L' amplificateur opérationnel.

www.9alami.com

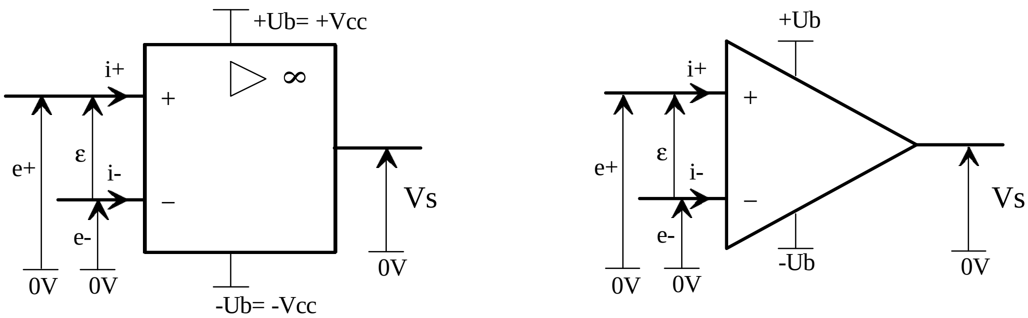
L'ampli opérationnel (AOP) ou amplificateur linéaire intégré (A.L.I.)

I) Présentation, symbole et fonction de transfert.

L'amplificateur opérationnel le plus couramment utilisé est un amplificateur de différence à référence commune.

Il possède:
- Deux entrées: Une entrée notée (-) dite entrée inverseuse et une entrée notée (+) dite entrée non inverseuse.
- Une sortie: Vs.

Les symboles sont représentés ci-dessous.



Symbole NF C 03-213 ***Symbole Américain***

Le composant comporte de plus des broches d'alimentation (Ex: +Ub et -Ub) et est souvent alimenté de manière symétrique par rapport au 0V de référence (Ex: +15V, -15V).

Les potentiels des entrées sont repérées par rapport à la référence commune de toutes les tensions (masse ou 0V de référence), et sont només e_+ et e_-. La différence de potentiel entre l'entrée + et l'entrée - est appelée *tension d'entrée différentielle* et est notée ε ou V_{ed} (ou parfois e). $\varepsilon = (e_+ - e_-)$.

L'étage d'entrée différentiel de l'AOP permet d'assurer des courants d'entrée très faibles (i < 300nA pour un étage différentiel à transistor bipolaire, et i de qq pA à 10nA pour les étages différentiels à FET). On supposera donc toujours: i+ = i- = 0 (sauf dans des cas très rares ou ces courants ne sont pas négligeables).

La sortie délivre la tension Vs par rapport à la référence (0V).

En statique: $\mathbf{Vs= Ad.(e_+ - e_-) + Amc.(e_+ + e_-)/2}$

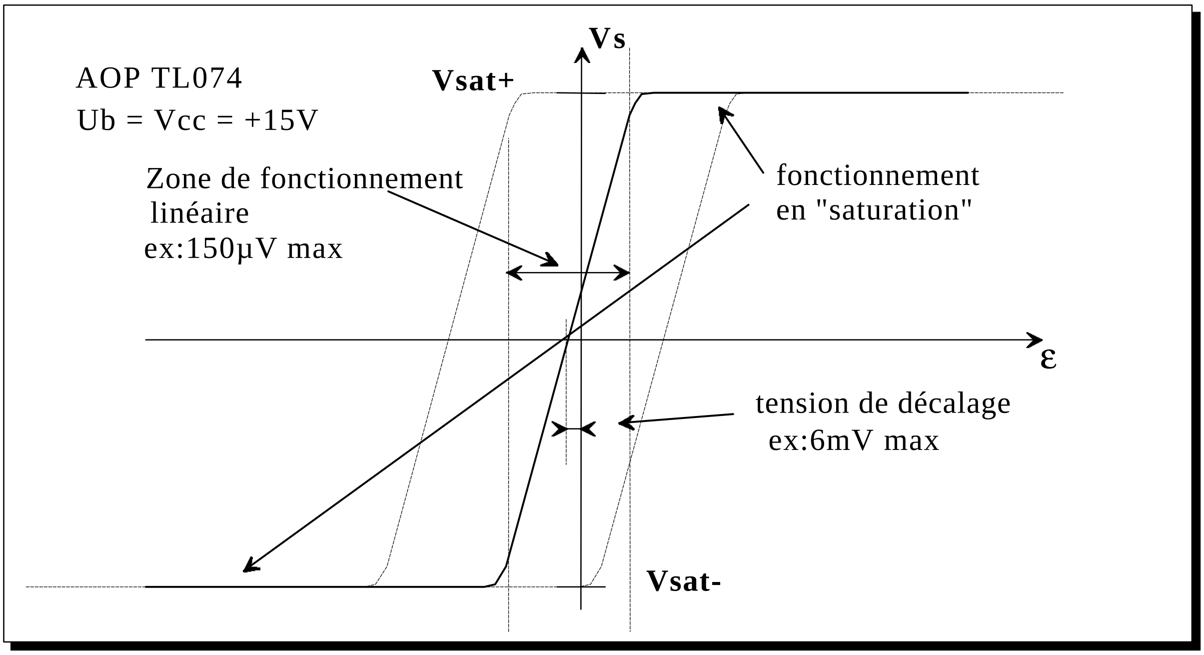
Ad représente l'amplification différentielle et Amc l'amplification de mode commun. Amc est très souvent négligeable par rapport à Ad, et Ad est noté A0.

Ceci permet d'écrire: $\mathbf{Vs=A0.(\varepsilon) = A0.(e_+ - e_-)}$, avec $A0_{typ} > 100\,000$. A0 est appelé coefficient d'amplification (ou amplification statique) propre de l'ALI, ou amplification en boucle ouverte.

Attention *A0 est souvent appelé "Gain", alors que ce terme devrait être réservé à G0 = 20*Log (A0), exprimé en décibel (dB).*

Caractéristique de transfert statique:

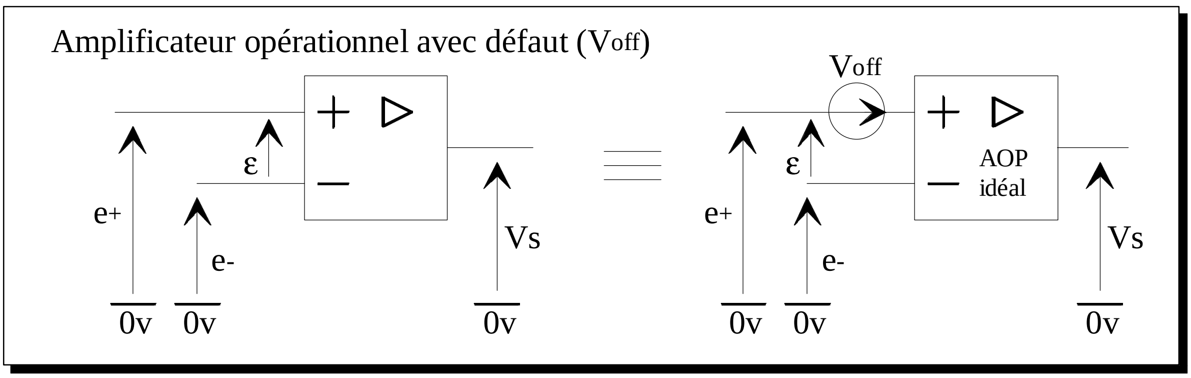
L'amplification statique A0 étant très élevée, une très faible tension ε suffit pour que Vs soit en saturation. Ex: Avec A0= 200 000, ε est alors compris entre +/- (Vsat/A0) soit si Vsat est voisin de 15V, ε = 75µV.



