Amplificateurs Opérationnels

Fonction Amplifier

Fonction Filtrer

Fonction Comparer

Objectifs

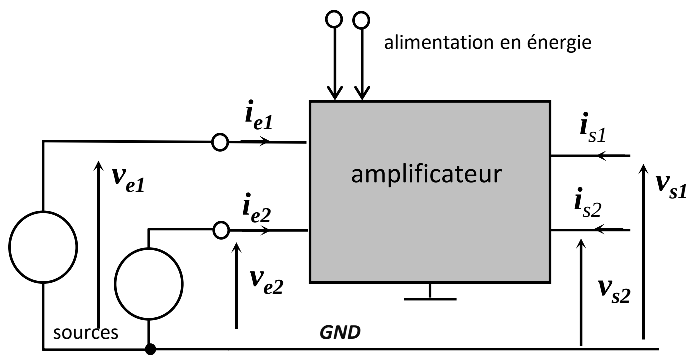
- Etude des fonctions électroniques
  - Concept général et caractéristiques principales d'un amplificateur
  - Le composant amplificateur opérationnel
  - Structures classiques pour
    - Amplifier
    - Comparer

- Présentation de la fonction électronique
  - Filtrer
    - Connaître les caractéristiques principales d'un filtre
    - Cellule d'ordre 2 classique: VCVS (Sallen-key) et MFB (Rauch)
    - Utiliser un algorithme ou un outil logiciel en vue de la synthèse du filtre

Généralités

- Objectif
  - Amplifie les signaux des capteurs
  - Obtention en sortie d'un signal exploitable pour effectuer des traitements

- Structure générale des amplificateurs



Système MIMO

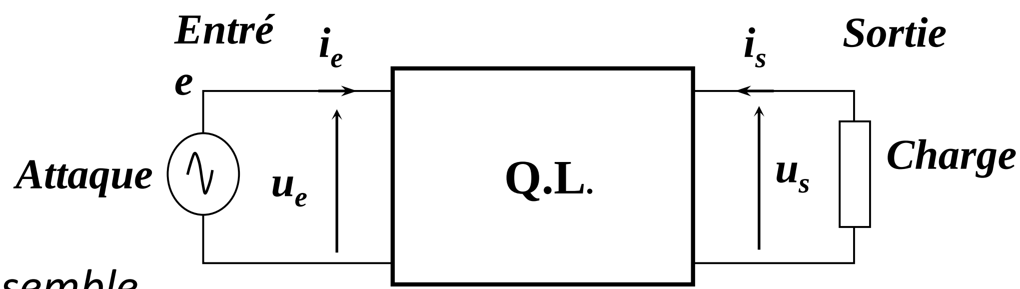
Mise en équation complexe car 8 grandeurs liées

Exemple de cas simple: Ampli de tension parfait

$V_{s1}=A_{11}V_{e1}+A_{12}V_{e2}$

$V_{s2}=A_{21}V_{e1}+A_{22}V_{e2}$

Sous-ensemble



Quadripôle linéaire

Simplification du cas MIMO

Chaque paire de bornes se comporte , vue de l'extérieur, comme un dipôle

ROLE TRES IMPORTANT EN ELECTRONIQUE

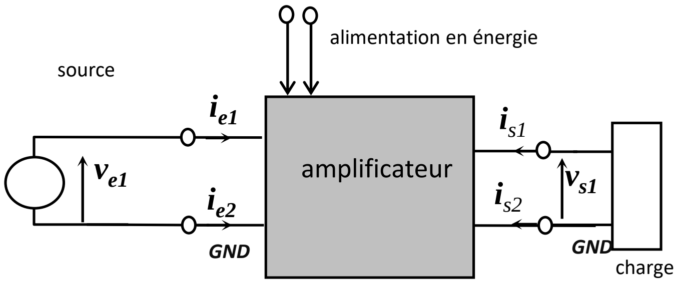
(recouvre la plupart des applications!)

Généralités

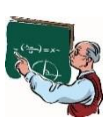
- Variantes de câblages et de structures
  - *La plupart des applications se limitent à 1 ou 2 entrées et 1 sortie*

Amplification en tension ou en courant

Une entrée et une sortie



quadripôle

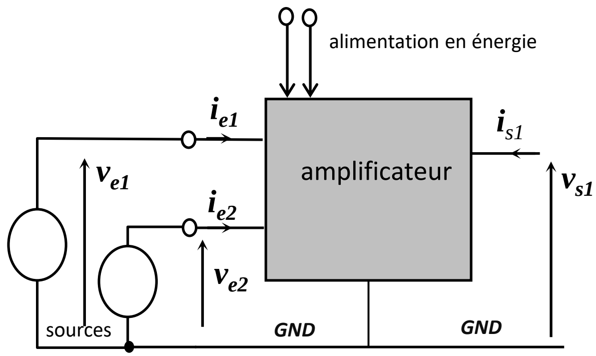


quadripôle amplificateur
1 entrée et 1 sortie

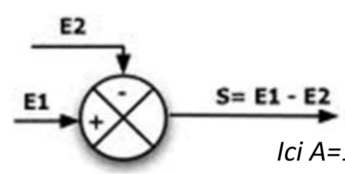
$$I_{e1}=-I_{e2}=I_e \quad \text{et } I_{S1}=-I_{s2}=I_s$$

Amplification différentielle

2 entrées et une sortie



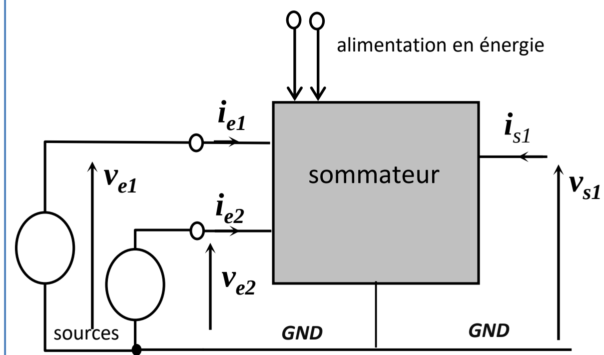
$A_{12}=-A_{11}=A \rightarrow \quad V_{s1}=A(V_{e1}-V_{e2})$



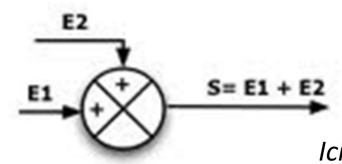
Ici A=1

Amplificateur sommateur

2 entrées et une sortie



$A_{11}=A_{12}=A \rightarrow \quad V_{s1}=A(V_{e1}+V_{e2})$



Ici A=1

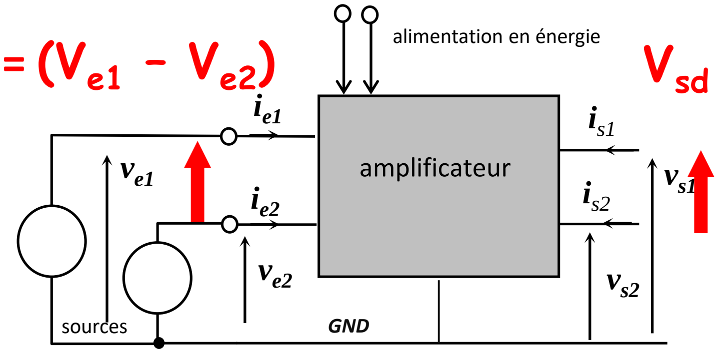
Modèles

- Amplificateur différentiel
  - objectifs: amplifier la différence des tensions en entrée
    - Les grandeurs « utiles » sont les tensions différentielles

Ampli dif à 2 sorties

$V_d = (V_{e1} - V_{e2})$

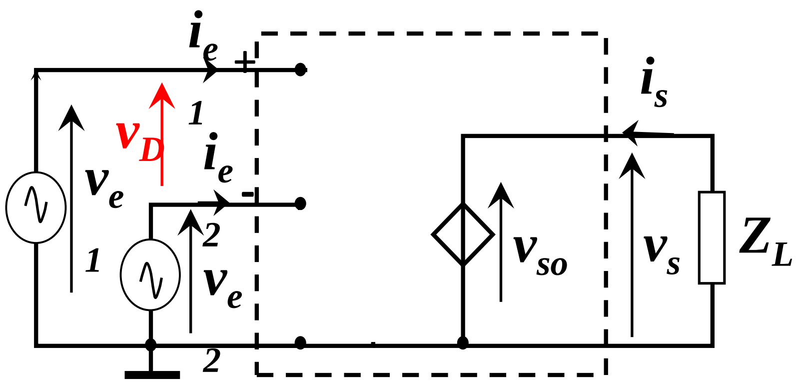
$V_{sd} = (V_{s1} - V_{s2})$



Ampli dif à 1 sortie

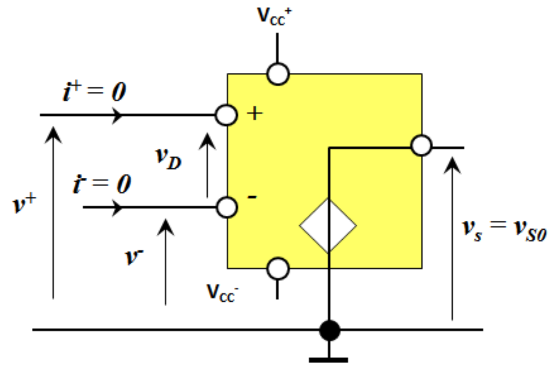
- Amplificateur parfait *(1 seule sortie)*
  - amplifie la différence des tensions en entrée
  - Supprime le mode commun
  - Ne gêne pas les sources d'entrées
  - N'est pas gêné par la charge

En résumé $\underline{V_S} = \underline{V_{S0}} = \underline{A_{VD}} \times \underline{V_D}$



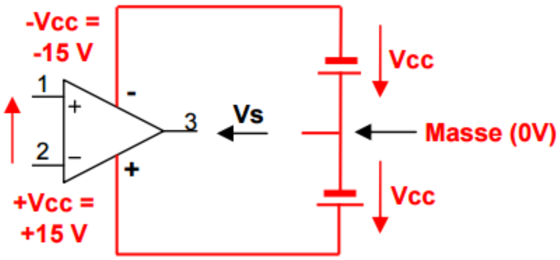
Aop parfait

- La règle des 3
  - AOp **parfait**
    - i+ et i- nul (donc Zed et Zec ∞)
    - Avd -> ∞ (ou constant et très grand (~10^5))
    - Impédance de sortie Zs =0



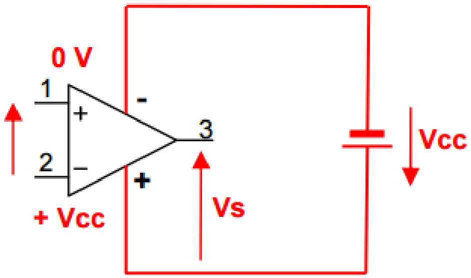
- Alimentation

Dual supply



Montage par défaut vu en cours (car le plus simple!)

single supply



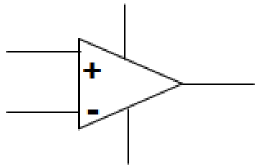
Peut être ramenée au cas dual supply en introduisant une nouvelle référence des tensions (voir ER)
ou application de montage spécifiques (voir application notes de Texas Instrument en ligne)

Amplificateur opérationnel

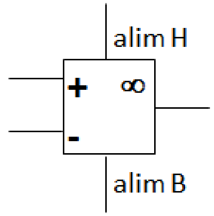
- Symboles et notations

Différentes notations possibles

Tension différentielle notée: V_{ed} ou V_d ou ε

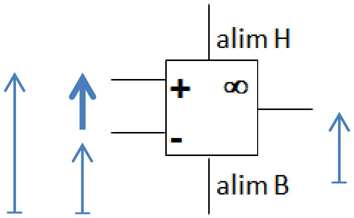


représentation anglo-saxonne

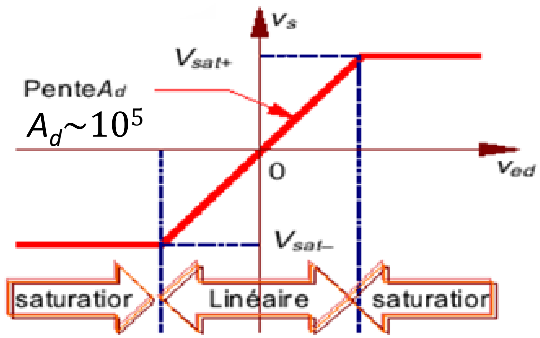


représentation européenne

- Fonctionnement
  - L' AOp <u>seul</u> , en boucle ouverte, est un amplificateur différentiel (mais inexploitable en l'état!)



