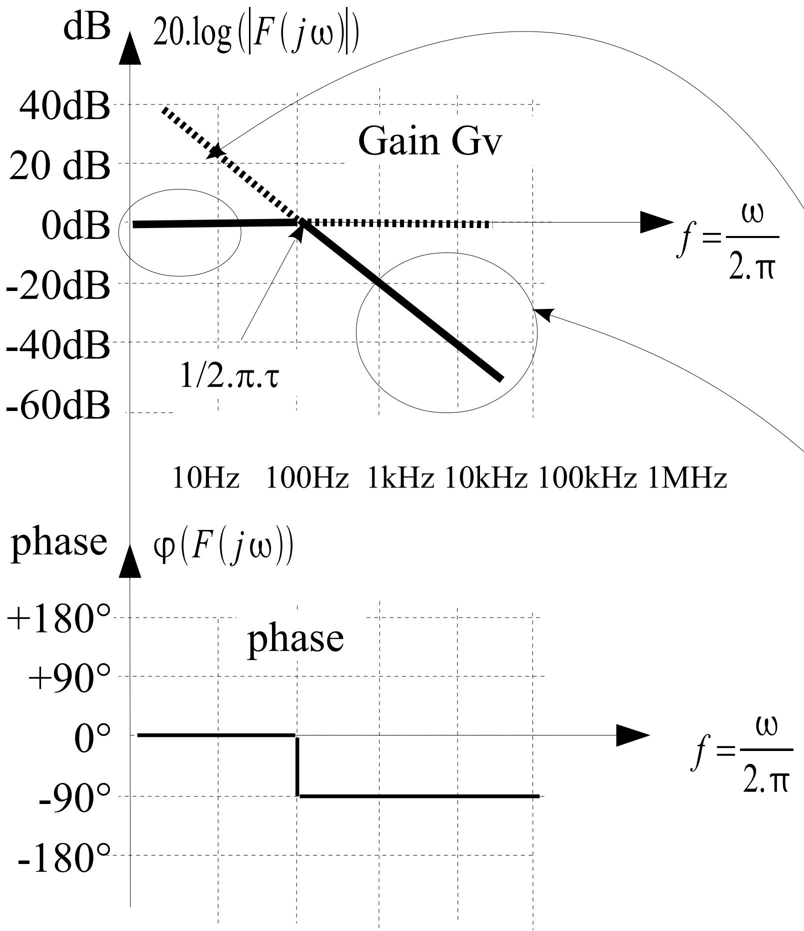
$$F(j\omega) = j.\tau.\omega$$

$$|F(j\omega)| = \tau.\omega = Av(j\omega)$$

À chaque fois que la pulsation ω (ou la fréquence f) est multipliée par 10 (une décade), alors Av(jω) est multiplée par 10, ce qui veut dire que le gain Gv(jω) gagne 20dB. La pente du tracé du gain est de +20dB/décade.
Pour ω = 1/ τ, Av(jω) =1, donc Gv(1/τ) = 0dB.

Tracé des réponses en fréquences : diagramme de Bode

Tracé asymptotique des fonctions de transfert classique :



Le passe-bas d'ordre 1

$$F(j\omega)=\frac{1}{1+j.\tau.\omega}$$

$$|F(j\omega)|=\frac{1}{\sqrt{1+\tau^2.\omega^2}}=Av(j\omega)$$

- Pour $\omega \Rightarrow 0$, $Av(j\omega) \Rightarrow 1$, donc le gain, exprimé en dB tend vers 0dB, $Gv(j\omega) \Rightarrow$ 0dB.
- Pour $\omega \Rightarrow \infty$, $Av(j\omega) \Rightarrow \frac{1}{\tau.\omega}$ (intégrateur)

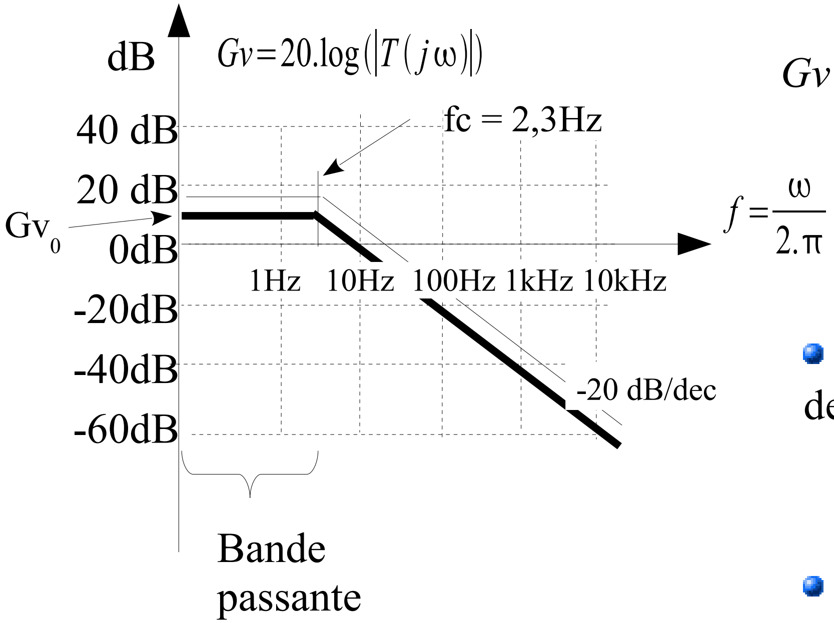
Le tracé s'obtient directement en s'inspirant de ce qui a été vu pour l'intégrateur : pente à -20dB/dec, intersection de l'axe des 0dB pour $\omega = 1/\tau$.