Pour le fonctionnement dans la zone linéaire (en dehors des plages dites de "saturation" = non saturée), on posera ε = 0.

Dans la réalité, il est parfois nécessaire de tenir compte de la tension de décalage ramenée à l'entrée (dite *tension d'offset Voff*), qui crée un décalage de la caractéristique de transfert de l'AOP vers la droite ou vers la gauche autour de l'origine.

L'influence de cette tension sur le montage peut être étudiée plus facilement en plaçant une source de tension Voff sur l'entrée e+ ou e- de l'AOP et en considérant alors ce dernier comme idéal.

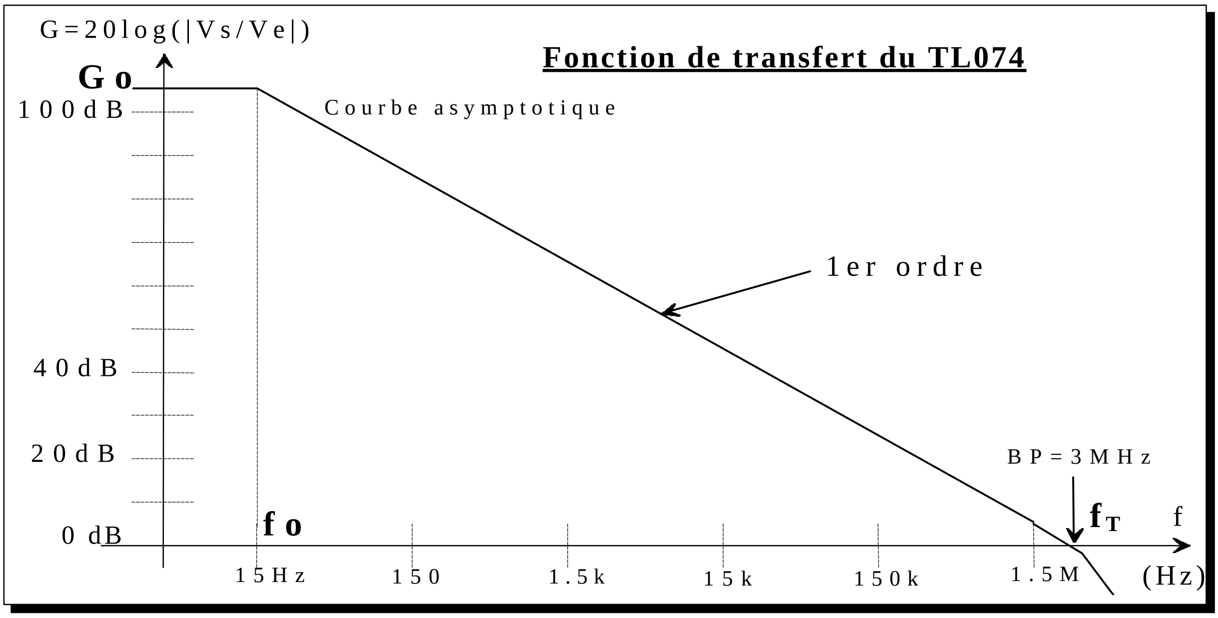


Attention, *la plupart des documents constructeurs indiquent simplement la valeur absolue de cette tension de décalage.*

Caractéristique de transfert dynamique:

En dynamique, on constate que l'amplification Ad n'est pas constante. Ad dépend de la fréquence et s'apparente à une fonction de transfert de type passe bas du 1er ordre.

$$\underline{Ad} = \frac{\underline{Ao}}{(1 + j\, f/fo)}$$



Cette caractéristique limite l'emploi de l'AOP vers les fréquences hautes. Ainsi, un amplificateur en boucle fermée d'amplification A_{BF} aura une fréquence de coupure fc à -3dB égale à: $\mathbf{fc = f_T/A_{BF}}$ (le produit "Gain Bande" est constant $\mathbf{f_T = Aofo = A_{BF}fc}$).

Remarque: On ne tient en principe pas compte de la fonction de transfert de l'AOP, car on utilise souvent ce composant avec des valeurs de gain et de fréquences plus faibles que celles limites définies précédemment.

II) Généralités sur les systêmes asservis linéaires:

a) système en boucle ouverte (sans retour de la sortie vers l'entrée): Exemple de l'ALI: v=A0*e. La sortie ne dépend que de l'entrée et de l'amplification propre (A0).

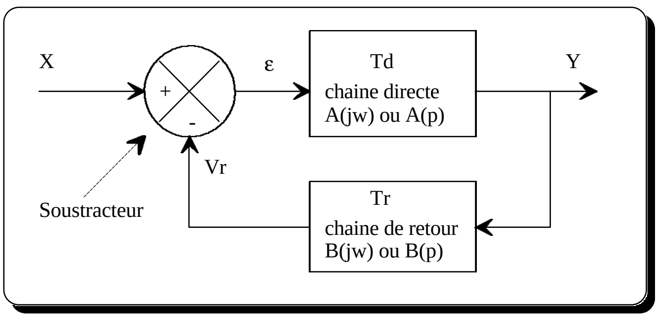
A0 est très grand (>100 000), mais les constructeurs ne peuvent pas donner de valeur précise (grande imprécision à la fabrication: comme pour le β d'un transistor bipolaire). Connaissant ε (le signal d'entrée, il n'est donc pas possible de connaître v (grandeur de sortie) avec précision.

De plus si des perturbations se produisent elles interviendront sur AO (dérive thermique, parasites etc..), ou directement sur v (variation du courant de sortie). Ce sera le cas de tous les systêmes linéaires fonctionnant en boucle ouverte. Cet inconvénient majeur est résolu grâce à un bouclage de la sortie vers l'entrée.

b) systêmes asservis (en boucle fermée):

De manière générale, ce type de systême est organisé autour d'un systême de fonction de transfert pouvant être représenté sous forme de deux blocs.

Le bloc Td (chaine directe) ou Td est souvent très grand (il s'agit par exemple d'un ALI), le bloc Tr (chaine de retour), parfois simplement constitué d'une boucle de retour (appelée boucle de contre réaction), et un comparateur (soustracteur analogique).



