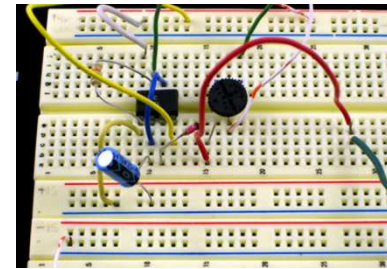


Méthode de conception en électronique

Cours 8

Alimentation et bruits

- Le montage d'un prototype se fait sur des plaquettes de prototypage:
 - Il y a de long fils de connexion
 - La capacité sur la plaquette
- Tous ces éléments sont propices à l'infiltration du bruit
- En amplification, le bruit se fait multiplier
 - Idéalement, le gain est infini... donc le bruit est infini



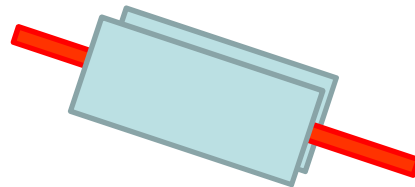
<https://www.techwalla.com/articles/the-functions-of-a-breadboard>

Alimentation et bruits

- Le bruit peut provenir de l'interne:
 - Ex: La variation de la quantité d'électrons qui circule dans une résistance
- Le bruit peut provenir de l'externe:
 - Ex: Signaux dans les environs captés par les longs fils
- Certains bruits sont inévitables
 - D'autres le sont moins...
 - Il existe des stratégies pour les minimiser

Alimentation et bruits

- 1^{re} stratégie (bruit externe)
 - Cage de Faraday
- Envelopper le circuit d'un conducteur connecté à la masse
 - Cette enveloppe bloque les signaux électromagnétiques
- Avec PCB:
 - Plan de masse
 - Signaux entre 2 couches de PCB



<https://i.stack.imgur.com/DagmW.jpg>

Alimentation et bruits

- 2^e stratégie (bruit externe):

- Limiter la longueur des fils

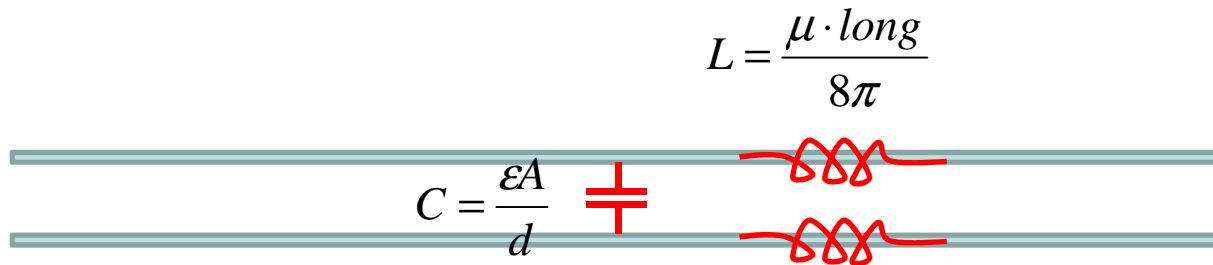
- Les fils sont inductifs et capacitifs

- Couplage inductif

$$V = L \frac{dI}{dt}$$

- Couplage capacitif

$$I = C \frac{dV}{dt}$$



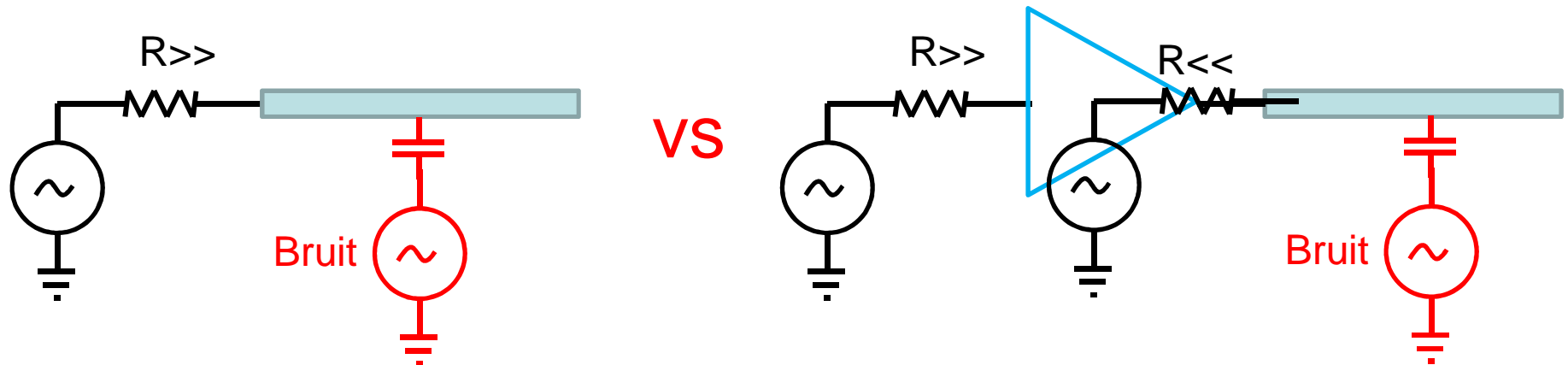
Alimentation et bruits

- 3^e stratégie (bruit externe):
 - Utiliser les signaux différentiels
 - Le bruit affectera les signaux de façon semblable
 - Utiliser des paires torsadées



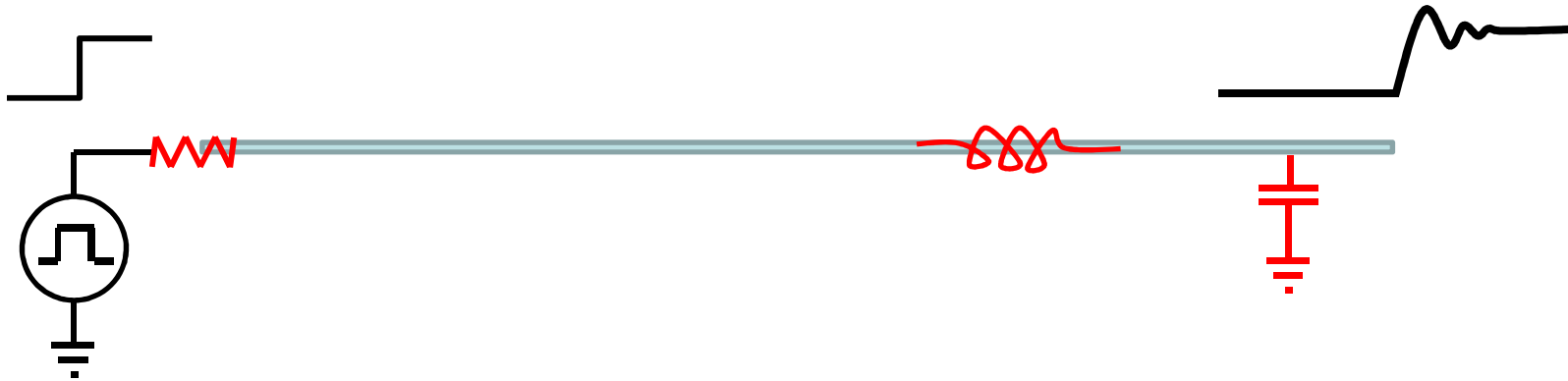
Alimentation et bruits

- 4^e stratégie (bruit externe):
 - Augmenter la “force” du signal
 - Avec un signal fort (gros courant), le bruit externe aura moins d’impact



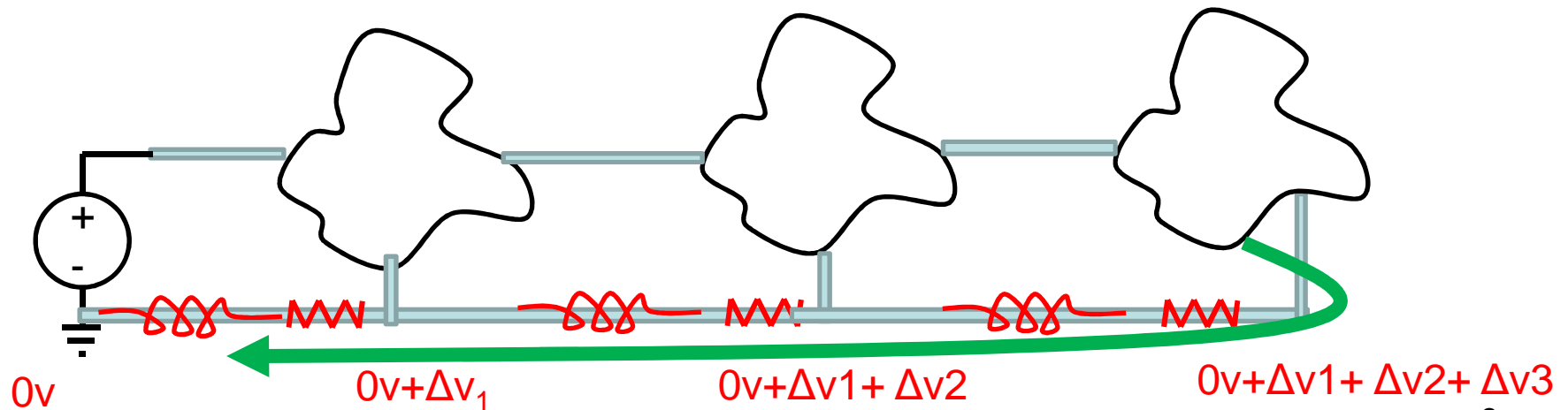
Alimentation et bruits

- 1^{re} stratégie (bruit interne)
 - Limiter la longueur des fils
- Réduire l'inductance
 - Réduit les oscillations dans les signaux