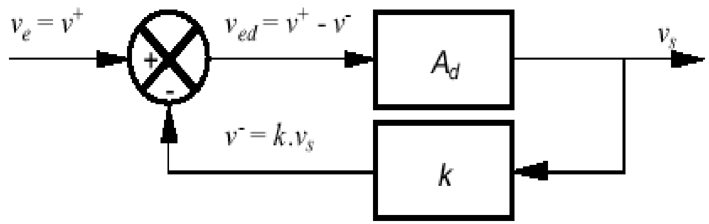
représentation européenne

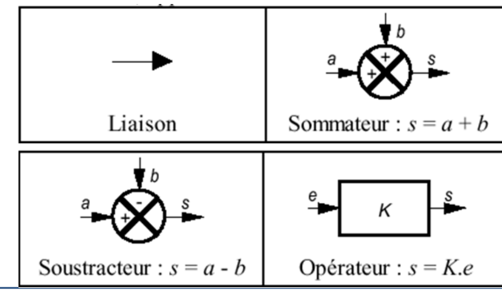


  - L'AOp est inexploitable seul pour faire une amplification!!!
    - SEUL: peut être utilisé en comparateur de tension simple
    - SINON: il faut des composants en +
      - Résistances, condensateurs…

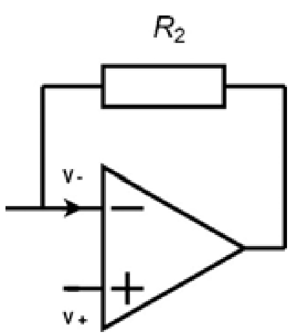
Amplificateur opérationnel: régime linéaire

- La contre-réaction
  - Principe





  - Appliqué à l'AOp



il faut avoir un **bouclage de la sortie sur l'entrée *V−* de l'AOp**

Les hypothèses de calculs:

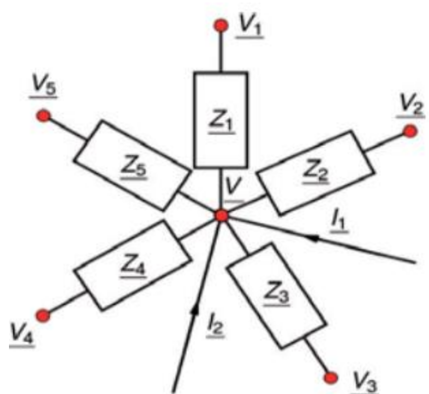
$i+ = i- = 0$

$V_{ed}=0$ (car Ad -> ∞)

$-Vsat<Vs<+Vsat$

AoP : Les outils

- Les calculs
  - Arsenal du GE11 à votre disposition
    - Thévenin, Norton, superposition et sans oublier loi des mailles et des nœuds!
  - Théorème de Millman



V est le ***barycentre des potentiels voisins pondérés par***
l'inverse des impédances.

$$\underline{V} = \frac{\sum_i \frac{\underline{V_i}}{\underline{Z_i}} + \sum_j \underline{I_j}}{\sum_i \frac{1}{\underline{Z_i}}}$$

  - Les stratégies de calculs
    - **On détermine ce que valent V^+ et V^- en fonction de V_e et V_s en utilisant la propriété $I^+ = I^- = 0$ (Millman permet d'arriver rapidement aux résultats)**
    - **En régime linéaire nous avons $V^+ = V^-$. On exprime alors $V_s = f(V_e)$**
    - En T.O.R. (non linéaire, absence de contre réaction ou réaction positive) on détermine le signe de

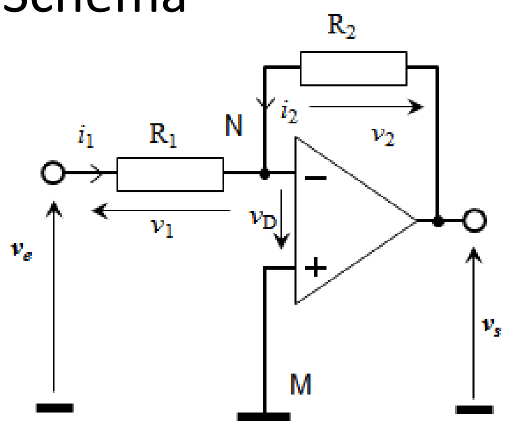
      $V_D = V+ - V-$.

      – Si $V_D > 0$ alors Vs=Vcc et on détermine V_e =Vseuil1 provoquant le basculement vers Vs=-Vcc
      – Si $V_D < 0$ alors Vs=-Vcc et on détermine V_e =Vseuil2 provoquant le basculement vers Vs=Vcc

À retenir

Amplificateur inverseur

- Schéma

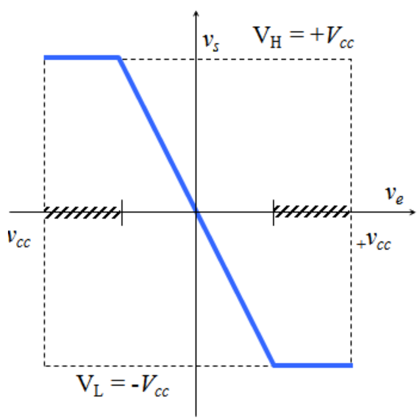


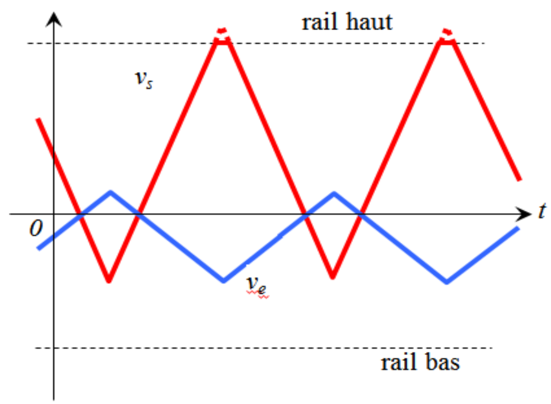
$$A_v = \frac{V_s(t)}{V_e(t)} = -\left(\frac{R_2}{R_1}\right)$$

La notation complexe n'est pas valide dans un contexte général

VALABLE SI TOUTES LES GRANDEURS SONT SINUSOIDALES

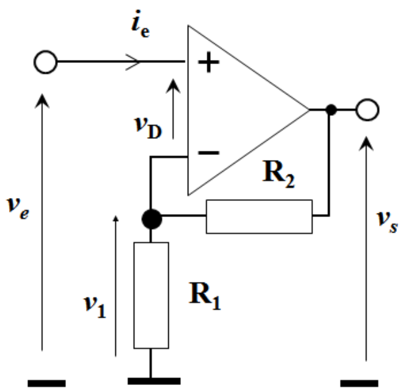
- Courbes





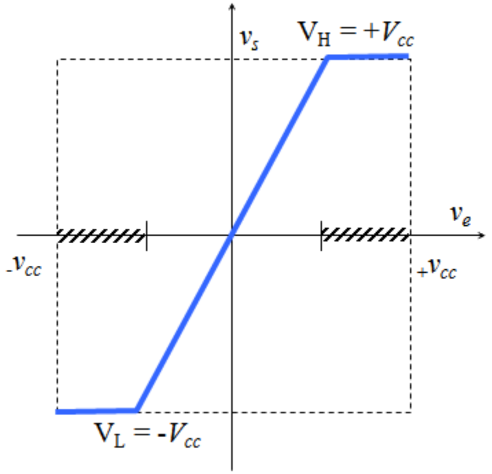
Amplificateur non inverseur

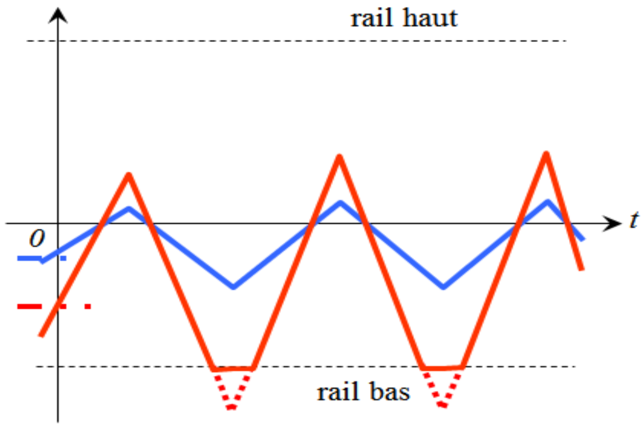
- Schéma



$$A_v = \frac{V_s(t)}{V_e(t)} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)$$

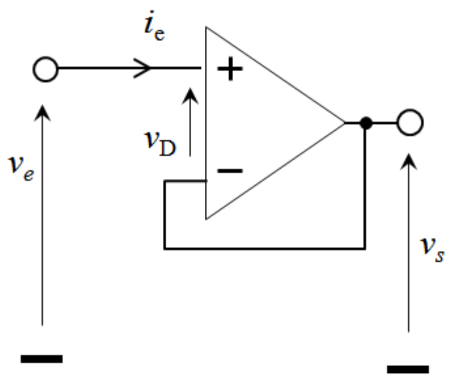
- Courbes



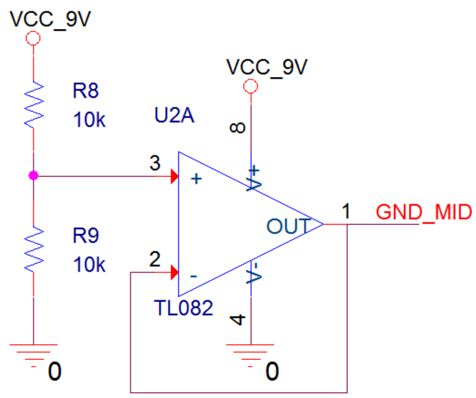


Amplificateur Unité: montage suiveur

- Schéma



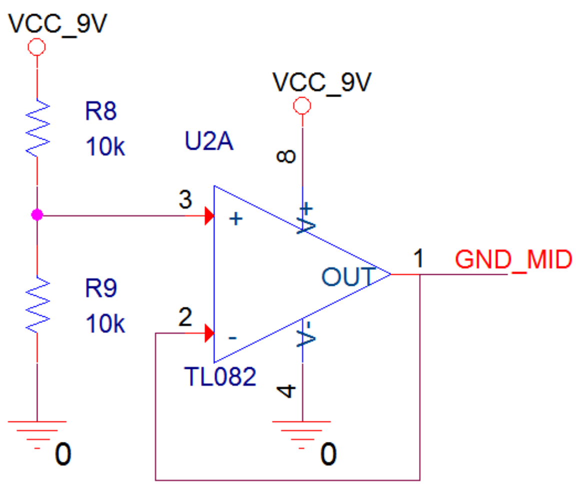
- Intérêt de ce montage
  - Adaptation d'impédance!
    - **isole les blocs** entre eux



Application du suiveur

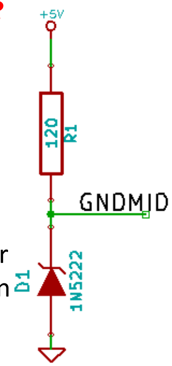
- Comment scinder une alimentation unique?
  - Point milieu en pratique