La mise en équation donne:

$\varepsilon = X - Tr_* Y$ et $Y = Td_* \varepsilon$ donc $Y=Td_*(X-Tr_*Y)$ d'ou:

$$Y = \frac{Td}{(1+Td_*Tr)} {}_* X$$

Si $Td_* Tr >> 1$ alors $Y = X / Tr$

si de plus $Tr < 1$ on obtient $Y = A_* X$ avec $A > 1$. On obtient donc un amplificateur d'amplification $A = 1/Tr$

Alors $\varepsilon = X - (Tr_* X / Tr) = 0$; En fait ε tend vers 0 car Y ne vaut pas rigoureusement X/Tr (cela est du à l'approximation: $Td_*Tr >> 1$).

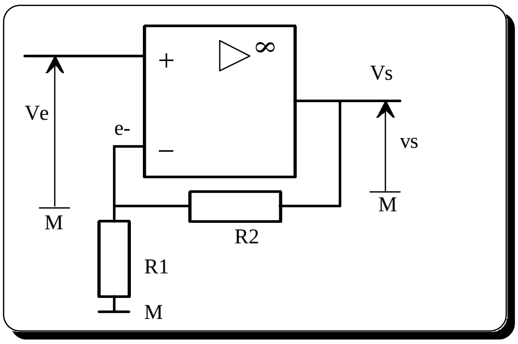
Il est facile de réaliser une fonction de transfert < 1: Pont diviseur de tension. Par contre il faudra toujours veiller à maintenir vraie la condition $Td_*Tr >> 1$. Ainsi on réalise une fonction de transfert ne dépendant que de 2 résistances (Tr); La sortie est alors indépendante de Td qui est susceptible de varier. On dit que la sortie est asservie à l'entrée.

III) Application aux amplificateurs opérationnels. Le régime linéaire:

Hypothèse importante:

Dans les montages à amplificateur opérationnel, **la présence d'une réaction négative** (de la sortie sur l'entrée -), **provoque un fonctionnement en régime linéaire** (la sortie évolue pour annuler le signal ε). Alors **tant que la sortie n'est pas en saturation on peut poser ε = 0** .

1) amplificateur non inverseur:

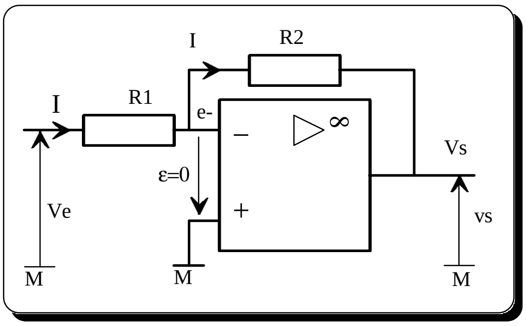


On reconnait la chaine directe Td=A0,
le comparateur d'entrée + et - , la boucle de retour constituée des résitances R1,R2.

Si l'amplificateur est supposé idéal (A0 = infini), ε=0. (cette remarque sera toujours vraie à partir du moment où il y aura bouclage de la sortie vers e-).
Alors e+=e-, or e+=ve et e-= $R1_*vs / (R1+R2)$

donc **$vs= (R1+R2)_*ve / R1 = [1+(R2/R1)]_*ve$**

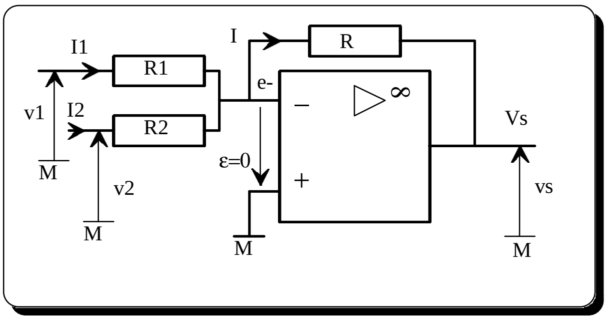
2) amplificateur inverseur:



$ve = R1_*I$ (car ε=0), $vs = -R2_*I$ (car i- = 0)
donc **$vs= - (R2/R1)_*ve$**

le signe "-" se traduit par une opposition de phase entre vs et ve, si ve est une tension sinusoidale.

3) amplificateur sommateur inverseur:



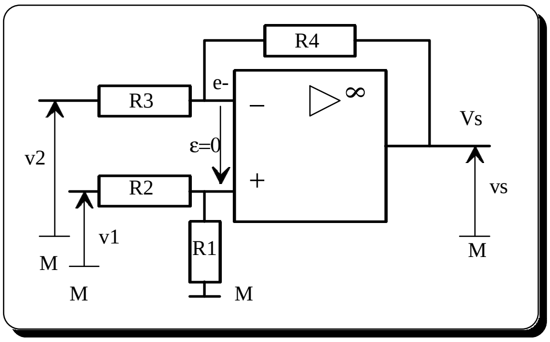
Le montage est similaire au précédent, il se résoud par les courants ou en appliquant le théorême de superposition ou celui de Millmann.

$vs = - R_* I = - R_* (I1 + I2)$

$vs = -R_* (v1/R1 + v2/R2)$

$vs = - (v1 + v2)$, si $R1 = R2 = R$

4) amplificateur de différence:



Il s'agit d'une configuration en amplificateur non inverseur pour e+ et inverseur pour e- d'où:

$e+ = \dfrac{v1.R1}{(R1+R2)}$ et $e- = \dfrac{vs.R3 + v2.R4}{(R3+R4)}$

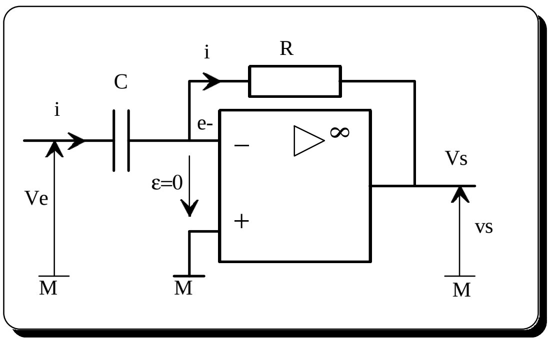
or e+ = e- d'ou

$vs=[(1+R4/R3)_* R1/(R1+R2)]_* v1 - (R4/R3)_* v2$

Si R3/R4=R2/R1 **$vs = R4/R3 . (v1-v2)$**

Si de plus R1 = R2 et R3 = R4 , alors vs = v1 - v2

5) dérivateur:



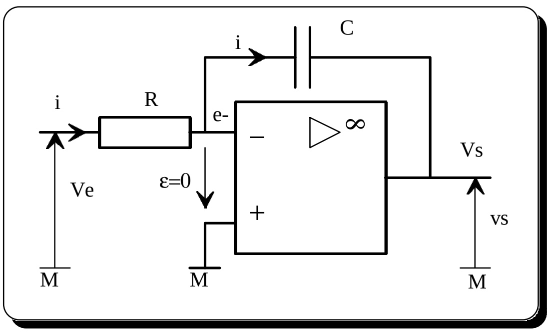
$i = C_* (dve/dt)$ et $i = -vs/R$

d'où **$vs = - RC_* (dve/dt)$**

la sortie est proportionnelle à la dérivée de l'entrée.