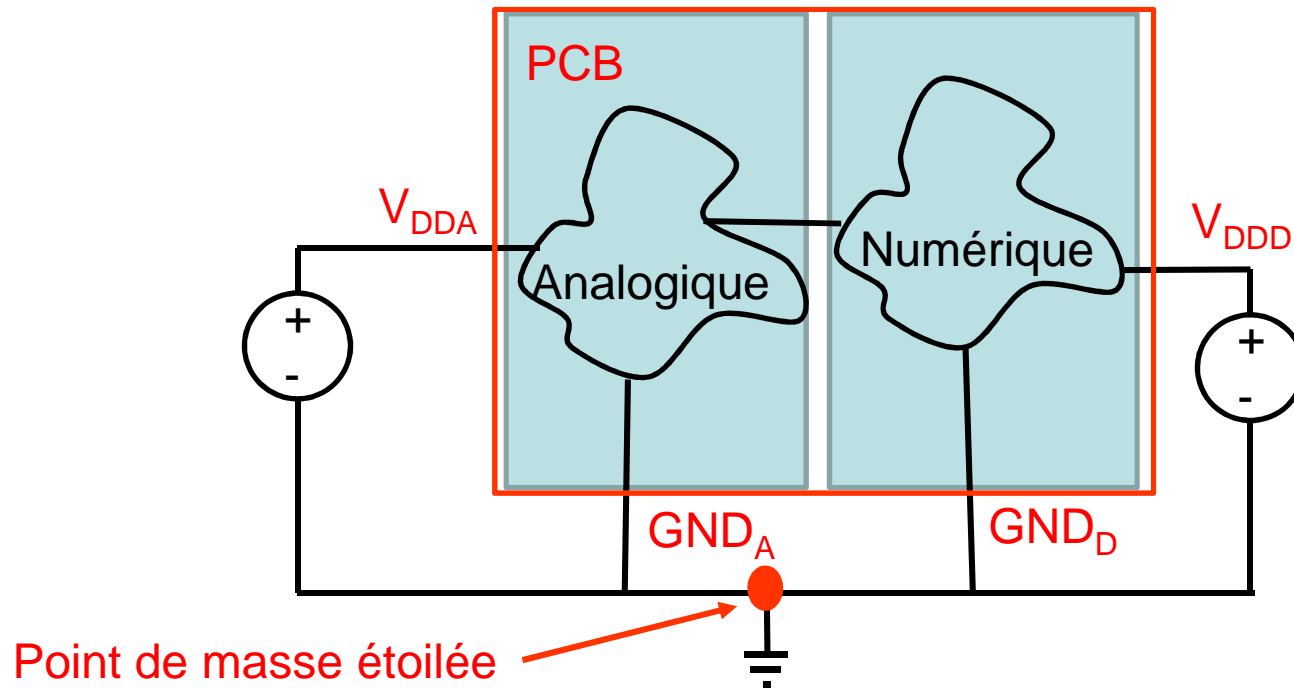
Alimentation et bruits

- 2^e stratégie (bruit interne):
 - Réduire la taille des fils vers la masse
- La masse passe des gros courants:
 - Longs fils: plus résistifs et plus inductifs
 - Changement de la tension à la masse



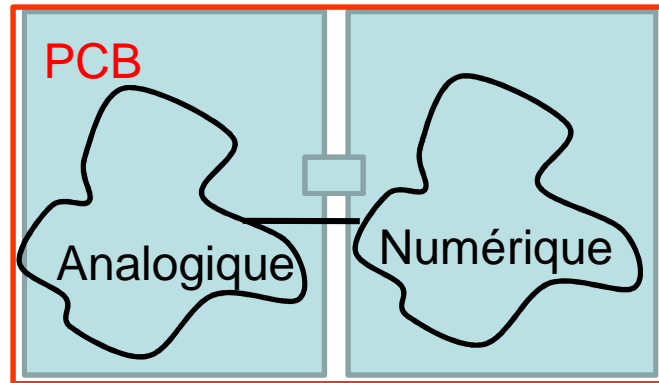
Alimentation et bruits

- 3^e stratégie (bruit interne):
 - Isoler la masse numérique de la masse analogique
 - Masse numérique beaucoup plus bruitée
 - Point de masse étoilée

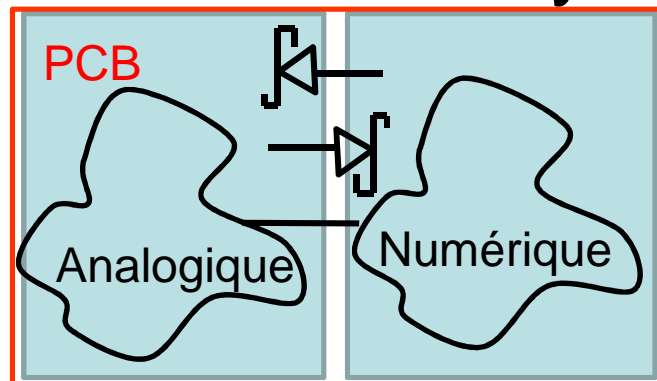


Alimentation et bruits

- Pour que les masses soient au même potentiel, on peut mettre UN contact

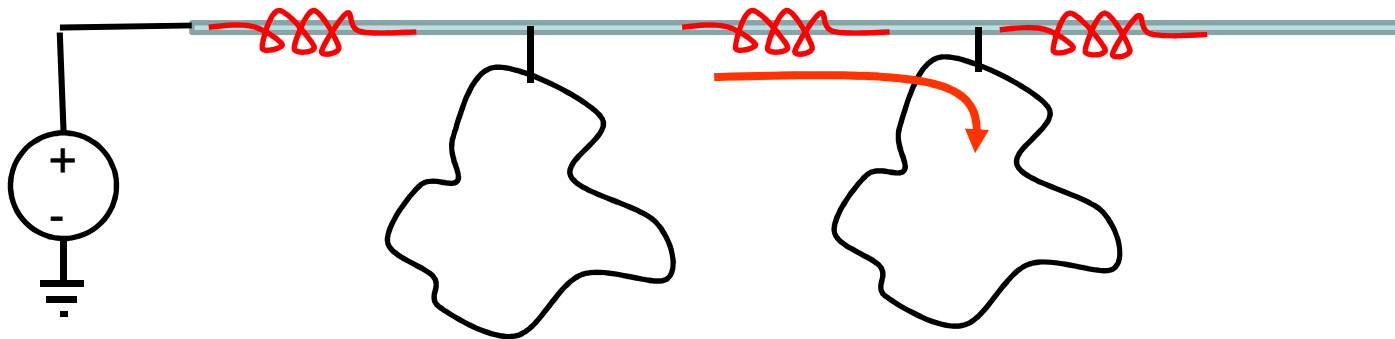


- Ou avec 2 diodes Schottky



Alimentation et bruits

- 4^e stratégie (bruit interne):
 - Condensateur sur les lignes d'alimentation
 - Atténuer le bruit sur l'alimentation
- La ligne d'alimentation comporte une certaine inductance:
 - Fils
 - "Bonding wires" à l'intérieur des circuits intégrés

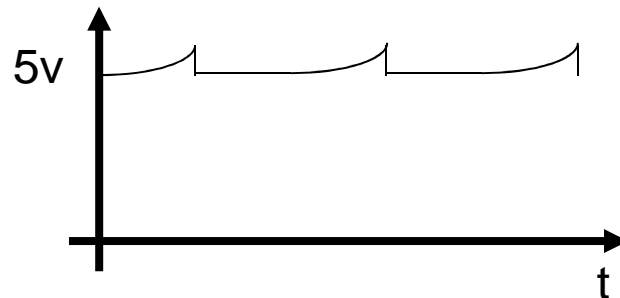


Alimentation et bruits

- Un changement de courant donne un changement de voltage

$$V = L \frac{dI}{dt}$$

- Il existe des pics de courant dans tout système:
 - En numérique, par exemple, c'est à chaque coup d'horloge



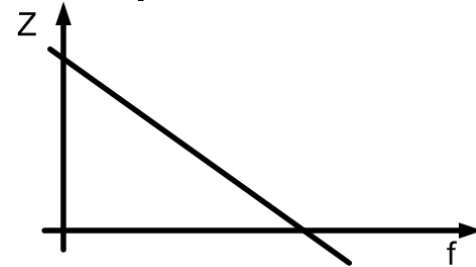
Alimentation et bruits

- Le bruit est de haute fréquence:
 - Les pics sont rapides et ne durent pas
- On peut donc mettre un condensateur pour atténuer ces pics
- La solution peut être expliquée de 2 manières:
 - Réservoir de charges qui les fournit aux moments de grosse demande
 - Filtre passe bas qui lisse le signal

Alimentation et bruits

- C entre l'alimentation et la masse court-circuite les hautes fréquences:
 - Les signaux de haute fréquences ont chemin de faible impédance vers la masse
 - C'est pourquoi les pics ne sont plus là

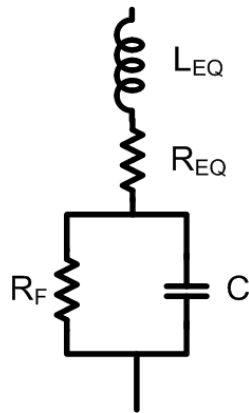
$$Z(s) = \frac{1}{sC} \quad \text{et} \quad Z(j\omega) = \frac{1}{j\omega C}$$



- Par contre, les vrais condensateurs sont un peu plus complexes...

Alimentation et bruits

- Un condensateur réel se modélise comme



C : Capacité
 R_F : Résistance de fuite
 R_{EQ} : Résistance équivalente
 L_{EQ} : Inductance équivalente

- R_F : Normalement très élevé
- R_{EQ} : Dépend du matériau, mais faible
- L_{EQ} : Inductance dans les fils

Alimentation et bruits

- Calculons son impédance

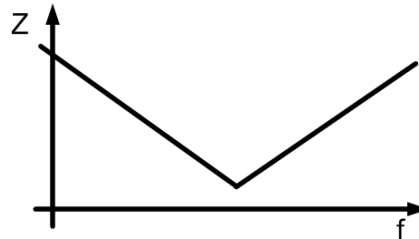
- Ignorons les résistances

$$Z = \frac{1}{sC} + sL = \frac{1 + s^2 LC}{sC}$$

- En régime sinusoïdal établi, ça devient

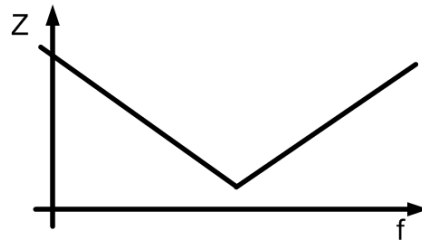
$$Z(j\omega) = \frac{1 - \omega^2 LC}{j\omega C}$$

- La courbe d'impédance devient:



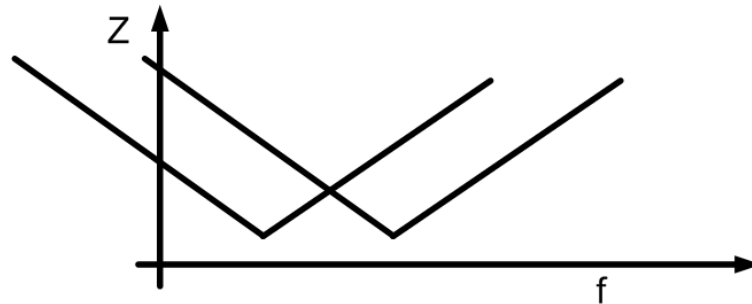
Alimentation et bruits

- Rappel: on veut une impédance faible vers la masse pour les hautes fréquences
 - Si le bruit est autour du point d'inflexion, le problème est réglé
 - Si le bruit contient des fréquences plus élevées, il faut trouver autre chose