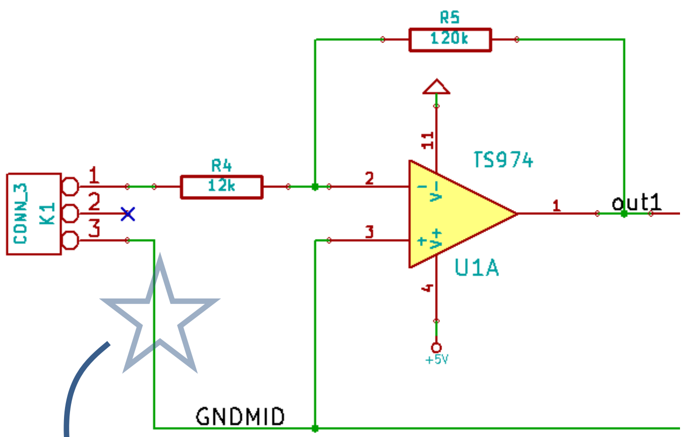
Exemple 1

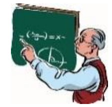


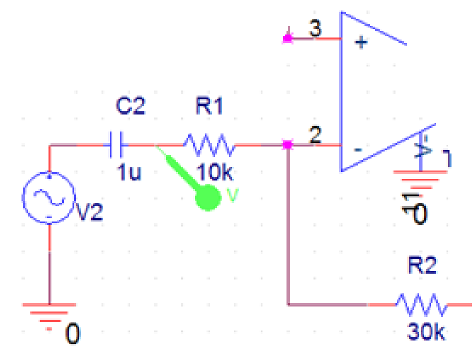
Exemple 2
Solution de notre E&R

Diode zéner polarisée en inverse





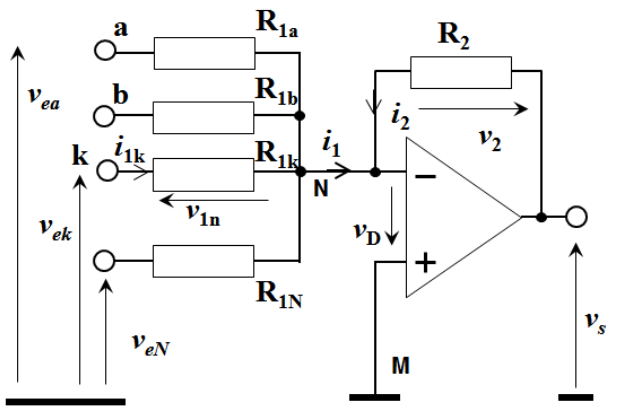




Si la source en entrée ne peut être référencé à GND_MID alors insertion d'un condo de liaison => blocage du continu

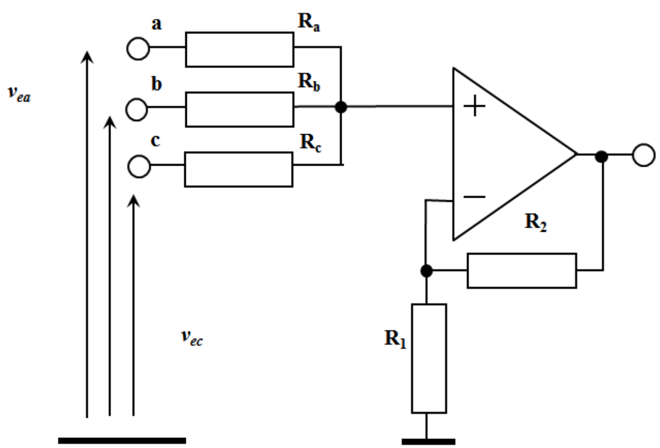
Amplificateur fonction arithmétique

- Additionneur inverseur



$$V_s = -\left(\frac{\mathrm{R}_2}{\mathrm{R}_{1a}} v_{ea} + \frac{\mathrm{R}_2}{\mathrm{R}_{1b}} v_{eb} + \ldots + \frac{\mathrm{R}_2}{\mathrm{R}_{1N}} v_{eN} \right)$$

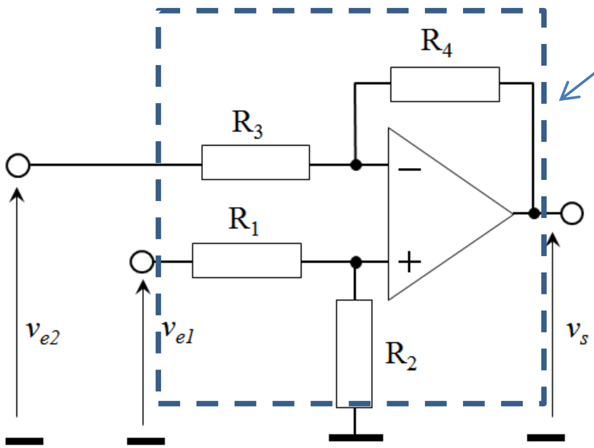
- Additionneur non inverseur



$$V_s = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)\left(\frac{1}{\mathrm{R}_{1a}} v_{ea} + \frac{1}{\mathrm{R}_{1b}} v_{eb} + \ldots + \frac{1}{\mathrm{R}_{1N}} v_{eN} \right)$$

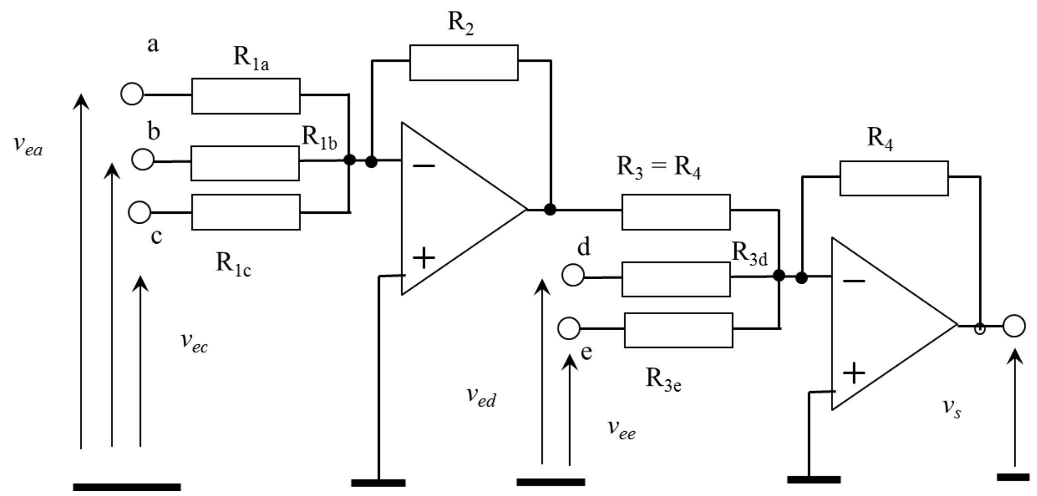
Amplificateur fonction arithmétique

- Soustracteur
  - Fait partie aussi des amplificateurs différentiels



$$V_S = \frac{R_3 + R_4}{R_3}\left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} v_{e1} - \frac{R_4}{R_3 + R_4} v_{e2}\right)$$

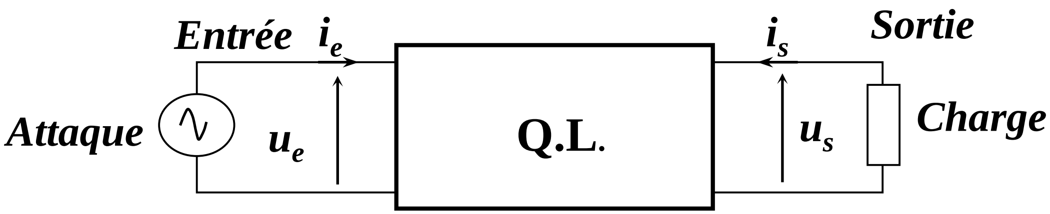
- Additionneur/soustracteur



$$V_S = +\left(\frac{R_2}{R_{1a}} v_{ea} + \frac{R_2}{R_{1b}} v_{eb} + \frac{R_2}{R_{1c}} v_{ec}\right) - \left(\frac{R_4}{R_{3d}} v_{ed} + \frac{R_4}{R_{3e}} v_{ee}\right)$$

Introduction à l'analyse harmonique

- **Cas particulier fondamental: $e_{(t)} = \text{E} \cos(\omega t + \theta_e)$**
  - Si le dispositif est linéaire alors => $s_{(t)} = \text{S} \cos(\omega t + \theta_s)$
- Notion de fonction de transfert



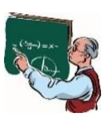
Quadripôle linéaire

En fonction des grandeurs utiles le nom donné à la fonction de transfert diffère

Entrée	*Sortie*	*H*	*Nom*
ue	*us*	$\underline{Av}$	*Amplification en tension*
ie	*is*	$\underline{Ai}$	*Amplification en courant*
ue	*is*	$\underline{Y_T}$	*Trans-admittance*
ie	*us*	$\underline{Z_T}$	*Trans-impédance*
Pe	*Ps*	*Ap*	*Amplification en puissance*

$$e_{(t)} = \text{E} \cos(\omega t + \theta_e) \qquad e_{(t)} \rightarrow \underline{\text{E}} = [\text{E} \,;\, \theta_e] = \text{E}\, e^{j\theta e}$$

$$s_{(t)} = \text{S} \cos(\omega t + \theta_s) \qquad s_{(t)} \rightarrow \underline{\text{S}} = [\text{S} \,;\, \theta_s] = \text{S}\, e^{j\theta s}$$

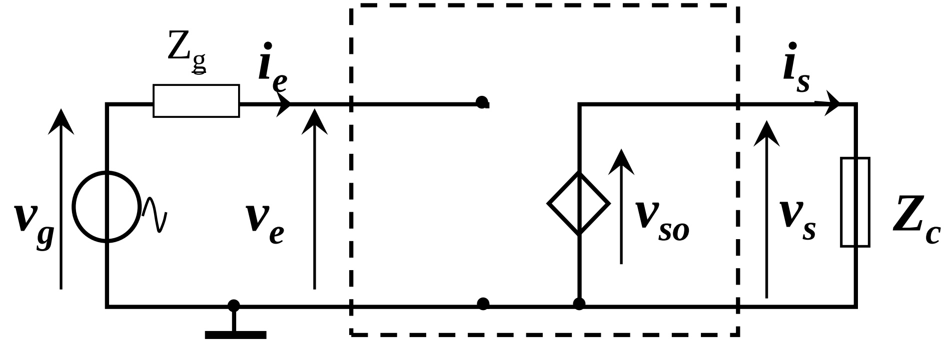


La réponse à une excitation sinusoïdale reste sinusoïdale pour un système linéaire

$$\underline{\text{H}}_{(j\omega)} = \frac{\underline{\text{S}}_{(j\omega)}}{\underline{\text{E}}_{(j\omega)}}$$

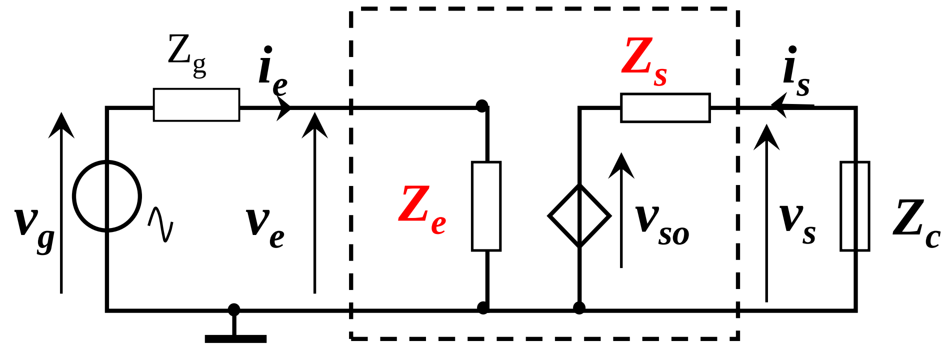
Modèles

- Amplificateur de tension
  - Amplificateur parfait
    - Ne doit pas gêner la source
      - On retrouve toute la tension de la source
    - Ne doit pas être gêné par la charge
      - Source de tension parfaite
    - Présente une amplification en tension constante $\forall f$



$$v_{so} = A_{v0} v_e$$

  - Amplificateur imparfait
    - Impédance d'entrée non infinie
    - Impédance de sortie de sortie non nulle
    - amplification non constante

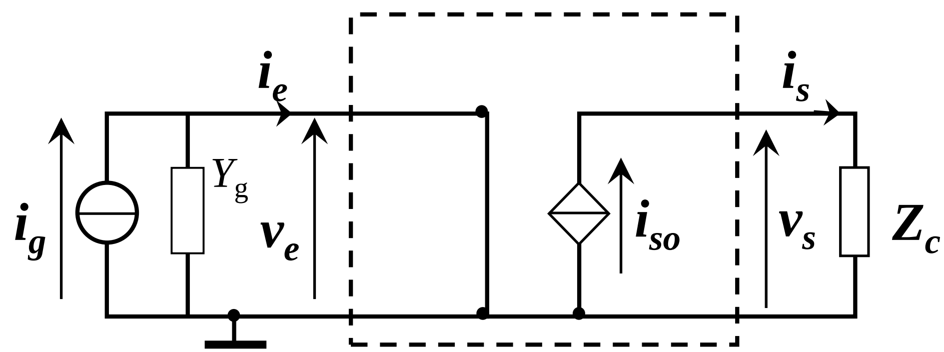


$$\underline{Z}_e = \frac{\underline{V}_e}{\underline{I}_e} \qquad v_{so} = A_{v0} v_e \qquad \underline{Z}_S = \frac{\underline{V}_{s0}}{-\underline{I}_{SCC}}$$

Toute les grandeurs sont complexes (barre omise pour faciliter les écritures!)