Rem: Ce montage ne fonctionne qu'avec une résistance r (r de l'ordre de 100Ω) en série avec C. Sans r, il se produit des oscillations (Ecrire la fonction de transfert complète, avec l'AOP).

6) intégrateur:



$i = ve/R$ et $i = - C_* (dvs/dt)$ d'où

$ve = - RC_* (dvs/dt)$

Donc la sortie vs est proportionnelle à la primitive de l'entrée.

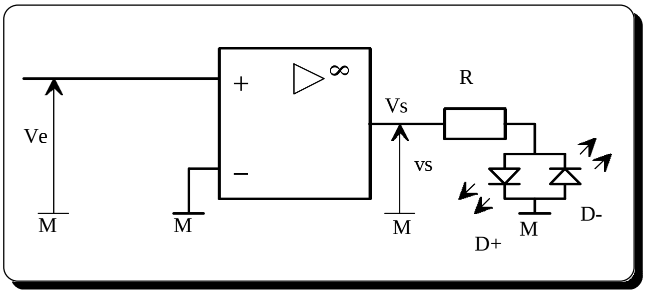
$vs = - (1/RC)_* \int ve_* dt$

IV) L'ALI en boucle ouverte: comparateur

En boucle ouverte la présence de la moindre tension ε porte la sortie en saturation (du fait de la grande valeur de A0): **Rem: On ne peut pas poser $\varepsilon = 0$. Cette condition n'est possible que lors des transitions de la sortie (passage de vs de V_{sat+} à V_{sat-} ou l'inverse).**

Si $\varepsilon > 0$, Vs= V_{sat+} = (+Vcc - tension de déchet à l'état haut)

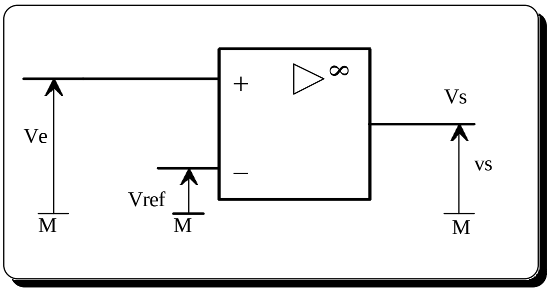
Si $\varepsilon < 0$, Vs= V_{sat-} = (-Vcc + tension de déchet à l'état bas)



Exemple: détection de signe. Ve= ε

Si Ve > 0, Vs= V_{sat+}, donc D+ est allumée.

Si Ve < 0, Vs= V_{sat-} , et D- est allumée.



Exemple: comparaison de tension

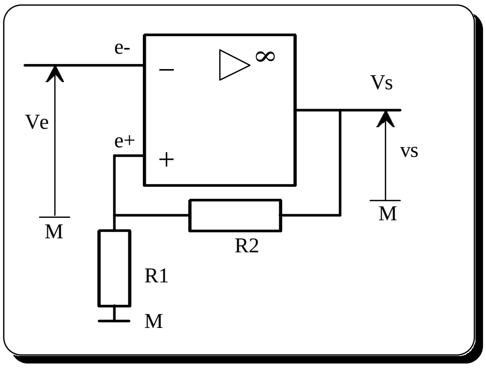
si Ve > Vref, Vs= V_{sat+}

si Ve < Vref, Vs= V_{sat-}

V) Bouclage de la sortie vers l'entrée + : comparateur à deux seuil (Trigger)

Dans ce cas (comme dans le cas de la boucle ouverte), la tension ε n'est pas nulle (sauf au moment de la commutation de vs). La sortie est portée en saturation comme dans le cas du comparateur. La sortie est rebouclée vers l'entrée +, et provoque donc deux seuils de comparaison (suivant que vs = V_{sat+} ou vs = V_{sat-}).

1)Trigger inverseur:

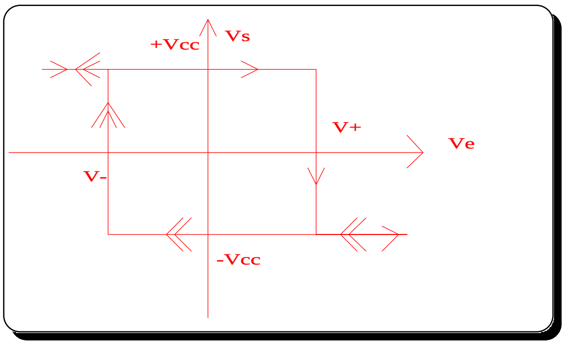


e+ = (R1/(R1+R2))$_*$Vs et e-= Ve
d'où ε = e+-e- = (R1/R1+R2)$_*$Vs - Ve
avec Vs = V_{sat+} ou V_{sat-} suivant le signe de ε

a) $\varepsilon > 0$, Vs= V_{sat+} donc Ve < (R1/R1+R2) $_*$ V_{sat+}

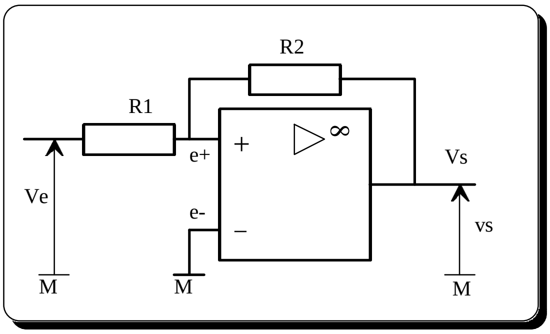
b) $\varepsilon < 0$, Vs= V_{sat-} donc Ve > - (R1/R1+R2)$_*$$V_{sat-}$

Il s'agit d'un comparateur à 2 seuils symétriques V+ et V-, dont la caractéristique de transfert est donnée page suivante: V+ = (R1/R1+R2)$_*$$V_{sat+}$ et V- = -(R1/R1+R2)$_*$$V_{sat-}$



Si Ve est < V-, Vs =V_{sat+}. Si Ve évolue de manière croissante on se déplace sur le parcours repéré par les flêches simples jusqu'au seuil V+ ou Vs bascule à V_{sat-}. Le nouveau seuil devient alors V-. Si Ve évolue ensuite de manière décroissante on se déplace sur le parcours repéré par les doubles flêches.

2) Trigger non inverseur:

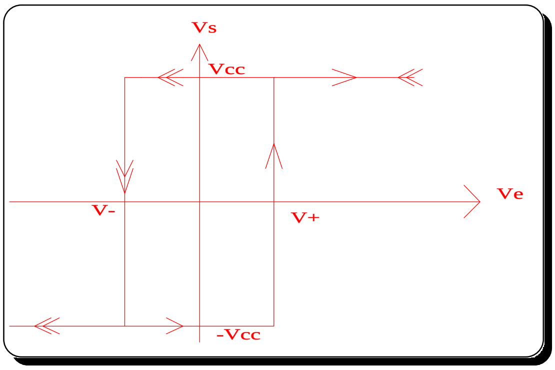


$\varepsilon = \dfrac{R1.Vs + R2.Ve}{(R1 + R2)}$

Le basculement aura lieu pour ε = 0. Donc pour Ve = - (R1/R2)$_*$ Vs avec Vs = V_{sat+} ou V_{sat-}

-Vcc < Ve < +Vcc impose R1 < R2 afin que Ve puisse atteindre les seuils.