Alimentation et bruits

- La solution souvent utilisée est d'avoir recours à 2 condensateurs



- Avec des profils différents, ils élargissent les fréquences avec faible impédance

Alimentation et bruits

- Deux condensateurs de valeurs différentes donnent de bons résultats:
 - Les valeurs sont souvent $0.1\mu\text{F}$ et $1\mu\text{F}$ (ou $10\mu\text{F}$)
- Ils devraient être placés le plus proche possible de l'alimentation
- Le chemin vers la masse devrait être court

Condensateurs

- Il existe 2 grandes classes de condensateurs:
 - Polarisé
 - Non-polarisé
- Les condensateurs polarisés ont un côté + et un côté - :
 - Si on ne respecte pas la polarité, ça peut exploser
 - Ceci est dû aux matériaux utilisés (électrolytiques)
 - Ces matériaux permettent plus de densité

Condensateurs

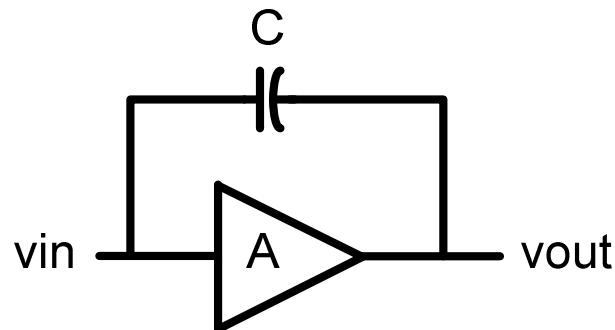
- Les condensateurs électrolytiques les plus populaires sont:
 - Aluminium
 - Tantale
- Les condensateurs non-polarisés les plus populaires sont en céramique:
 - Moins chers
 - Versatiles
 - Mais moins denses

Lien avec ampli-op

- Comme les autres circuits, l'ampli-op sera affecté par le bruit sur l'alimentation
- Une caractéristique: PSRR
 - Power supply rejection ratio
 - Capacité du circuit de se protéger contre les bruits sur l'alimentation
- Une valeur élevée indique qu'il est moins susceptible aux bruits sur l'alimentation...
 - Mais, on protège quand même!

Parenthèse: Théorème de Miller

- Il arrive parfois qu'on se retrouve avec un circuit comme celui-ci:

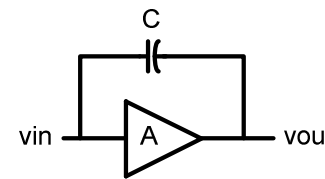


- Parfois, le C est explicite
 - Parfois, le C est parasite
- Son comportement mérite une attention...

Parenthèse: Théorème de Miller

- Le courant qui entre va passer par le condensateur:

$$I_{IN} = sC(vin - vout)$$



- Sachant que $v_{out} = Av_{in}$, on pourrait écrire:

$$I_{IN} = sC(vin - Avin)$$

- Et on peut finalement isoler V_{IN}/I_{IN} :

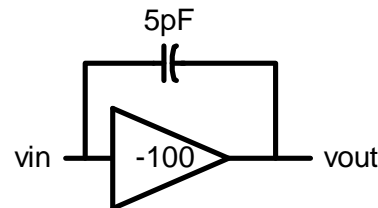
$$\frac{vin}{I_{IN}} = \frac{1}{s[C(1 - A)]}$$

Parenthèse: Théorème de Miller

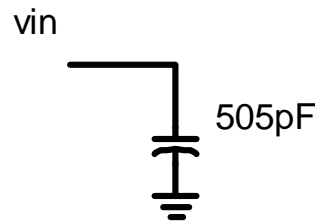
- Quel genre de composante a une impédance du type: $Z = \frac{1}{sK}$?
 - Réponse: un condensateur
- Si $Z = (1/sK)$, c'est un condensateur de valeur K.
- Puisque $\frac{v_{in}}{I_{IN}} = \frac{1}{s[C(1-A)]}$ c'est comme un condensateur de $C(1-A)$.

Parenthèse: Théorème de Miller

- Une capacité connectée aux bornes d'un amplificateur "devient plus grosse".
- Un circuit comme ceci:



- Est vue comme ceci à l'entrée:



Parenthèse: Théorème de Miller

- La sortie de l'amplificateur voit aussi l'effet du condensateur.

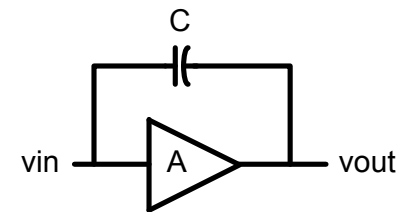
$$I_{OUT} = sC(v_{out} - v_{in})$$

- On remplace v_{in} par v_{out}/A :

$$I_{OUT} = sC\left(v_{out} - \frac{v_{out}}{A}\right)$$

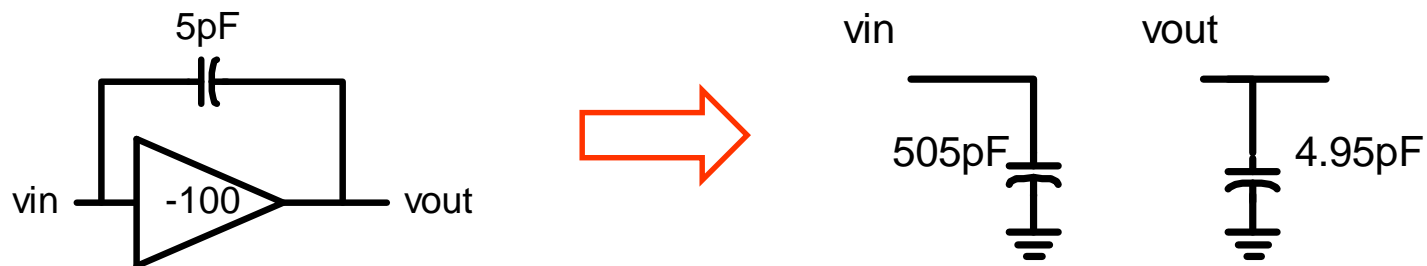
- On isole l'impédance à la sortie

$$\frac{v_{out}}{I_{OUT}} = \frac{1}{sC\left(1 - \frac{1}{A}\right)}$$



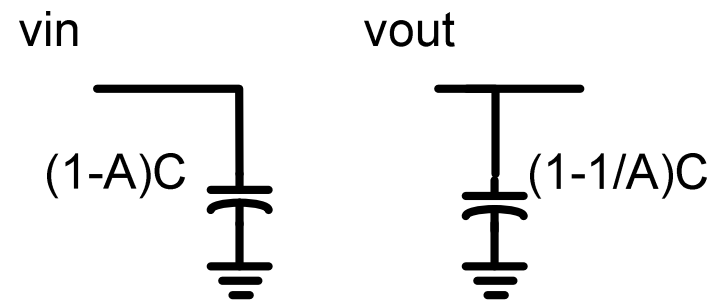
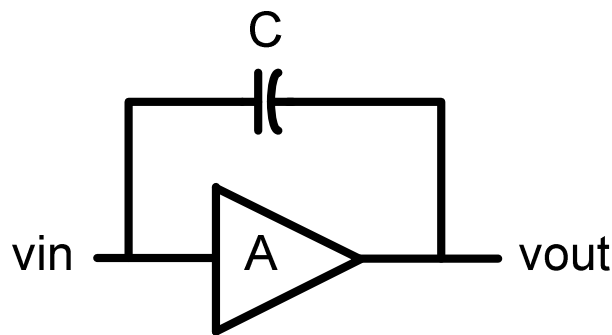
Parenthèse: Théorème de Miller

- Pour compléter l'exemple, les capacités vus de chaque bord ressembleraient à:



Parenthèse: Théorème de Miller

- Le théorème de Miller dit que:
 - Si on connecte un condensateur aux bornes d'un amplificateur de gain A
 - Le circuit à l'entrée va VOIR un condensateur de valeur $(1-A)C$ connecté au ground
 - La sortie de l'amplificateur va VOIR un condensateur de $(1-1/A)C$ connecté au ground

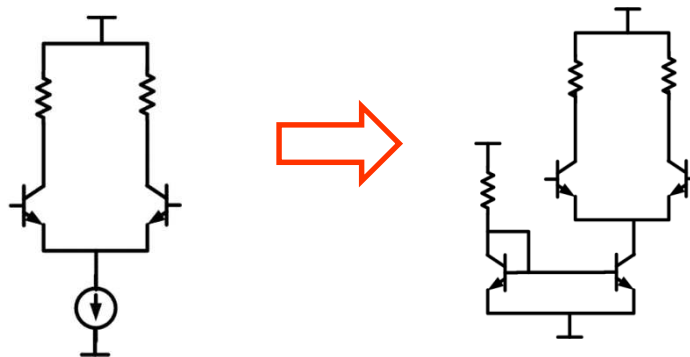


Parenthèse: Théorème de Miller

- Importance du théorème de Miller:
 - Pour la microélectronique, les condensateurs prennent beaucoup de place
 - Haute valeur de condensateur coûtent cher
 - Solution: amplificateur de haut gain et C petit
 - Parfois, condensateur parasite aux bornes d'un amplificateur de haut gain baisse les performances
 - Compensation de stabilité pour amplificateur opérationnel

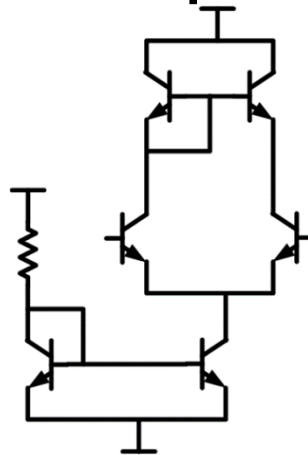
Amplificateurs à 2 étages

- On a exploré les amplificateurs différentiels au dernier cours
 - 2 entrees et 1 sortie
- Selon les voltages à l'entrée, le courant est distribué
 - On a vu que la source de courant pouvait être un miroir de courant



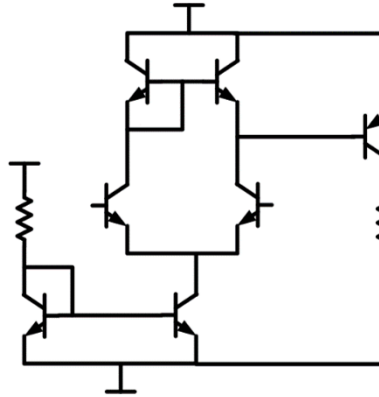
Amplificateurs à 2 étages

- Pour augmenter le gain, on peut remplacer la résistance par un miroir:
 - Le R_{OUT} d'un miroir est élevé
 - Le gain serait élevé
- Si on voulait augmenter le gain encore plus, il faudrait faire quoi?