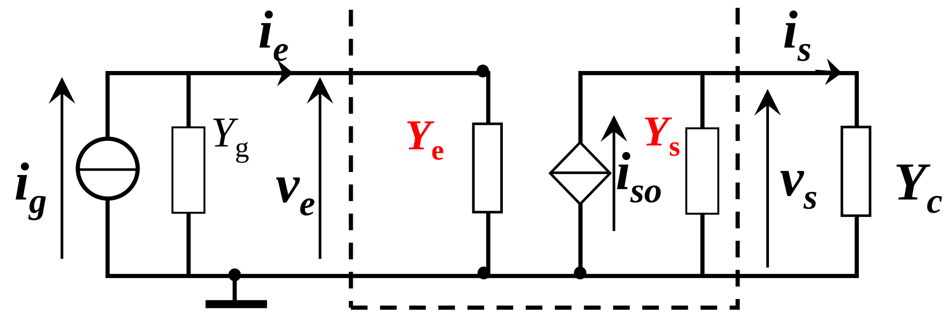
Modèles

- Amplificateur de courant
  - Amplificateur parfait
    - Ne doit pas gêner la source
      - On retrouve toute le courant de la source
    - Ne doit pas être gêné par la charge
      - Source de courant parfaite
    - Présente une amplification en courant constante $\forall f$



$i_{so}=A_{i0}i_e$

  - Amplificateur imparfait
    - Admittance d'entrée non nulle
    - Admittance de sortie non infinie
    - amplification non constante

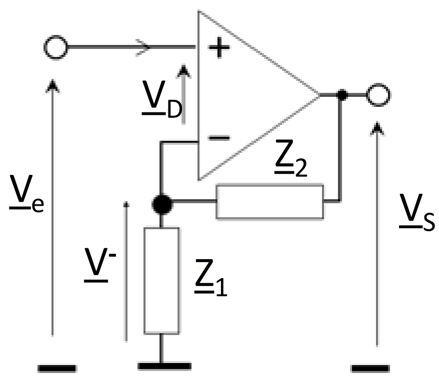


$i_{so}=A_{i0}i_e$

Toutes les grandeurs sont complexes

Fonction de transfert : Amplificateur NON inverseur

Schéma

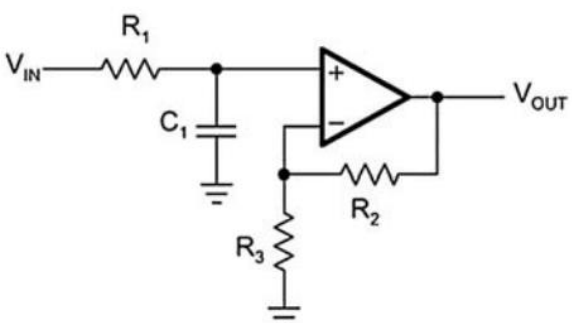


La notation complexe est introduite pour pouvoir généraliser aux impédances

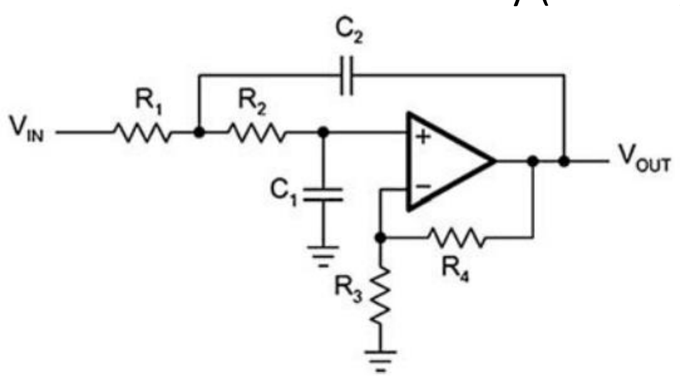
A CONDITION que ve(t), vs(t) , ie(t) soient TOUS SIN ou COS

Exemples

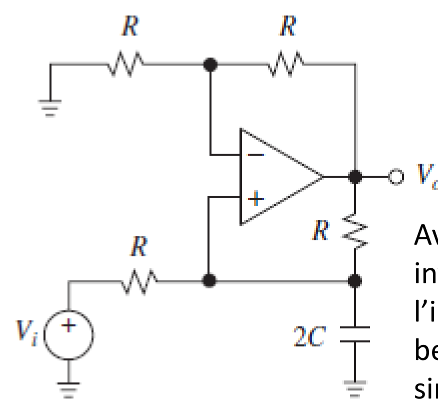
Filtre Passe bas ordre 1

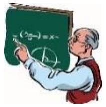


Filtre de Sallen Key (ordre 2)



Montage intégrateur non inverseur Howland

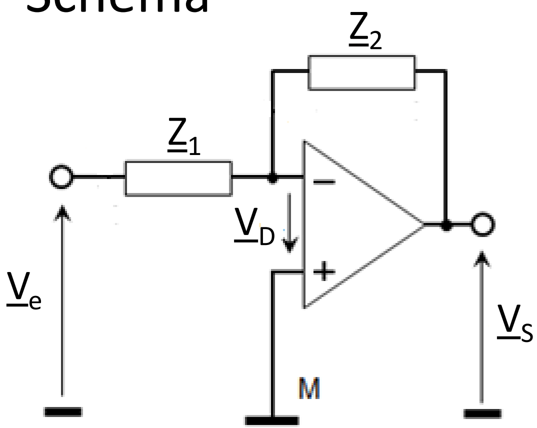




Avec un ampli inverseur l'intégrateur est beaucoup plus simple!!!

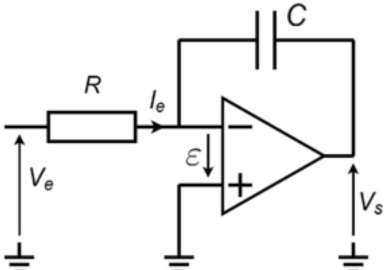
Fonction de transfert :Amplificateur inverseur

- Schéma



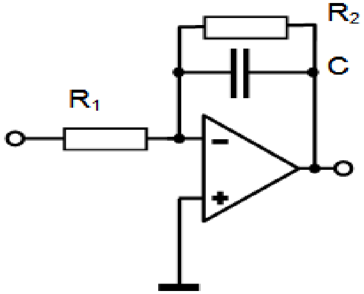
- Exemples

Montage intégrateur



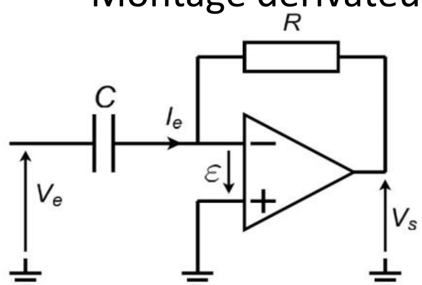
Filtre passe bas ordre1

Montage pseudointégrateur

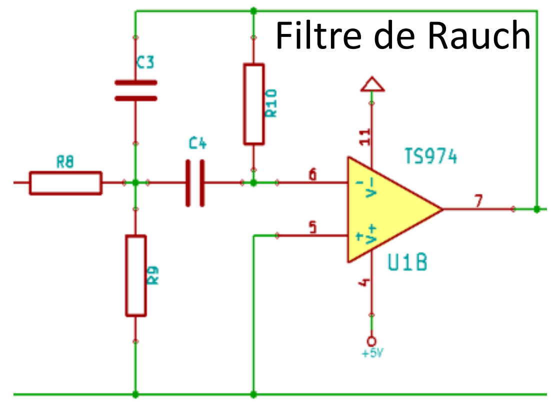


Filtre passe bas ordre1

Montage dérivateur



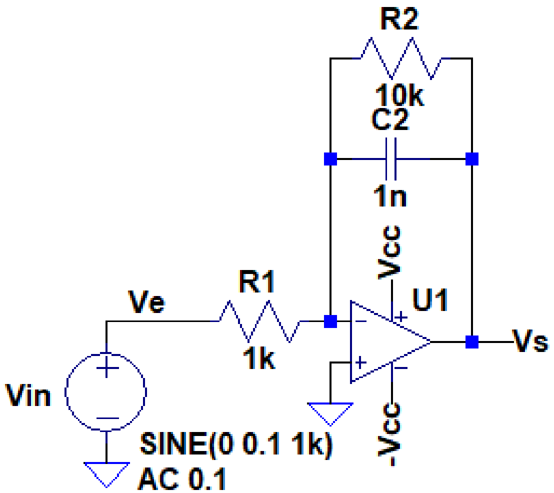
Filtre passe haut ordre1

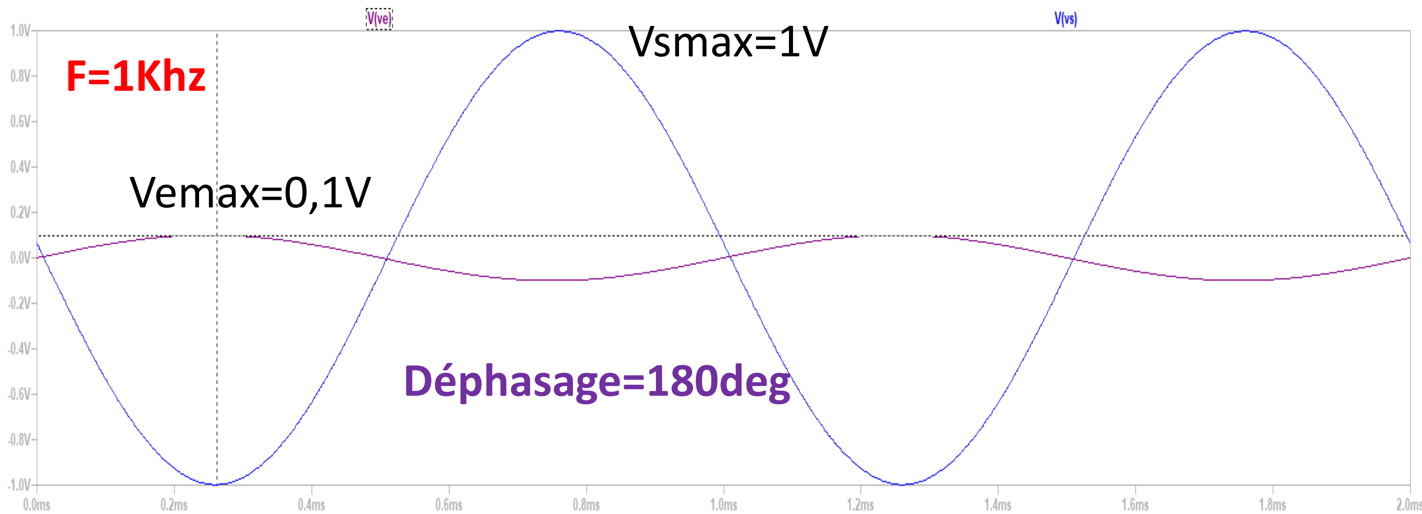


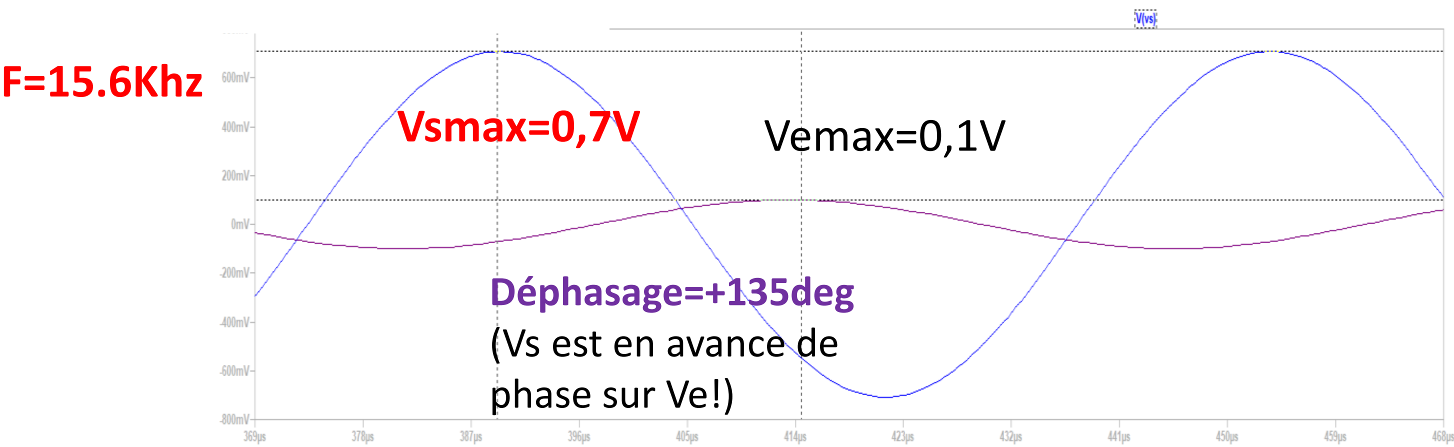
Filtre passe bande ordre2

Fonction de transfert :Amplificateur inverseur

- Courbes







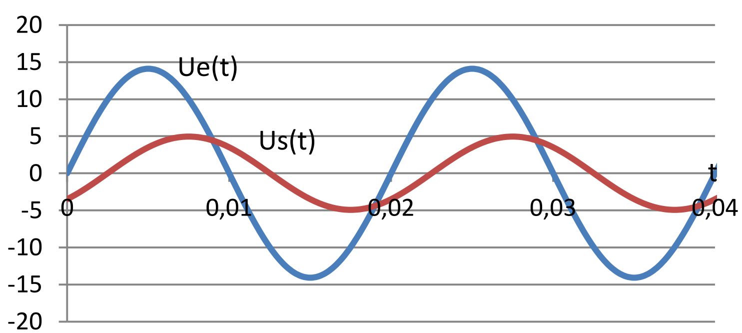
Représentation fréquentielle

- Amplification et déphasage
  - L'amplification A
    - l'amplitude du signal de sortie sur celle du signal d'entrée pour chacune des fréquences possibles du signal

$$A(j\omega) = \frac{\left|\underline{U_s}(j\omega)\right|}{\left|\underline{U_e}(j\omega)\right|}$$