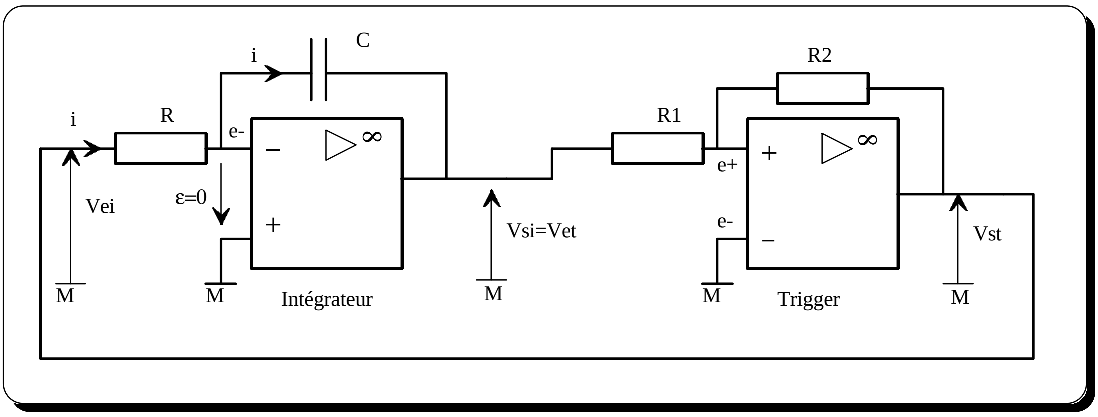
On obtient la caractéristique de transfert suivante:



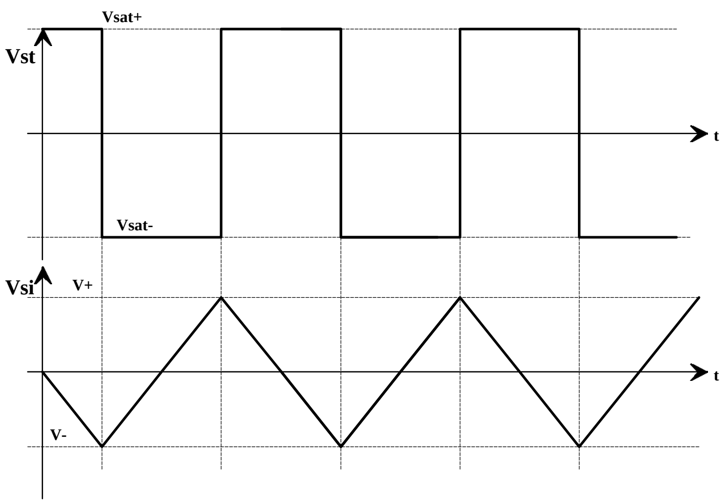
V+ = (R1/R2)$_*$$V_{sat+}$

et V- = -(R1/R2)$_*$$V_{sat-}$

VI) Application de l'ALI à la génération de signaux:



Lorsque Vei = +Vcc, i > 0 (i est constant et vaut Vcc/R) on effectue la charge de C à courant constant. On obtient en Vsi une rampe décroissante (la pente vaut -Vcc/RC, si V_{sat-} est voisin de -Vcc). D'après la caractéristique de transfert du trigger on s'aperçoit qu'il y aura basculement pour Vet = -(R1/R2)*Vcc, alors Vst = -Vcc; avec Vei = -Vcc Vsi est une rampe de pente positive; Vet est donc croissante et le basculement aura lieu pout Vet= (R1/R2)*Vcc (idem on suppose V_{sat+}.=+Vcc). On obtient donc les signaux triangulaires (Vsi) et rectangulaires (Vst):



Rem: Si la tension de déchet est nulle, alors Vsat+ = Vcc, et Vsat- = -Vcc

Pour les ampli nommés:
Rail to Rail en sortie, la tension de déchet est nulle.

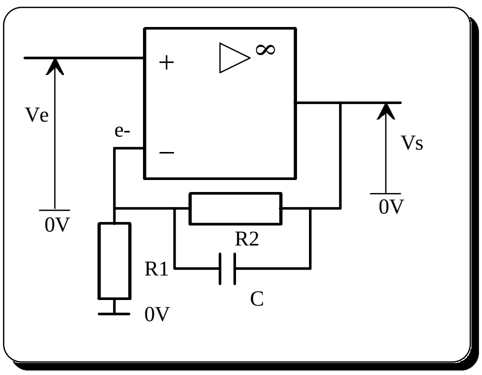
Calcul de la période des signaux: Vsi est un signal triangulaire symétrique car ses bornes sont opposées et les 2 pentes de même valeur absolue. Vst est donc un signal rectangulaire. La demi période est le temps que met Vsi pour passer de -(R1/R2)*Vcc à (R1/R2)*Vcc avec une pente Vcc/RC; donc T/2=2(R1/R2)*Vcc*RC/Vcc d'où T=4(R1/R2)*RC

Exercices:

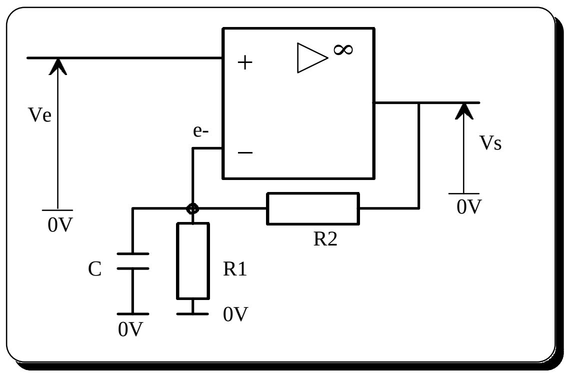
Pour les montages suivants, déterminer la fonction de transfert T = Vs/Ve en considérant l'amplificateur opérationnel idéal, et la mettre sous la forme canonique.

Déduire le type de filtre réalisé (passe-bas, passe-haut, passe-bande, coupe-bande) ainsi que l'ordre. Donner l'expression de la (ou des fréquences de coupures) et représenter les diagrammes asymptotiques de Bode.