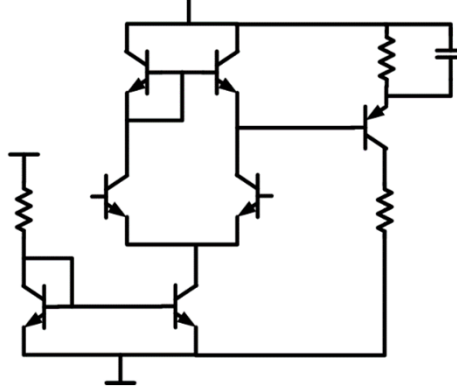


Amplificateurs à 2 étages

- On ajoute un étage de gain:
 - L'émetteur commun avec un PNP

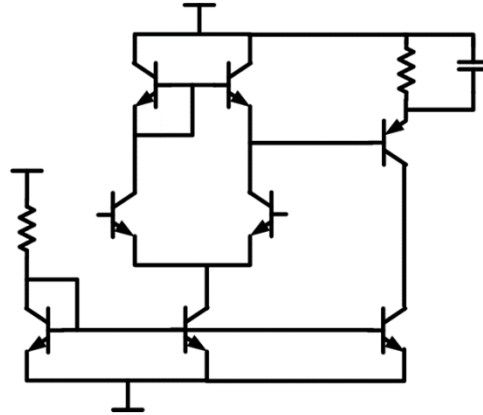


- On peut le stabiliser avec un R_E et son C_E



Amplificateurs à 2 étages

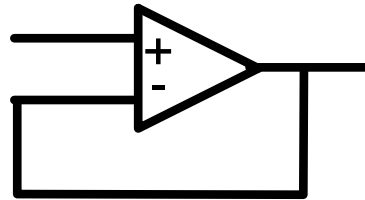
- Et si on voulait encore augmenter le gain?
 - On remplace la résistance de gain par un miroir



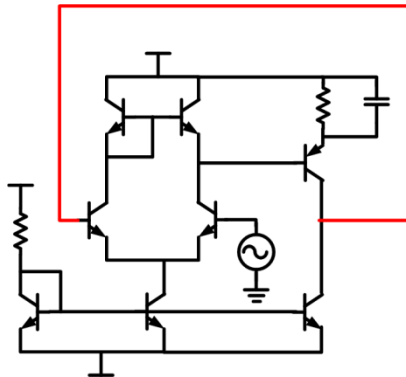
- Le gain est maintenant une multiplication du gain des deux étages...
 - Presque... (R_{IN} d'un étage c'est R_{OUT} de l'autre)

Amplificateurs à 2 étages

- On sait qu'un amplificateur peut être connecté comme ceci:



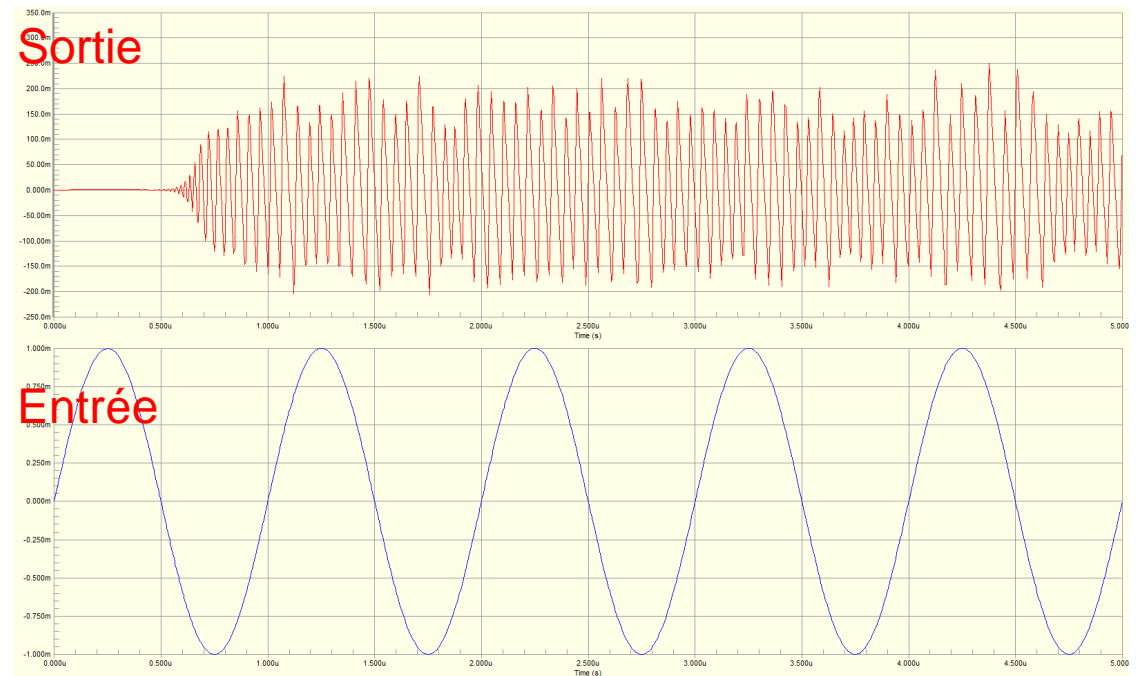
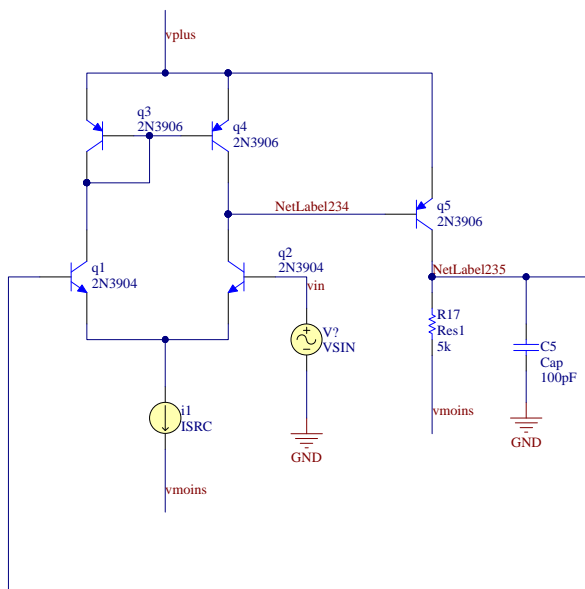
- C'est un buffer: sortie = entrée (gain=1)
- Faisons ça avec notre ampli:



Dessignons ça dans Altium
et simulons le...

Amplificateurs à 2 étages

- Résultat de simulation
 - Circuit simplifié pour les besoins

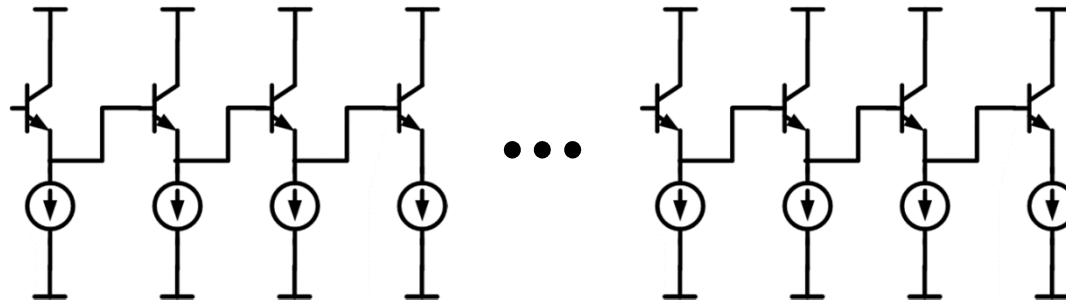


Amplificateurs à 2 étages

- Qu'est-ce qui vient d'arriver?
 - Je ne sais pas!
 - Il va falloir examiner le phénomène en détail...
- Pour comprendre le phénomène, on procède de 2 manières:
 - Une analyse intuitive
 - Une analyse mathématique

Amplificateurs à 2 étages

- Premier aspect: le temps
- Imaginez des milliers de collecteurs communs:



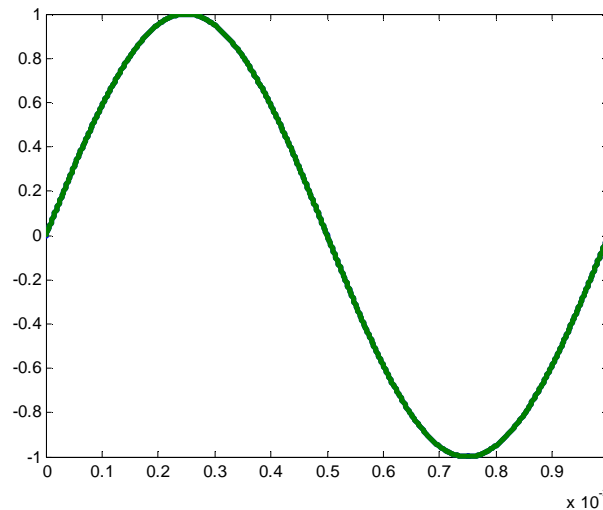
- Avec un signal à l'entrée, ça prend Δt avant de sortir...
 - Il y a delai (déphasage) entre l'entrée et la sortie

Amplificateurs à 2 étages

- Pourquoi? On a des C qui doivent être chargés et déchargés...
 - Imaginons par exemple que ce délai est $\Delta t = 1\mu s$
- Donc, si j'entre V_A , il se retrouvera à la sortie après $1\mu s$
- Allons voir ce que ça représente...

Amplificateurs à 2 étages

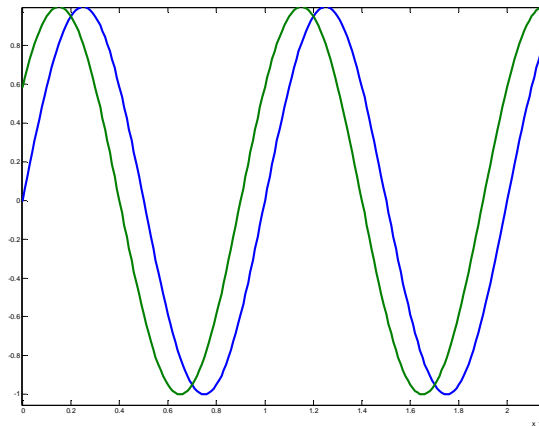
- Mettons 1KHz à l'entrée du système
 - Après $1\mu\text{s}$, le signal se retrouve à la sortie
- Dans cette figure il y a 2 signaux:



La différence entrée/sortie ne se voit pas à l'oeil nu...