  - Le déphasage φ :
    - différence entre la phase (argument) du signal de sortie et la phase du signal d'entrée pour chacune des fréquences possibles du signal

$$\varphi(j\omega) = \arg \underline{U_s}(j\omega) - \arg \underline{U_e}(j\omega)$$



Rappel sur les notations complexes
A connaître absolument

	Relation U-I (temporel)	Relation U-I (complexe)	Impédance (Ohm)
Résistance	$U = RI$	$\underline{U} = R\underline{I}$	R
Condensateur	$i = \frac{dq}{dt} = C\frac{d(u_C)}{dt}$	$\underline{U_C} = \frac{1}{jC\omega}\underline{I}$	$\frac{1}{C\omega}$
Inductance	$u_L = L\frac{di}{dt}$	$\underline{U_L} = jL\omega\underline{I}$	$L\omega$

Représentation fréquentielle

- Diagramme de Bode
  - Pour différent w (ou f) on mesure A et φ (ou calculs théoriques)

f	100Hz	200Hz	500Hz	……..	
A	1	0,9	0,8		
φ	0°	5°	12°		

  - On calcule le gain en décibel: $G_{V(dB)} = 20\log\left(\frac{U_s}{U_e}\right)$

Retenu pour comparer des tensions en déciBel

Définition du Bel

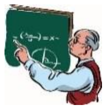
$$G_{P(Bel)} = \log\left(\frac{P_s}{P_e}\right)$$

Définition déciBel

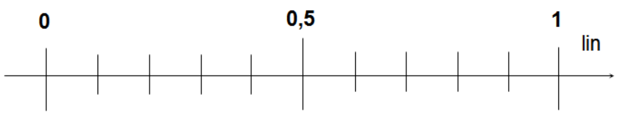
$$\boxed{G_{p(Bel)} = 10.\log\left(\frac{P_s}{P_e}\right)}$$

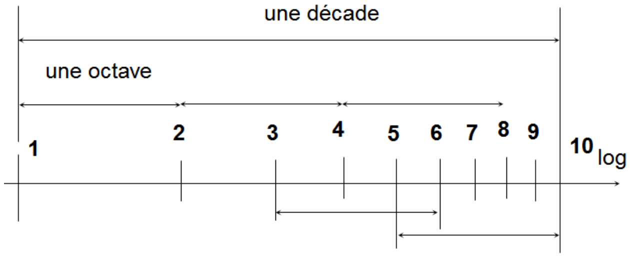
$$G_{p(dB)} = 10\log\left(\frac{U_s^2/R}{U_e^2/R}\right) = 10\log\left(\frac{U_s^2}{U_e^2}\right) = \boxed{20\log\left(\frac{U_s}{U_e}\right)}$$

  - On trace sur une échelle semi-log G_V et φ en fonction de w (ou f)



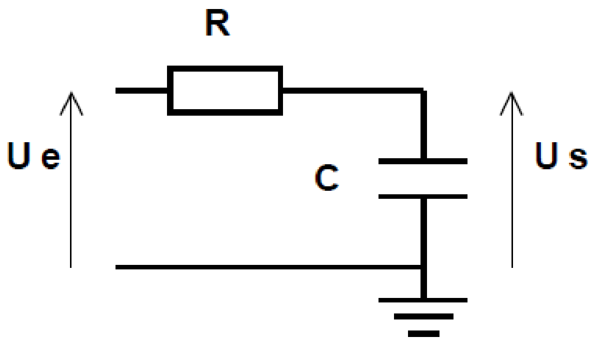
Rappel sur les échelles (voir GE11)





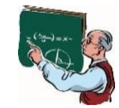
Représentation fréquentielle

- Exemple 1



Fonction de transfert

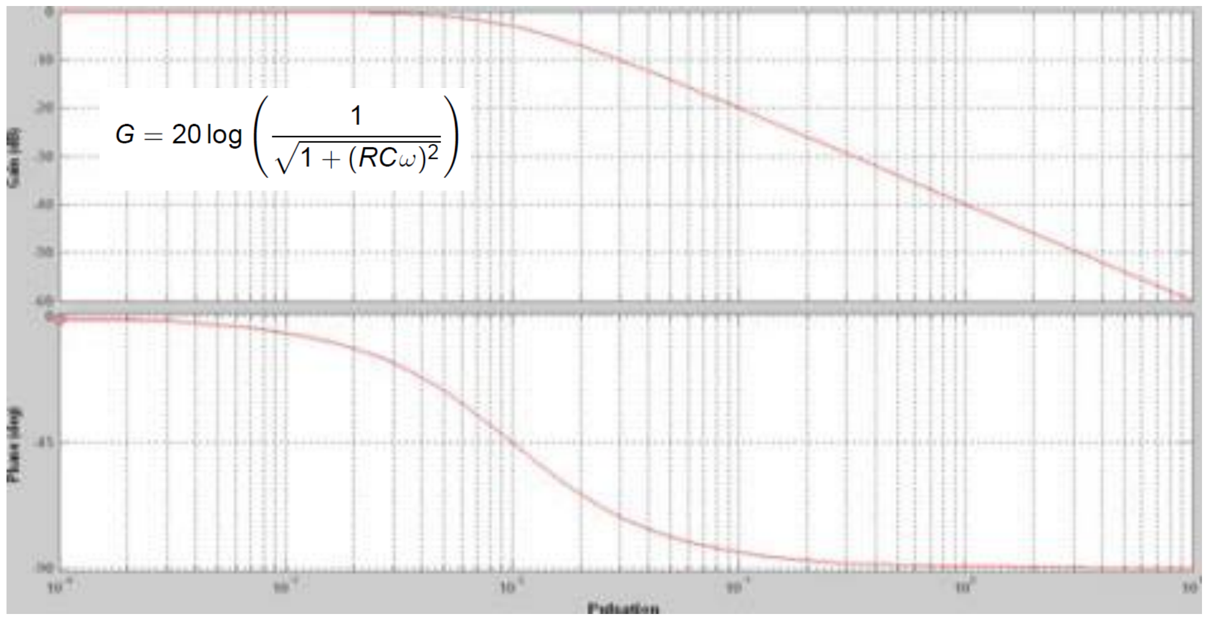
$$\underline{H}(\jmath\omega) = \frac{\underline{U_s}(\jmath\omega)}{\underline{U_e}(\jmath\omega)} = \frac{\underline{Z_C}}{\underline{Z_R} + \underline{Z_C}} = \frac{\frac{1}{\jmath C\omega}}{R + \frac{1}{\jmath C\omega}} = \frac{1}{1 + \jmath RC\omega}$$



Comportement de type filtre passe-bas

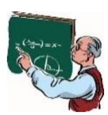
$$A = |\underline{H}(\jmath\omega)| = \left|\frac{1}{1 + \jmath RC\omega}\right| = \frac{1}{\sqrt{1 + (RC\omega)^2}}$$

$$\varphi = \arg \underline{H}(\jmath\omega) = \arg 1 - \arg(1 + \jmath RC\omega) = 0 - tan^{-1}\left(\frac{RC\omega}{1}\right) = -tan^{-1}(RC\omega)$$

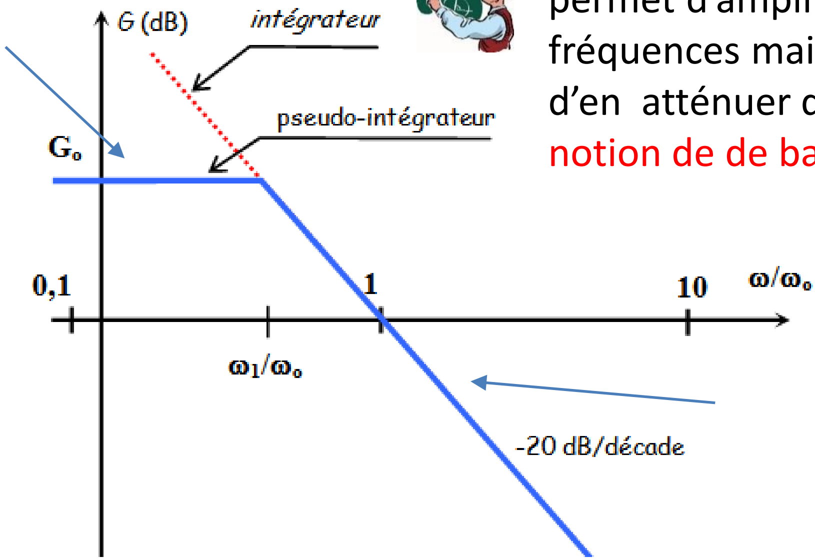


Filtre ordre 1

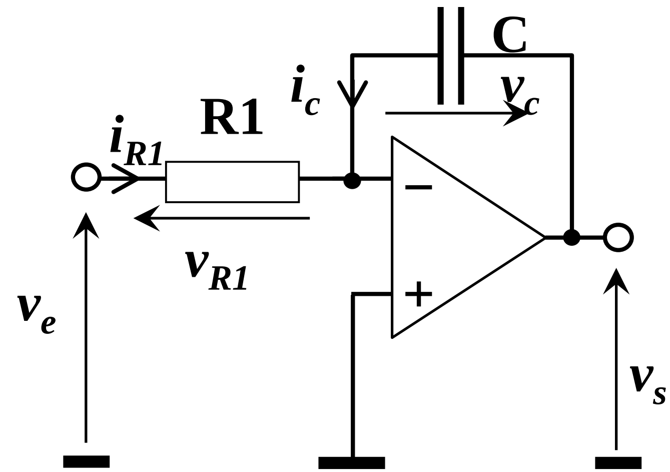
- Exemple 2
  - Approche fréquentielle
    - fonction de transfert du 1er ordre de type passe-bas
    - Diagramme de Bode



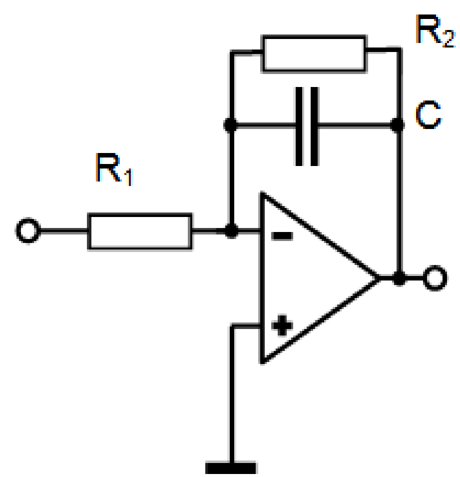
On constate que le dispositif permet d'amplifier certaines fréquences mais aussi d'en atténuer d'autres=> notion de de bande passante



$$\omega_0 = \frac{1}{R_1 C} \qquad G_0 = 20\log\left(\frac{R_2}{R_1}\right) \qquad \omega_1 = \frac{1}{R_2 C}$$



Circuit intégrateur



Variante: Circuit pseudo-intégrateur

Représentation fréquentielle

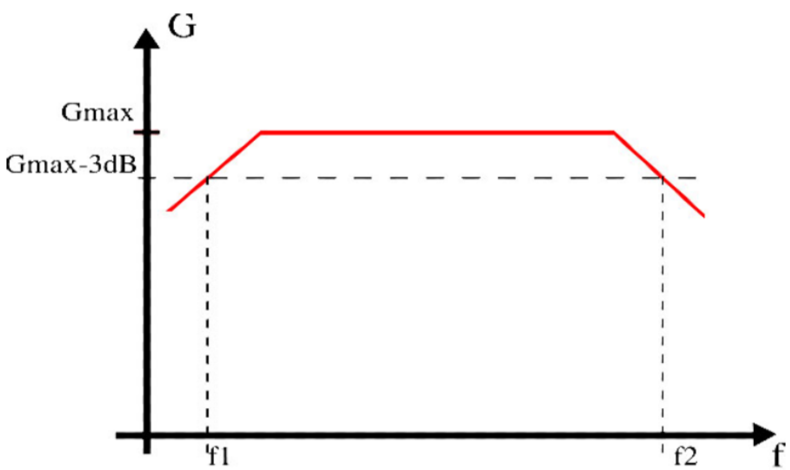
- Bande de passante
  - Défini une plage de fréquence pour laquelle le gain en tension reste « presque » constant
    - Définition du « presque »

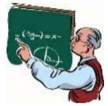
$$G_{\max dB} \geq G_{dB}(f) \geq (G_{\max dB} - x_{dB})$$

En général le seuil *x* est de -3dB

  - Fréquences de coupures

$$G_{dB}(f = f_c) = (G_{\max dB} - x_{dB})$$





Pourquoi -3dB?