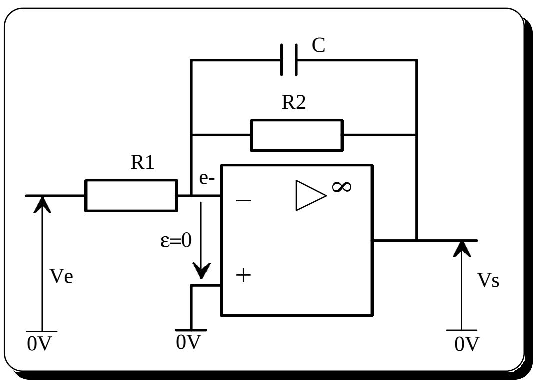
Montage N°1:



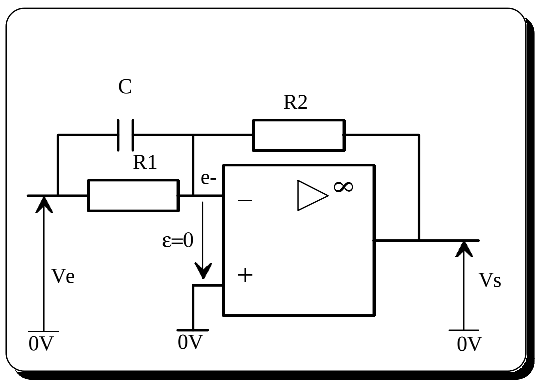
Montage N°2:



Montage N°3:

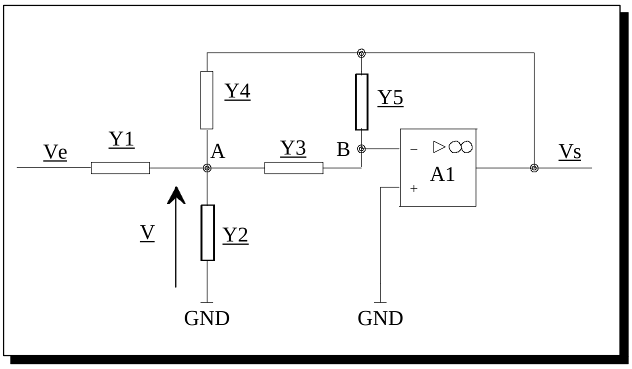


Montage N°4:



VII) Filtres du deuxième ordre: Structures de Rauch et de Sallen & Key

a) Structure de Rauch:



Cette famille de filtre est décrite par le schéma ci-contre, sur lequel $\underline{Y1}$ à $\underline{Y5}$ sont des admittances realisées par soit des résistances ($\underline{Y} = 1/R$), soit des condensateurs ($\underline{Y} = jCw$).

Méthode de résolution: Lois des noeuds en A et B, ou Millman.

Ex: Résolution par la loi des noeuds en A et B.

En A: $\underline{Y1}\,(\underline{Ve} - \underline{V}) = \underline{Y2}\,\underline{V} + \underline{Y3}\,\underline{V} + \underline{Y4}\,(\underline{V} - \underline{Vs})$

et en B: $\underline{Y3}\,\underline{V} = -\,\underline{Y5}\,\underline{Vs}$

En éliminant $\underline{V}$ on obtient:

$$\underline{T} = \frac{\underline{Vs}}{\underline{Ve}} = -\,\frac{\underline{Y1}\,\underline{Y3}}{\underline{Y3}\,\underline{Y4} + \underline{Y5}\,(\underline{Y1} + \underline{Y2} + \underline{Y3} + \underline{Y4})}$$

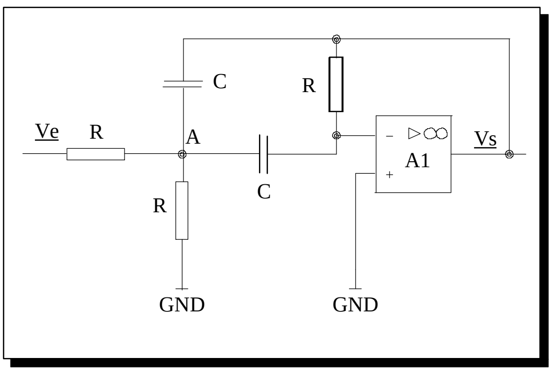
Il est donc possible d'obtenir des filtres de type passe bas (Si Y1, Y3, Y4 sont résistifs et Y2, Y5 capacitifs), passe haut (Si Y1, Y3, Y4 capacitifs et Y2, Y5 résistifs), ou même de type passe bande (Si Y1, Y2, Y5 sont résistifs et Y3, Y4 capacitifs).

Exercices:

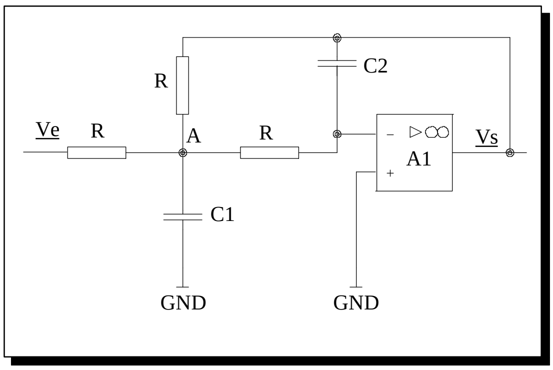
Pour les montages suivants, déterminer la fonction de transfert $\underline{T} = \underline{Vs}/\underline{Ve}$ en considérant l'amplificateur opérationnel idéal. Mettre la fonction de transfert sous la forme canonique.

Déduire le type de filtre réalisé (passe-bas, passe-haut, passe-bande, coupe-bande) ainsi que l'ordre. Donner l'expression de la (ou des fréquences de coupures) et représenter les diagrammes asymptotiques de Bode.

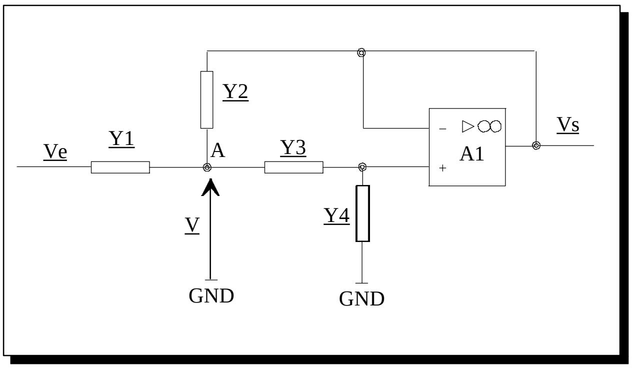
Montage N°1



Montage N°2



b) Structure de Sallen et Key:



Cette famille de filtre est décrite par le schéma ci-contre, sur lequel $\underline{Y1}$ à $\underline{Y4}$ sont des admittances realisées soit par des résistances ($\underline{Y} = 1/R$), soit par des condensateurs ($\underline{Y} = jCw$) comme pour la structure de Rauch.

Méthode de résolution: Lois des noeuds

Ex: Résolution par la loi des noeuds en A.