Amplificateurs à 2 étages

- Mettons un signal de 100KHz à l'entrée
 - Le signal se retrouvera à la sortie $1\mu\text{s}$ après...

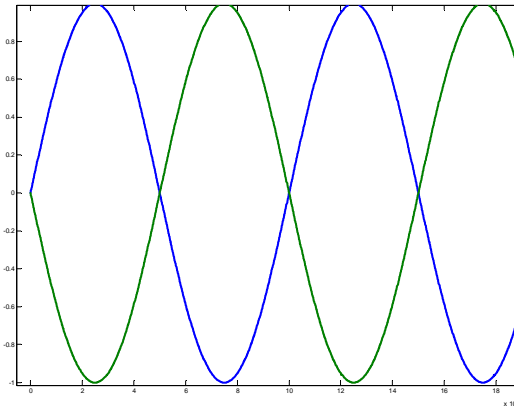


- On commence à voir un décalage:
 - Ce décalage s'exprime en secondes ou en radians

C'est soit un « délai » ou un « déphasage »

Amplificateurs à 2 étages

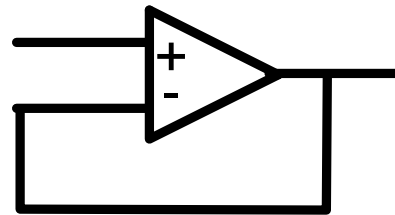
- Si on augmentait encore la vitesse à l'entrée (500KHz), on aurait ceci:



- L'entrée et la sortie sont déphasées de 180 degrés
 - On peut aussi dire que $V_{OUT} = -V_{IN}$

Amplificateurs à 2 étages

- Prenons le cas de l'amplificateur différentiel
- Imaginez qu'on décide de le connecter en buffer...

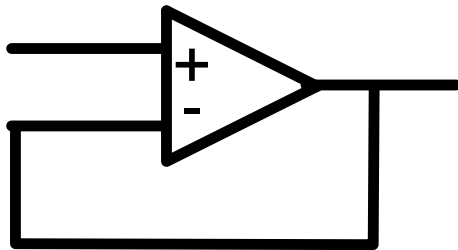


Avec cette connexion, on s'attendrait à ce que $V_{OUT} = V_{IN}$

Amplificateurs à 2 étages

- Quand l'entrée est LENTE:

- Déphasage faible entre v_- et v_+



$$v_{out} = A(v_+ - v_-)$$

$$v_{out} = A(v_+ - v_{out})$$

$$v_{out} = Av_+ - Av_{out}$$

$$\frac{v_{out}}{v_+} = \frac{A}{(1+A)} \cong 1$$

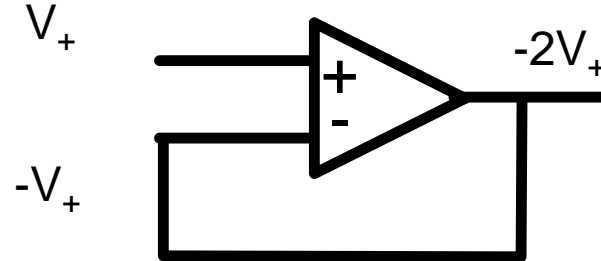
- Le feedback négatif stabilise
 - Le gain est de 1

Amplificateurs à 2 étages

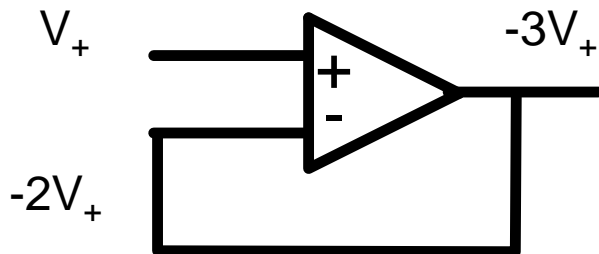
- Quand l'entrée est 500KHz, on a un gros déphasage: $V_- = -V_+$

$$v_{out} = A(v_+ - v_-)$$

$$v_{out} = A(v_+ + v_+)$$



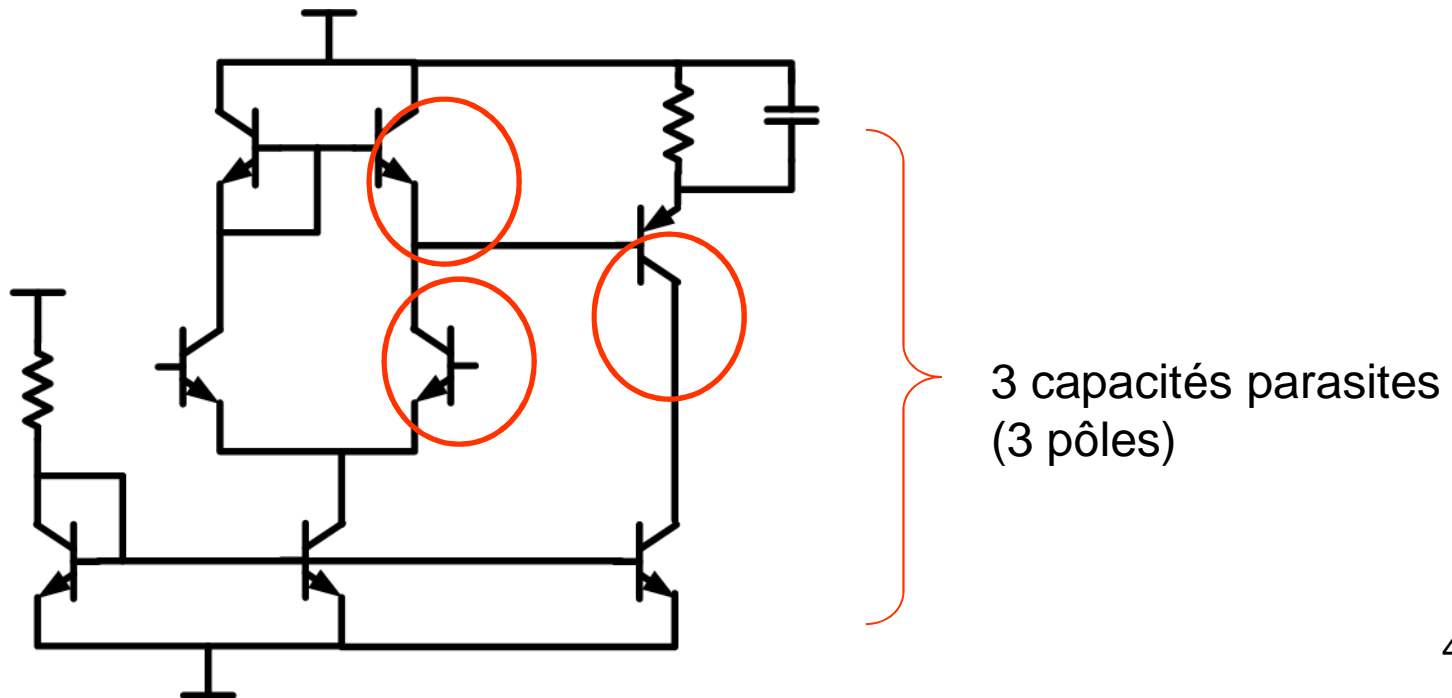
- À la place de se soustraire, v_+ et v_- s'additionnent.



Le système est INSTABLE

Amplificateurs à 2 étages

- Voyons ça mathématiquement.
- On reprend le diagramme de l'amplificateur:



Amplificateurs à 2 étages

- Le $T(s)$ d'un amplificateur peut être représenté comme ceci:

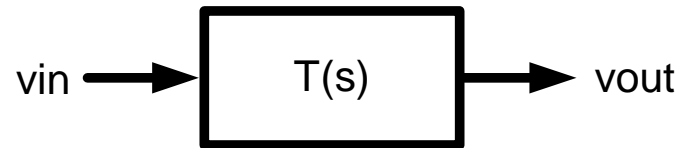
$$T(s) = \frac{GainDC}{\left(\frac{s}{\omega_1} + 1\right)\left(\frac{s}{\omega_2} + 1\right)\left(\frac{s}{\omega_3} + 1\right)}$$

- On pourrait le ré-écrire sous une forme plus familière:

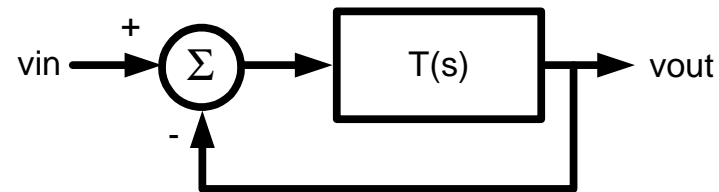
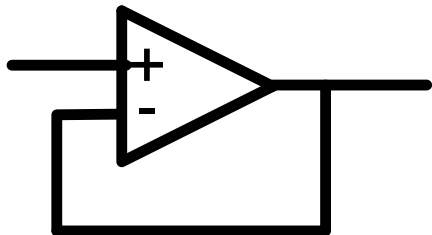
$$T(s) = \frac{\omega_1 \omega_2 \omega_3 GainDC}{(s + \omega_1)(s + \omega_2)(s + \omega_3)}$$

Amplificateurs à 2 étages

- Un amplificateur peut être dessiné comme

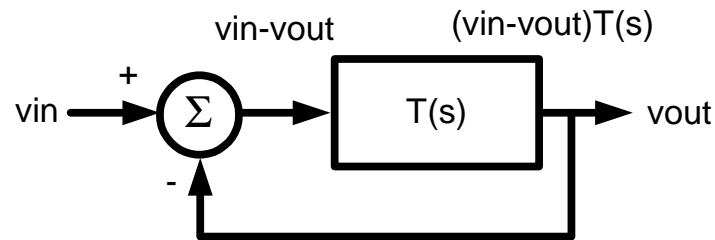


- Un amplificateur avec feedback négatif, c'est comme



Amplificateurs à 2 étages

- Rappel (systèmes asservis):
 - En feedback négatif, la fonction de transfert change



$$(vin - vout)T(s) = vout$$

- On manipule un peu et ça donne:

$$\frac{vout}{vin} = \frac{T(s)}{1 + T(s)}$$

Amplificateurs à 2 étages

- En substituant $T(s)$, on obtient:

$$\frac{T(s)}{1+T(s)} = \frac{\frac{\omega_1 \omega_2 \omega_3 \text{GainDC}}{(s + \omega_1)(s + \omega_2)(s + \omega_3)}}{1 + \frac{\omega_1 \omega_2 \omega_3 \text{GainDC}}{(s + \omega_1)(s + \omega_2)(s + \omega_3)}}$$