Correspond $P = 0{,}5\ P_{max}$

En effet $G_{PC} = G_{Pmax} - 3$ dB

Conséquence: $A(f_c) = \dfrac{A_{max}}{\sqrt{2}}$

$$G_{dB}(f_c) = 20\log\left(\frac{A_{max}}{\sqrt{2}}\right) = 20(\log A_{max} - \log\sqrt{2})$$
$$= G_{max_{dB}} - 10\log 2$$
$$G_{dB}(f_c) = G_{max_{dB}} - 3dB$$

Analyse harmonique

- Intérêt des fonctions de transferts harmoniques
  - Elles permettent de trouver facilement la réponse fréquentielle d'un système pour une entrée donnée

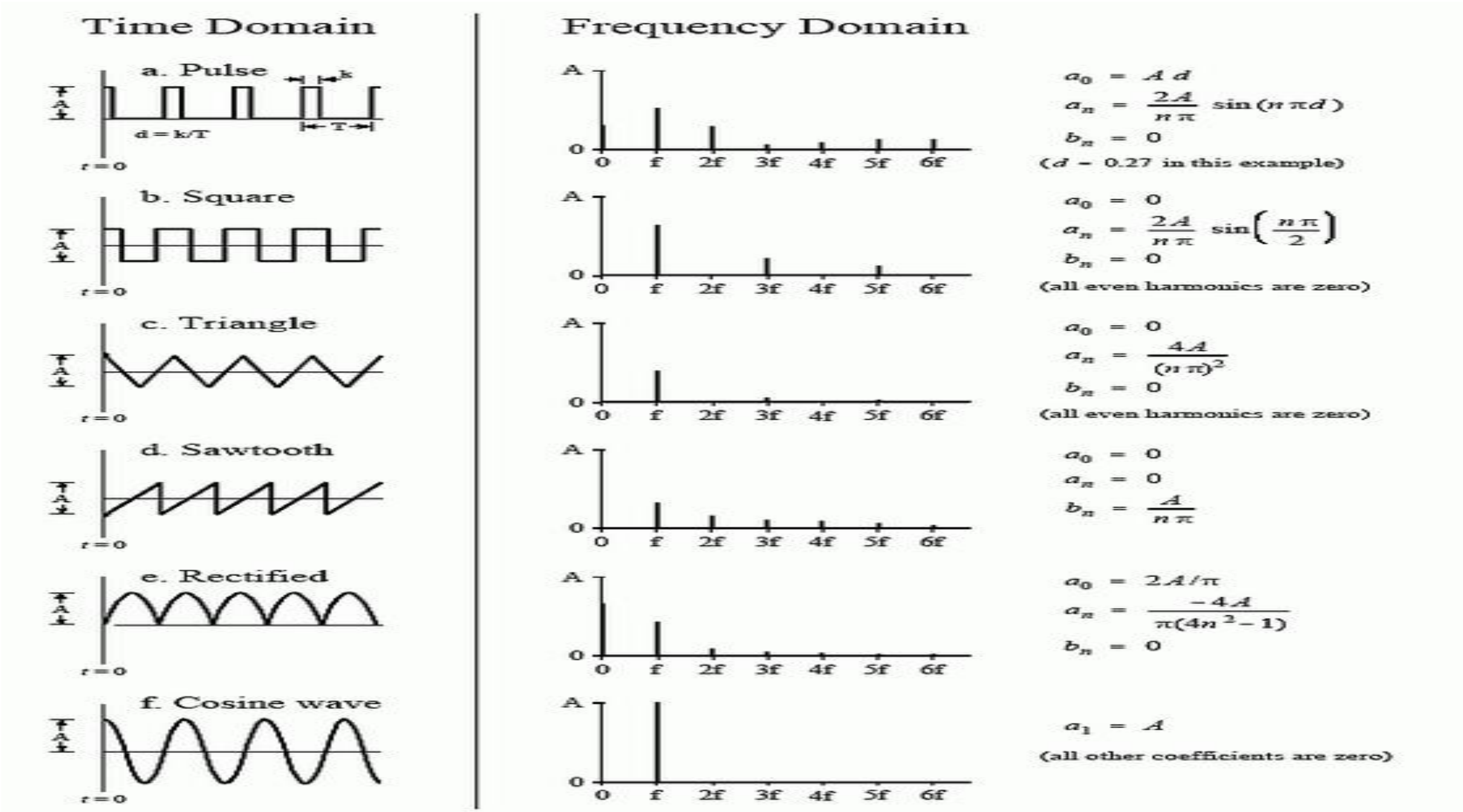
Vs(jw)=H(jw)x Ve(jw)

Produit des modules

  - Comment trouver |H(jw)|
    - Pour des cas simples déjà étudiés en utilisant la notion d'impédance (outils complexes)
      - Obtention de diagramme de Bode
    - Dans un contexte général en utilisant des outils de transformations mathématiques
      - Transformée de Laplace
      - Transformée de Fourier
  - Comment trouver |Ve(jw)|
    - En utilisant un outil permettant de passer d'une représentation temporelle à une représentation fréquentielle
      - Série de Fourier pour les fonctions période en temps
      - Transformée de Fourier pour les fonctions non périodique

Analyse harmonique

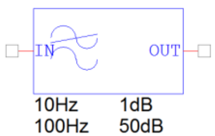
- Représentation fréquentielle de fonctions usuelles



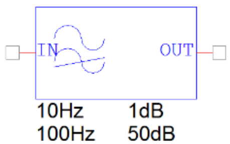
Fonction Filtrer

- Filtrer
  - Objectif: supprimer ou conserver que certaines fréquences du signal d’entrée
  - On distingue 4 grandes familles de filtrage

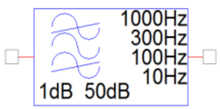
PASSE-BAS



PASSE-HAUT



PASSE-BANDE

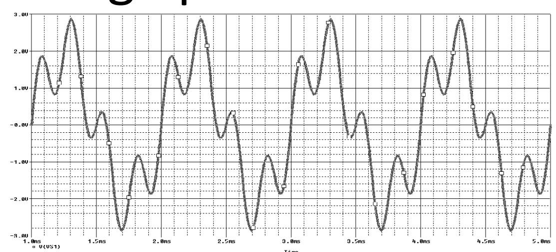


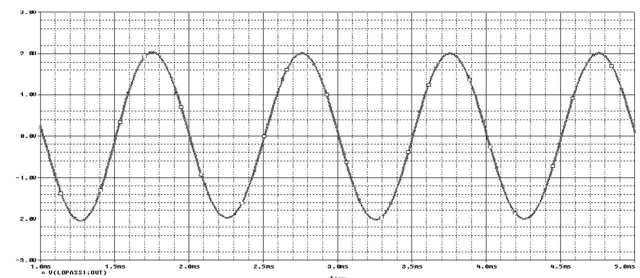
REJECTEUR DE BANDE

- Exemple de filtrage passe bas

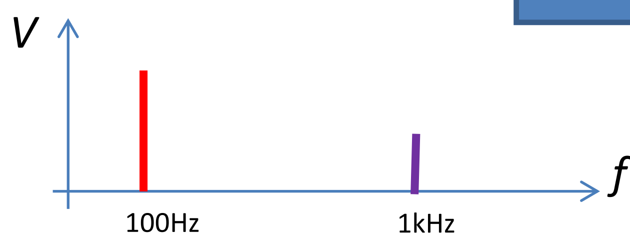
Représentation temporelle

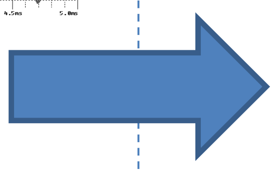
Mélange de 2 sinus:100 Hz et 1kHz

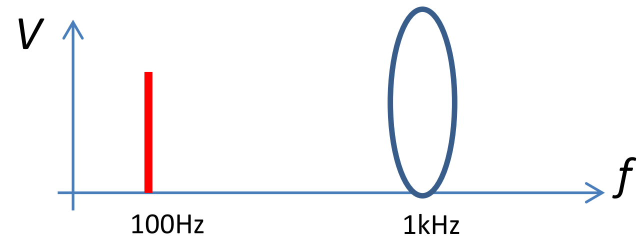




Représentation fréquentielle





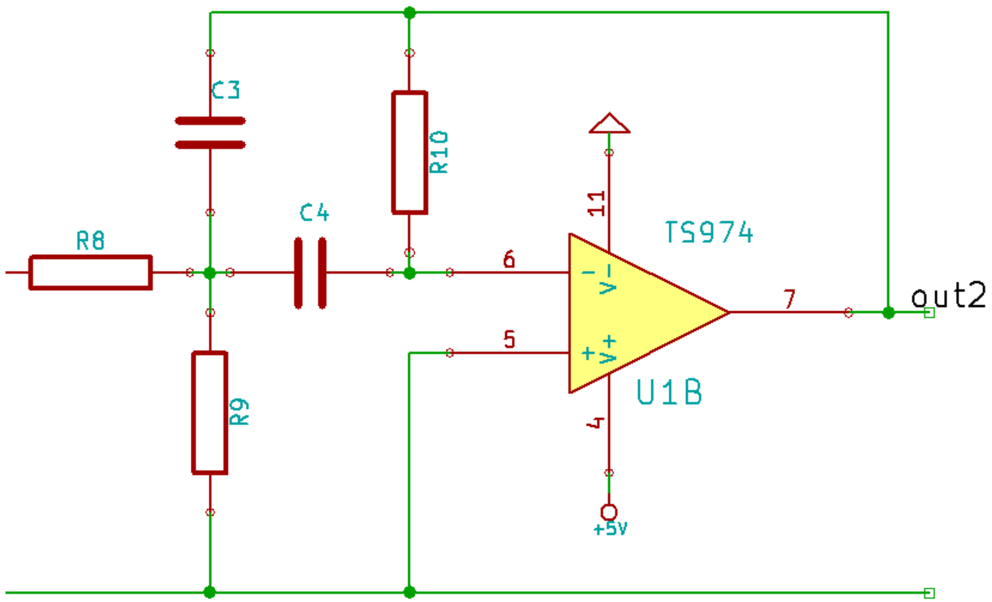


Fonction Filtrer

- Pour notre application
  - Nous souhaitons conserver les signaux émis autour de 40Khz
  - Supprimer les autres gammes de fréquences
    - Voix , bruits ambiants
  - Un passe bande convient donc (cependant compte tenu du comportement naturellement passe bande du récepteur US un passe bas ferait tout aussi bien l'affaire!)
  - Cependant nous souhaitons pouvoir réutiliser le récepteur avec un émetteur infrarouge