En A: $\underline{Y1}\,(\underline{Ve} - \underline{V}) = \underline{Y2}\,(\underline{V} - \underline{Vs}) + \underline{Y3}\,(\underline{V} - \underline{Vs})$

et $\underline{Y3}\,(\underline{V} - \underline{Vs}) = \underline{Y4}\,\underline{Vs}$

En éliminant $\underline{V}$ on obtient:

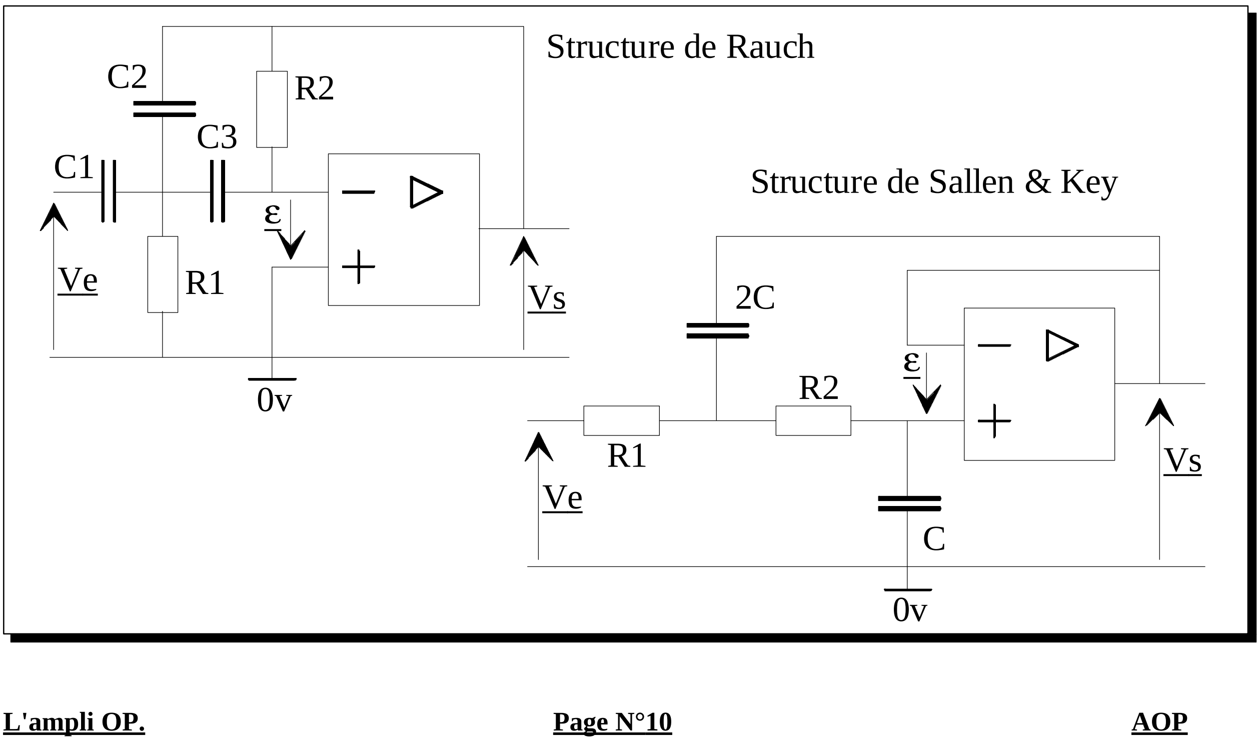
$$\underline{T} = \frac{\underline{Vs}}{\underline{Ve}} = \frac{\underline{Y1}\,\underline{Y3}}{(\underline{Y1} + \underline{Y2})\,(\underline{Y3} + \underline{Y4}) + \underline{Y3}\,(\underline{Y4} - \underline{Y2})}$$

Comme pour la structure de Rauch, il est possible d'obtenir des filtres de type passe bas (Si Y1, Y3 sont résistifs et Y2, Y4 capacitifs), passe haut (Si Y1, Y3 capacitifs et Y2, Y4 résistifs), ou même de type passe bande (Si Y1, Y2 sont résistifs et Y3 capacitif et $\underline{Y4} = 1/R + jCw$).

Exercices:

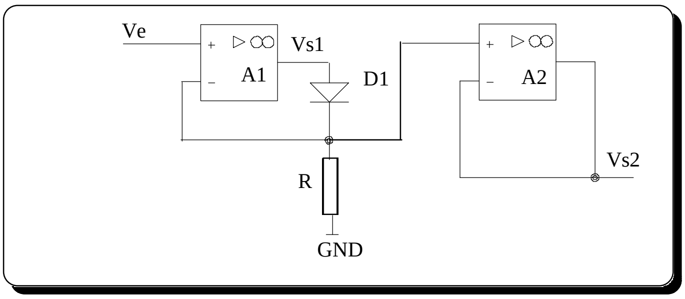
Pour les montages suivants, déterminer la fonction de transfert $\underline{T} = \underline{Vs}/\underline{Ve}$ en considérant l'amplificateur opérationnel idéal. Mettre la fonction de transfert sous la forme canonique.

*Déduire le type de filtre réalisé (passe-bas, passe-haut, passe-bande, coupe-bande) ainsi que l'ordre. Donner l'expression de la fréquence de coupure f_0 et du coefficient d'amortissement **m.** Déterminer les équations des asymptotes. Représenter les diagrammes asymptotiques de Bode.*

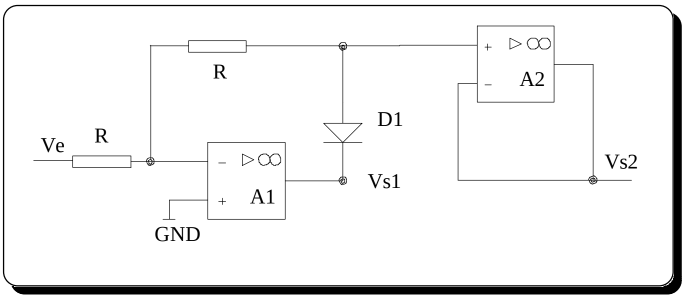


VIII) Montages non linéaires à diodes (Redresseurs écrêteurs limiteurs).

1) Redresseur simple ou double alternance.

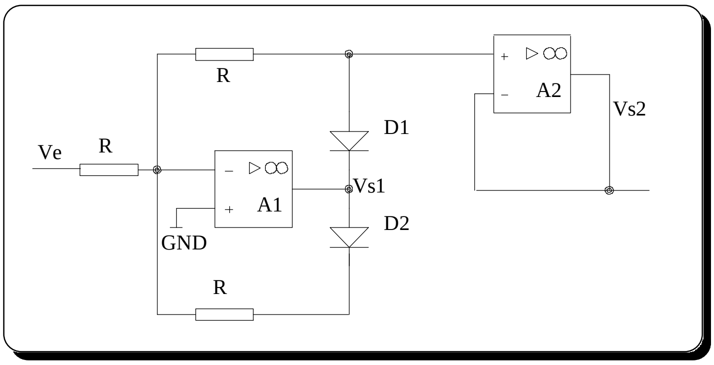


On suppose Ve sinusoïdal.
Représentez les signaux V_R,Vs1 et Vs2 si les amplis sont idéaux.
En déduire un défaut de ce montage si le slew rate de A1 n'est pas négligeable.