- Avec un peu d'algèbre:

$$\frac{\omega_1 \omega_2 \omega_3 \text{GainDC}}{(s + \omega_1)(s + \omega_2)(s + \omega_3) + \omega_1 \omega_2 \omega_3 \text{GainDC}}$$

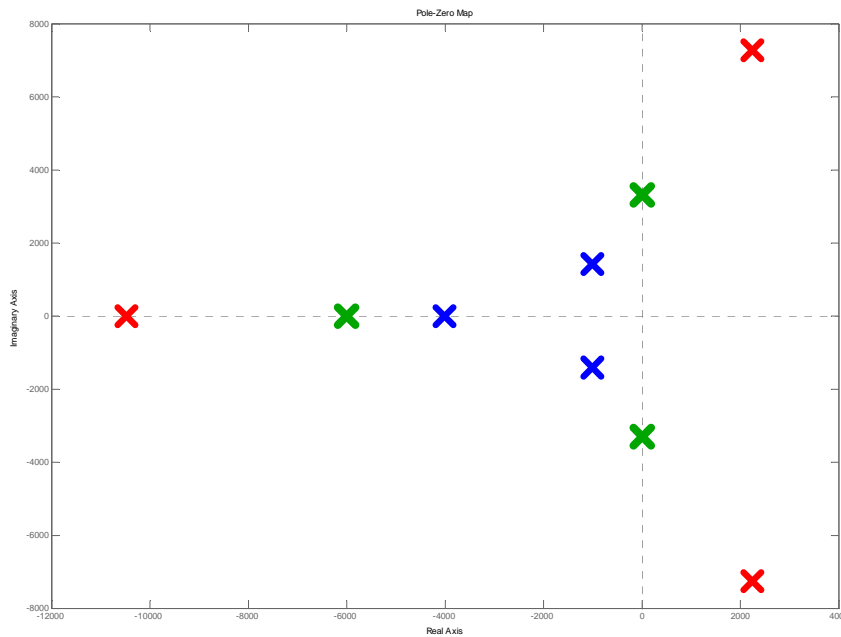
Amplificateurs à 2 étages

- En regardant le résultat, on remarque:

$$\frac{\omega_1 \omega_2 \omega_3 \text{GainDC}}{(s + \omega_1)(s + \omega_2)(s + \omega_3) + \omega_1 \omega_2 \omega_3 \text{GainDC}}$$

- 1) Les poles ne sont plus a ω_1 , ω_2 et ω_3
 - 2) Leur position dépend du gain DC
- Essayons quelques valeurs de gain et voyons où les pôles se trouvent...

Amplificateurs à 2 étages



Bleu: gain faible

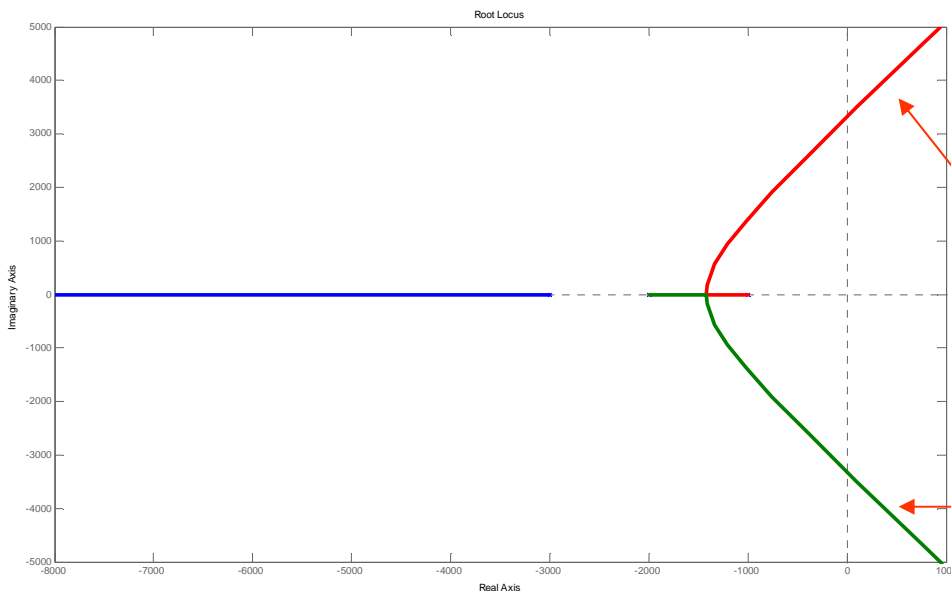
Vert: gain medium

Rouge: gain élevé

- On voit qu'avec un gain élevé (rouge), les pôles se trouvent à droite (instable)
 - Rappel: La position des pôles détermine la stabilité

Amplificateurs à 2 étages

- Pour simplifier le travail, on utilise le lieu des racines (Root Locus)
 - Ça montre le changement de position des poles avec un changement de gain:



Chaque couleur
represente
un des 3 pôles

Instable

Amplificateurs à 2 étages

- On peut aussi comprendre d'une autre façon...
- L'instabilité est dû à quoi?
 - 1) Le délai entre l'entrée et la sortie qui donne un déphasage de 180 degrés ($V_{OUT} = - V_{IN}$)
 - 2) L'amplificateur qui me donne un GAIN à cette fréquence pour donner un effet qui grossit
- Par exemple, si le gain était 0 à cette fréquence, le système serait stable

Il ne ferait pas grand chose, par contre...

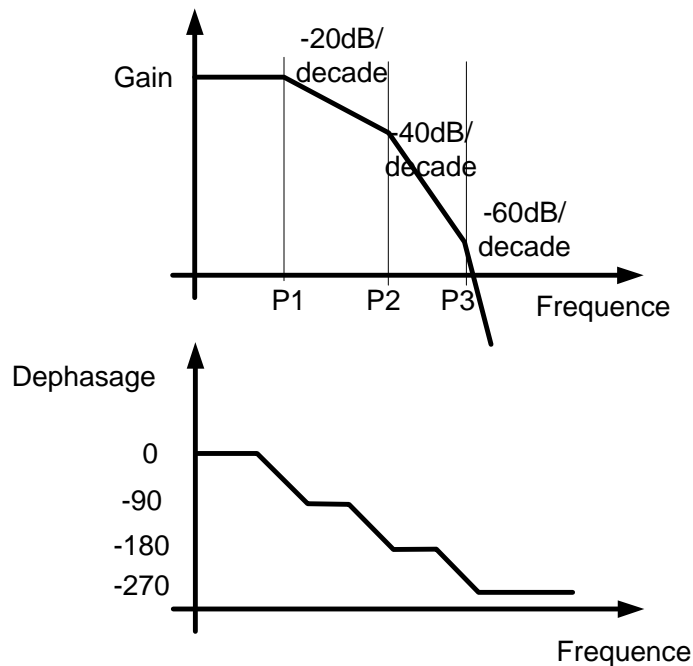
Amplificateurs à 2 étages

- Comment vérifier ça?
- On sait comment:
 - Voir le gain en fonction de la fréquence
 - Voir le déphasage en fonction de la fréquence
- Diagramme de Bode
 - Si gain est “faible” lorsque le déphasage est 180, on serait stable
 - Gain faible veut dire moins de 1 dans ce cas...

Amplificateurs à 2 étages

- Rappel:

- Un pôle baisse de -20dB/décade “pour toujours”
- Un pôle déphase de -45dB/décade de $P/10$ jusqu’à $10 \cdot P$



Il y a un moment où déphasage=180

Si le gain < 1 à ce point, ça va être stable

Sinon, ce sera instable quand connecté en feedback négatif

Amplificateurs à 2 étages

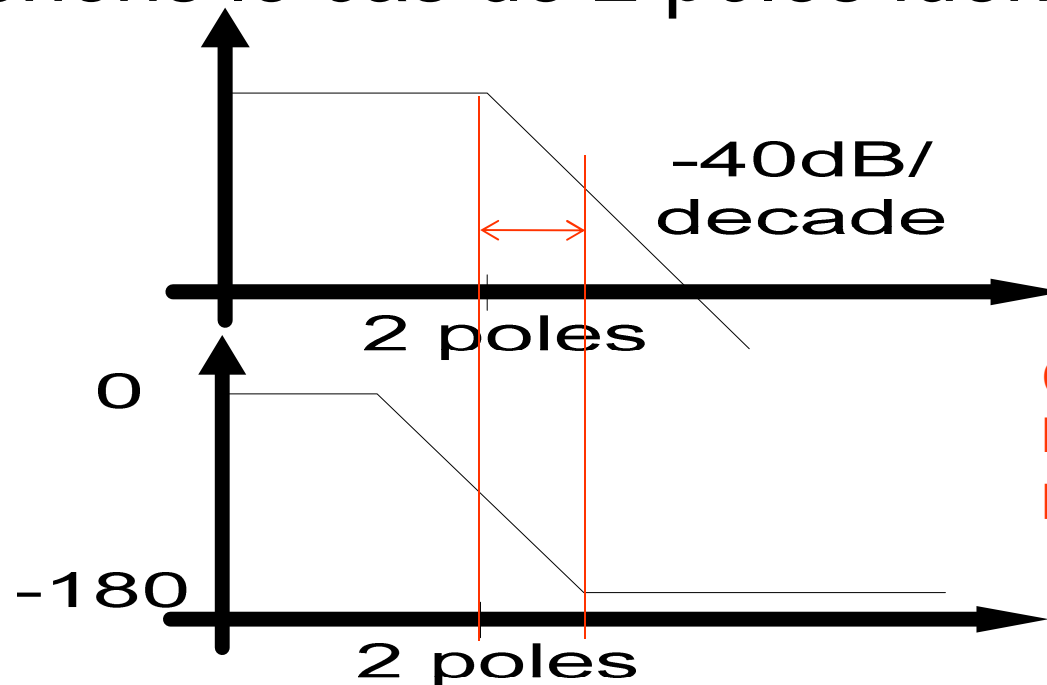
- La stabilité dépend de:
 - Position des pôles (en boucle ouverte)
 - Gain DC
 - Fréquence de déphasage 180
- Le gain DC et les pôles déterminent le gain quand déphasage 180
 - Si gain=1 ou plus, le système est instable
 - Sinon, le système est stable (parce qu'il arrête d'amplifier)

Amplificateurs à 2 étages

- Comment faire pour stabiliser le système?
 - Baisser le gain DC
 - Ajuster le circuit
- La première solution est triviale
 - Ça va même contre le principe de faire des amplificateurs...
- On va se concentrer sur la 2^e solution

Amplificateurs à 2 étages

- Qu'est-ce qui fait qu'un système est instable?
 - C'est quand les pôles sont rapprochés...
- Prenons le cas de 2 pôles identiques