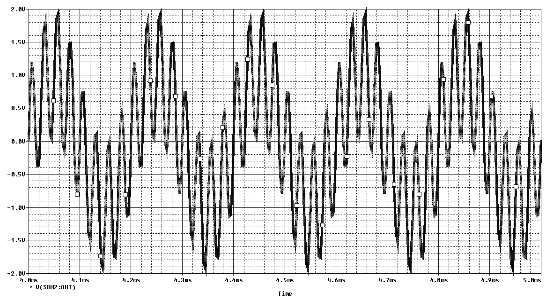
Solution retenue pour notre E&R

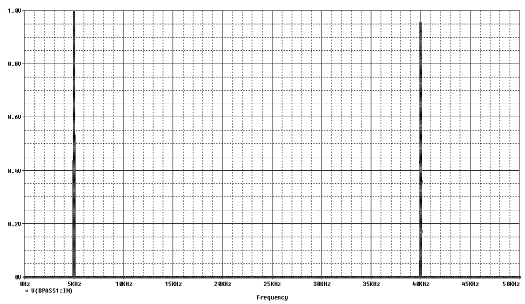
Structure de Rauch (Multiple Feedback Biquad)

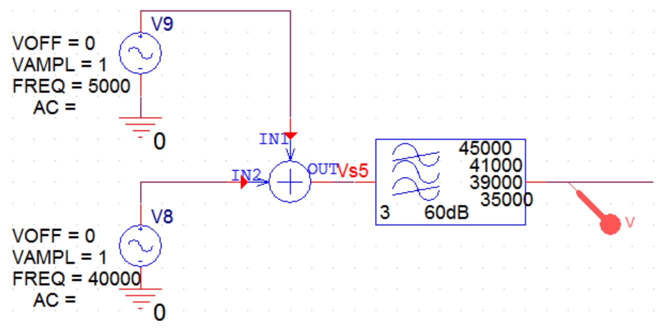


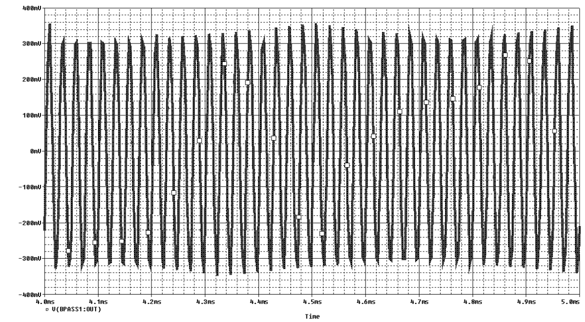
Principe du filtrage

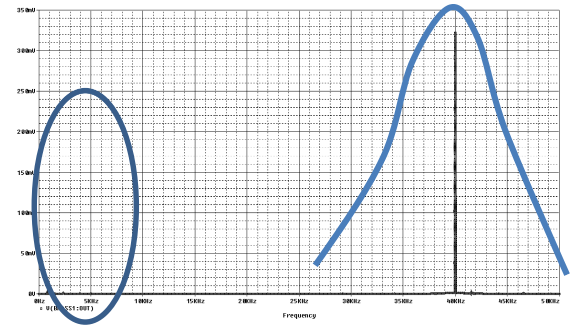
- Simulation filtre passe-bande











Passe Bande d'ordre 2

- Modèle
  - Fonctions de transfert

$$\underline{T}(j\omega)=A.\frac{j2m\frac{\omega}{\omega_0}}{1+2jm\frac{\omega}{\omega_0}+\left(j\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2}$$

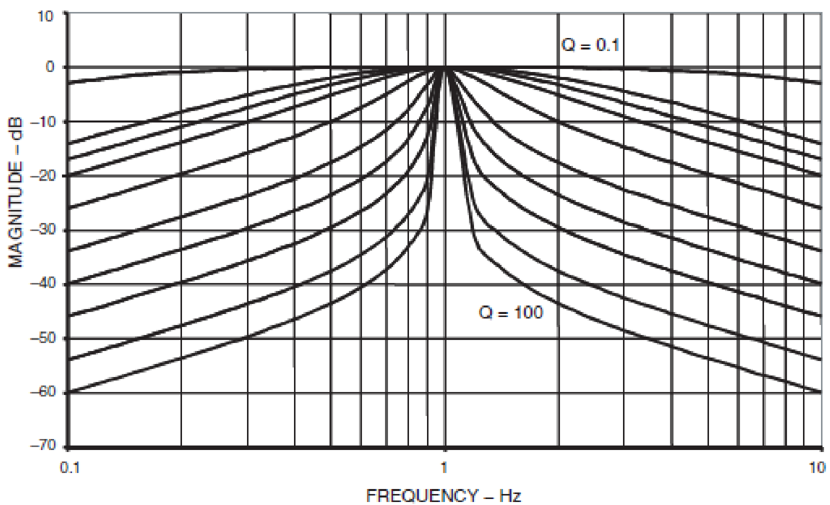
- Fréquence centrale : F_0
- Coefficient de sélectivité: Q

$$Q=\frac{1}{2m}=\frac{F_0}{F_H-F_L}$$

  - Il définit la bande passante
- Bande passante
  - Déduite des fréquences de coupures à -3dB
    - » F_H et F_L

$$F_0=\sqrt{F_H F_L}$$

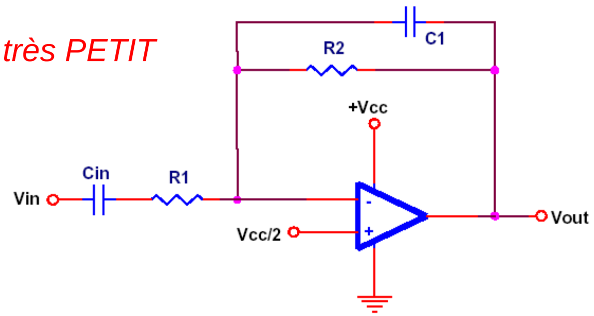
Diagramme de Bode paramétré en Q



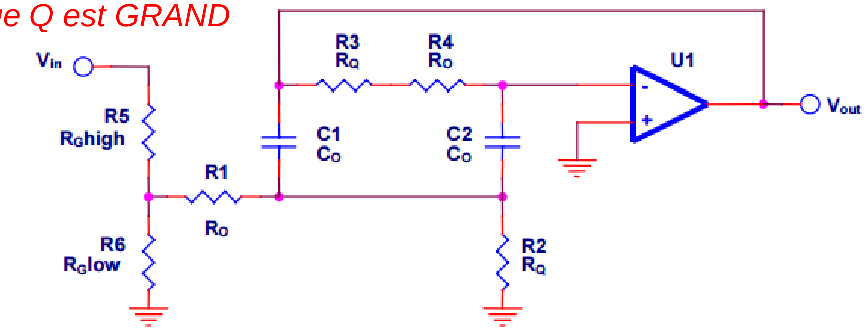
Passe Bande d'ordre 2

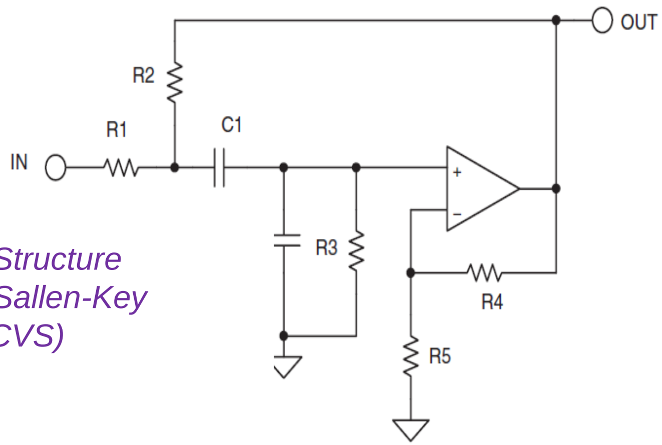
- Réalisation
  - Plusieurs solutions existent: 'pros and cons' pour chaque solution

1 -Combinaison d'un passe-haut et d'un passe bas
Utilisé lorsque Q est très PETIT

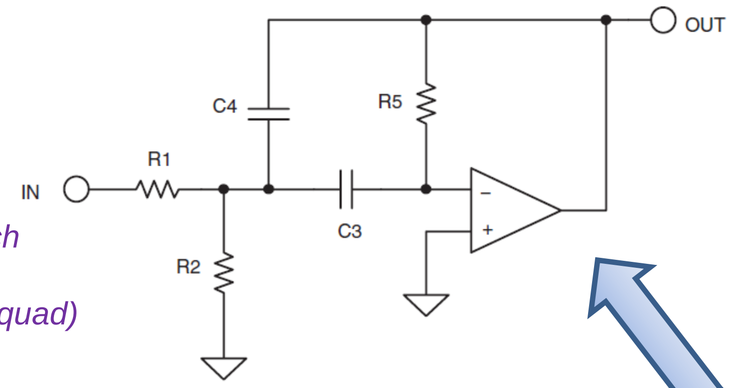


2 –Structure de Deliyannis modifiée
Utilisé lorsque Q est GRAND





3 –Structure de Sallen-Key (VCVS)



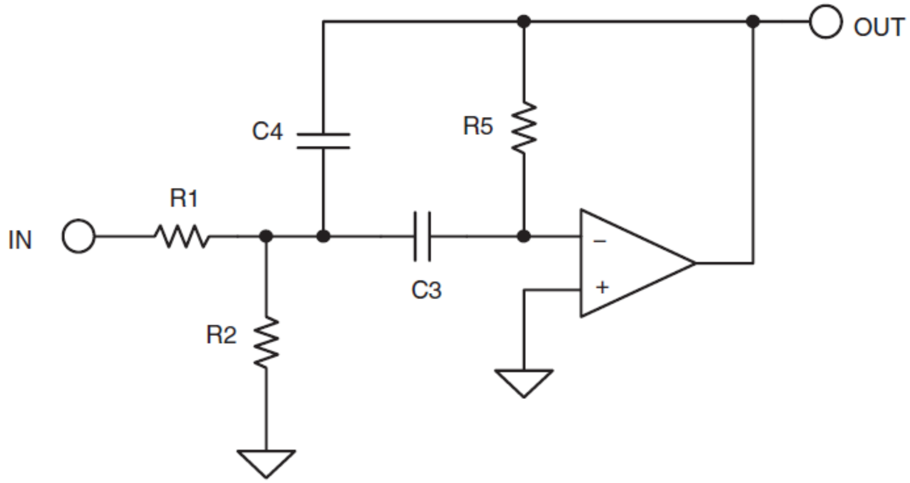
4 –Structure de Rauch (MFB Multiple Feedback Biquad)

Passe-Bande MFB

- Structure
  - RETENU POUR NOTRE E&R

    Pro/cons
    + bande passante
    +ratio valeur min/max
    -Interaction Fo et Q
    -Gain dépendant de Q

    Couramment utilisé pour Q petit et moyen (<20)



- Fonction de transfert

$$\frac{V_O}{V_{IN}} = \frac{-s\dfrac{1}{R1\ C4}}{s^2 + s\dfrac{(C3+C4)}{C3\ C4\ R5} + \dfrac{1}{R5\ C3\ C4}\left(\dfrac{1}{R1}+\dfrac{1}{R2}\right)}$$

$$\underline{T}(j\omega)=A.\frac{j2m\dfrac{\omega}{\omega_0}}{1+2jm\dfrac{\omega}{\omega_0}+\left(j\dfrac{\omega}{\omega_0}\right)^2}$$

s =jw *opérateur de Laplace (en France p=jw)*

Identification terme à terme avec la forme canonique

Passe-Bande MFB

- Algorithme de calcul (si pas de PC disponible)
  - Permet d'obtenir rapidement des valeurs
  - Les cahiers des charges définissent en général
    - La fréquence centrale: F_0
    - Le gain à F_0
    - La bande passante (autrement dit Q)

3 données et 5 inconnues!!!!