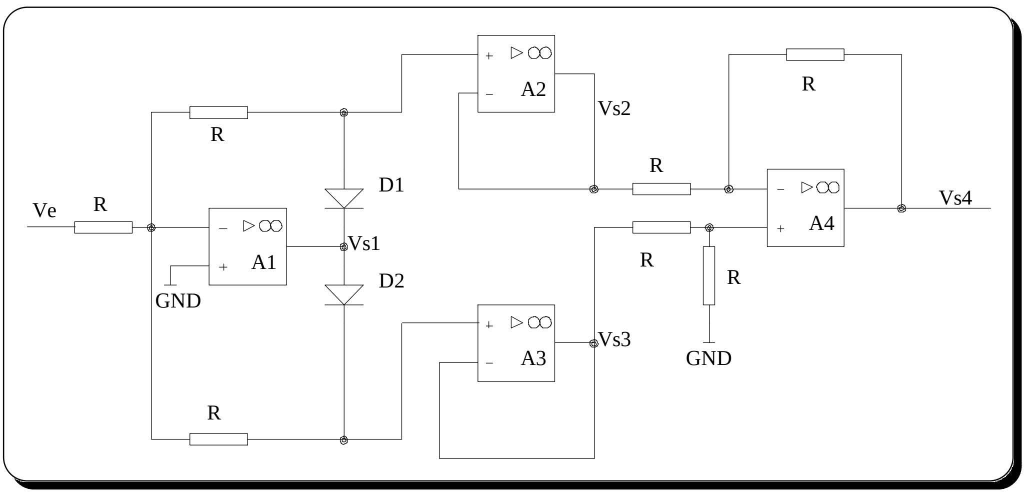


En supposant Ve sinusoïdal, représentez e+ de A2, Vs1 et Vs2 si les amplis sont supposés idéaux.
De même, déduire un défaut de ce montage si le slew rate de A1 n'est pas négligeable.

Faire de même avec le montage ci dessous en représentant Vs1 et Vs2, avec Ve sinusoïdal. En déduire le type de redresseur. Montrez que le problème de slew rate est ici beaucoup moins important.



Faire de même avec le montage ci dessous en représentant Vs1, Vs2, Vs3 et Vs4. En déduire le type de redresseur. Montrez également que le problème de slew rate est ici beaucoup moins important.



Exercice A:

Pour les montages N°1 et 2 suivants:

a) Citez le nom de la structure et déterminez la fonction de transfert: T = Vs/Ve en considérant l'amplificateur opérationnel idéal.

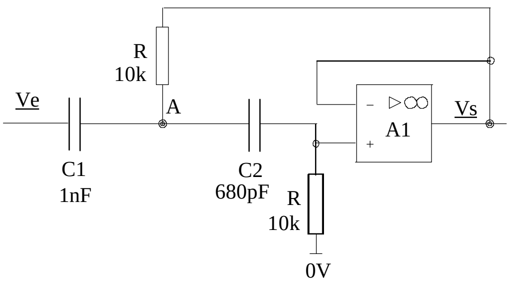
b) Déduisez-en le type de filtre réalisé (passe-bas, passe-haut, passe-bande, coupe-bande) ainsi que l'ordre.

c) Donnez alors l'expression de la (ou des) fréquence (s) de coupure (s) et du coefficient d'amortissement (s'il existe).

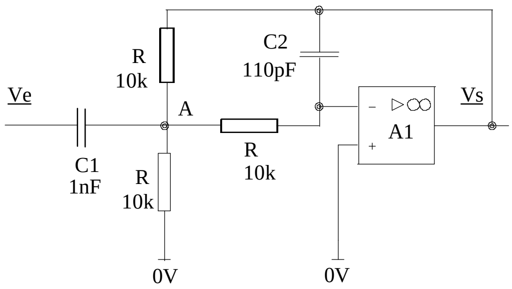
d) Faites l'application numérique, et représentez le diagramme asymptotique de bode (gain uniquement).

e) Montrez graphiquement, les modifications de la courbe de gain, si l'ALI utilisé à un produit gain bande GW_R de 1MHz.

Montage N°1



Montage N°2



Exercice B:

Pour le montage N°3 suivant:

a) Déterminez la fonction de transfert: T = Vs/Ve en considérant l'amplificateur opérationnel idéal.

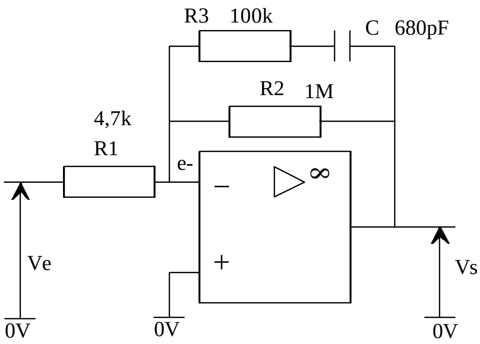
b) Déduisez-en le type de filtre réalisé (passe-bas, passe-haut, passe-bande, coupe-bande) ainsi que l'ordre.

c) Donnez alors l'expression de la (ou des) fréquence (s) de coupure (s) et du coefficient d'amortissement (s'il existe).

d) Faites l'application numérique, et représentez le diagramme asymptotique de bode (gain uniquement).

e) Calculez l'impédance d'entrée Ze = Ve / Ie.

Montage N°3



Exercice C:

Pour le montage N°4 suivant:

a) Déterminez la fonction de transfert: T = Vs/Ve en considérant l'amplificateur opérationnel idéal.

b) Exprimez Vs en fonction de Ve, si l'on tient compte de la tension d'offset V_{off} = VIO de l'ALI (VIO_{max} = 20mV , VIO=Input Offset Voltage voir TL081C), et calculer Vs_{max} lorsque Ve = 0V.

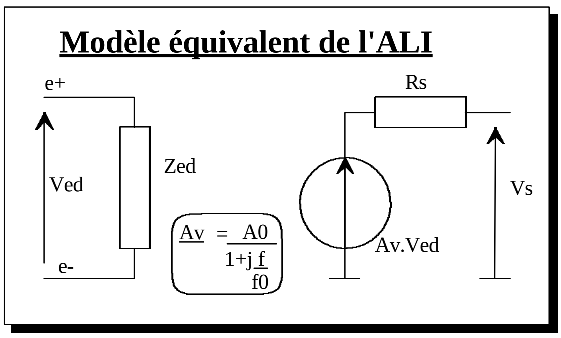
c) Proposez alors une solution pour diminuer l'influence de la tension d'offset.

d) Calculez l'impédance d'entrée Ze = Ve / Ie en supposant l'ALI idéal.

e) Calculer les paramètres A0 et f0 du modèle équivalent de l'ALI, en fonction des données constructeurs fournies. Voir ci dessous (On prendra Zed=10^{12} W , A_{VD} =200V/mV , GW_R = 3MHz et Rs = 0).

f) *Calculer la fonction de transfert réelle de ce montage en tenant compte du modèle équivalent ci dessous de l'ALI. Simplifier les expressions en tenant compte des ordres de grandeurs. Montrez que l'on obtient un passe bas du 1er ordre avec fc = f0.A0 / A (ou A= amplification = R2/R1)*

g) *Calculer de même l'impédance d'entrée de ce montage en tenant compte du modèle équivalent de l'ALI. Montrez que Ze = R1 + Z' (ou Z' vaut R2/A0 si f< f0 , et Z' tend vers R2 si f> GW_R de l'ALI.*



Montage N°4