Ça ne lui donne pas beaucoup de « temps » pour chuter de gain

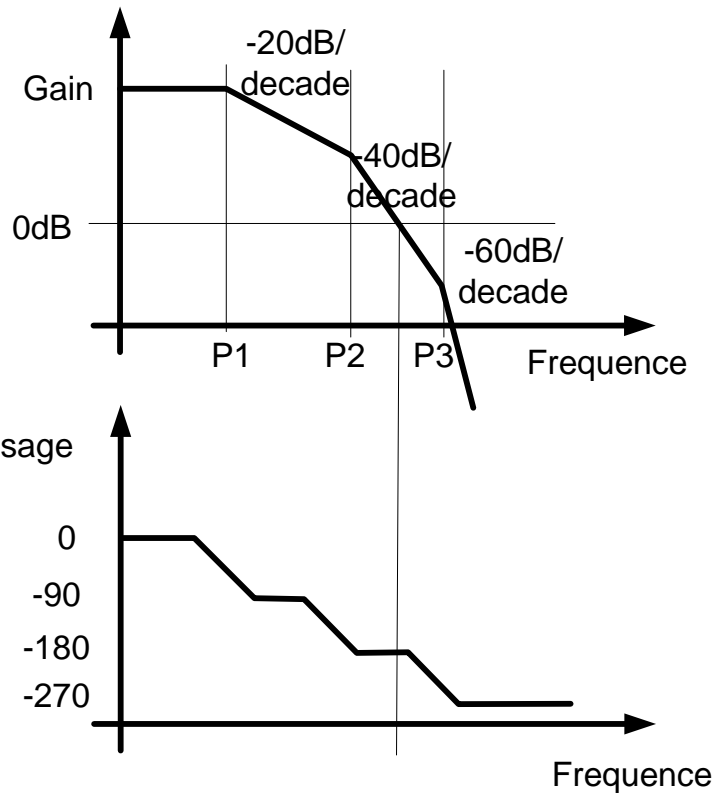
Amplificateurs à 2 étages

- Le déphasage commence à 1 décade avant le pôle et finit 1 décade après
- La chute de gain commence AU pôle et ne finit jamais...
 - Ça donne seulement 1 décade de chute de gain
 - Durant la décade, le gain doit chuter à moins de 1
- Si les pôles sont proches, ça ne laisse pas « assez de fréquences » ...

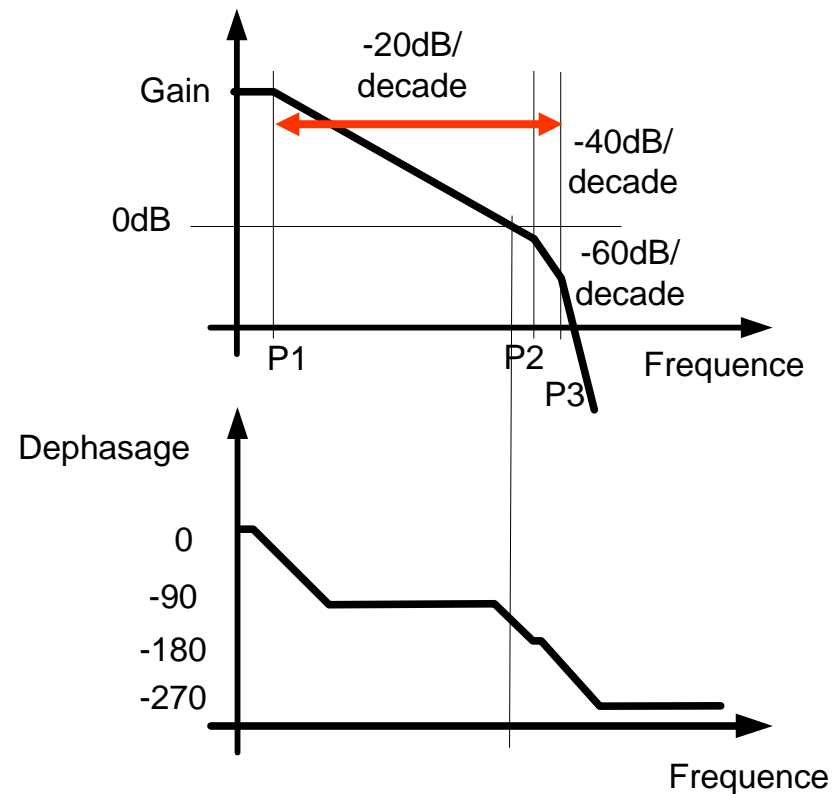
Pourquoi c'est mieux quand ils sont loins?

Amplificateurs à 2 étages

Plus de « fréquences » pour faire chuter le gain



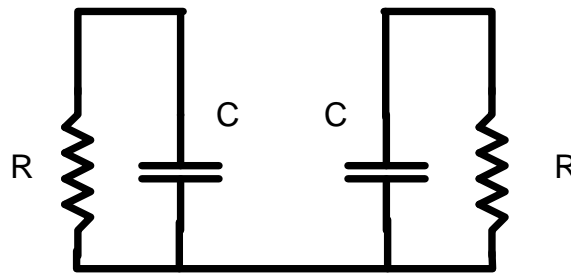
Pôles rapprochés



Pôles éloignés

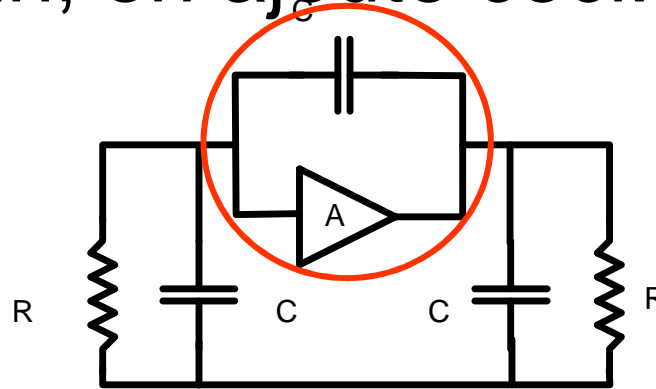
Amplificateurs à 2 étages

- On va utiliser la technique par séparation de pôles (“pole splitting”)
- Imaginez qu’on a ce circuit:
 - Les 2 pôles se trouvent à CR (séparation = 0)
 - On aimerait maintenant les séparer...

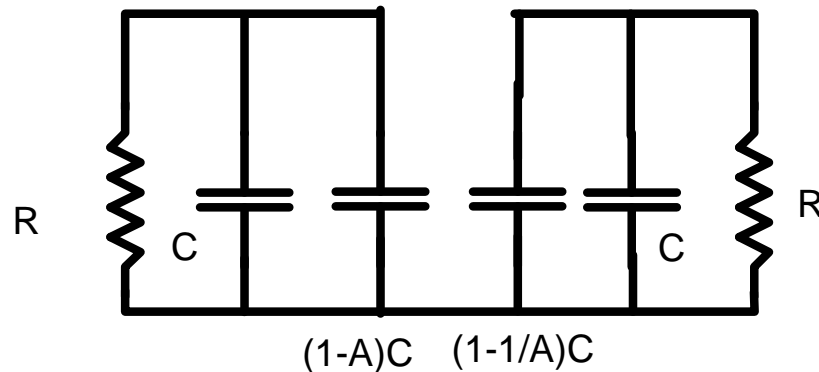


Amplificateurs à 2 étages

- Pour le fun, on ajoute ceci:

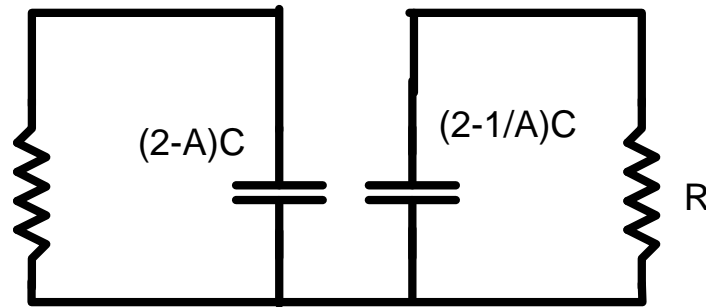


- Avec le théorème de Miller, ça devient:



Amplificateurs à 2 étages

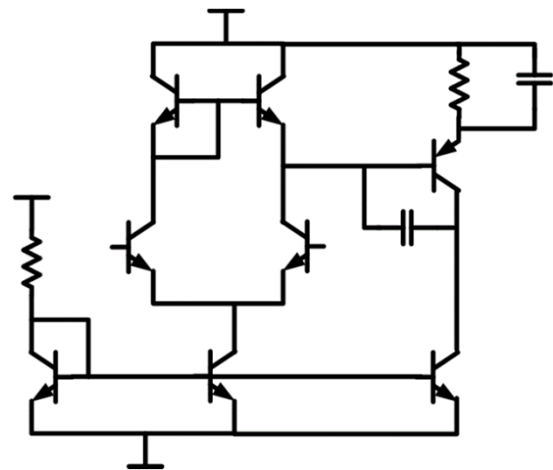
- On combine les condensateurs en parallèle:



- Avec un gain $A=-100$:
 - Un pôle est à $102RC$
 - L'autre pôle est à $2.01RC$
- On vient de séparer les pôles...