- Le tracé complet s'obtient en reliant les deux tracés jusqu'à l'intersection en $\omega = 1/\tau$: C'est la **pulsation de coupure à -3dB**

Application : tracé de Bode du filtre actif passe-bas

Analyse du montage « amplificateur inverseur » : approche fréquentielle

$$T(j\omega)=\frac{-R2}{R1}\cdot\frac{1}{1+j.R2.C2.\omega}$$



- Détermination de l'amplification de T(jω)

$$Av(j.\omega)=|T(j.\omega)|=\frac{R2}{R1}\cdot\frac{1}{\sqrt{1+R2^2.C2^2.\omega^2}}$$

- Détermination du gain en dB de T(jω)

$$Gv(j.\omega)=20.\log(Av(j.\omega))=\underbrace{20.\log(\frac{R2}{R1})}_{\text{Gain dans la bade passante}}+\underbrace{20.\log(\frac{1}{\sqrt{1+R2^2.C2^2.\omega^2}})}_{\text{Gain passe-bas}}$$

- Le gain dans la bande passante (fréquence nulle à fréquence de coupure) varie selon la valeur de R1.
  - Si R1 vaut 2kΩ, alors Av_0 = 3,4 soit Gv_0 = 10,6dB
  - Si R1 vaut 1kΩ, alors Av_0 = 6,8 soit Gv_0 = 16,6dB
- La fréquence de coupure ne dépend que de R2 et C2 :

$$f_c=\frac{1}{2.\pi.R2.C2}=2,3\ Hz$$

Résumé des notions vues

- **Les composants passifs** :
  - Résistance, $u(t)=R.i(t)$, unité ***Ω***, composant limité en <u>puissance</u>
  - Condensateur, $u(t)=\frac{1}{C}\int i(t)dt$, unité ***pF, nF, µF***, limité en <u>tension</u>
  - Self (ou bobine ou inductance), $u(t)=L\frac{di(t)}{dt}$, unité ***nH, µH, mH***, limité en <u>courant</u>
- ***Loi de noeuds, loi des mailles*** (cf planches)
- ***Le régime harmonique :***
  - Représentation complexe des grandeurs tension ***u(jω)***, courant i***(jω)***, impédances Z***(jω)*** :

    $|u(j\omega)|$ représente l'***amplitude*** de la sinusoïde de la grandeur (ici tension)

    $\varphi(u(j\omega))$ représente la ***phase*** de la sinusoïde de la grandeur (ici tension)
  - Impédance complexe, loi d'Ohm généralisée
    - Résistance : $\varphi(u(j\omega))$
    - Condensateur : $Z(j.\omega)=\frac{1}{j.C.\omega}$
    - Self $Z(j.\omega)=j.L.\omega$

Résumé des notions vues

- ***Le régime harmonique :***
  - Fonction de transfert $F(j.\omega)=\dfrac{s(j.\omega)}{e(j.\omega)}$
    - Le ***module*** de la fonction de transfert est ***l'amplification*** $|F(j.\omega)|=Av(j.\omega)=\dfrac{s_{Max}(j.\omega)}{e_{Max}(j.\omega)}$
    - Le ***gain*** est l'amplification exprimée en ***décibe***l (dB) $Gv(j.\omega)=20.\log(Av(j.\omega))$
    - L'***argument*** de la fonction de transfert est le déphasage de la sinusoïde de sortie par rapport à celle d'entrée $\varphi(j.\omega)=\varphi_s(j.\omega)-\varphi_e(j.\omega)$
- ***L'amplificateur opérationnel :***
  - Un AOP a besoin d'être **alimenté** (le plus souvent par deux alimentations symétriques, +/-15V par ex)
  - Un AOP a un **gain** basse fréquence (<10kHz) **très élevé**
  - Ses **courants d'entrée** sont **nuls**
  - Lorsqu'il comporte une ***contre-réaction*** (dipôle entre sortie et ***entrée -***), il fonctionne en régime ***linéaire*** (sa tension de sortie ne sature pas : $\varepsilon = 0$ à cause du grand gain)
- ***L'adaptation d'impédance en tension***
  - L'impédance de sortie d'un montage doit être très faible devant celle du circuit qui le suit.
- ***Le diagramme de Bode*** (cf planches)