✓ Il faut réduire le nombre de degré de liberté en se fixant des valeurs

✓ On peut rajouter une donnée en imposant Ze

Choisir: C3

Puis

$$k = 2\pi F_o C3$$

$$C4 = C3$$

$$H = -\frac{A}{Q}$$

A est négatif car le filtre repose sur une base inverseuse

$$\Rightarrow$$

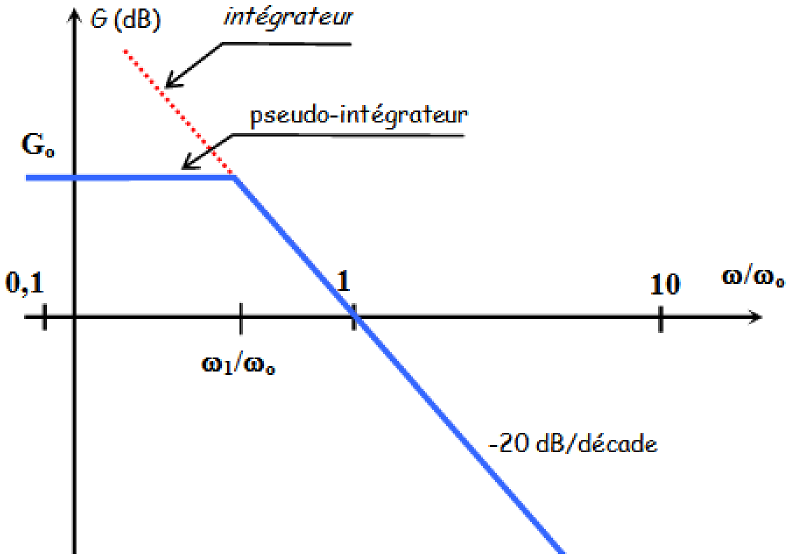
$$R1 = \frac{1}{H\,k}$$

$$R2 = \frac{1}{(2Q - H)k}$$

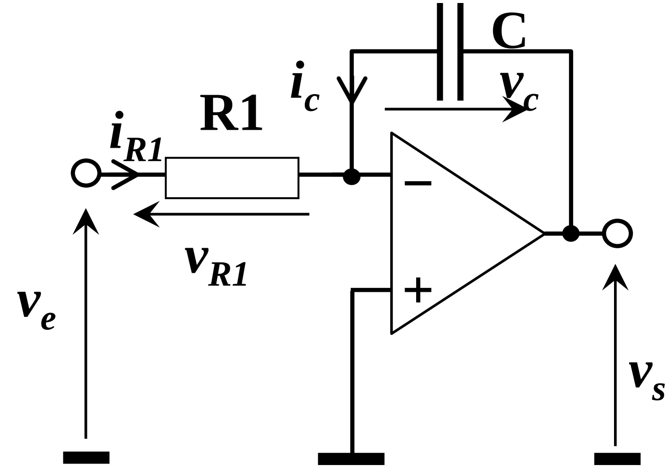
$$R5 = \frac{2Q}{k}$$

Filtre ordre 1

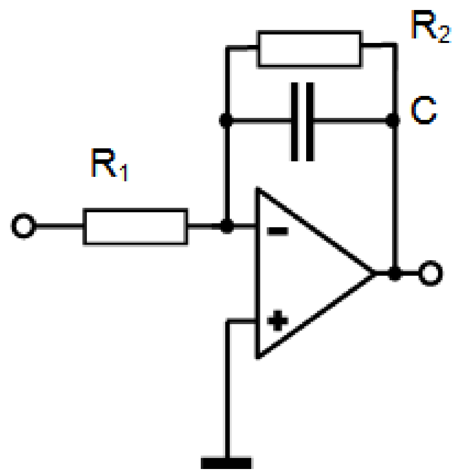
- Filtre passe-bas
  - Approche fréquentielle
    - fonction de transfert du 1er ordre de type passe-bas
    - Diagramme de Bode



$\omega_o = \frac{1}{R_1 C}$ $G_o = 20 \log(\frac{R_2}{R_1})$ $\omega_1 = \frac{1}{R_2 C}$



Circuit intégrateur



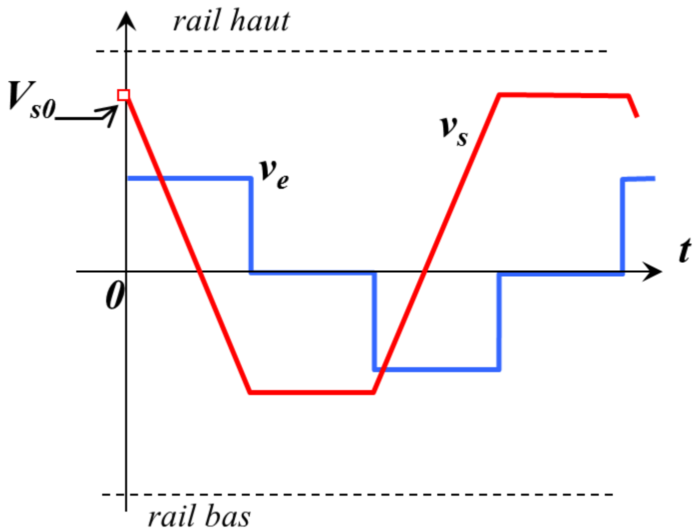
Variante: Circuit pseudo-intégrateur

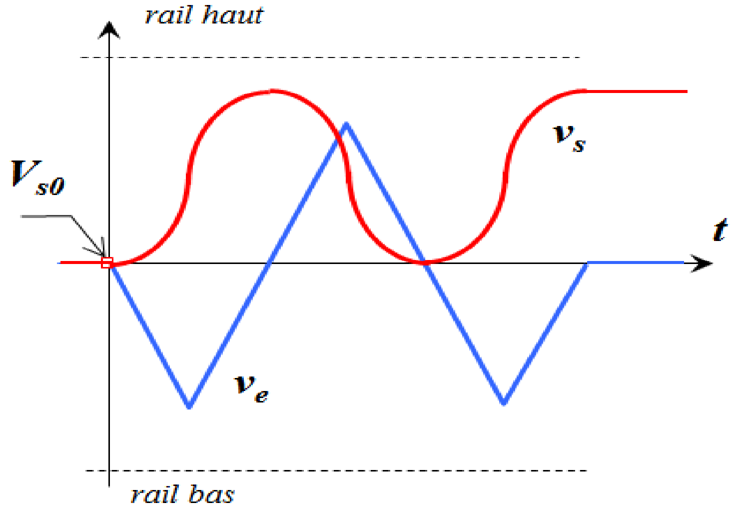
Filtre ordre 1

- Filtre passe-bas
  - Approche temporelle
    - Mise en évidence de la forme intégrale
      - Circuit utilisé en régulation (2ème année cours d'automatique)

intégrateur pur

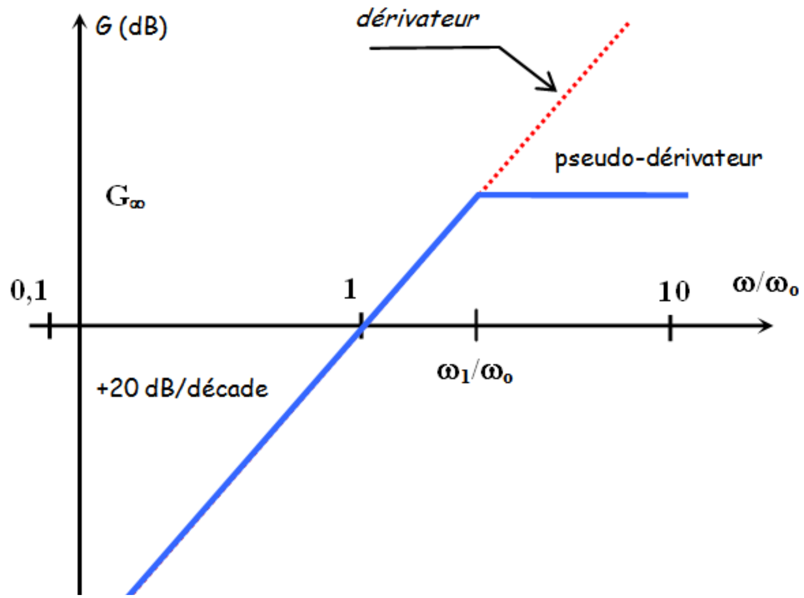
$$v_{s(t)} = \mathrm{V_{S0}} - \frac{1}{\mathrm{R_1 C}} \int_0^t v_{e(\tau)} d\tau = \mathrm{V_{S0}} - \frac{1}{\mathrm{T}i} \int_0^t v_{e(\tau)} d\tau$$



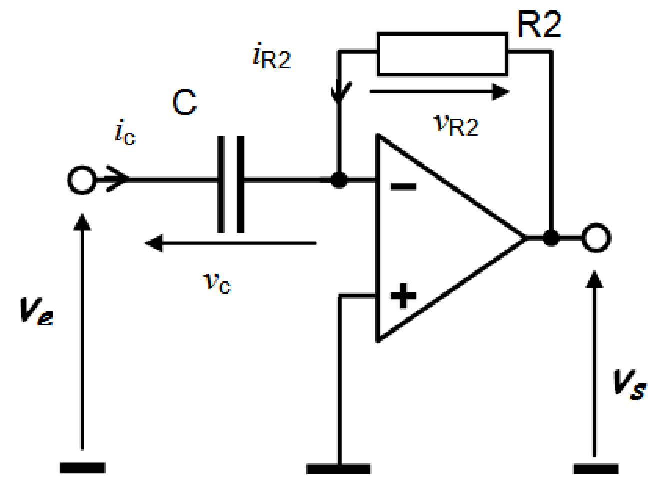


Filtre ordre 1

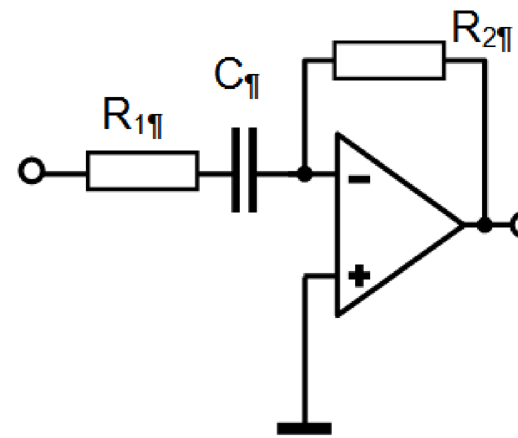
- Filtre passe-haut
  - Approche fréquentielle
    - fonction de transfert du 1er ordre de type passe-bas
    - Diagramme de Bode



$$\omega_o = \frac{1}{R_2 C} \qquad G_\infty = 20\log\left(\frac{R_2}{R_1}\right) \qquad \omega_1 = \frac{1}{R_1 C}$$



Circuit dérivateur



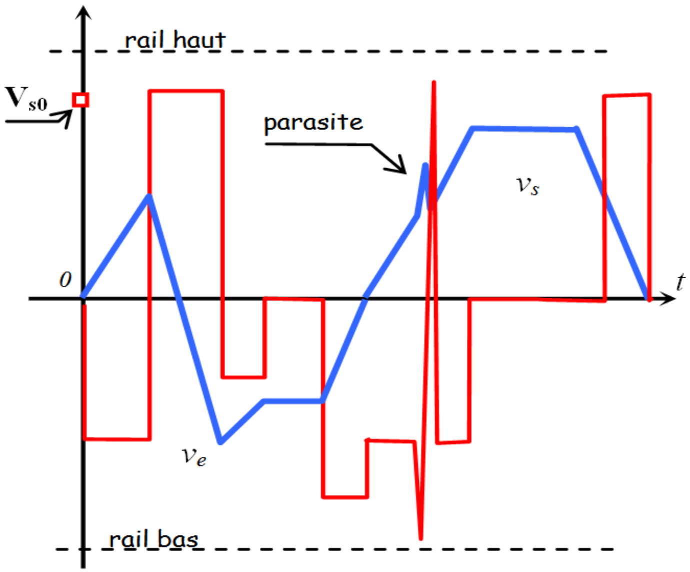
Circuit pseudo-dérivateur

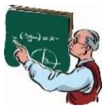
Filtre ordre 1

- Filtre passe-haut
  - Approche temporelle
    - Mise en évidence de la forme dérivée
      - Circuit utilisé en régulation (2ème année cours d'automatique)

dérivateur pur

$$V_{S(t)} = -R_2C\frac{d(Ve)}{dt} = Td.\frac{d(Ve)}{dt}$$





Le montage dérivateur est très sensible aux parasites (dv/dt grand). Aussi, est-il fréquent de n'utiliser qu'un pseudo-dérivateur qui n'a l'effet de dérivation que pour les basses fréquences.

Les outils logiciels

- Synthèse des filtres en pratiques
  - calculs théoriques ou algorithme peu utilisé (sauf si PC non dispo)
  - Utilisation de logiciels (gratuits ou payant) pour la synthèse
    - WEBENCH® Filter Designer (texas instrument – en ligne et gratuit)
    - FilterLab® Filter Design Software (microchip)
    - Iowa Hills Opamp Filters (dispo aussi sur mon site)
- Validation des résultats
  - Utilisation de LTSpice
  - Gratuit et téléchargement sur:

    www.analog.com/en/design-center/design-tools-and-calculators/ltspice-simulator.html
  - Des tutos et ressources dispo sur mon dépôt GitHub
    - https://github.com/juanbravo