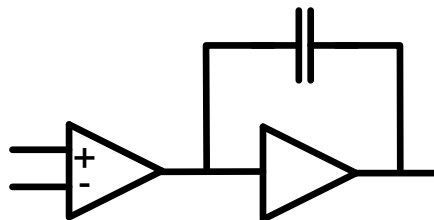
Amplificateurs à 2 étages

- Alors, si on voulait séparer les poles, on pourrait introduire une capacité de Miller

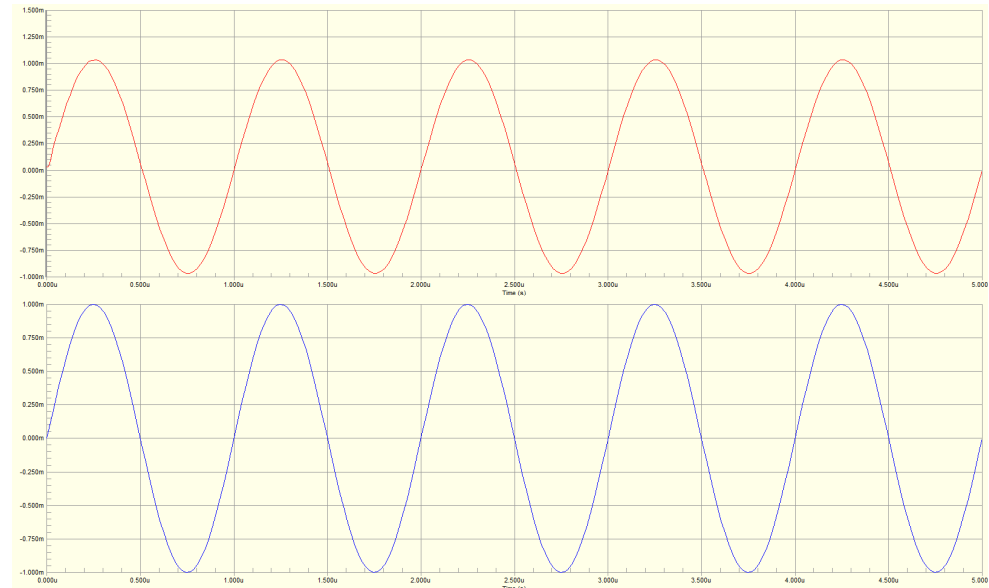
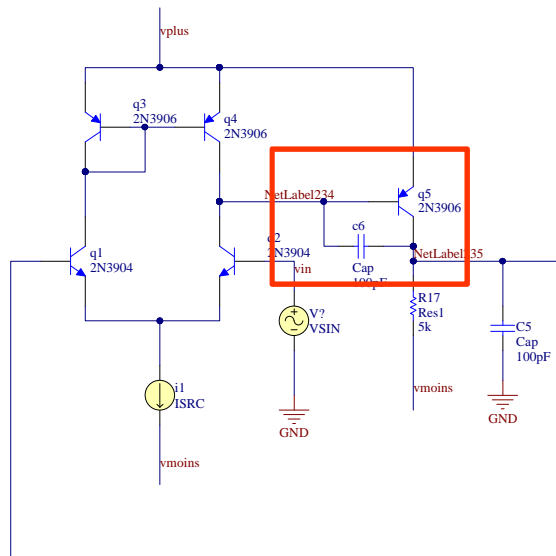


On l'introduit entre l'entrée et la sortie de l'émetteur commun

- C'est l'équivalent de ce circuit:



Amplificateurs à 2 étages



Exemple

- $T(s)$ est la fonction de transfert BOUCLE OUVERTE d'un amplificateur

$$T(s) = \frac{100 \times 10^9}{(s + 10)(s + 100000)(s + 1000)}$$

- Si je le connectais en boucle fermée, serait-il instable? Justifiez.

Exemple

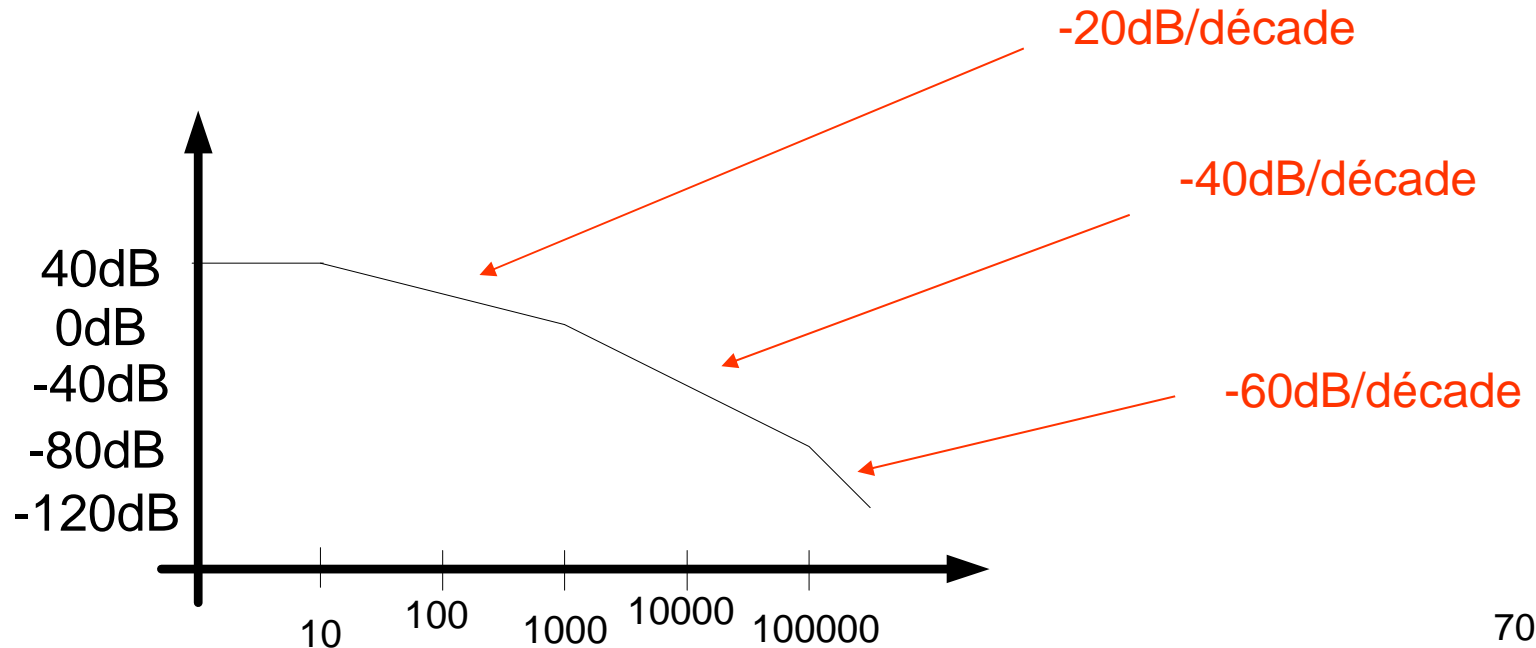
- Le problème est principalement le Diagramme de Bode

$$T(s) = \frac{100 \times 10^9}{(s+10)(s+100000)(s+1000)}$$

- On identifie le gain DC: on met $s=0j$
- Ça donne un gain DC de 100
- En dB, ça donne 40dB

Exemple

- On identifie les pôles (10, 1000 et 100000)
- Pour le gain, c'est facile: chaque pôle donne un $-20\text{dB}/\text{décade}$ de plus

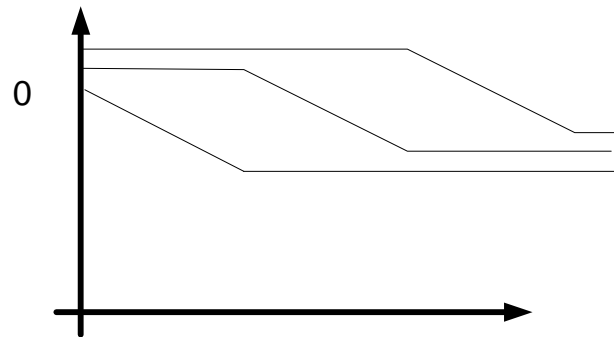


Exemple

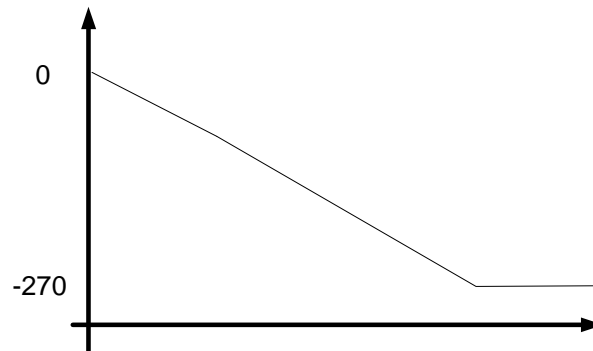
- Pour tracer le déphasage, on identifie $\omega/10$, ω et $10^*\omega$.
 - Un déphasage de -45 degrés/décade commence à $\omega/10$
 - Il finit à $10^*\omega$
- Donc, chaque pôle contribue un déphasage max de 90 degrés.

Exemple

- On trace les 3 graphiques les uns à côté des autres:

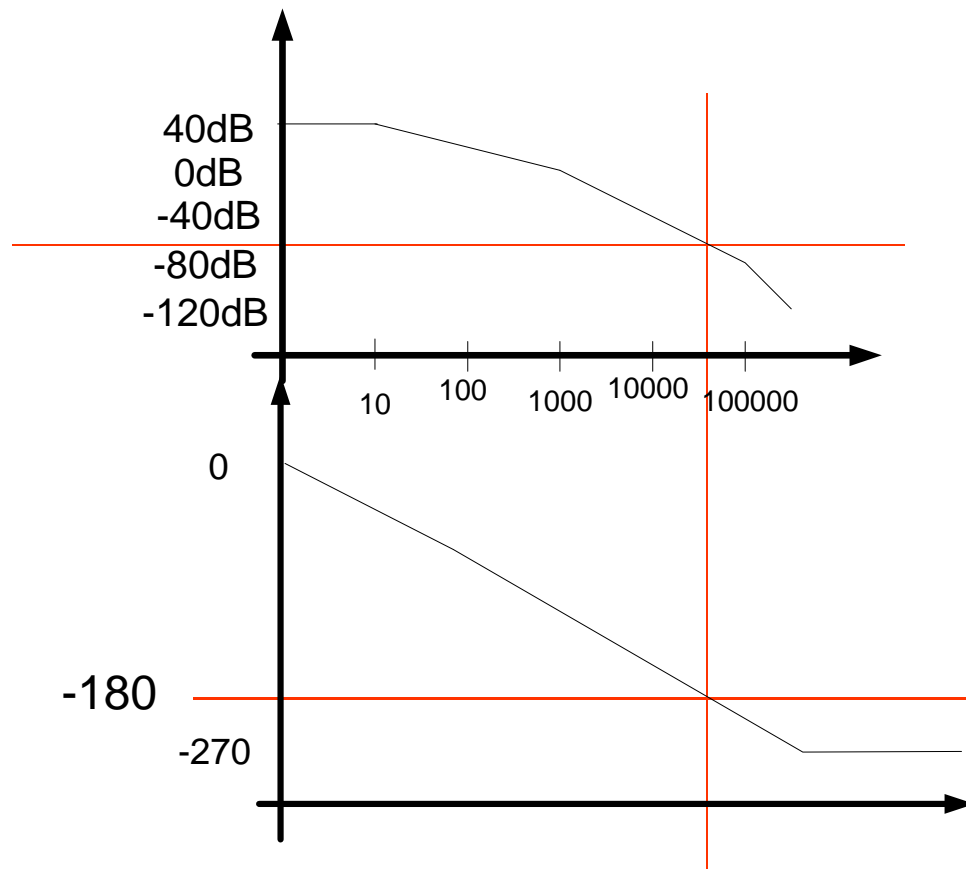


- On additionne la contribution de chaque:



Exemple

- On traçant les courbes sur la même échelle, on peut comparer:



Gain < 0dB a 180
Donc, stable